

# **VERGLEICHENDE STUDIE ZUM NATÜRLICHEN LUFTWECHSEL IN INNENRÄUMEN**

VOR UND NACH EINER THERMISCHEN SANIERUNG

Master-Thesis zur Erlangung des akademischen Grades  
Master of Science - Building Science  
eingereicht am Department für Bauen und Umwelt  
der Donau-Universität Krems

Ing. Bernhard Kram

Hainfeld am, 28. Mai 2009



Department für Bauen und Umwelt

# Abstract

**Titel:** Vergleichende Studie zum natürlichen Luftwechsel in Innenräumen vor und nach einer thermischen Sanierung

Name Autor:

**Ing. Bernhard Kram**

Name AutorIn:

**Inhalt:**

Aufgrund steigender Energiekosten und Förderprogrammen zur Senkung des Energiebedarfs, die indirekt zum Erreichen der Kyotoziele beitragen sollen, werden vor allem Wohngebäude vermehrt thermisch saniert. Die Auswirkungen durch die, heute dem Stand der Technik entsprechende, dichte Bauweise, werden in den seltensten Fällen berücksichtigt. Die damit verbundenen Auswirkungen für den Nutzer in Hinblick auf Frischluftzufuhr und Veränderung der Schadstoffsituation wird wenig Aufmerksamkeit gewidmet.

**Hypothese:**

Im Neubaubereich gibt es bereits gut dokumentierte Daten über luftdichte Bauweise und der Auswirkung auf das Innenraumklima, so ist über die Auswirkung von thermischen Sanierungen in Wohngebäuden, bei denen ebenfalls mit einer Verbesserung der luftdichten Hülle zu rechnen ist, wenig bekannt.

**Methode und Belege:**

Die Bestimmung der natürlichen Luftwechselzahl erfolgte mittels Tracergastechnik in einem ausgewählten Raum, unter definierten Bedingungen, vor und nach einem Fenstertausch. Des Weiteren wurden die Umgebungsparameter, der Über- bzw. Unterdruck zwischen Innen und Außen sowie die Konzentrationen von Formaldehyd und VOC über je einen Zeitraum von 10 Tagen ermittelt.

**These:**

Die erhöhte Dichtigkeit der Gebäudehülle durch einen Fenstertausch trägt zu einer Reduktion des Energieverbrauches bei, allerdings können sich durch die hohe Dichtigkeit auch mögliche negative Einflüsse auf das Innenraumklima einstellen.

**Schlagwortkatalog:** Fenstertausch, Formaldehyd, Luftdichtigkeit von Gebäuden, Luftwechselzahl, natürlicher Luftwechsel, thermische Gebäudesanierung, VOC

**Betreuer:** Dipl. Ing. Peter Tappler

**Weitergabe gesperrt:**



Department of Building and Environment

# Abstract

**Title:** The effects of thermal refurbishment on the natural air change inside a building: A comparative study

Name Author:

**Ing. Bernhard Kram**

Name Author:

**Content:**

Due to the increase in energy costs and grant programmes that aim at reducing the energy demand in buildings - in order to indirectly contribute to achieve the aims of the Kyoto protocol – more and more residential homes are thermally refurbished. It is state of the art that the building envelope should be as airtight as possible. However, the effects of an airtight building envelope are very rarely considered. In other words, the effects on the resident with regard to air change and the alteration of the contaminants situation is hardly paid attention to.

**Hypothesis:**

For new buildings there is well documented data concerning the consequences of an airtight construction on the quality of the indoor climate. However, there is little known about the consequences of thermal refurbishment of residential homes that also lead to a more airtight building envelope.

**Method and evidence:**

The natural air change rate was determined using the tracer gas technique in a certain room under defined conditions before and after the exchange of windows. Climatic parameters (e.g. temperature, humidity, wind speed) as well as the difference in air pressure were measured inside and outside of the building. Furthermore, the concentration of formaldehyde and VOC were determined. All measurements were taken over a period of 10 days.

**Thesis:**

A more airtight building envelope caused by the exchange of windows contributes to a reduction in energy consumption. However, a more airtight building envelope can also influence the indoor climate in a negative way.

**Subject catalogue:** airtightness of buildings, air change rate, exchange of windows, formaldehyde, natural air change, thermal refurbishment, VOC

**Supervisor:** Dipl. Ing. Peter Tappler

**Transmission prohibited:**

## Erklärung

Ich versichere hiermit wahrheitsgemäß, dass diese Master-Thesis bis auf die, den Betreuern bereits bekannten Hilfen selbständig angefertigt, alle Hilfsmittel vollständig und genau angegeben und alles kenntlich gemacht zu haben, was aus der Arbeit anderer unverändert oder mit Änderungen entnommen wurde.

Hainfeld, 28.05.2009

## Danksagung

Mein aufrichtiger Dank gilt Herrn Dipl. Ing. Peter TAPPLER für die herzliche Aufnahme im Ingenieurbüro IBO Innenraumanalytik OG, für die Überlassung des Master Thesis-Themas und der Zurverfügungstellung der benötigten Messgeräte. Besonders möchte ich Ihm dafür danken, dass er mich stets gefördert und unterstützt hat sowie das Entstehen dieser Arbeit mit großem Interesse verfolgt und fachlich gefördert hat.

Danken möchte ich auch dem Team des Ingenieurbüro IBO Innenraumanalytik OG – Dipl. Ing. Bernhard DAMBERGER, Dipl. Ing. Marie JANSSON und Dipl. Ing. Felix TWRDIK – die mich herzlich aufgenommen haben und durch Ihre fachliche Kompetenz zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Dank gebührt auch Frau Gudrun BEILSCHMIDT (WTG-NÖ) und Herrn Roland KUSS (Wöhler) für die kostenlose Zurverfügungstellung von Messgeräten.

Weiters möchte ich meiner Schwester Petra KRAM dafür danken, dass Sie so nett und verständnisvoll war, während der beiden Messreihen Ihr Zimmer nicht zu nutzen.

Danken möchte ich auch den beiden guten Geistern am Department für Bauen und Umwelt an der Donauuniversität Krems – Annemarie KLAUS und Martina PLACHT – die mir immer helfend zur Seite standen und für eine reibungslose Absolvierung des Studiums sorgten.

All meinen Freunden möchte ich dafür danken, dass Sie mir während meiner Studienzeit mit mentalem Beistand zur Seite standen.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie, die stets für mich da ist und mit großer Begeisterung mein Studium verfolgt hat.

Meiner Freundin Mag. Claudia BLAHA danke ich dafür, dass Sie mich stets, trotz des zeitaufwändigen Studiums, liebevoll und verständnisvoll unterstützt hat und durch Ihr Engagement und Ihre Engelsgeduld zur Verbesserung dieser Arbeit beigetragen hat.

Ein besonderer Dank gebührt meinen Eltern, die mir durch eine freie Zeiteinteilung und großzügigen Sonderurlaub im elterlichen Betrieb, mein Studium ermöglicht haben und stets mit großem Interesse meine Arbeit verfolgt haben. Außerdem möchte ich mich herzlich dafür bedanken, dass Sie den untersuchten Raum in Ihrem Wohnhaus zur Verfügung gestellt haben.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>KURZFASSUNG</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>5</b>
2.1	Einleitung	5
2.2	Zielsetzung	7
2.3	Messstrategie	8
2.4	Natürlicher Luftwechsel	8
2.5	Formaldehyd	10
2.6	Flüchtige organische Verbindungen (VOC)	12
2.7	Kohlenstoffdioxid	14
<b>3</b>	<b>METHODISCHE VORGANGSWEISE UND ANALYTIK</b>	<b>18</b>
3.1	Untersuchter Raum	18
3.1.1	Raumbeschreibung	18
3.1.2	Fensteröffnung vor der Sanierung	19
3.1.3	Fensteröffnung nach der Sanierung	20
3.1.4	Zusammenfassung Messraum	21
3.2	Untersuchung des Luftwechsels	22
3.2.1	Messsystem	22
3.2.2	Tracergas	23
3.2.3	Messablauf	23
3.2.4	Ermittlung der Luftwechselzahl	24
3.3	Messung des Innenraumklimas	25
3.3.1	Temperatur	25
3.3.2	Luftfeuchtigkeit	25
3.3.3	Differenzdruck	25
3.3.4	Luftdruck	26
3.4	Messung des Außenklimas	26
3.4.1	Temperatur	26
3.4.2	Luftfeuchtigkeit	27
3.4.3	Windrichtung und Windgeschwindigkeit	27
3.5	Messung Formaldehyd	27
3.5.1	Ermittlung der korrigierten Formaldehyd-Werte nach Andersen	28
3.6	Kontrollierte Emission von flüchtigen organischen Verbindungen	30
3.7	Untersuchung der Luftdurchlässigkeit der Raumhülle	32
3.7.1	Messablauf	32
3.8	Überblick Versuchsaufbau	33
<b>4</b>	<b>MESSERGEBNISSE</b>	<b>34</b>
4.1	Ergebnis der Untersuchung des Luftwechsels und der Randparameter	34
4.1.1	Allgemeines zur graphische Darstellung der Messergebnisse	36
4.1.2	Zeitliche Variation des Luftwechsels	36
4.1.3	Häufigkeitsverteilung	38

---

4.1.4	Abklingkurve Tracergas.....	38
4.1.5	Abhängigkeit des Luftwechsel von Umgebungsparametern .....	40
4.1.6	Ergebnis Windgeschwindigkeit und Windrichtung.....	47
4.1.7	Zusammenfassung der Ergebnisse der Luftwechseluntersuchung.....	48
4.2	Ergebnis der Untersuchungen der Formaldehydkonzentration .....	48
4.2.1	Ergebnisse der Einzelmessungen .....	48
4.2.2	Abhängigkeit der Formaldehydkonzentration vom Luftwechsel .....	50
4.2.3	Abhängigkeit der Formaldehydkonzentration von der Innenraumtemperatur ..	53
4.2.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Formaldehydmessung.....	55
4.3	Ergebnis der Untersuchung der VOC-Konzentration.....	55
4.3.1	Abhängigkeit der VOC-Konzentration vom Luftwechsel.....	56
4.3.2	Grafische Darstellung der einzelnen VOC-Verbindungen .....	58
4.3.3	Abhängigkeit VOC-Konzentration von Innenraumtemperatur und Luftdruck ...	61
4.3.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der VOC-Messung .....	64
4.4	Ergebnis der Untersuchung der Luftdurchlässigkeit der Raumhülle.....	64
<b>5</b>	<b>BEURTEILUNG DER MESSERGEBNISSE.....</b>	<b>65</b>
5.1	Erkenntnisse zur Luftdurchlässigkeit des Raumes .....	65
5.1.1	Auswirkungen auf den untersuchten Raum.....	65
5.1.2	Auswirkungen der erhöhten Dichtigkeit der Raumhülle auf den Differenzdruck .....	67
5.2	Auswirkungen der Messergebnisse auf das Innenraumklima .....	68
5.2.1	CO <sub>2</sub> – Konzentration im Innenraum.....	68
5.2.2	Schadstoffbelastung im Innenraum .....	72
5.3	Auswirkungen der Messergebnisse auf den Energieverbrauch .....	76
5.3.1	Lüftungswärmeverluste .....	76
5.4	Auswirkung der Messergebnisse auf raumluftabhängige Feuerstätten.....	78
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND FOLGERUNGEN .....</b>	<b>81</b>
<b>7</b>	<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>84</b>
<b>8</b>	<b>QUELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>86</b>
<b>9</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>89</b>
<b>10</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>91</b>
<b>11</b>	<b>FORMELVERZEICHNIS.....</b>	<b>92</b>

# 1 KURZFASSUNG

Hohe Energiepreise und lukrative Förderprogramme der Bundes- und Landesregierungen lassen zurzeit die Anzahl der thermischen Sanierungen von Wohngebäuden stark steigen. Durch den Einbau von neuen Fenstern erhöht sich die Dichtheit der Gebäudehülle schlagartig. Die Auswirkungen dieser einschneidenden Maßnahme wurden bis jetzt nur in sehr geringen Umfang beleuchtet. Aufgrund der geringen Anzahl bisher publizierter Ergebnisse erschien es umso wichtiger, weitere Erfahrungen auf diesem Gebiet zu sammeln.

Es bestand die Möglichkeit, ein Einfamilienhaus über je einen Zeitraum von 10 Tagen vor und nach der thermischen Sanierung, insbesondere den Tausch des Fensters, messtechnisch zu begleiten. Dabei wurden vor und nach dem Fenstertausch eines ausgewählten Wohnraumes die Luftdurchlässigkeit der Raumhülle, der natürlich induzierte Luftwechsel, die Druckdifferenz zwischen Messraum und Außen sowie Messraum und Gang, die Klimadaten Innen und Außen und Schadstoffkonzentrationen von Formaldehyd und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) erfasst.

Das Ziel der Arbeit bestand darin, die Einflussfaktoren der Umgebungsbedingungen auf die Luftwechselzahl zu beziehen. Zusätzlich wurde untersucht ob es Zusammenhänge zwischen den Konzentrationen des Raumlufthaltstoffes Formaldehyd und der versuchsweise emittierten VOC-Verbindungen mit dem Luftwechsel gibt. Aufgrund der durch die thermische Sanierung reduzierten Luftwechselzahl wurde überprüft, inwieweit die verbesserte Dichtheit einer Raumhülle Auswirkungen auf den Energieaufwand für die Raumheizung, die Luftschadstoffbelastung und die zugeführten Frischluftvolumina hat.

Der natürliche induzierte Luftwechsel in einem Gebäude, der auch als freier Luftwechsel bezeichnet wird, beschreibt den Luftaustausch in einem Gebäude durch Öffnungen in der Gebäudehülle, ohne Berücksichtigung von Fenster- bzw. Türlüftung. Der natürliche Luftwechsel entsteht dadurch, dass Luft durch Undichtigkeiten in der Außenhülle in das Gebäudeinnere eindringen kann.

Die Untersuchung der Luftwechselzahl wurde vor und nach dem Fenstertausch gemäß der VDI-Richtlinie VDI 4300 Blatt 7 durchgeführt. Dabei wurde am Beginn einer Messung die Raumlufthalt mit einem inerten Tracergas (Schwefelhexafluorid, SF<sub>6</sub>) vermischt. Die Konzentration wurde mittels eines Detektors mit dem Funktionsprinzip einer photoakustischen Infrarotspektroskopie mit selektivem Filter [Brüel & Kjaer Single Gas Monitor] über einen Zeitraum von mehreren Stunden gemessen und aufgezeichnet. Aus der Abklingkurve der Tracergaskonzentration konnte nach

VDI 4300 Blatt 7 – „Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen“ der gleitende Stundenmittelwert der Luftwechselzahl bestimmt werden.

Um mögliche Zusammenhänge zwischen dem Luftwechsel und der Konzentration von Raumluftschadstoffen beurteilen zu können, wurde die Konzentration des Innenraumschadstoffs Formaldehyd in mehreren Einzelmessungen bestimmt. Die Sammlung und Auswertung der Formaldehydkonzentration erfolgte nach der Acetylaceton-Methode (VDI 3484). Zusätzlich zur Bestimmung der Formaldehydkonzentration wurden VOC-Verbindungen (n-Butylacetat, Tetrachlorethen, 1,2,4-Trimethylbenzol, 3-Ethyltoluol und n-Nonan) versuchsweise im untersuchten Raum emittiert und die Konzentration in der Innenraumluft ermittelt. Die Sammlung der VOC-Konzentration erfolgte mit Hilfe eines Adsorptionsröhrchens auf Aktivkohlebasis, die analytisch, chemische Untersuchung wurde nach ÖNORM M 5700-2 mit Hilfe einer Kapillargaschromatographie mit gekoppeltem Massenspektrometer durchgeführt.

Zur Quantifizierung der Luftdurchlässigkeit der Raumhülle wurde vor und nach dem Tausch der Fenster eine stationäre Differenzdruckmessung nach ÖNORM EN 13829 angewandt, dabei wurde die Luftwechselrate pro Stunde bei einem Differenzdruck von 50 Pa ( $n_{50}$ -Wert) ermittelt.

Die stationäre Differenzdruckmessung, vor Beginn des zweiten Messzykluses zeigte eine deutliche Verbesserung der Dichtigkeit der Raumhülle durch den Fenstertausch. Der  $n_{50}$ -Wert reduzierte sich um etwa 50 Prozent, liegt allerdings mit einem Wert von  $n_{50} = 8,6 \text{ h}^{-1}$  noch immer sehr hoch.

Die Messung nach der Konzentrations-Abklingmethode zeigte eine Reduzierung der mittleren Luftwechselzahl von  $0,35 \text{ h}^{-1}$  auf  $0,15 \text{ h}^{-1}$ , dies bedeutet eine Verbesserung um 57 Prozent.

Die Verbesserung der Dichtigkeit des untersuchten Innenraums zeigt sich auch deutlich in der Gegenüberstellung der beiden Häufigkeitsverteilungen der Luftwechselzahlen aus den beiden unterschiedlichen Versuchsreihen. Bei der zweiten Messreihe ist eine deutlich geringere Varianz der Luftwechselzahl zu erkennen, dies erschien auch deshalb interessant, da während der zweiten Messreihe am Beginn starke Windgeschwindigkeiten vorherrschten.

Bei den beiden Versuchsabläufen konnte eine hohe Variation des Luftwechsels festgestellt werden. So lag das Verhältnis des höchsten gemessenen Wertes zum niedrigsten bei der ersten Messreihe bei 14,1 bzw. bei der Zweiten bei 8,3. Die Differenz der Luftwechselzahl zwischen dem höchsten und dem niedrigsten gemessenen Wert liegt vor dem Fenstertausch bei  $1,05 \text{ h}^{-1}$  bzw.  $0,29 \text{ h}^{-1}$  nach dem Fenstertausch. Dabei zeigt sich deutlich, dass sich die Bandbreite der Luftwechselzahlen nach dem Fenstertausch um 60 Prozent reduziert hat.

Bei den Gegenüberstellungen der Luftwechselzahlen mit den Umgebungsparametern konnten bei der Messung vor dem Fenstertausch keine einfachen Zusammenhänge erkannt werden, nur bei der zweiten Messreihe konnten teilweise mögliche Tendenzen festgestellt werden. Dabei wurde beobachtet, dass mit steigender Druckdifferenz die Luftwechselzahl, in einem geringen Umfang, tendenziell steigt. Außerdem zeigte sich ein möglicher leichter tendenzieller Anstieg der Luftwechselzahl bei steigender Innenraumtemperatur.

Die Schwankungsbreite der Formaldehydkonzentrationen während eines Messzykluses, befand sich in einem Band von 0,03 ppm zwischen dem niedrigsten und dem höchsten gemessenen Wert. Eine Korrelation zwischen dem Luftwechsel und den unkorrigierten Messwerten ist weder vor noch nach dem Fenstertausch erkennbar. Allerdings konnte beobachtet werden, dass sich durch den Fenstertausch und der damit verbesserten Dichtigkeit der Raumhülle, ein Anstieg der mittleren Formaldehydkonzentration um rund 30 Prozent einstellt.

Ein tendenzieller Zusammenhang zwischen dem Luftwechsel und der gemessenen Gesamtkonzentration flüchtiger organischer Verbindungen konnte nur bei der zweiten Messreihe festgestellt. Es ergab sich eine breite Varianz der gemessenen VOC-Konzentration mit einer hohen Standardabweichung. Bei der Messung vor dem Fenstertausch lag das Verhältnis von der niedrigsten zur höchsten VOC-Konzentration bei 1,6 und bei der Messung nach dem Fenstertausch sogar bei 5,4. Somit bestehen offenbar neben dem Luftwechsel, der eventuell einen Einfluss haben könnte, weitere Einflussgrößen, die eine derart hohe Varianz der Schadstoffkonzentration bewirkte. Weiters wurde festgestellt, dass sich das Verhältnis der Konzentrationen der einzelnen VOC-Verbindungen zueinander, ausgenommen Tetrachlorethen, nahezu immer gleich verhalten hat.

Neben den Einfluss auf die Erhöhung der Konzentration der Innenraumschadstoffe bewirkt die dichte Raumhülle, dass bei der Benutzung durch den Menschen ausgeatmetes Kohlenstoffdioxid, so fern nicht ständig gelüftet wird, in geringerer Konzentration abgeführt wird.

Die breite Variation der Messergebnisse, vor allem bei der Ermittlung der VOC-Konzentrationen, zeigt, dass eine Einzelmessung in einem realen Raum nur bedingt repräsentative Aussage über die Konzentration eines Luftschadstoffes geben kann.

Der spezifische Wärmeverlust eines Gebäudes ergibt sich aus den Transmissionswärmeverlusten über die Außenbauteile und dem Lüftungswärmeverlust. Der spezifische Wärmeverlust durch Lüftung setzt sich aus dem hygienisch notwendigen Luftaustausch und über Infiltration durch Undichtigkeiten zusammen. Der durch die

verbesserte Dichte der Außenhülle reduzierte Luftwechsel trägt demnach entscheidend zur Energieeinsparung in einem Gebäude bei. Für den untersuchten Raum ergibt sich eine Reduzierung der Lüftungswärmeverluste nach dem Fenstertausch von 56 Prozent.

Weiters zeigte sich, dass durch die dichtere Raumphülle der Betrieb von raumluftabhängigen Feuerstätten problematisch werden kann, wenn benötigte Verbrennungsluft nicht ausreichend zugeführt wird. Eine unvollständige Verbrennung mit erhöhten Schadstoffemissionen ist die Folge, zusätzlich ist ein gesicherter Abtransport der Verbrennungsgase nicht möglich, durch austretendes Abgas kann Gefahr für Menschen entstehen.

Durch die gewonnenen Daten zeigt sich, dass sich durch den Tausch der Fenster und einer dichten Gebäudehülle tatsächlich Energie sparen lässt. Allerdings wurde auch festgestellt, dass die dichte Gebäudehülle mögliche negative Einflüsse auf das Innenraumklima und somit auf den Menschen haben kann.

## 2 EINLEITUNG

### 2.1 Einleitung

„Das Einatmen von verdorbener Luft geschieht am häufigsten im Winter, wo die Wohnzimmer geheizt und Türen und Fenster möglichst luftfest verschlossen werden, damit ja kein Atom Wärme verloren gehen kann <sup>1</sup>.“

Bereits Ende des 19. Jahrhunderts befasste sich der deutsche Naturheilkundler Friedrich Eduard Bilz mit dem Thema Luftwechsel und Wärmeschutz.

Ein Gedanke der heute nicht aktueller sein könnte, hohe Energiepreise und lukrative Förderangebote (die indirekt zum Erreichen der Kyotoziele beitragen sollen) der Bundes- und Landesregierungen wecken in vielen Hausbesitzern den Energiespardedanken. Als Konsequenz folgt eine thermische Modernisierung der Gebäudehülle, die den Energieverbrauch deutlich reduzieren soll. Dieser massive Eingriff in die Gebäudehülle kann allerdings neben dem positiven Aspekt der Energieeinsparung auch negative Auswirkungen auf die Qualität der Raumluft und somit auf das Wohlbefinden des Gebäudenutzers mit sich bringen (Hutter et al. 2005).

Mit dem Aspekt des natürlichen Luftwechsels beschäftigt sich unter anderem die nachfolgende Studie. Bisher gab es nur wenige Untersuchungen, die sich mit der zeitlichen Variation des natürlichen Luftwechsels in Gebäuden befassten. So gibt es z.B. eine Pilotstudie von Thumulla und Weber (2004) die sich allerdings mit einem sehr speziellen Objekt, ein im 16. Jahrhundert erbautes Bibliotheksgebäude in Weimar beschäftigt. In Österreich befasste sich Tappler et al. (2006) mit dem zeitlich variierenden Luftwechsel von Innenräumen bei 3 verschiedenen Gebäudetypen und der sich einstellenden Formaldehydkonzentration in Räumen.

Aufgrund der geringen Anzahl bisher publizierter Ergebnisse, erscheint es umso wichtiger, weitere Erfahrungen auf diesem Gebiet zu sammeln.

Durchschnittlich kann man davon ausgehen, dass sich die Bevölkerung Mitteleuropas zwischen 80 und 90 % ihrer Lebenszeit in geschlossenen Räumen aufhält. Dabei hält sich ein Mensch rund 12 bis 14 Stunden pro Tag in der eigenen Wohnung auf <sup>2</sup>. Die Qualität der Raumluft der Wohnung ist somit entscheidend für die Gesundheit und das Wohlempfinden der Bewohner.

---

<sup>1</sup> Bilz

<sup>2</sup> Deutsches Bundesministerium für Gesundheit, 2005, S. 63

Der Luftwechsel ist einer jener Faktoren, der einen maßgeblichen Einfluss auf die Raumluftqualität hat. Der Luftwechsel sorgt für eine ausreichende Frischluftversorgung von Außen. Zusätzlich sorgt der Luftwechsel für den Abtransport von überschüssiger Luftfeuchtigkeit, die durch die Transpiration des Menschen, Pflanzen, Kochen, Wäschetrocknen und Ähnlichem an den Innenraum abgegeben wird. Des Weiteren werden Geruchsstoffe und Schadstoffe aus dem Raum abtransportiert. Bei Bestandsgebäuden, die eine sehr undichte Gebäudehülle aufweisen, erfolgt ein Großteil des hygienisch erforderlichen Luftwechsels über Fugen und Ritzen, ohne Zutun des Nutzers. Dieser permanente Luftaustausch erhöht zwangsläufig den Energiebedarf für die Beheizung des Raumes, da die stetig nachgeführte kalte Außenluft nachgeheizt werden muss. Andererseits werden durch den hohen Luftwechsel allfällige Schadstoffe, die z.B. aus Möbelstücken oder Lösungsmitteln in die Raumluft emittiert werden, laufend verdünnt und aus dem Raum abgeführt und zwar auch dann, wenn sich niemand im Raum aufhält und für eine ausreichende Lüftung sorgt. Dadurch kann während der Heizperiode sichergestellt werden, dass auch bei kalten Außenlufttemperaturen, bei denen eine Fensterlüftung nicht oder nur selten angewandt wird, der notwendige Luftwechsel gewährleistet ist. Der Gebäudenutzer muss also nicht selbst, durch sein Lüftverhalten, den hygienischen Luftwechsel steuern. Untersuchungen zeigen allerdings auch, dass die Luftwechselzahl zeitlich sehr unterschiedlich verläuft, was auch bei undichten Gebäuden bewirkt, dass das zugeführte Frischluftvolumen zu gering sein kann (Tappler et al. 2006).

Welche Auswirkung hat aber nun eine thermisch verbesserte, dichte Raumhülle auf den Bewohner? Muss ein Nutzer sein Lüftungsverhalten nach einem Fenstertausch ändern und wenn ja, wer ist dazu verpflichtet ihn darüber zu informieren?

Um diese Fragen beantworten zu können, knüpft die gegenständliche Untersuchung an die Vorgangsweise der Pilotstudie von Tappler et al. (2006) an. Es bestand die Möglichkeit, ein Einfamilienhaus über je einen Zeitraum von 10 Tagen vor und nach der thermischen Sanierung, die insbesondere den Tausch des Fensters beinhaltete, messtechnisch zu begleiten.

Dabei wurden vor und nach dem Fenstertausch des Wohnraumes folgende Parameter erfasst:

- Luftdurchlässigkeit der Raumhülle (Differenzdruck-Messverfahren  $n_{50}$ )
- Natürlicher induzierter Luftwechsel (gleitende mittlere Luftwechselzahl)
- Druckdifferenz zwischen Messraum und Außen sowie Messraum und Gang
- Klimadaten Innen und Außen
- Schadstoffkonzentrationsmessungen von Formaldehyd und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC)

Es konnten bei den beiden Versuchsreihen rund 4.400 Datensätze erhoben und ausgewertet werden.

## 2.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, den natürlich induzierten Luftwechsel in einem Innenraum vor und nach einer thermischen Sanierung, insbesondere nach einem Fenstertausch, zu untersuchen. Die Einflussfaktoren der Umgebungsbedingungen auf die Luftwechselzahl wie Außen- und Innentemperatur, Differenzdruck zwischen Innen und Außen und Windgeschwindigkeit sollen dabei erfasst werden. Die ermittelten Werte werden in Beziehung gesetzt und so kann festgestellt werden, ob einfache Zusammenhänge zwischen den Parametern bestehen.

Zusätzlich werden Konzentrationsmessungen des Raumlufthaltstoffes Formaldehyd und flüchtiger organischer Verbindungen durchgeführt. Hierbei soll festgestellt werden, ob die Raumlufthaltkonzentrationen der Luftschadstoffe im Zusammenhang mit dem Luftwechsel stehen. Übergeordnet soll beurteilt werden, ob und inwieweit ein schwankender natürlicher Luftwechsel eine Reproduzierbarkeit von analytischen Schadstoffmessungen in realen Innenräumen beeinflusst.

Aufgrund der durch die thermische Sanierung zu erwartenden Veränderung der Luftwechselzahl soll überprüft werden, inwieweit die verbesserte Dichtheit einer Raumhülle, Auswirkungen auf den Energieaufwand für die Raumheizung, die Luftschadstoffbelastung und die zugeführten Frischluftvolumina hat.

## 2.3 Messstrategie

Zur Beurteilung des Luftwechsels wurde in einem Einfamilienhaus ein geeigneter Raum ausgewählt, der vor und nach der Sanierung untersucht werden konnte.

Der Zeitraum der beiden Messreihen wurde so gewählt, dass mit einer gewissen Bandbreite der Außenklimabedingungen (z.B. niedrige und hohe Außentemperaturen, verschiedene Windverhältnisse) gerechnet werden konnte. Die erste Messreihe umfasste den Zeitraum vom 03. April bis zum 11. April 2008. Der zweite Versuchsablauf startete am 19. November und endete am 01. Dezember 2008.

Um eine Gesundheitsgefährdung der Bewohner bzw. eine Störung des Versuchsablaufs zu unterbinden, wurde der Raum während der beiden Messreihen nur zur Betreuung des Versuchs betreten.

## 2.4 Natürlicher Luftwechsel

Der natürliche Luftwechsel in einem Gebäude, der auch als freier Luftwechsel bezeichnet wird, beschreibt den Luftaustausch in einem Gebäude durch Öffnungen in der Gebäudehülle, ohne Berücksichtigung von Fenster- bzw. Türlüftung. Der gewollte und vom Nutzer beeinflussbare Luftwechsel wird in der Regel über Fensterlüftung bzw. Lüftung über speziell ausgebildete Klappen oder Öffnungen gesichert. Im Gegensatz dazu steht der natürliche Luftwechsel über Undichtigkeiten, z. B. Fugen in der Gebäudehülle welcher, nicht steuer- und kontrollierbar ist. Um den nicht kontrollierbaren Luftwechsel so gering wie möglich zu halten, wird bei der Bauausführung auf eine hohe Dichtigkeit der Gebäudehülle geachtet. Die ÖNORM B 8110-1<sup>3</sup> gibt einen Maximalwert, für Neubauten die nicht mechanisch belüftet werden, von  $n_{50} = 3,0 \text{ h}^{-1}$  und bei mechanisch belüfteten Gebäuden einen Wert von  $n_{50} = 1,5 \text{ h}^{-1}$  bei einer stationären Druckdifferenz-Messung an.

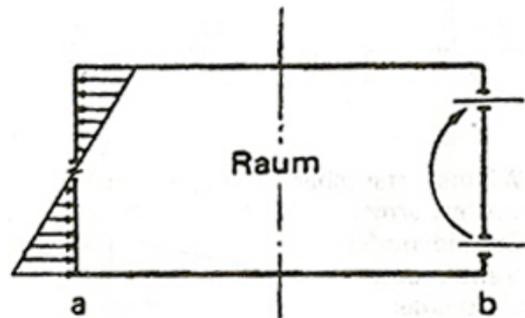
Der natürliche Luftwechsel entsteht dadurch, dass Luft durch Undichtigkeiten in der Außenhülle in das Gebäudeinnere eindringen kann. Eine Voraussetzung für den natürlichen Luftwechsel ist ein Druckunterschied zwischen Innen und Außen. Diese Druckdifferenz wird einerseits durch Wind und dadurch entstehende Luv- und Leeseiten gebildet. Die zweite treibende Kraft zur Erzeugung einer Druckdifferenz ist die Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen, die während der Heizperiode gegeben ist.

Durch die Dichteunterschiede der Luft, aufgrund der verschiedenen Temperaturen, stellt sich an der Außenwand, in der Regel, eine Druckdifferenz ein, die in *Abbildung 1 - a* dargestellt ist. So entsteht oben im Raum ein leichter Überdruck, im unteren Bereich des Raumes stellt sich hingegen ein leichter Unterdruck gegenüber der Außenluft ein. Dadurch kann sich bei

---

<sup>3</sup> ÖNORM B 8110-1: 2008 Wärmeschutz im Hochbau – Anforderungen an den Wärmeschutz und Deklaration des Wärmeschutzes von Gebäuden/Gebäudeteilen – Heizwärmebedarf und Kühlbedarf

Öffnungen in der Wand eine Luftströmung bilden wie es in *Abbildung 1 - b* skizziert ist. Generell gilt, je größer die Höhenunterschiede zwischen den Wandöffnungen sind, desto höher ist auch die Druckdifferenz <sup>4</sup>.



- a Druckverteilung über die Höhe der Wand  
b Strömung durch die Wandöffnung

Abbildung 1: Druckverteilung in einem erwärmten Raum (Quelle: Recknagel et al. <sup>5</sup>)

Die Luftwechselzahl  $n$  (*Formel 1*) ist eine theoretische Zahl, die den Zusammenhang zwischen dem einem Raum oder Gebäudeteil zugeführten bzw. ausgetauschten Luftvolumenstroms und dem Netto-Raumvolumen des betrachteten Raums an. Die Luftwechselzahl  $n$  [ $\text{h}^{-1}$ ] ist definiert als der Quotient aus dem Zuluftvolumenstrom  $\dot{V}_Z$  und dem Gesamtvolumen des Raumes  $V_R$  innerhalb einer Stunde.

$$n = \frac{\dot{V}_Z}{V_R}$$

$n$	[ $\text{h}^{-1}$ ]	Luftwechselzahl (Raumbezogener Luftvolumenstrom)
$\dot{V}_Z$	[ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	Zuluftvolumenstrom
$V_R$	[ $\text{m}^3$ ]	Raumvolumen

Formel 1: Luftwechselzahl

Eine Luftwechselzahl von  $n = 1,0 \text{ h}^{-1}$  bedeutet nicht zwangsläufig, dass das gesamte Raumluftvolumen ausgetauscht wurde, dies wäre nur mit hocheffizienter Verdrängungslüftung möglich. Die Luftwechselzahl  $n$  gibt keine Auskunft über die

<sup>4</sup> vgl. Recknagel et al., 2009, S. 926

<sup>5</sup> Recknagel et al., 2009, S. 926

Vermischung der Luft im betrachteten Raum und der damit verbundenen tatsächlichen Verweildauer der Luft im betrachteten Raum <sup>6</sup>.

*Tabelle 1* gibt einen Überblick über die abgeschätzte Luftwechselzahl von Gebäuden bei geschlossenen und geöffneten Fenstern.

Gebäudezustand	Luftwechsel n [h <sup>-1</sup> ]
Dichte Häuser ( $n_{50} \leq 3,0 \text{ h}^{-1}$ )	0,1 – 0,3
Dichte Häuser ( $n_{50} > 5,0 \text{ h}^{-1}$ )	$\leq 2,0$
Regulierbare Lüftungsöffnungen	0,2 – 0,8
Fenster gekippt ohne Querlüftung	0,8 – 2,5
Fenster gekippt mit Querlüftung	2,0 – 4,0
Fenster offen ohne Querlüftung	9,0 – 15,0
Fenster offen mit Querlüftung	$> 20,0$

Tabelle 1: Luftwechsel in Abhängigkeit der Gebäudedichtheit und Fensteröffnung (Quelle: Seifert <sup>7</sup>)

## 2.5 Formaldehyd

Formaldehyd (systematischer Name: Methanal, CH<sub>2</sub>O) ist ein reaktiver, stechend riechender Stoff, der sich bei Raumtemperatur gasförmig verhält (*Tabelle 2*). Formaldehyd ist gut wasserlöslich, die wässrige Lösung bezeichnet man als Formalin.

		Formaldehyd
Dichte bei 20 °C	[g/cm <sup>3</sup> ]	0,815
Molare Masse	[g/mol]	30,03
Siedepunkt	[°C]	-20,95

Tabelle 2: Chemische und physikalisch Eigenschaften von Formaldehyd <sup>8</sup>

Hauptverursacher von Formaldehydbelastungen in Innenräumen sind Spanplatten oder andere Holzwerkstoffe die mit Harnstoff-Formaldehydverbindungen verleimt sind. Die Abgabe von Formaldehyd von Holzwerkstoffplatten an die Umgebungsluft nimmt in der Regel rasch ab und bleibt dann nahezu konstant. Sie kann aber auch abhängig von der Qualität der Spanplatte mehrere Jahre auf einem erhöhten Niveau bleiben. Bei der

<sup>6</sup> vgl. Gerder, 2006, S. 18f

<sup>7</sup> Seifert et al., 2003, S. 4

<sup>8</sup> BMLFUW (2009) Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) - Formaldehyd, S. 5

Verwendung qualitativ minderwertiger Spanplatten kann die Abgasung nach Jahrzehnten noch hoch sein.

Neben Spanplatten als kontinuierliche Quellen von Formaldehyd gelten auch offene Gasflammen, Desinfektionsmittel und vor allem Zigarettenrauch als Verursacher von Formaldehydbelastungen in geschlossenen Räumen.

Das leicht flüchtige Formaldehyd wird vom Menschen bereits in sehr geringen Konzentrationen wahrgenommen. Bei sehr empfindlichen Personen können bereits bei einer Konzentration von 0,01 ppm gesundheitliche Auswirkungen festgestellt werden. Die Geruchsschwelle liegt, abhängig von der Empfindlichkeit der Person, zwischen 0,05 und 1,0 ppm. Bei einer Luftkonzentration von ca. 30 ppm hat Formaldehyd beim Menschen letale Wirkung. Die gesundheitlichen Auswirkungen von Formaldehyd erstrecken sich von Reizungen der Atemwege, Kontaktallergien, Ausschlägen, Kopfschmerzen bis hin zu einer karzinogenen Wirkung<sup>9</sup>.

Ein gesetzlicher Grenzwert für Formaldehyd in der Luft von Innenräumen ist in Österreich nicht gegeben. Für Arbeitsplätze in Österreich, bei denen Formaldehyd verwendet wird liegt die derzeit gültige maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK-Wert) für Formaldehyd bei 0,5 ppm<sup>10</sup>. Der MAK-Wert ist allerdings in der Regel nicht zur Beurteilung der Raumluftkonzentration in Innenräumen wie Büros, Schulen oder Wohnräume heranzuziehen. International existieren verschiedene Richtwerte zur Beurteilung der Raumluftkonzentration von Formaldehyd. Eine Zusammenfassung der gängigsten Werte finden sich in *Tabelle 3*, die Werte sind in ppm bzw. mg/m<sup>3</sup> angegeben, wobei angemerkt werden muss dass die Messwerte stark abhängig von der zum Zeitpunkt der Messung herrschenden Innenraumtemperatur, der Raumluftfeuchte und des Luftdruckes sind.

---

<sup>9</sup> vgl. Hutter et al., 2005, S. 7f

<sup>10</sup> Grenzwertverordnung, 2007

Formaldehyd	Raumluftkonzentration		Bemerkungen
	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	
Umweltministerium (BMLFUW) und Österreichische Akademie der Wissenschaften <sup>11</sup>	-	0,06	24-Stunden-Mittelwert
	-	0,10	Höchstwert, 30 Minuten Richtwert
Weltgesundheitsorganisation (WHO)	-	0,06	level of no concern <sup>12</sup>
	-	0,1	30 Minuten Richtwert <sup>13</sup>
Bundesgesundheitsamt Deutschland <sup>14</sup>	0,1	0,12	Richtwert auch unter ungünstigen Bedingungen einzuhalten, 2006 durch Umweltbundesamt bestätigt

Tabelle 3: Übersicht der Richtwerte für die Formaldehydkonzentration

Die Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluf – Formaldehyd des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) empfiehlt die Richtwerte der WHO als Wert, für keinen oder nur geringen Anlass zur Sorge für die menschliche Gesundheit, von 0,06 mg/m<sup>3</sup> bzw. für die Kurzzeitexposition den Wert von 0,10 mg/m<sup>3</sup> heranzuziehen <sup>15</sup>.

## 2.6 Flüchtige organische Verbindungen (VOC)

In Innenräumen treten verschiedene organische Verbindungen als Luftschadstoff auf, die in Abhängigkeit ihres Siedepunktes in der Gasphase oder an Luft- bzw. Staubpartikel gebunden vorliegen.

Für die Summe der organischen Verbindungen sind verschiedene Definitionen gebräuchlich. Daher kann es bei bestimmten Stoffen von der Definition abhängen, ob eine Substanz zu den VOCs gezählt werden kann. Die VDI-Richtlinie 4300 Blatt 6 <sup>16</sup> legt dazu die Einteilung der European Collaborative Action (ECA) zugrunde. Dazu werden alle organischen Verbindungen gezählt, die in einem analytischen Fenster zwischen C6 (n-Hexan) und C16 (n-Hexadecan) detektierbar sind <sup>17</sup>. Diese Definition der VDI-Richtlinie deckt sich in etwa mit den Werten der Weltgesundheitsorganisation (WHO). In der nachfolgenden *Tabelle 4* ist die Klassifikation der Innenraumschadstoffe zusammengefasst. Die Spalte Probenahmeverfahren unterstreicht, dass die Definition nur in Kombination mit den dazu gehörigen analytischen Nachweisverfahren gesehen werden darf.

<sup>11</sup> BMLFUW (2009) Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluf, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluf am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) - Formaldehyd, S.30

<sup>12</sup> Indoor air pollutants: exposure and health effects, 1983

<sup>13</sup> Air Quality Guidelines for Europe, 2000

<sup>14</sup> Bewertungsmaßstab für Formaldehyd in der Raumluf, 1977

<sup>15</sup> BMLFUW (2009) Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluf, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluf am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) - Formaldehyd, S.30

<sup>16</sup> VDI 4300 Blatt 6, 2000, S. 3

<sup>17</sup> European Collaborative Action (ECA), 1997

Kategorie	Abkürzung	Siedebereich		Probenahmeverfahren
		von [°C]	bis [°C]	
Very volatile (gaseous) organic compounds	VVOC	< 0	50 - 100	Gasmaus oder Kanister, Adsorption PDMS
Volatile organic compounds	VOC	50 - 100	240 - 260	Adsorption an Tenax, graphitiertem Kohlenstoff oder Aktivkohle, PDMS
Semivolatile organic compounds	SVOC	240 – 260	380 - 400	Adsorption an PU-Schaum oder XAD-2
Organic compounds associated with particulate matter or particulate organic matter	POM	>380		Probenahme mit Filtern

Tabelle 4: Klassifizierung flüchtiger organischer Verbindungen nach WHO 1989<sup>18</sup>

Als Verursacher von flüchtigen organischen Verbindungen in Innenräumen sind vor allem Einrichtungsgegenstände, Kunststoffe und Lacke zu sehen. Die gängigsten Verbindungen von organischen Lösungsmitteln sind Gemische aus Toluol, Esterverbindungen, Xylenen und Alkoholen.

Die wichtigsten Vertreter der VOCs umfassen folgende Verbindungsgruppen<sup>19</sup>:

- Aromatische Kohlenwasserstoffe
- Aliphatische und Cycloaliphatische Kohlenwasserstoffe
- Alkohole
- Ketone
- Ester
- Isoprenoide
- Aldehyde
- Phthalate
- Siloxane
- Mikrobiell verursachte flüchtige organische Verbindungen (MVOC) durch z.B. Schimmelpilze

Die gesundheitlichen Auswirkungen von flüchtigen organischen Verbindungen umfassen ein breites Spektrum. Dies reicht von Geruchsbelästigung über Reizerscheinungen bis hin zu toxischen Langzeitschäden. Bereits geringe Konzentrationen können Reizungen der Schleimhäute der Augen und den Atemwegen hervorrufen und es können Beschwerden wie Kopfschmerzen, Müdigkeit und Übelkeit auftreten.

<sup>18</sup> World Health Organization (WHO), 1989

<sup>19</sup> vgl. Hutter et al., 2005, S. 11f

Grenzwerte für flüchtige organische Verbindungen in der Luft von Innenräumen sind in Österreich nicht vorhanden. In einer vom Umweltministerium und der österreichischen Akademie der Wissenschaften herausgegebenen Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft werden Richtwerte für die Innenraumluft festgelegt. Ziel dieser Richtlinie ist es, eine österreichweit einheitliche Erfassung und Bewertung der Innenraumluft zu ermöglichen. Die angegebenen Richtwerte sind als wirkungsbezogene Innenraumrichtwerte (WIR) definiert, wobei ein WIR jene Konzentration darstellt, bei deren Unterschreitung gemäß dem derzeitigen Wissensstand mit keiner schädigenden Wirkung zu rechnen ist<sup>20</sup>.

Für die gängigsten VOC-Verbindungen sind in Österreich folgende Richtwerte (*Tabelle 5*) festgelegt worden:

	<b>WIR-Konzentration</b>
Tetrachlorethen (auch PER oder TCE)	250 µg/m <sup>3</sup> <sup>21</sup>
Styrol	40 µg/m <sup>3</sup> <sup>22</sup> als 7-Tages-Mittelwert
Toluol	75 µg/m <sup>3</sup> <sup>23</sup> als Stunden-Mittelwert

Tabelle 5: WIR von VOC-Verbindungen

Bei Unterschreiten des Wertes von 10 µg/m<sup>3</sup> Styrol bei einer Kurzzeitmessung unter worst-case Bedingungen wird davon ausgegangen, dass auch der WIR unterschritten ist. Eine Langzeitmessung wäre dann nicht erforderlich.

## 2.7 Kohlenstoffdioxid

Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) ist ein reaktionsträger geruchs- und farbloser Stoff, der sich bei Raumtemperatur gasförmig verhält und schwerer als die Umgebungsluft der Atmosphäre ist. Eine Zusammenfassung der chemischen und physikalischen Eigenschaften finden sich in *Tabelle 6*.

<sup>20</sup> vgl. BMLFUW (2004) Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) – VOC-Summenparameter

<sup>21</sup> BMLFUW (2003) Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) – Tetrachlorethen, S. 25

<sup>22</sup> BMLFUW (2004) Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) – Styrol, S. 22

<sup>23</sup> BMLFUW (2006) Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) – Toluol, S. 22

		<b>Kohlenstoffdioxid</b>
Dichte bei 0 °C	[kg/m <sup>3</sup> ]	1,9769
Molare Masse	[g/mol]	44,01
Siedepunkt	[°C]	-78,95

Tabelle 6: Chemische und physikalisch Eigenschaften von Kohlenstoffdioxid <sup>24</sup>

CO<sub>2</sub> ist in einer Konzentration von rund 0,035 Volums-Prozent (Vol.-Prozent) in der Atmosphäre enthalten, wobei die Konzentration in Industriegebieten bzw. Gebieten mit einer hohen Verkehrsdichte auch Werte über 0,05 Vol.-Prozent erreichen kann <sup>25</sup>.

In der nachfolgenden Studie wird Kohlenstoffdioxid als Indikator für die ausreichende Belüftung der Innenräume betrachtet. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Innenraum ist neben dem aus dem Außenbereich eintretendem Anteil hauptsächlich auf den menschlichen Stoffwechsel zurückzuführen. CO<sub>2</sub>, als Substanz selbst, das durch den Stoffwechsel produziert wird, wird üblicherweise nicht als Schadstoff betrachtet. CO<sub>2</sub> gilt allerdings als Leitparameter für durch den Menschen verursachte Innenluftverunreinigungen, da der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration mit der Geruchsintensität menschlicher Ausdünstungen korreliert <sup>26</sup>.

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Innenraum ist stark abhängig von der Belegungsdichte, der Raumnutzung und der Belüftungssituation. Bei hoher Belegungsdichte oder bei mangelnder Belüftung kann eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von 10.000 ppm und mehr auftreten <sup>27</sup>.

Kohlenstoffdioxid in Innenräumen stellt in der Regel keine gesundheitliche Gefährdung für den Menschen dar, allerdings konnte in zahlreichen Studien belegt werden, dass bei steigender CO<sub>2</sub>-Konzentration (> 1.000 ppm) Auswirkungen auf das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit von Menschen beobachtet werden kann. Ab Konzentrationen von ca. 100.000 ppm treten Schwindel und Bewusstlosigkeit auf, steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration weiter

<sup>24</sup> BMLFUW (2006) Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) – Physikalische Faktoren Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter, S. 5

<sup>25</sup> vgl. Recknagel et al., 2009, S.104

<sup>26</sup> BMLFUW (2006) Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) – Physikalische Faktoren Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter, S. 6

<sup>27</sup> vgl. BMLFUW (2006) Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) – Physikalische Faktoren Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter, S. 5-8

an kann es zu den typischen Gärkeller- und Silounfällen kommen, bei denen es auch zu Todesfällen kommt<sup>28</sup>.

In einer vom Umweltministerium und der österreichischen Akademie der Wissenschaften herausgegebenen Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft<sup>29</sup> werden Orientierungswerte für die Innenraumluft festgelegt, die sich an die ÖNORM EN 13779<sup>30</sup> anlehnen. Aufgrund der Tatsache, dass keine definierten Grenzen für das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit beeinträchtigende Konzentrationen vorliegen, sondern steigende Konzentrationen ab etwa 700 ppm kontinuierliche Verschlechterungen der Raumluftqualität anzeigen, werden in der österreichischen Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft Orientierungswerte vorgeschlagen.

In *Tabelle 7* sind die Klassifizierungen der Innenraumluftqualität und die Anforderungen an natürlich und mechanisch belüftete Gebäude in Hinblick auf CO<sub>2</sub> nach BMLFUW/Österreichischer Akademie der Wissenschaften bzw. ÖNORM EN 13779 angeführt.

---

<sup>28</sup> BMLFUW (2006) Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) – Physikalische Faktoren Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter, S. 20-23

<sup>29</sup> BMLFUW (2006) Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) – Physikalische Faktoren Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter

<sup>30</sup> ÖNORM EN 13779: 2008 Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme

Beurteilungswert als CO <sub>2</sub> -Konzentration (absolut)	Beschreibung der Innenraum-Luftqualität nach BMLFUW/ Österreichische Akademie der Wissenschaften	Beschreibung der Innenraum- Luftqualität nach ÖNORM EN 13779 (2008)
< etwa 800 ppm	Spezielle Raumlufqualität	Hohe Raumlufqualität (IDA 1)
etwa 800 - 1000 ppm	Hohe Raumlufqualität	Mittlere Raumlufqualität (IDA 2)
etwa 1000 - 1400 ppm	Mittlere Raumlufqualität	Mäßige Raumlufqualität (IDA 3)
etwa 1400 - 1900 ppm	Niedrige Raumlufqualität	Niedrige Raumlufqualität (IDA 4)
> etwa 1900 ppm	Sehr niedrige Raumlufqualität	

Mindest- und Zielvorgaben für dauernd von Menschen genutzte Innenräume	
natürlich belüftete Innenräume	mechanisch belüftete Innenräume
Zielbereich für die Innenraumluft < etwa 1000 ppm	Zielbereich für die Innenraumluft < etwa 800 ppm
Mindestvorgabe 1-MWg < etwa 1400 ppm	Mindestvorgabe 1-MWg < etwa 1000 ppm
Mindestvorgabe Alle Einzelwerte im Beurteilungszeitraum: < etwa 1900 ppm	Mindestvorgabe Alle Einzelwerte im Beurteilungszeitraum: < etwa 1400 ppm

1-MWg            maximaler gleitender Stundenmittelwert

Tabelle 7: Klassifizierung der Innenraumluft und Anforderungen in Hinblick auf CO<sub>2</sub>

Die Orientierungswerte nach BMLFUW/ Österreichische Akademie der Wissenschaften bzw. ÖNORM EN 13779 werden auch in den Erläuterungen der OIB-Richtlinie 3 Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz genannt <sup>31</sup>:

<sup>31</sup> Österreichisches Institut für Bautechnik, OIB-Richtlinie 3 Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz, OIB-300.3-005/07 ([http://www.oib.or.at/RL3\\_250407.pdf](http://www.oib.or.at/RL3_250407.pdf))

## 3 METHODISCHE VORGANGSWEISE UND ANALYTIK

### 3.1 Untersucher Raum

#### 3.1.1 Raumbeschreibung

Der untersuchte Innenraum liegt in einem Einfamilienhaus, das um 1900 erbaut und Ende der Siebziger Jahre des vorigen Jahrhunderts erweitert wurde. Das Einfamilienhaus (*Abbildung 2*) steht im verbauten Siedlungsgebiet der Marktgemeinde St. Veit/Gölsen (Bezirk Lilienfeld, NÖ) und ist am Grundstück freistehend.



Abbildung 2: Außenansicht des Gebäudes

Der untersuchte Raum befindet sich im Erdgeschoss des Gebäudes, ist nach Süden orientiert und wird als Kinderzimmer genutzt, das herkömmlich möbliert ist. Der Raum ist durch eine Standard-Innentür an den Gang angebunden, in deren Türrahmen sich eine einlagige Gummidichtlippe befindet. Die Wände bestehen aus verputztem Ziegel, bei der Decke gegen den Keller handelt es sich um eine Tramdecke, die mit einer Schüttung und einem Staffeboden ausgeführt ist. Nach oben wird der Raum mit einer Stahlbetondecke abgeschlossen.

Gegen Süden und Westen wird der Raum durch Außenwände abgegrenzt, wobei sich das dreiteilige Fenster in der Südwand (*Abbildung 3*) befindet.



Abbildung 3: Außenansicht Messraum

Die Innenabmessung des Raumes beträgt 4,27 x 3,07 x 3,10 m (Länge/Breite/Höhe). Daraus ergeben sich eine Grundfläche von 13,1 m<sup>2</sup> und ein Raumvolumen von 40,7 m<sup>3</sup>. Das Fenster hat eine lichte Weite von 248 cm und eine lichte Höhe von 144 cm.

### 3.1.2 Fensteröffnung vor der Sanierung

Bei dem verbauten Fenster vor dem Tausch handelte es sich um ein ca. 30 Jahre altes, dreiflügeliges, Holzfenster mit einer 2-Scheiben-Klarglasverglasung (*Abbildung 4*). Die Fensterflügel waren dichtungslos ausgeführt, für die Bedienung des außenliegenden Sonnenschutzes war eine Gelenkstange vorhanden, die nach außen nicht abgedichtet war. Die Bauanschlußfuge zwischen Mauerwerk und Stockrahmen war mit einem Mineralwollestreifen ausgefüllt. Der Stockrahmen war innen und außen ohne jegliche Abdichtung überputzt.



Abbildung 4: Fenster vor dem Tausch



Abbildung 5: Fenster nach dem Tausch

### 3.1.3 Fensteröffnung nach der Sanierung

Das im Zuge der Sanierung eingebaute Fenster (*Abbildung 5*) besteht aus einer Holz-Aluminiumkonstruktion [Josko Diamant 100] mit einer zusätzlichen Wärmedämmschicht an der Außenseite des Rahmens, 3 Dichtungsebenen und einer 3-Scheiben-Isolierverglasung (*Abbildung 6*). Bei der Montage des Fensters wurde auf eine luftdichte Montage gemäß ÖNORM B 5320<sup>32</sup> geachtet.

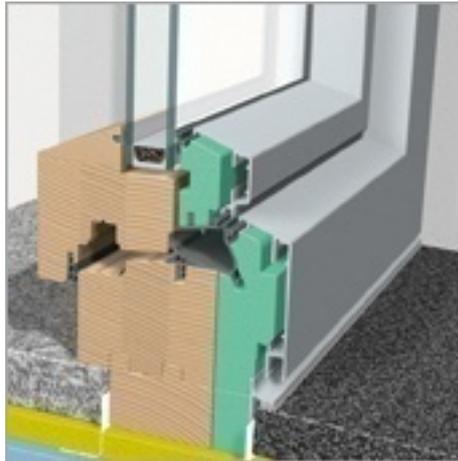


Abbildung 6: Detailansicht Josko Diamant 100 (Quelle: [www.josko.at](http://www.josko.at)<sup>33</sup>)

Bei einer ÖNORM-gerechten Montage wird der Stockrahmen auf der Außenseite schlagregendicht und dampfdiffusionsoffen an das Mauerwerk angebunden. Dies wurde mit einem Dichtungsband für den Außenbereich [Isowindow F1 Aussen, Isocell] und einem Weichzellenschaum als Kleber [AIRSTOP Sprint, Isocell] realisiert. Das Dichtungsband kann beim Anbringen des Vollwärmeschutzes überspachtelt und in das Fassadenverbundsystem mit eingebunden werden (*Abbildung 7*). Die Innenseite des Fensterstockes wird hingegen umlaufend luft- und dampfdiffusionsdicht ausgeführt, dabei wurde eine dauerelastische Abdichtung auf Polymerbasis [Uniseal, Innotec] verwendet.

Die Bauanschlussfuge zwischen Mauerwerk und Stockrahmen wurde mit einem Hartschaum [PUR65, Würth] ausgeschäumt.

<sup>32</sup> ÖNORM B 5320: 2000 Bauanschlussfuge für Fenster, Fenstertüren, Türen und Tore in Außenbauteilen

<sup>33</sup> Josko, 2009



Abbildung 7: Fensterband Außen

### 3.1.4 Zusammenfassung Messraum

In der nachfolgenden *Tabelle 8* sind alle relevanten raumbezogenen Daten vor und nach dem Austausch der Fenster angeführt.

	Vor Fenstertausch	Nach Fenstertausch
Grundfläche [m <sup>2</sup> ]	13,1	
Innenraumvolumen [m <sup>3</sup> ]	40,70	
Raumhöhe [m]	3,10	
Anzahl Fenster	1	
Anzahl Türen	1	
Errichtung des Gebäudes	Ca. 1900	
Einrichtung	Übliche Kinderzimmereinrichtung	
Orientierung des Fensters	Süden	
Lichte Weite des Fensters [m]	2,48	
Lichte Höhe des Fensters [m]	1,44	
Art der Fenster	Dreiflügeliges Holzfenster mit 2-Scheiben-Klarglas	Dreiflügeliges Holz-Alufenster mit 3-Scheiben-Isolierglas
Fugenlänge [m]	12,20	11,60
Art der Dichtung	Keine	3 Dichtungsebenen
Einbaujahr Fenster	Ca. 1970	2008

Tabelle 8: Zusammenfassung der Daten des Messraums

## 3.2 Untersuchung des Luftwechsels

### 3.2.1 Messsystem

Die Messung des Luftwechsels wurde auf der Grundlage der VDI-Richtlinie 4300 Blatt 7<sup>34</sup> „Messen von Innenraumluftverunreinigungen: Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen“, durchgeführt.

Die Norm sieht drei verschiedene Messverfahren zur Bestimmung der Luftwechselzahl  $n$  vor:

- Konzentrations-Abklingmethode
- Konstant-Injektionsmethode
- Konstant-Konzentrationsmethode

Die Konzentrations-Abklingmethode ist die am häufigsten angewandte Methode, bei welcher Luftwechselzahlen bis  $n = 10 \text{ h}^{-1}$  bestimmt werden können. Dieses Messverfahren wurde für die vorliegende Studie ausgewählt, da es sich besonders für kleine Raumvolumina bis  $500 \text{ m}^3$  und Raumhöhen bis 4 m empfiehlt.

Bei der Konzentrations-Abklingmethode wird über einen gewissen Zeitraum die Konzentrationsabnahme eines inerten Tracergases in dem untersuchten Raum gemessen. Anhand der Konzentrationsabklingkurve kann daraus die Luftwechselrate errechnet werden. Der Vorteil der Konzentrations-Abklingmethode liegt in der Möglichkeit, über einen längeren Zeitraum Messergebnisse zu ermitteln und dass sich die Infiltration über Undichtigkeiten der Raumhülle in den Messergebnissen widerspiegelt.

Die Konzentrationsmessung des Tracergases erfolgt mittels eines Detektors mit dem Funktionsprinzip einer photoakustischen Infrarotspektroskopie mit selektivem Filter. Bei der photoakustischen Infrarotspektroskopie wird durch eine Lichtquelle breitbandiges Infrarotlicht (IR-Licht) erzeugt. Auf dem Weg zur Messzelle passiert das Licht eine sich drehende Schlitzscheibe (Chopper), die das IR-Licht taktet sowie mehrere optische Filter. Durch Unterteilungen am Chopper wird das Licht in verschiedene Frequenzen aufgeteilt, die nachgeschalteten Filter lassen nur das Licht hindurch, das vom Tracergas absorbiert werden kann.

Ist Indikatorgas vorhanden, wird Licht absorbiert. Dadurch kommt es zu einer Erwärmung und Ausdehnung des Gases. Da es sich um ein geschlossenes System handelt bewirkt die Ausdehnung einen Druckanstieg, der aufgrund der Taktung zu einem akustischen Signal

---

<sup>34</sup> VDI 4300 Blatt 7: 2001 Messen von Innenraumluftverunreinigungen: Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen

### SF<sub>6</sub>-Konzentration

führt. Dieses Signal kann von einem kalibrierten Messmikrofon detektiert und in ein Ausgabesignal verwertet werden <sup>35</sup>.

#### 3.2.2 Tracergas

Als Tracergas oder auch Indikatorgas werden Gase bezeichnet, die sich mit Luft vermischen lassen und bereits in sehr geringen Konzentrationen selektiv gemessen werden können. Indikatorgase sollten ungiftig, chemisch inert, stabil, nicht brennbar, nicht oder nur in geringen Konzentrationen in der Raumluft vorhanden und gut messtechnisch erfassbar sein.

Als Tracergas wurde bei dieser Testreihe die anorganische Verbindung Schwefelhexafluorid (SF<sub>6</sub>) gewählt. Dabei handelt es sich um ein farbloses, geruchsloses und reaktionsträges Gas mit einer molaren Masse von 146,054 g/mol. Die Dichte beträgt bei Normalbedingungen 6,180 kg/m<sup>3</sup>. Durch die Reaktionsträgheit und die geringe Konzentration in der Atmosphäre eignet sich SF<sub>6</sub> hervorragend für den Einsatz als Tracergas.

#### 3.2.3 Messablauf

Die Konzentration des Tracergases (SF<sub>6</sub>) ist mit Hilfe eines Detektors [Brüel & Kjaer Single Gas Monitor, *Abbildung 8*] gemessen worden.

Das Tracergas wurde direkt aus einer Gasflasche über einen Druckminderer in den Raum geleitet. Damit sich eine möglichst homogene Vermischung von Tracergas und Raumluft einstellt, wurde ein Tischventilator im Messraum platziert und während des Versuchsablaufs betrieben.



Abbildung 8: Brüel & Kjaer Single Gas Monitor

<sup>35</sup> Vgl. Gerder, 2006, S. 37

Die Dokumentation der Messergebnisse erfolgte im 5 Minuten-Rhythmus, wobei die Probenentnahme zentral im Raum in einer Höhe von 1,50 m erfolgte.

### 3.2.4 Ermittlung der Luftwechselzahl

Nach der Beendigung der Messzyklen wurden die ermittelten Daten aus den Messgeräten ausgelesen und zur Bearbeitung in ein Tabellenkalkulationsprogramm [Microsoft Excel] übertragen. Die ersten 6 Messwerte jeder Einzelmessung eines Messzykluses wurden verworfen, dadurch konnten falsche Messergebnisse durch Schwankungen der Konzentration des Tracergases aufgrund einer noch nicht ausreichenden Durchmischung des Raumes mit Tracergas bzw. durch Inhomogenitäten infolge des Verlassens des Raumes nach dem Start einer Einzelmessung vermieden werden. Die Rohdaten wurden entsprechend formatiert, aufbereitet und dienten als Grundlage für die Berechnung des gleitenden Stundenmittelwertes der Luftwechselzahl.

Die Ermittlung der Luftwechselzahl  $n$  erfolgte nach der Tracergas-Konzentrationsabkling-Methode (*Formel 2*) gemäß VDI 4300 Blatt 7<sup>36</sup>. Sind zwei zeitlich versetzt gemessene Konzentrationen  $\sigma_{t_1}$  und  $\sigma_{t_2}$  des Tracergases bekannt, so ergibt sich die Luftwechselzahl nach folgender Gleichung:

$$n = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \ln \frac{\sigma_{t_1}}{\sigma_{t_2}}$$

$n$	[h <sup>-1</sup> ]	Luftwechselzahl
$t_{1,2}$	[h]	Zeitpunkt der Probenahme des Indikatorgases
$\sigma_{t_1}$	[cm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Volumengehalt des Indikatorgases zur Zeit $t_1$ [h] in cm <sup>3</sup> Indikatorgas / m <sup>3</sup> Indikatorgas-Luft-Gemisch
$\sigma_{t_2}$	[cm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Volumengehalt des Indikatorgases zur Zeit $t_2$ [h] in cm <sup>3</sup> Indikatorgas / m <sup>3</sup> Indikatorgas-Luft-Gemisch

Formel 2: Ermittlung der Luftwechselzahl mit 2 Messwerten

<sup>36</sup> VDI 4300 Blatt 7: 2001 Messen von Innenraumluftverunreinigungen: Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen, S. 7

### 3.3 Messung des Innenraumklimas

#### 3.3.1 Temperatur

Der Verlauf der Lufttemperatur im Innenraum wurde über den gesamten Messzeitraum mittels einer digitalen Wetterstation [WS3600, Fa. TFA] im Abstand von 5 Minuten gemessen und aufgezeichnet. Der Sensor der Wetterstation befand sich dabei in einer Höhe von 75 cm über dem Fußboden.

Eine Messgenauigkeit des Gerätes ist nicht angegeben.

#### 3.3.2 Luftfeuchtigkeit

Der Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit im Innenraum wurde über den gesamten Messzeitraum mittels einer digitalen Wetterstation [WS3600, Fa. TFA] im Abstand von 5 Minuten gemessen und aufgezeichnet. Der Sensor der Wetterstation befand sich dabei in einer Höhe von 75 cm über dem Fußboden.

Eine Messgenauigkeit des Gerätes ist nicht angegeben.

#### 3.3.3 Differenzdruck

Der Differenzdruck wurde zwischen Gang und untersuchtem Raum sowie zwischen Außenbereich und untersuchtem Raum bestimmt. Dazu dienten zwei Druckmessgeräte [DC100<sup>PRO</sup>, Fa. Wöhler], die im Abstand von einer Minute die Druckdifferenz gemessen und aufgezeichnet haben. Die Differenzdruckmessung erfolgte dabei über eine temperaturkompensierte Piezo-Brücke.

Der Messbereich liegt bei  $\pm 100$  hPa und einer Auflösung von 0,1 Pa, die Genauigkeit wird mit  $< 3\%$  vom Mittel angegeben.

Das Kapillarröhrchen zur Messung des Außendruckes wurde direkt auf der Fensterbank vor dem Fenster mit einem T-Stück, zur Dämpfung von direkten Windeinflüssen (*Abbildung 9*), angebracht. Das zweite Röhrchen zur Ermittlung des Innendruckes im Gang wurde im Bereich der Innentür auf einer Höhe von 2,20 m montiert.

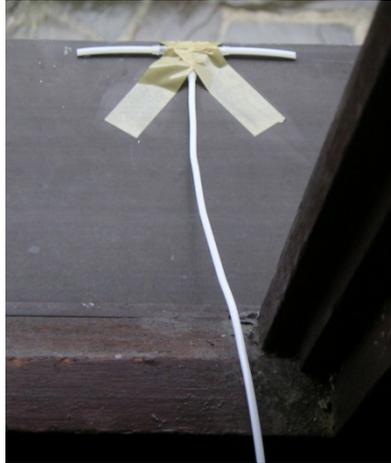


Abbildung 9: Kapillarröhrchen zur Messung des Außendruckes

Die beiden Messröhrchen zur Messung des Innendruckes wurden nebeneinander im Messraum auf einer Höhe von 2,00 m befestigt.

### 3.3.4 Luftdruck

Der Verlauf des relativen Luftdrucks wurde über den gesamten Messzeitraum mittels einer digitalen Wetterstation [WS3600, Fa. TFA] im Abstand von 5 Minuten gemessen und aufgezeichnet. Der Sensor der Wetterstation befand sich dabei in einer Höhe von 75 cm über dem Fußboden.

Eine Messgenauigkeit des Gerätes ist nicht angegeben.

## 3.4 Messung des Außenklimas

### 3.4.1 Temperatur

Der Verlauf der Lufttemperatur im Außenbereich wurde über den gesamten Messzeitraum mittels einer digitalen Wetterstation [WS3600, Fa. TFA] im Abstand von 5 Minuten gemessen und aufgezeichnet. Der Sensor der Wetterstation befand sich dabei am Balkon des Obergeschoßes, in einer Höhe von 4,30 m über dem Niveau des Fußbodens des untersuchten Raumes, wobei der Temperaturfühler so angebracht wurde, dass er von direkter Sonneneinstrahlung geschützt war.

Eine Messgenauigkeit des Gerätes ist nicht angegeben.

### 3.4.2 Luftfeuchtigkeit

Der Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit im Außenbereich wurde über den gesamten Messzeitraum mittels einer digitalen Wetterstation [WS3600, Fa. TFA] im Abstand von 5 Minuten gemessen und aufgezeichnet. Der Sensor der Wetterstation befand sich dabei am Balkon des Obergeschoßes, in einer Höhe von 4,30 m über dem Niveau des Fußbodens des untersuchten Raumes

Eine Messgenauigkeit des Gerätes ist nicht angegeben.

### 3.4.3 Windrichtung und Windgeschwindigkeit

Der Verlauf der Windgeschwindigkeit im Außenbereich wurde über den gesamten Messzeitraum mittels einer digitalen Wetterstation [WS3600, Fa. TFA] im Abstand von 5 Minuten gemessen und aufgezeichnet. Das Windrad der Wetterstation befand sich dabei am Balkon des Obergeschoßes in einer Höhe von 7,60 m über dem Niveau des Fußbodens des untersuchten Raumes.

Eine Messgenauigkeit des Gerätes ist nicht angegeben.

## 3.5 Messung Formaldehyd

Die Planung des Messablaufes und die Probennahmestrategie zur Messung der Raumlufkonzentration von Formaldehyd wurden in Anlehnung an die ÖNORM EN ISO 16000-1<sup>37</sup> und ÖNORM EN ISO 16000-2<sup>38</sup> vorbereitet und durchgeführt. Durch die vorhandene Möblierung im untersuchten Raum war eine gewisse Raumlufkonzentration an Formaldehyd durch Emission der Holzwerkstoffe zu erwarten. Damit eine signifikante Raumlufkonzentration von Formaldehyd sichergestellt ist, wurden zusätzlich zu den vorhandenen Möbeln 2 mit Textil bespannte Rohspanplatten mit einer Gesamtoberfläche von 3,53 m<sup>2</sup> (inklusive Kanten) im Raum platziert.

Die Messung des Formaldehyds erfolgte nach der Acetylaceton-Methode, die in der Norm ÖNORM EN 717-1<sup>39</sup> beschrieben ist. Formaldehyd wird dabei durch Absorption in einer wässrigen Lösung, die mit Ammoniumacetat versetzt ist, gebunden. Dazu wird ein definiertes Luftvolumen von mindestens 0,08 m<sup>3</sup>, der Raumluf durch eine Gasprobenapparatur (*Abbildung 10*), die im Raum in einer Höhe von 1,20 m über dem Fußboden positioniert war, gesaugt.

---

<sup>37</sup> ÖNORM EN ISO 16000-1: 2006 Innenraumlufverunreinigungen, Teil 1: Allgemeine Aspekte der Probenahmestrategie

<sup>38</sup> ÖNORM EN ISO 16000-2: 2006 Innenraumlufverunreinigungen, Teil 2: Probenahmestrategie für Formaldehyd - 2006 06 01

<sup>39</sup> ÖNORM EN 717-1: 2005 Holzwerkstoffe – Bestimmung der Formaldehydabgabe, Teil 1: Formaldehydabgabe nach der Prüfkammermethode



Abbildung 10: Probenahmeapparatur für Formaldehyd und VOC

Zur analytischen Bestimmung des Formaldehydgehalts wird die Formaldehyd-Ammoniumacetatlösung mit Acetylaceton (Pentan-2,4-dion) versetzt, Formaldehyd und Acetylaceton reagieren im Beisein von Ammoniumacetat. Bei dieser Reaktion bildet sich 3,5-Diacetyl-1,4-dihydrolutinidin. Die Absorption des dabei gebildeten Farbstoffes, dessen Farbintensität proportional zur Konzentration von Formaldehyd in der Probe ist, wurde mit einem Spektralphotometer [Shimadzu UV 1202] gemessen (in Anlehnung an die ÖNORM EN 120<sup>40</sup>). Die Nachweisgrenze liegt bei 0,010 ppm bzw. 0,013 mg/m<sup>3</sup> Formaldehyd, die Messunsicherheit wird mit  $\pm 20\%$  abgeschätzt.

Die Ergebnisse sind auf die bei der Messung herrschenden Temperaturen bzw. Luftdrücke bezogen und wurden auf zwei signifikante Stellen gerundet.

Die Probennahme während der Messzyklen erfolgte in mehreren Einzelmessungen bei verschiedenen Außenklimabedingungen, wobei die Probenahmezeit zwischen 45 und 60 Minuten betrug<sup>41</sup>.

### 3.5.1 Ermittlung der korrigierten Formaldehyd-Werte nach Andersen

Die Freisetzung von Formaldehyd ist stark vom Innenraumklima abhängig. Die bei der Produktion von Spanplatten gebildeten Kunstharzpolymere können sich unter Einwirkung von Luftfeuchtigkeit zurückbilden. Bei diesem Prozess wird Formaldehyd freigesetzt und an die Luft abgegeben. Steigende Temperaturen und Luftfeuchten begünstigen diesen Rückbildungsprozess. Dieser Rückbildungsvorgang kann über die gesamte

<sup>40</sup> ÖNORM EN 120: 1993 Holzwerkstoffe – Bestimmung des Formaldehydgehaltes – Extraktionsverfahren, genannt Perforatormethode

<sup>41</sup> vgl. Tappler et al., 2006, S. 10

Verwendungsdauer einer Spanplatte beobachtet werden, wobei die Anfangsemission rasch abnimmt, aber dann über einen langen Zeitraum relativ konstante bleibt.

Die physikalischen und chemischen Zusammenhänge des Emissionsvorganges von Formaldehyd aus Kunstharz können in vier Phasen zusammengefasst werden (Marutzky 1992):

1. Produktion von Formaldehyd aus Kunstharz
2. Transport durch die Matrix des Materials
3. Transport durch eventuelle Hindernisse (Barriere)
4. Diffusion in die Raumluft

Aufgrund der sehr komplexen Vorgänge bei der Formaldehydemission versuchte man, das Problem der Formaldehydabgabe von Holzwerkstoffen statistisch zu beschreiben. Ein Beispiel für diese statistische Herangehensweise ist die Andersen-Gleichung (Andersen 1974). Andersen ermittelte empirisch die Abhängigkeit von Luftwechsel, Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Die Zusammenhänge werden in der von ihm so ermittelten Formel (*Formel 3*) dargestellt. Die Gleichung ist allerdings nur für den von Andersen untersuchten Spanplattentyp gültig. Des Weiteren ist die Formel nur bei Luftwechselzahlen über  $n = 0,4 \text{ h}^{-1}$  gültig. Die Gleichung wird jedoch gerne zum Vergleich von Messwerten bei verschiedenen Raumkonditionen angewandt. Die somit ermittelten Werte sind rein informativ und stellen nur eine Basis zur Vergleichbarkeit dar.

Die umgeformte Andersen-Gleichung lautet:

$$c_B = c_M \cdot \frac{(0,143 H_B + 0,048) \cdot (0,08 T_B - 0,764) \cdot (1 + 0,304 \frac{n_B}{a_B})}{(0,143 H_M + 0,048) \cdot (0,08 T_M - 0,764) \cdot (1 + 0,304 \frac{n_M}{a_M})}$$

mit

$c_B$	= Formaldehydgehalt der Luft für Bezugswerte (insbes. gemäß GefStoffV; Lufttemperatur 23 °C, relative Luftfeuchtigkeit 45 %, mittlerer Luftwechsel 1 je Std., Raumbeladung 1 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
$c_M$	= Formaldehydgehalt der Luft unter Meßbedingungen
$H$	= absolute Luftfeuchte in g H <sub>2</sub> O/kg trockener Luft bei Bezugs- (B) bzw. Meßbedingungen (M) im Bereich 5 - 13 g H <sub>2</sub> O/kg Luft <sup>2)</sup>
$T$	= Temperatur in °C bei Bezugs- (B) bzw. Meßbedingungen (M) im Bereich 18 - 26 °C
$n$	= Luftwechsel je Stunde bei Bezugs- (B) bzw. Meßbedingungen (M) im Bereich 0,3 bis 1,5 h <sup>-1</sup>
$a$	= Beladung des Raumes mit Formaldehyd ermittelnden Flächen in m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> Rauminhalt bei Bezugs- (B) bzw. Meßbedingungen (M)

Die Beladung des Raumes unter Meßbedingungen ( $a_M$ ) ist mit 1 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> einzusetzen (gleich Beladung des Raumes unter Bezugsbedingungen ( $a_B$ )), sofern ein genauer Wert für  $a_M$  nicht ermittelbar ist.

Formel 3: Andersen-Gleichung (Quelle: Tappler et al., 2006<sup>42)</sup>)

### 3.6 Kontrollierte Emission von flüchtigen organischen Verbindungen

Um festzustellen, ob der natürliche Luftwechsel Einfluss auf die Raumlufkonzentration emittierender flüchtiger organischer Verbindungen (VOC) hat, wurde der Messraum mit künstlichen VOC-Emittenten versehen. Hierbei wurde eine Mischung aus mehreren Reinsubstanzen in Glaskolben (genaue Beschreibung siehe *Tabelle 9*), deren Öffnungen mit einer Polyethylenfolie als Membran versehen waren, im Raum aufgestellt. Bei der zweiten Messreihe wurde der emittierende Querschnitt verringert, um die Emissionen im nunmehr dichteren Raum zu reduzieren. Um eine konstante Emission zu erhalten, wurden die Probebehältnisse während der beiden Messreihen in einem Wasserbad konstant auf 26°C erwärmt.

<sup>42</sup> Tappler et al., 2006 S. 12

	Messung vor Fenstertausch	Messung nach Fenstertausch
Anzahl der Glaskolben	2	
Art des Glaskolbens	Erlenmeyerkolben	Messkolben
Volumen des Glaskolbens [ml]	150	100
Emissionsfläche [mm <sup>2</sup> ]	710	95
Verwendete Membran	Polyethylenfolie	

Tabelle 9: Zusammenfassung verwendete Glaskolben (VOC-Emission)

Es wurden folgende Verbindungen zur Emission gebracht:

- n-Butylacetat (polare Verbindung)
- Tetrachlorethen (chlorierte Verbindung)
- 1,2,4-Trimethylbenzol (aromatische Verbindung)
- 3-Ethyltoluol (aromatische Verbindung) - nur bei der ersten Messreihe eingesetzt
- n-Nonan (aliphatische Verbindung)

Die Messplanung und Probenahmestrategie folgten der ÖNORM EN ISO 16000-1<sup>43</sup> und der ÖNORM EN ISO 16000-5<sup>44</sup>. Die Sammlung der flüchtigen organischen Verbindungen erfolgte laut ÖNORM M 5700-2<sup>45</sup> durch Adsorption an ein Adsorbens, wobei ein definiertes Luftvolumen von mindestens 0,08 m<sup>3</sup> durch ein Adsorptionsröhrchen [SKC, Anasorb 747] gesaugt wurde. Die Probenahme erfolgte zentral in der Raummitte in einer Höhe von 1,50 m über dem Fußboden.

Die analytisch, chemische Untersuchung erfolgte nach ÖNORM M 5700-2. Die Aktivkohle wurde aus dem Adsorptionsröhrchen entnommen und mit Schwefelkohlenstoff (CS<sub>2</sub>) aus dem Adsorbens eluiert. Der dadurch gewonnene Schwefelkohlenstoff-Extrakt konnte direkt zur quantitativen Analyse herangezogen werden. Die einzelnen flüchtigen organischen Verbindungen wurden mittels Kapillargaschromatographie mit gekoppeltem Massenspektrometer [Shimadzu, QP5000] unter Verwendung einer Kapillarsäule [HEWLETT PACKARD, HP-VOC] gegen externe und interne Standards bestimmt. Die vom Detektor erhaltenen Signale wurden elektronisch aufgezeichnet, die Quantifizierung der organischen

<sup>43</sup> ÖNORM EN ISO 16000-1: 2006 Innenraumluftverunreinigungen, Teil 1: Allgemeine Aspekte der Probenahmestrategie

<sup>44</sup> ÖNORM EN ISO 16000-5: 2007 Innenraumluftverunreinigungen, Teil 5: Probenahmestrategie flüchtige organische Verbindungen (VOC) - 2007 06 01

<sup>45</sup> ÖNORM M 5700-2: 2002 Messen von Innenraumluft-Verunreinigungen - Gaschromatographische Bestimmung organischer Verbindungen - Teil 2: Aktive Probenahme durch Anreicherung auf Aktivkohle - Lösemittelextraktion

Verbindungen erfolgte über die Peakflächen. Die Ergebnisse sind auf die bei der Messung herrschende Temperatur bzw. den Luftdruck bezogen. Die Messunsicherheit wird mit  $\pm 20\%$  abgeschätzt.

Die Probennahme während den beiden Messzyklen erfolgte in mehreren Einzelmessungen bei verschiedenen Außenklimabedingungen, wobei die Probenahmezeit zwischen 45 und 60 Minuten betrug.

### 3.7 Untersuchung der Luftdurchlässigkeit der Raumhülle

Um die Undichtigkeiten im Messraum quantifizieren zu können wurde ein stationäres Differenzdruck-Messverfahren nach ÖNORM EN 13829<sup>46</sup> angewandt. Dieses Verfahren dient zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit eines Gebäudes oder Gebäudeteiles, zum Auffinden von Undichtigkeiten und zur Bewertung von Verbesserungsmaßnahmen in der Gebäudehülle. Der ermittelte Wert  $n_{50}$  gibt das Verhältnis von Innenraumvolumen zu gefördertem Luftvolumen an (*Formel 4*), das notwendig ist um eine konstante Druckdifferenz von 50 Pa aufrecht zu erhalten.

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V}$$

$n_{50}$	[h <sup>-1</sup> ]	Luftwechselzahl einem Differenzdruck 50 Pa
$\dot{V}_{50}$	[m <sup>3</sup> /h]	Leckagevolumenstrom bei einem Differenzdruck 50 Pa
V	[m <sup>3</sup> ]	Innenraumvolumen

Formel 4: Luftwechselzahl bei Differenzdruck 50 Pa<sup>47</sup>

#### 3.7.1 Messablauf

Die Raumhülle des Messraums wurde vor und nach dem Tausch der Fenster einer Differenzdruck-Messung [Blowtest3000] unterzogen. Das Messgerät wurde dazu in den Rahmen der Innentür eingebaut. Mittels des eingebauten Gebläses wurde ein konstanter Unter- bzw. Überdruck erzeugt, dabei wurden je 6 Messungen, beginnend bei einem Unter bzw. Überdruck von 60 Pa und danach um jeweils 10 Pa reduziert, durchgeführt. Gemessen wurde dabei die Luftmenge, die notwendig ist um den jeweils eingestellten Differenzdruck zu

<sup>46</sup> ÖN EN13829:2001 Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden, Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden - Differenzdruckverfahren

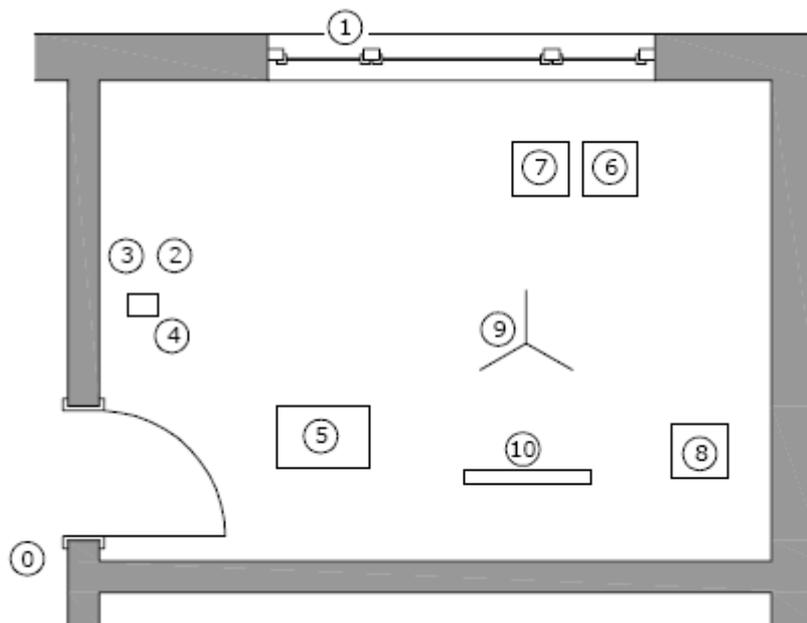
<sup>47</sup> ÖN EN13829:2001 Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden, Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren, S. 17

erreichen. Daran anschließend konnte der  $n_{50}$ -Wert für Unter- bzw. Überdruck errechnet werden.

Während der Messung wurden die Hüllflächen des Raumes, vor allem im Bereich der Bauteilanschlüsse, mittels eines Thermoanemometers [Airflow TA35] auf den eintretenden Luftvolumenstrom, und somit auf Leckagen, untersucht.

### 3.8 Überblick Versuchsaufbau

In der *Abbildung 11* sind alle relevanten Messgeräte und Messstellen, mit deren Standort im Probenahmeraum, skizziert.



- 0 1 x Kapillarröhrchen Druck – Gang
- 1 1 x Kapillarröhrchen Druck – Außen
- 2 2 x Kapillarröhrchen Druck – Innen
- 3 2 x Messgerät Differenzdruck
- 4 Wetterstation
- 5 Probenahmeapparatur für Formaldehyd und VOC
- 6 Tischventilator
- 7 Wasserbad für VOC-Quellen
- 8 Gasdetektor für Tracergas
- 9 Messstelle für Gasdetektor
- 10 Zusätzliche Spanplatten

Abbildung 11: Standort der Messgeräte im Versuchsraum

## 4 MESSERGEBNISSE

### 4.1 Ergebnis der Untersuchung des Luftwechsels und der Randparameter

Die Ermittlung des gleitenden Stundenmittelwertes der Luftwechselzahl einer Stunde erfolgte in einer Taktung von 5 Minuten. Somit ergibt sich eine kontinuierliche Darstellung des Luftwechsels über den gesamten Messzyklus. In *Tabelle 10* findet sich ein exemplarischer Auszug der Rohdaten vom 03.04.2008 und die sich daraus ergebenden, gleitenden Stundenmittelwerte für Luftwechsel, Druckdifferenz Innen und Außen, Innen- und Außentemperatur sowie der Temperaturdifferenz.

Ein positiver Differenzdruck bedeutet, dass der Druck im Außenbereich bzw. am Gang größer ist als im Versuchsraum.

Datum	SF <sub>6</sub> [mg/m <sup>3</sup> ]	LW [h <sup>-1</sup> ]	Δp-Außen [Pa]	Δp-Außen Mittel [Pa]	Δp-Innen [Pa]	Δp-Innen Mittel [Pa]	T <sub>i</sub> [°C]	T <sub>i</sub> Mittel [°C]	T <sub>a</sub> [°C]	T <sub>a</sub> Mittel [°C]	T <sub>Diff</sub> [K]
03.04.2008 11:20	20,90	-	0,5100	-	0,77	-	20,2	-	5,0	-	-
03.04.2008 11:25	20,30	-	0,4500	-	0,69	-	20,0	-	5,0	-	-
03.04.2008 11:30	19,70	-	1,1400	-	0,28	-	20,0	-	5,1	-	-
03.04.2008 11:35	19,00	-	0,7200	-	0,42	-	20,0	-	5,1	-	-
03.04.2008 11:40	18,20	-	0,7600	-	0,32	-	20,0	-	5,2	-	-
03.04.2008 11:45	17,60	-	1,0800	-	0,3	-	20,0	-	5,2	-	-
03.04.2008 11:50	16,80	-	2,1800	-	0,13	-	20,0	-	5,2	-	-
03.04.2008 11:55	16,40	-	0,1100	-	1,26	-	20,2	-	5,3	-	-
03.04.2008 12:00	15,40	-	-0,0600	-	0,31	-	20,3	-	5,3	-	-
03.04.2008 12:05	14,80	-	0,6000	-	-0,15	-	20,4	-	5,3	-	-
03.04.2008 12:10	14,00	-	-0,1800	-	0,63	-	20,4	-	5,3	-	-
03.04.2008 12:15	13,30	-	-0,4000	-	1,04	-	20,4	-	5,3	-	-
03.04.2008 12:20	12,70	0,50	0,5600	0,57	1,38	0,57	20,5	20,2	5,3	5,2	15,0
03.04.2008 12:25	12,30	0,50	-0,5400	0,49	0,45	0,54	20,5	20,2	5,4	5,2	15,0
03.04.2008 12:30	11,80	0,51	-0,1300	0,45	2,8	0,71	20,5	20,2	5,4	5,3	15,0
03.04.2008 12:35	11,40	0,51	0,0400	0,36	1,83	0,82	20,5	20,3	5,4	5,3	15,0
03.04.2008 12:40	10,90	0,51	0,3800	0,34	0,63	0,84	20,4	20,3	5,4	5,3	15,0
03.04.2008 12:45	10,70	0,50	0,4500	0,31	0,7	0,87	20,4	20,3	5,4	5,3	15,0
03.04.2008 12:50	10,40	0,48	0,2400	0,25	1,11	0,93	20,4	20,4	5,4	5,3	15,0
03.04.2008 12:55	10,10	0,48	0,1300	0,09	0,11	0,93	20,4	20,4	5,4	5,3	15,1
03.04.2008 13:00	9,87	0,44	0,1500	0,10	0,81	0,90	20,4	20,4	5,4	5,4	15,1
03.04.2008 13:05	9,62	0,43	0,6700	0,15	0,33	0,90	20,4	20,4	5,5	5,4	15,1
03.04.2008 13:10	9,21	0,42	0,1300	0,12	0,47	0,95	20,4	20,4	5,5	5,4	15,0
03.04.2008 13:15	8,83	0,41	0,7200	0,18	0,22	0,91	20,4	20,4	5,6	5,4	15,0
03.04.2008 13:20	8,58	0,39	0,1800	0,23	-0,18	0,82	20,4	20,4	5,6	5,4	15,0
03.04.2008 13:25	8,23	0,40	0,5800	0,23	0,67	0,77	20,4	20,4	5,7	5,5	15,0
03.04.2008 13:30	7,96	0,39	0,5800	0,32	0,52	0,77	20,4	20,4	5,8	5,5	14,9
03.04.2008 13:35	7,72	0,39	0,3300	0,35	0,88	0,62	20,5	20,4	5,9	5,5	14,9
03.04.2008 13:40	7,49	0,38	0,1800	0,36	1,04	0,56	20,7	20,4	6,1	5,6	14,8

SF <sub>6</sub>	SF <sub>6</sub> -Konzentration [mg/m <sup>3</sup> ]
LW	Gleitender Stundenmittelwert des Luftwechsel [h <sup>-1</sup> ]
Δp-Außen	Druckdifferenz Innen – Außen [Pa]
Δp-Außen Mittel	Gleitender Stundenmittelwert der Druckdifferenz Innen – Außen [Pa]
Δp-Innen	Druckdifferenz Innen – Gang [Pa]
Δp-Innen Mittel	Gleitender Stundenmittelwert der Druckdifferenz Innen – Gang [Pa]
T <sub>i</sub>	Innenraumtemperatur [°C]
T <sub>i</sub> Mittel	Gleitender Stundenmittelwert der Innenraumtemperatur [°C]
T <sub>a</sub>	Außentemperatur [°C]
T <sub>a</sub> Mittel	Gleitender Stundenmittelwert der Außentemperatur [°C]
T <sub>Diff</sub>	Gleitender Stundenmittelwert der Differenztemperatur [K]

Tabelle 10: Exemplarische Darstellung der Messergebnisse vom 03.04.2008

#### 4.1.1 Allgemeines zur graphische Darstellung der Messergebnisse

In *Tabelle 11* sind die Abkürzungen und Bezeichnungen der folgenden Diagramme aufgelistet:

	<b>Bedeutung</b>
Luftwechselzahl bzw. LW	Gleitender Stundenmittelwert des Luftwechsels, errechnet nach der Tracergas-Konzentrationsabkling-Methode
M1	Messzyklus 1: 03.04.2008 bis 11.04.2008
M2	Messzyklus 2: 19.11.2008 bis 30.11.2008
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß der Trendlinie
LW [100 x h <sup>-1</sup> ]	Luftwechselzahl 100-fach überhöht dargestellt (Diagramm Tracergas-Abklingkurve)

Tabelle 11: Bedeutung der Diagrammbezeichnungen

Zur Verdeutlichung der Abhängigkeit zweier Parameter wurden den Diagrammen resultierende Trendlinien nach linearer Regression angefügt und mit dem Bestimmtheitsmaß R<sup>2</sup> versehen.

Je größer der Wert des Bestimmtheitsmaßes R<sup>2</sup> ist, desto höher ist die Qualität der Trendlinie und desto besser ist die ermittelte Geradegleichung zu Prognosezwecken geeignet. Ein Bestimmtheitsmaß nahe 1 deutet auf einen stark dominanten Zusammenhang hin <sup>48</sup>.

#### 4.1.2 Zeitliche Variation des Luftwechsels

In *Abbildung 12* und *Abbildung 13* ist die zeitliche Variation des gleitenden Mittelwerts des Luftwechsels dargestellt, dabei zeigt sich eine große Schwankungsbreite des Luftwechsels über den gesamten Beobachtungszeitraum, wobei die Differenz zwischen dem höchsten und niedrigsten gemessenen Wertes bei der ersten Messreihe bei 1,05 h<sup>-1</sup> und der Zweiten bei 0,29 h<sup>-1</sup> lag.

<sup>48</sup> vgl. Duller, 2007, S. 149f

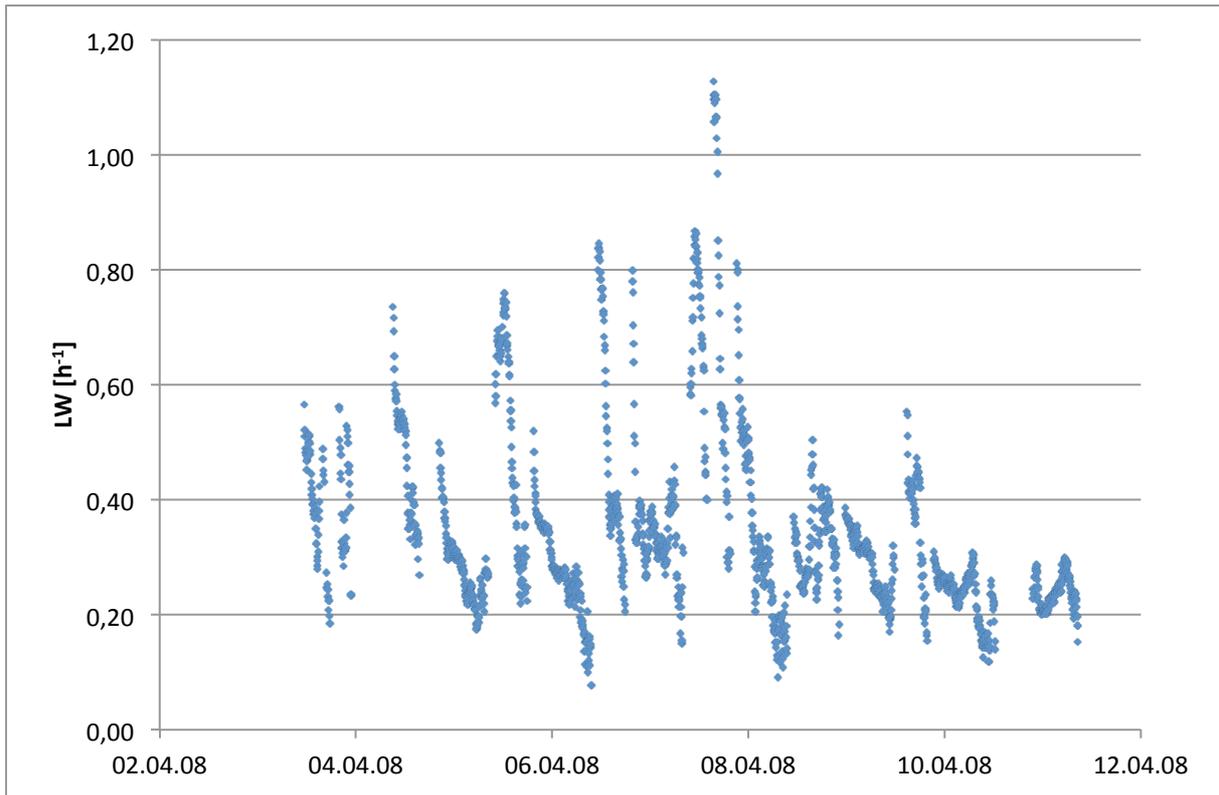


Abbildung 12: Zeitliche Variation des Luftwechsels M1

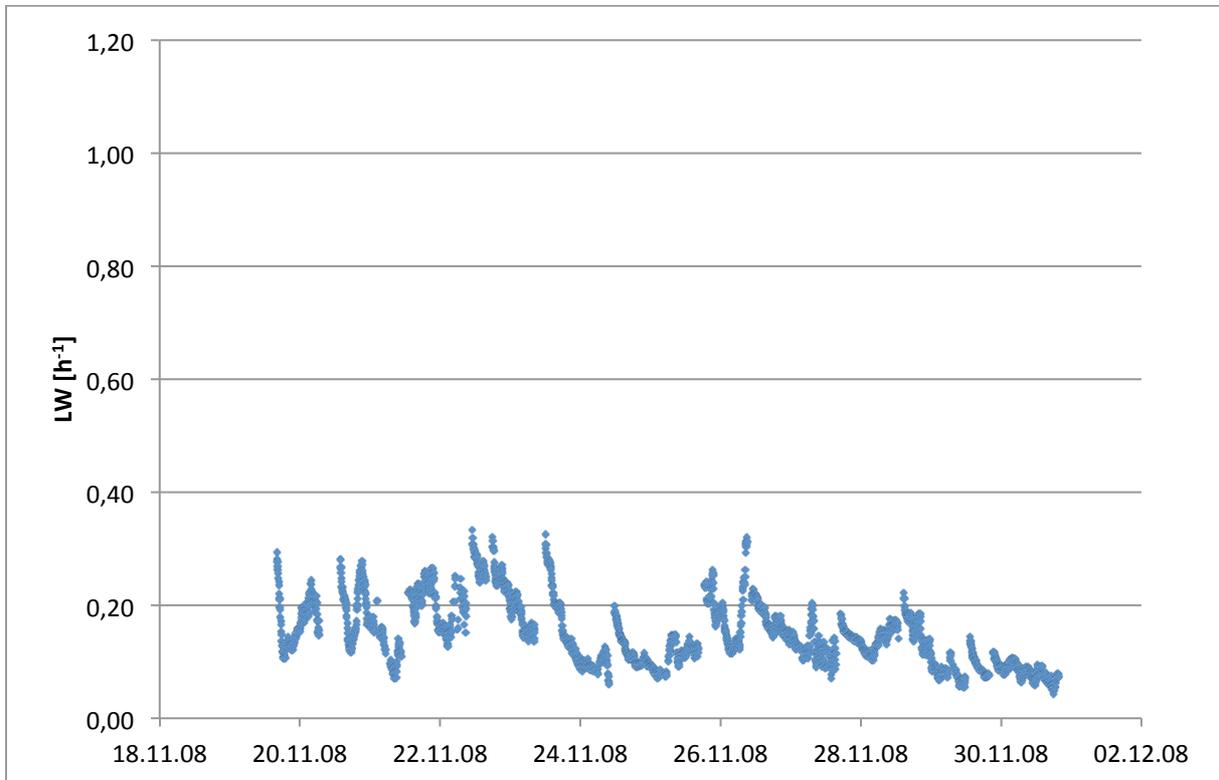


Abbildung 13: Zeitliche Variation des Luftwechsels M2

### 4.1.3 Häufigkeitsverteilung

In *Abbildung 14* ist die Häufigkeitsverteilung der ermittelten Luftwechselzahlen angeführt. Dabei ist sehr deutlich die höhere Dichtigkeit der Gebäudehülle und der damit verbundene verringerte Luftwechsel der zweiten Messreihe zu erkennen.

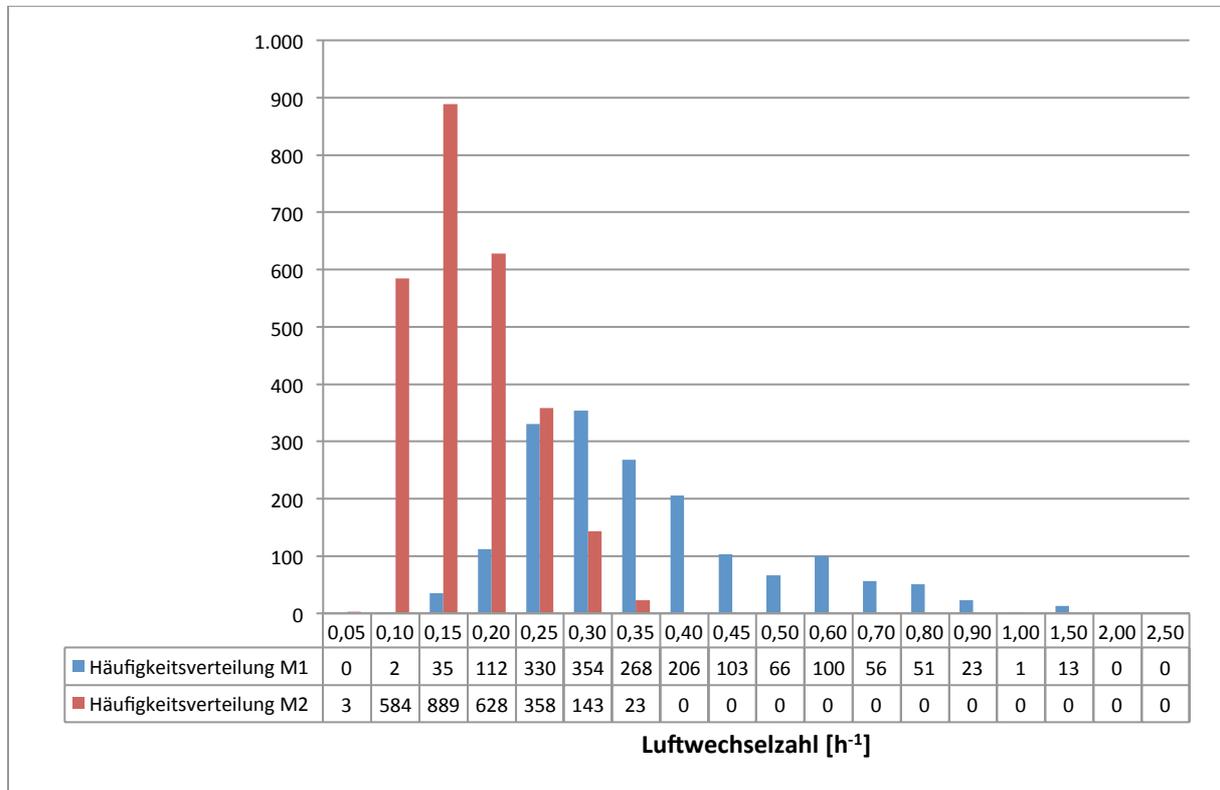


Abbildung 14: Häufigkeitsverteilung der Luftwechselzahlen M1 und M2

### 4.1.4 Abklingkurve Tracergas

Anhand der Abklingkurven des Tracergases wird ebenfalls der reduzierte Luftwechsel durch den Fenstertausch deutlich sichtbar. Eine exemplarische Abklingkurve der ersten Messreihe (*Abbildung 15*) zeigt deutlich den raschen Abfall der Tracergaskonzentration, der Luftwechsel ist in beiden Darstellungen 100-fach überhöht dargestellt. Bei der ebenfalls exemplarisch dargestellten Abklingkurve der zweiten Messreihe (*Abbildung 16*) ist eine bei weitem flachere Kurve festzustellen.

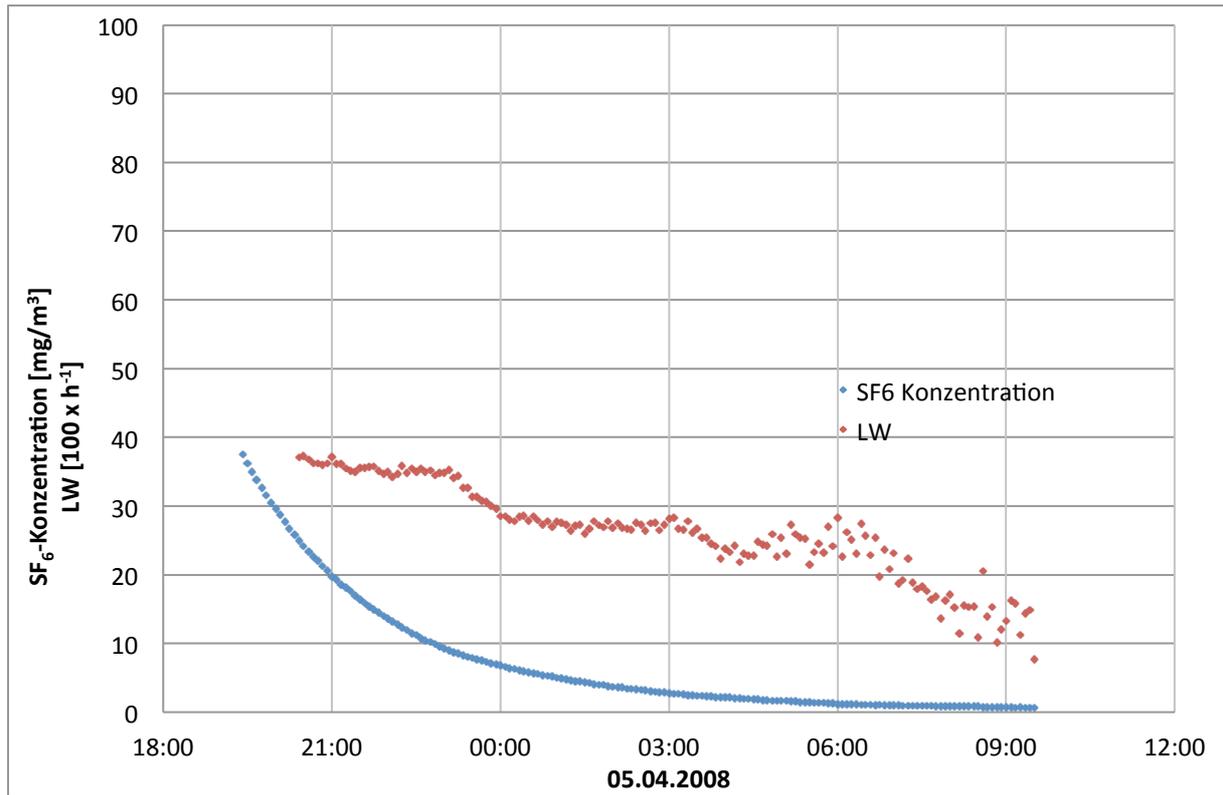


Abbildung 15: Beispiel SF<sub>6</sub> Konzentrationsabklingkurve M1 (LW 100-fach überhöht)

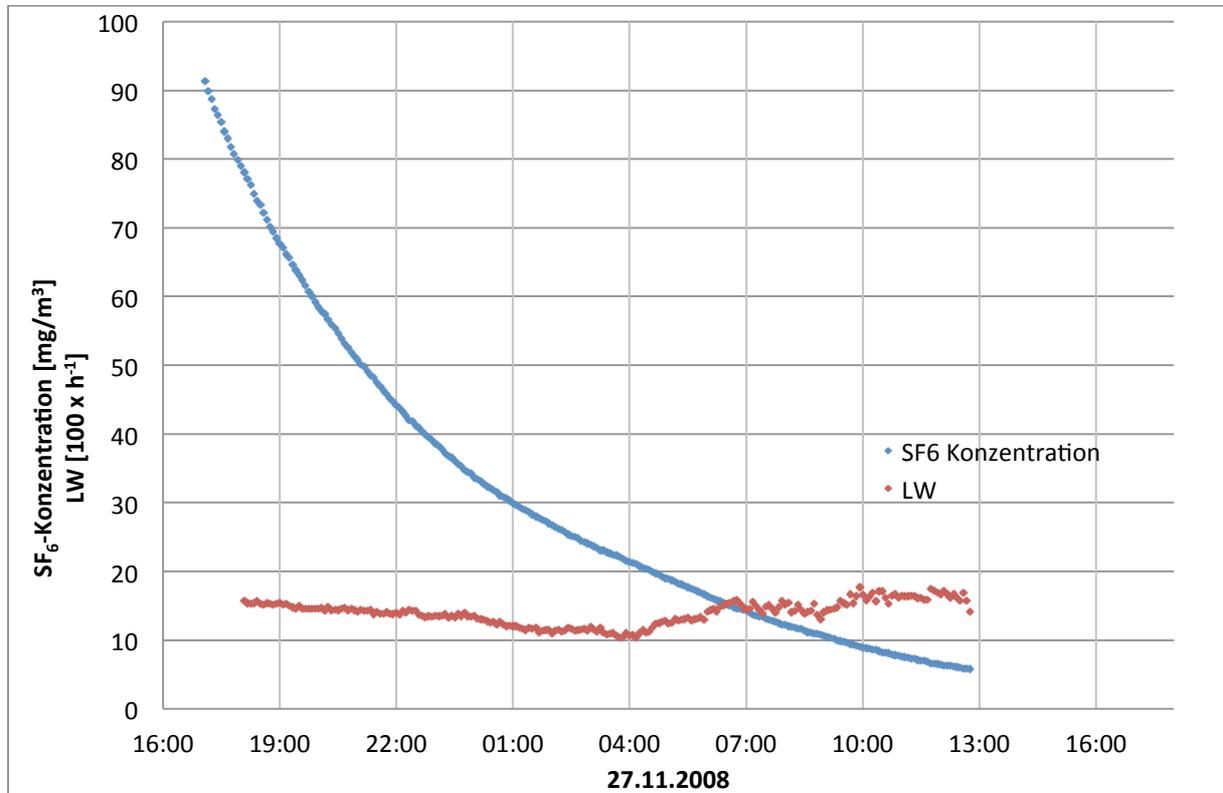


Abbildung 16: Beispiel SF<sub>6</sub> Konzentrationsabklingkurve M2 (LW 100-fach überhöht)

#### **4.1.5 Abhängigkeit des Luftwechsel von Umgebungsparametern**

Die Datenpunkte in den folgenden Diagrammen stellen die gleitenden Stundenmittelwerte für den Luftwechsel einer Stunde in Beziehung zu den dazugehörigen Stundenmittelwerten der Umgebungsparameter einer Stunde dar.

Die Auswirkung der Luftwechselzahl in Bezug auf die Druckdifferenz ergab bei der ersten Messreihe vor dem Fenstertausch keine einfache Tendenz (*Abbildung 17* und *Abbildung 19*), bei der zweiten Messreihe (*Abbildung 18* und *Abbildung 20*) ist nur eine sehr geringe Tendenz zwischen Luftwechsel und Druckdifferenz zu erkennen, wobei zu beobachten ist, dass tendenziell mit steigendem Differenzdruck sich die Luftwechselzahl erhöht (*Abbildung 18*).

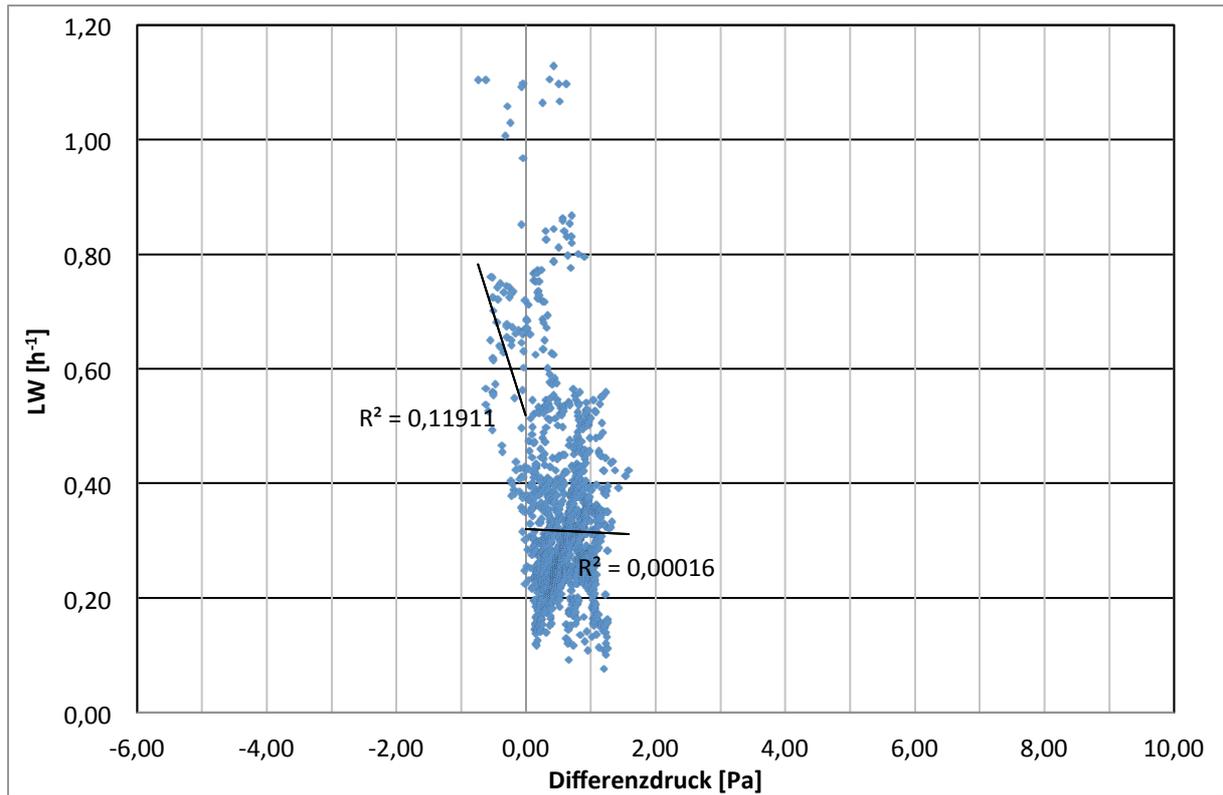


Abbildung 17: Luftwechsel in Abhängigkeit zum Differenzdruck (Messraum – Außen) M1

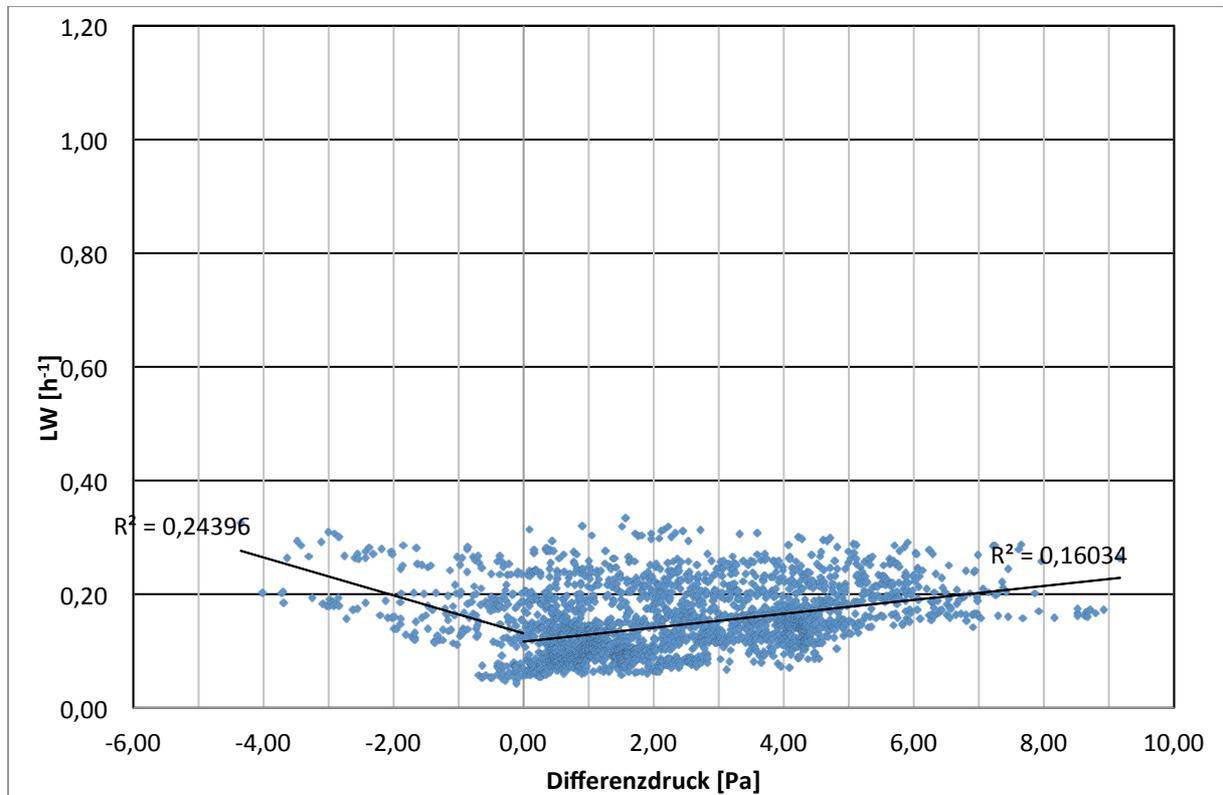


Abbildung 18: Luftwechsel in Abhängigkeit zum Differenzdruck (Messraum – Außen) M2

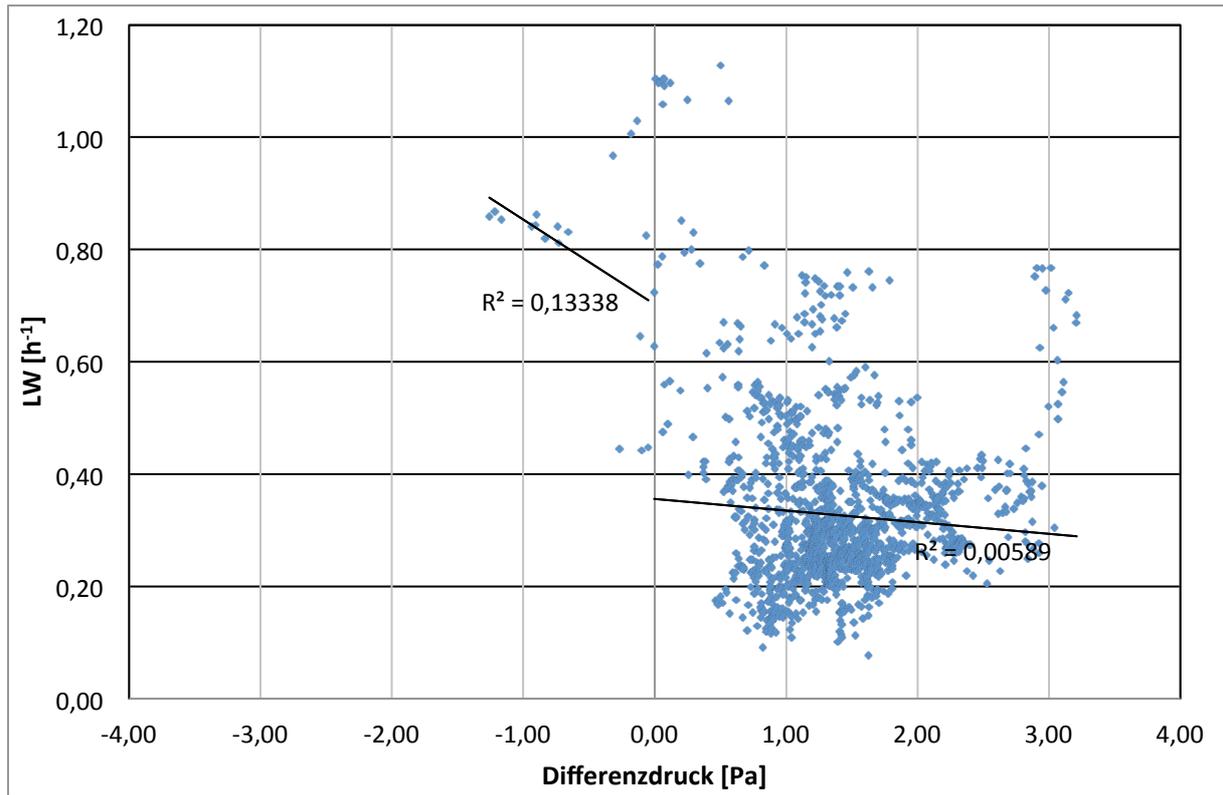


Abbildung 19: Luftwechsel in Abhängigkeit zum Differenzdruck (Messraum – Gang) M1

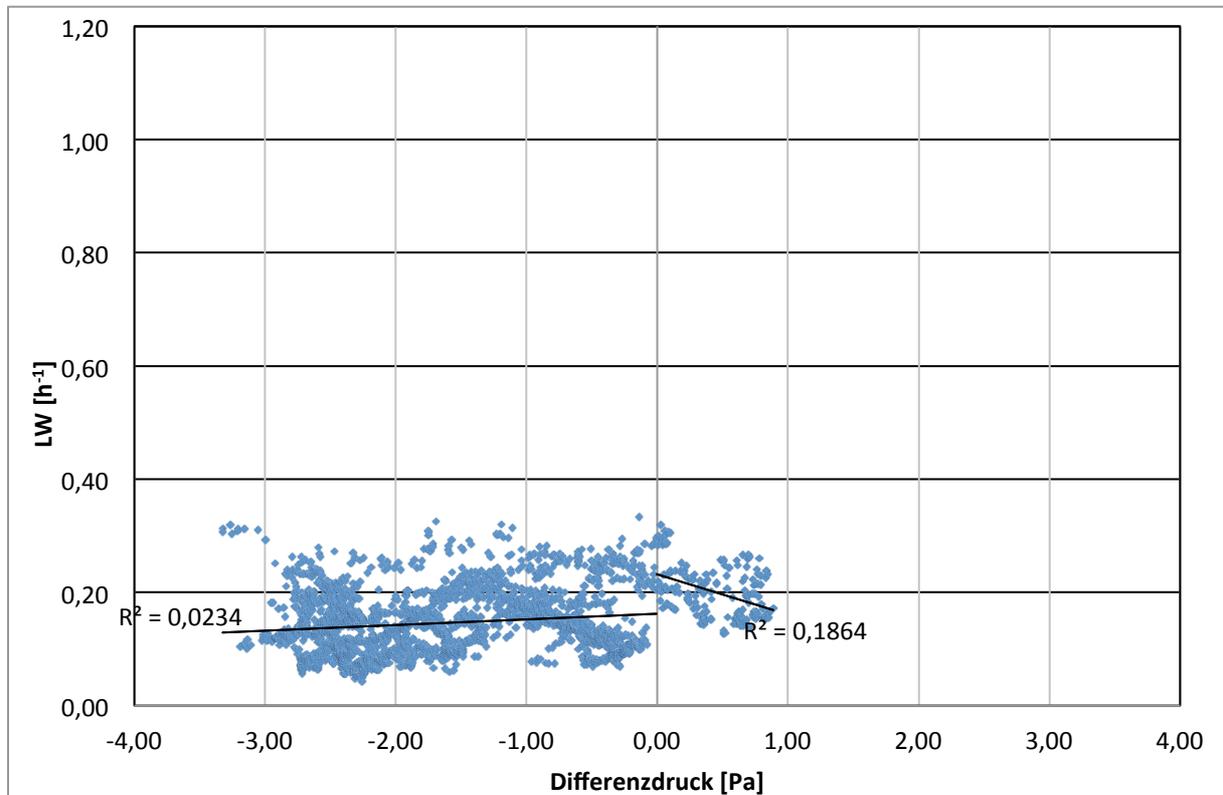


Abbildung 20: Luftwechsel in Abhängigkeit zum Differenzdruck (Messraum – Gang) M2

Neben der Druckdifferenz konnte, wiederum nur bei der zweiten Messreihe, ein möglicher schwacher, tendenzieller Anstieg des Luftwechsels bei steigender Innenraumtemperatur (*Abbildung 24*) beobachtet werden. Weder bei den Temperaturdifferenzen zwischen Innen und Außen (*Abbildung 22*) und den Außentemperaturen (*Abbildung 26*) der zweiten Messreihe konnte kein einfacher Zusammenhang mit dem Luftwechsel erkannt werden. Bei der ersten Messreihe (*Abbildung 21*, *Abbildung 23* und *Abbildung 25*) konnte ebenfalls kein Zusammenhang zwischen den vorherrschenden Temperaturen und dem Luftwechsel festgestellt werden.

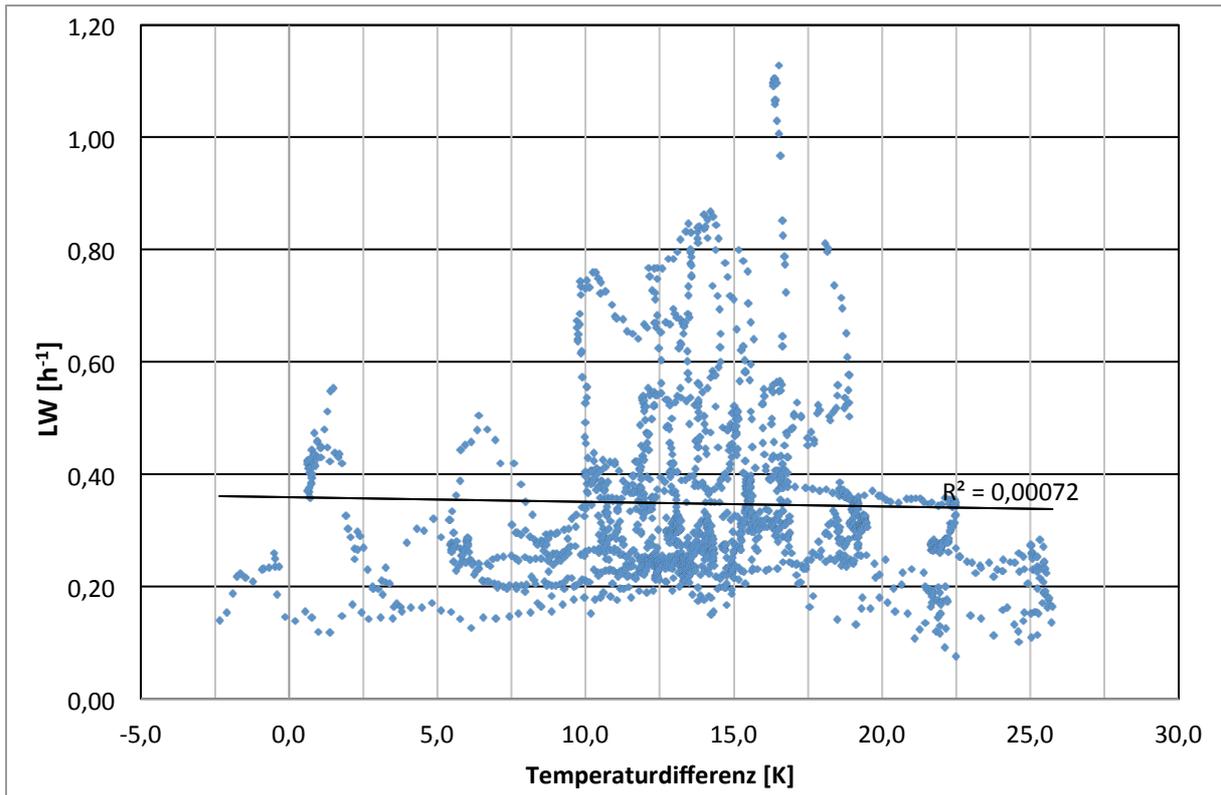


Abbildung 21: Luftwechsel in Abhängigkeit zur Temperaturdifferenz Innen – Außen M1

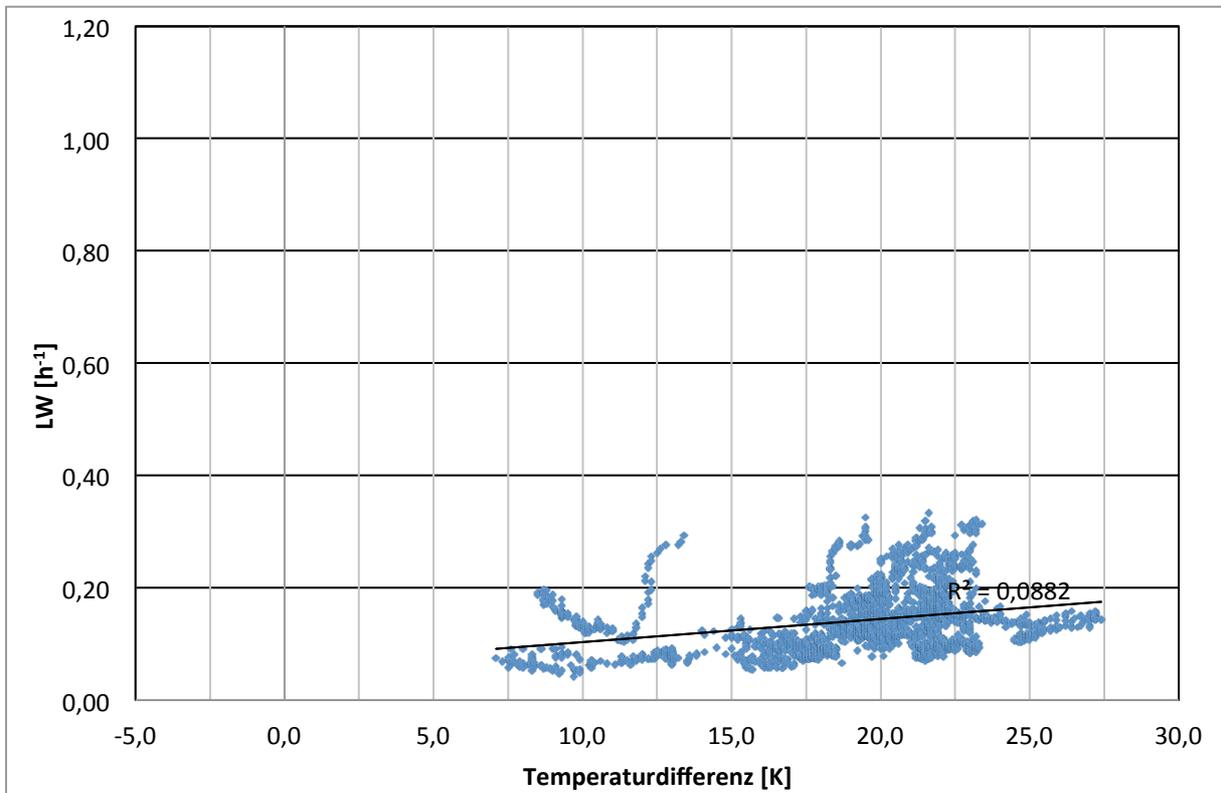


Abbildung 22: Luftwechsel in Abhängigkeit zur Temperaturdifferenz Innen – Außen M2

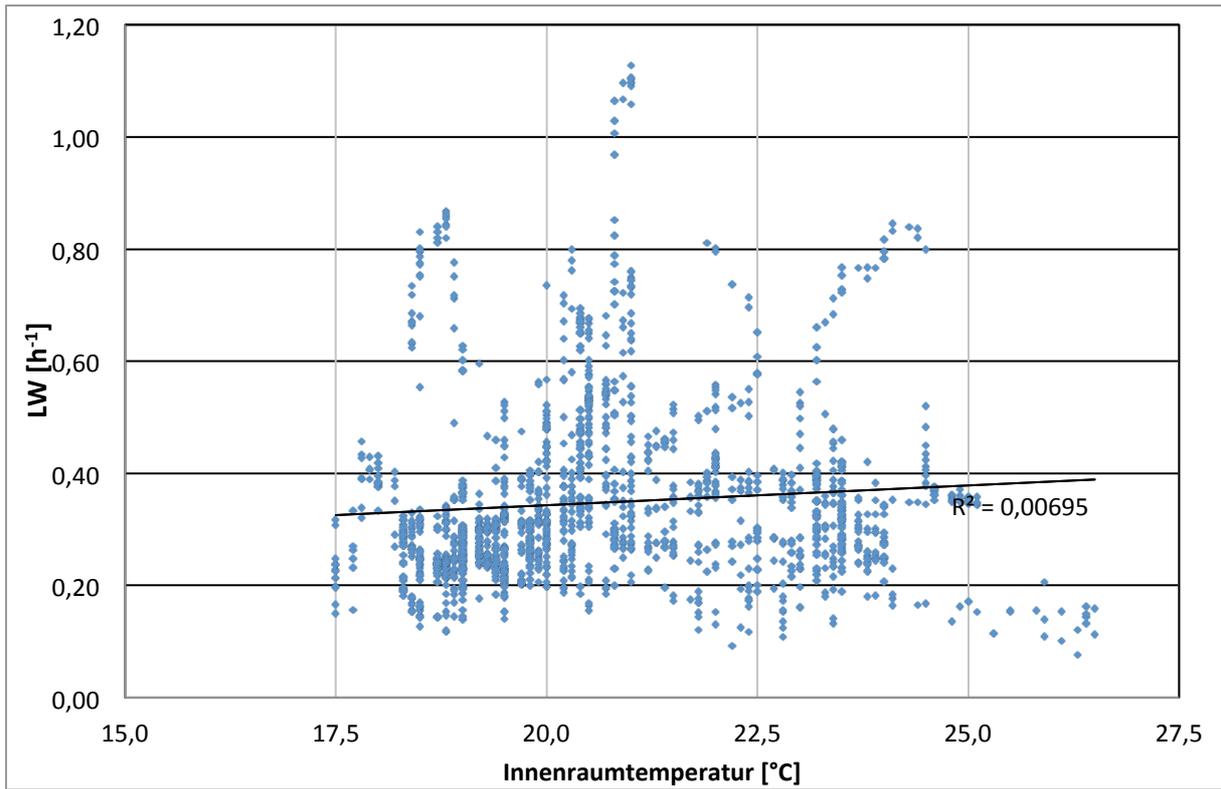


Abbildung 23: Luftwechsel in Abhängigkeit zur Innenraumtemperatur M1

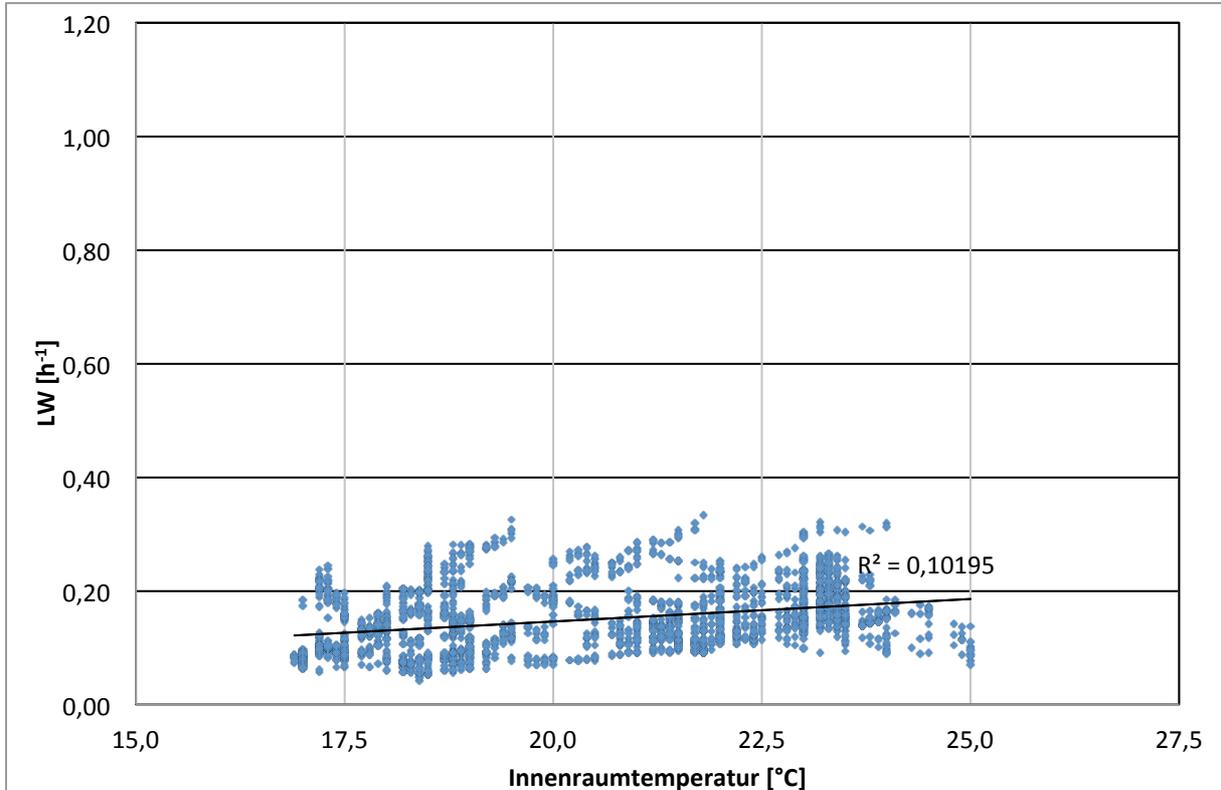


Abbildung 24: Luftwechsel in Abhängigkeit zur Innenraumtemperatur M2

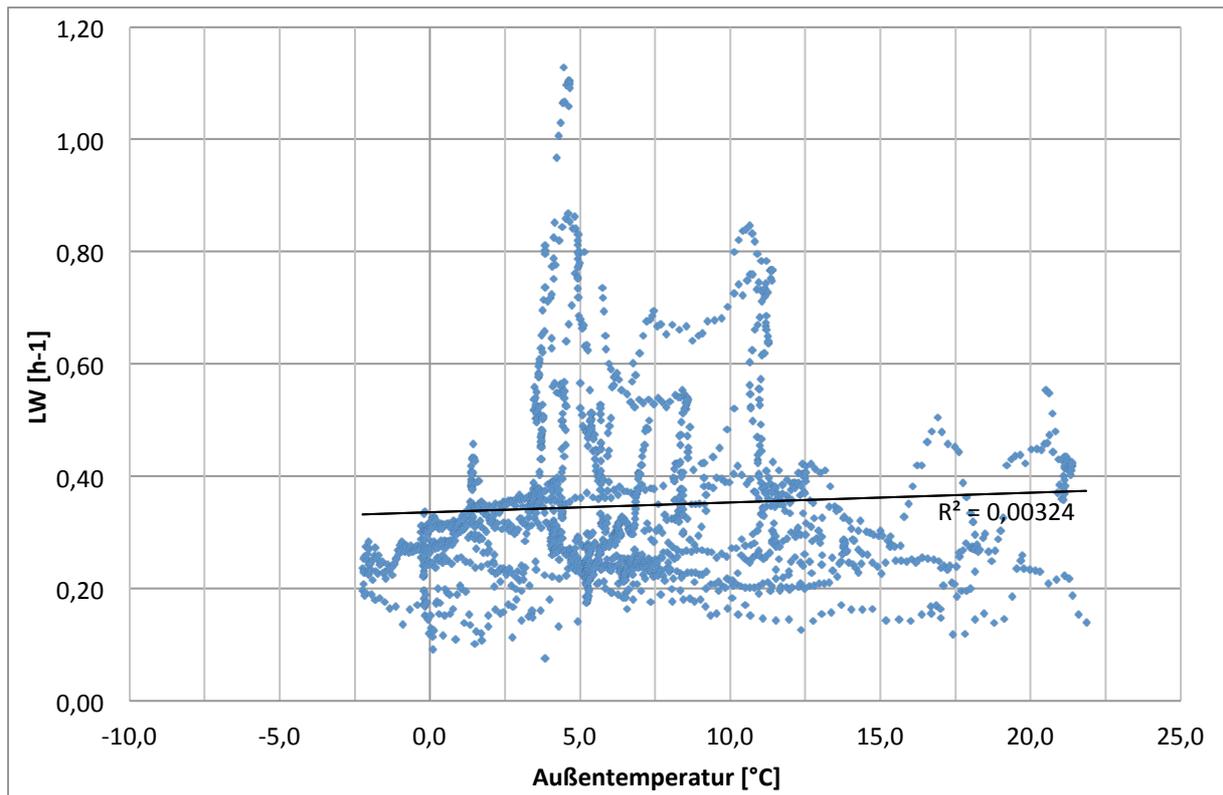


Abbildung 25: Luftwechsel in Abhängigkeit zur Außentemperatur M1

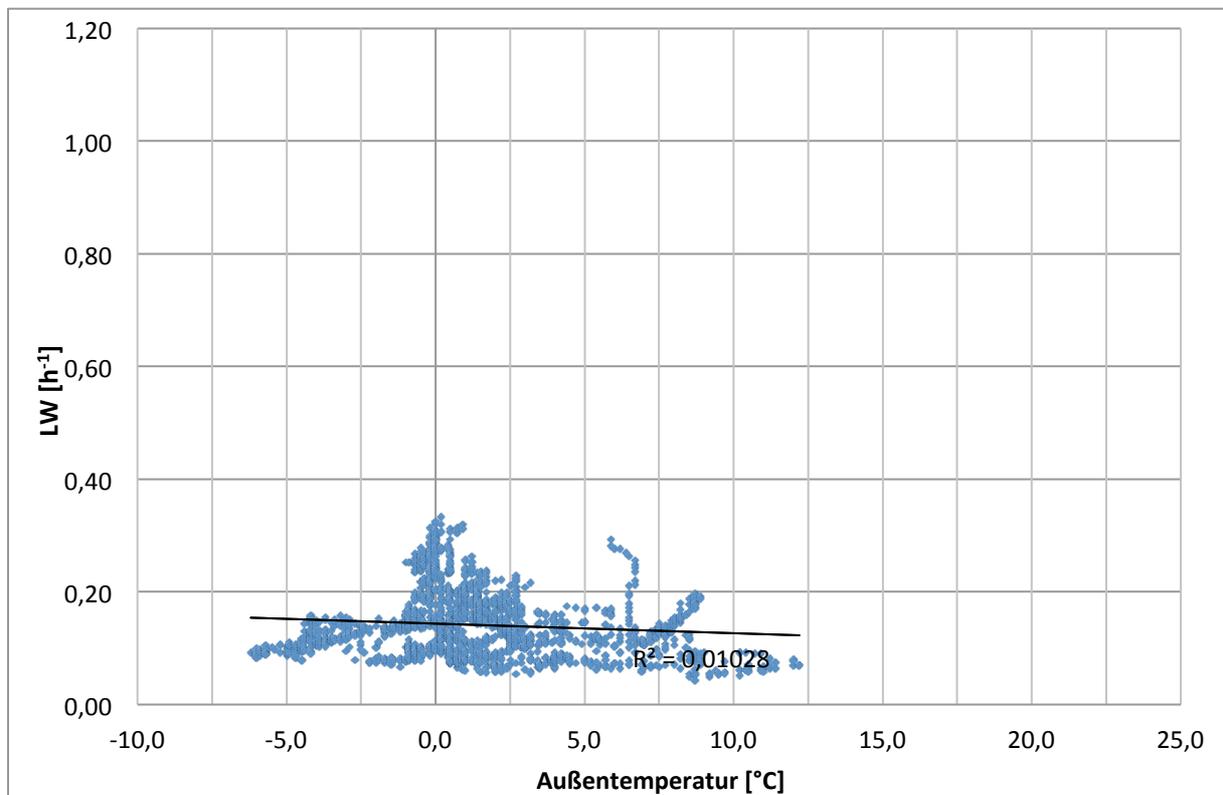


Abbildung 26: Luftwechsel in Abhängigkeit zur Außentemperatur M2

#### 4.1.6 Ergebnis Windgeschwindigkeit und Windrichtung

Bei der zweiten Messreihe herrschte am Beginn des Versuchs starker Wind. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Wetterstation trotz hoher Windgeschwindigkeiten nur Werte bis maximal 11 m/s anzeigte.

Da sich das Windrad im freien Luftstrom befand, lag die Vermutung nahe, dass das Messgerät falsche Werte anzeigt. In einem Versuch mit einem Strömungsmessgerät [Testo 400, Testotherm] mit einem Flügelrad wurde die Genauigkeit der Wetterstation, bei gleichen Windgeschwindigkeiten, überprüft.

Dabei zeigte sich, wie in *Abbildung 27* dargestellt, dass die Wetterstation erst ab Windgeschwindigkeiten von 1 m/s Messergebnisse liefert, zwischen 2 und 6 m/s dem Referenzmessgerät ähnliche Daten liefert und keine Werte über 11 m/s anzeigt.

Des Weiteren wurde festgestellt, dass die verwendete Wetterstation sehr reaktionsträge ist und die angezeigte Windrichtung, vor allem bei sehr geringen Windgeschwindigkeiten, sich sehr schwankend darstellt.

Die mit der Wetterstation ermittelten Windrichtungen und -geschwindigkeiten sind somit nicht für die Beurteilung der Messergebnisse heranzuziehen.

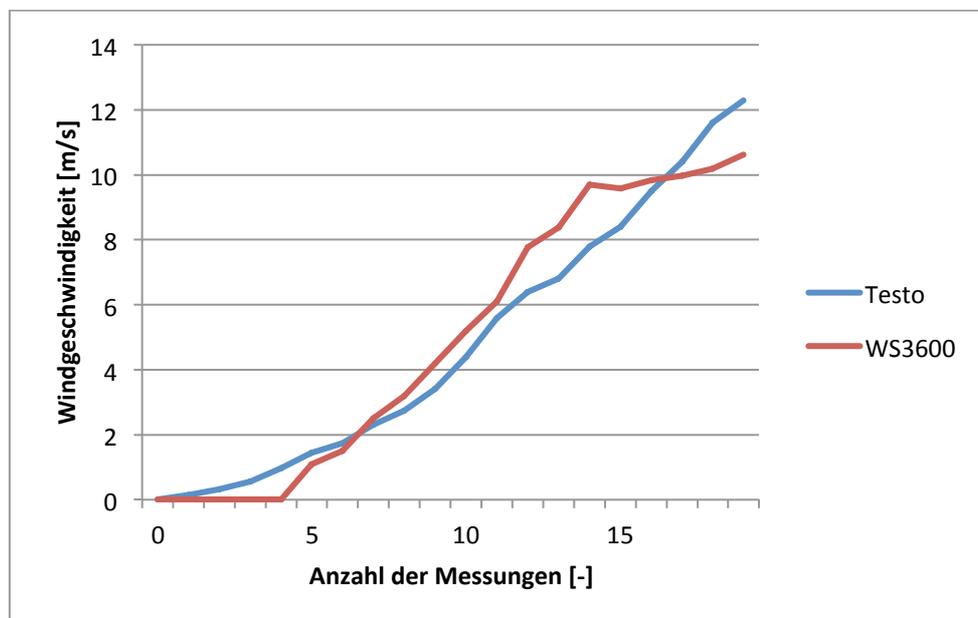


Abbildung 27: Vergleichsmessung Wetterstation und Strömungsmessgerät

### 4.1.7 Zusammenfassung der Ergebnisse der Luftwechseluntersuchung

In der nachfolgenden *Tabelle 12* sind ausgewählte Ergebnisse der Bestimmung der Luftwechselzahl angeführt.

		<b>Messzyklus M1</b>	<b>Messzyklus M2</b>
Anzahl Messungen	[-]	1.720	2.628
$n_{50}$ - Wert	[h <sup>-1</sup> ]	16,7	8,6
LW – arithm. Mittel	[h <sup>-1</sup> ]	0,35	0,15
Standardabweichung	[-]	±0,16	±0,06
LW <sub>min</sub>	[h <sup>-1</sup> ]	0,08	0,04
LW <sub>max</sub>	[h <sup>-1</sup> ]	1,13	0,33
LW – Differenz min. – max.	[h <sup>-1</sup> ]	1,05	0,29
Verhältnis LW <sub>max</sub> / LW <sub>min</sub>	[-]	14,1	8,3

Tabelle 12: Zusammenfassung der Ergebnisse der Luftwechselbestimmung

## 4.2 Ergebnis der Untersuchungen der Formaldehydkonzentration

### 4.2.1 Ergebnisse der Einzelmessungen

In *Tabelle 13* und *Tabelle 14* sind die Ergebnisse der Einzelmessungen der Formaldehydkonzentration angeführt. Zusätzlich sind alle relevanten Umgebungsparameter als Mittelwerte angeführt. Des Weiteren wurden die Ergebnisse nach der *Andersen*-Formel errechnet, diese Werte dienen allerdings nur zur Vergleichbarkeit der einzelnen Messwerte.

Festgestellt wurde, dass die Formaldehydkonzentration nach dem Fenstertausch im Mittel um 30 Prozent höhere Werte aufwies als vor Beginn der Sanierungsmaßnahmen.

Es muss allerdings angemerkt werden, dass aufgrund der geringen Anzahl von Messungen eine allgemeine Aussage über einen Zusammenhang zwischen Formaldehydkonzentration und Luftwechselzahl nur bedingt möglich ist.

		03.04.08	05.04.08	05.04.08	06.04.08	07.04.08	07.04.08	08.04.08	08.04.08
Probenahmebeginn	[hh:mm]	17:30	07:27	13:35	08:48	08:22	13:02	08:38	21:19
Probenahmeende	[hh:mm]	18:19	08:21	14:18	09:36	09:07	13:54	09:26	22:08
Sammelvolumen	[m³]	0,090	0,095	0,080	0,085	0,080	0,090	0,085	0,085
Mittlere Raumtemperatur	[°C]	20,6	20,1	21,0	26,3	18,9	19,8	23,1	23,8
Mittlere rel. Luftfeuchte	[%]	46	45	44	39	45	45	39	41
Luftdruck Absolut	[hPa]	973	971	966	955	950	955	962	957
<b>Ergebnisse</b>									
<b>Konzentration</b>	[mg/m³]	<b>0,025</b>	<b>0,028</b>	<b>0,028</b>	<b>0,046</b>	<b>0,044</b>	<b>0,029</b>	<b>0,037</b>	<b>0,049</b>
	[ppm]	<b>0,021</b>	<b>0,023</b>	<b>0,023</b>	<b>0,038</b>	<b>0,037</b>	<b>0,024</b>	<b>0,031</b>	<b>0,041</b>
Formaldehyd (korr.) <sup>b</sup>	[ppm]	0,029	0,035	0,031	0,030	0,067	0,039	0,35	0,041
Mittlerer LW	[h <sup>-1</sup> ]	0,20	0,27	0,52	0,13	0,62	0,49	0,17	0,25

<sup>b</sup> Formaldehyd (korr.): Konzentration mittels Andersen-Formel rechnerisch umgelegt auf 23°C, 45 % rel. Luftfeuchte, dient nur zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse

Tabelle 13: Übersicht Formaldehydkonzentrations-Messungen vor der Sanierung

		22.11.08	23.11.08	24.11.08	26.11.08	27.11.08	28.11.08	30.11.08	-
Probenahmebeginn	[hh:mm]	16:37	09:46	09:11	08:25	14:41	11:41	13:29	-
Probenahmeende	[hh:mm]	17:21	10:29	10:00	09:10	15:26	12:28	14:18	-
Sammelvolumen	[m³]	100	100	100	100	100	100	100	-
Mittlere Raumtemperatur	[°C]	21,6	19,3	17,7	23,6	24,9	24,5	19,1	-
Mittlere rel. Luftfeuchte	[%]	48	49	51	47	46	47	49	-
Luftdruck Absolut	[hPa]	951	958	948	976	974	965	954	-
<b>Ergebnisse</b>									
<b>Konzentration</b>	[mg/m³]	<b>0,038</b>	<b>0,045</b>	<b>0,039</b>	<b>0,049</b>	<b>0,070</b>	<b>0,073</b>	<b>0,038</b>	-
	[ppm]	<b>0,032</b>	<b>0,038</b>	<b>0,032</b>	<b>0,041</b>	<b>0,058</b>	<b>0,061</b>	<b>0,032</b>	-
Formaldehyd (korr.) <sup>b</sup>	[ppm]	0,037	0,059	0,064	0,036	0,045	0,049	0,052	-
Mittlerer LW	[h <sup>-1</sup> ]	0,29	0,19	0,08	0,30	0,11	0,17	0,09	-

<sup>b</sup> Formaldehyd (korr.): Konzentration mittels Andersen-Formel rechnerisch umgelegt auf 23°C, 45 % rel. Luftfeuchte, dient nur zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse

Tabelle 14: Übersicht Formaldehydkonzentrations-Messungen nach der Sanierung

#### 4.2.2 Abhängigkeit der Formaldehydkonzentration vom Luftwechsel

Die Messwerte der Formaldehydmessungen (*Abbildung 28* und *Abbildung 29*) vor und nach dem Fenstertausch weisen zwar eine gewisse Bandbreite auf, es zeigte sich kein einfacher Zusammenhang zwischen dem gemittelten gleitenden Stundenmittelwert für den Luftwechsel während der Formaldehydmessung und der Formaldehydkonzentration.

Für die nach der Andersen-Formel korrigierten Werte in der ersten Messreihe (*Abbildung 30*) zeigt sich eine mögliche Tendenz, wobei allerdings der einzelne Wert, der signifikant über dem Niveau der anderen Werte lag, bei einer relativ niedrigen Raumtemperatur erzielt wurde, wodurch sich der korrigierte Wert stark erhöhte. Bei der zweiten Messreihe (*Abbildung 31*) könnte ein möglicher dominanter Zusammenhang zwischen Formaldehydkonzentration und Luftwechsel vorhanden sein.

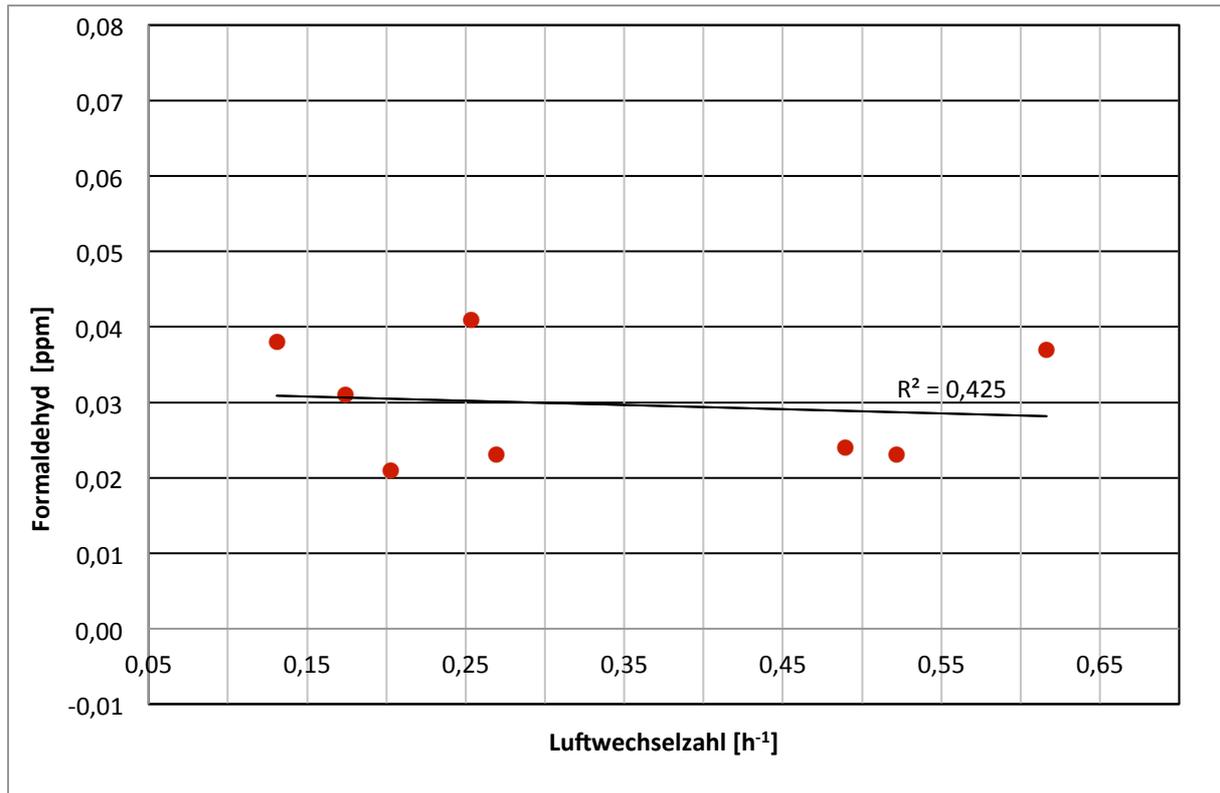


Abbildung 28: Abhängigkeit der Formaldehydkonzentration vom Luftwechsel M1

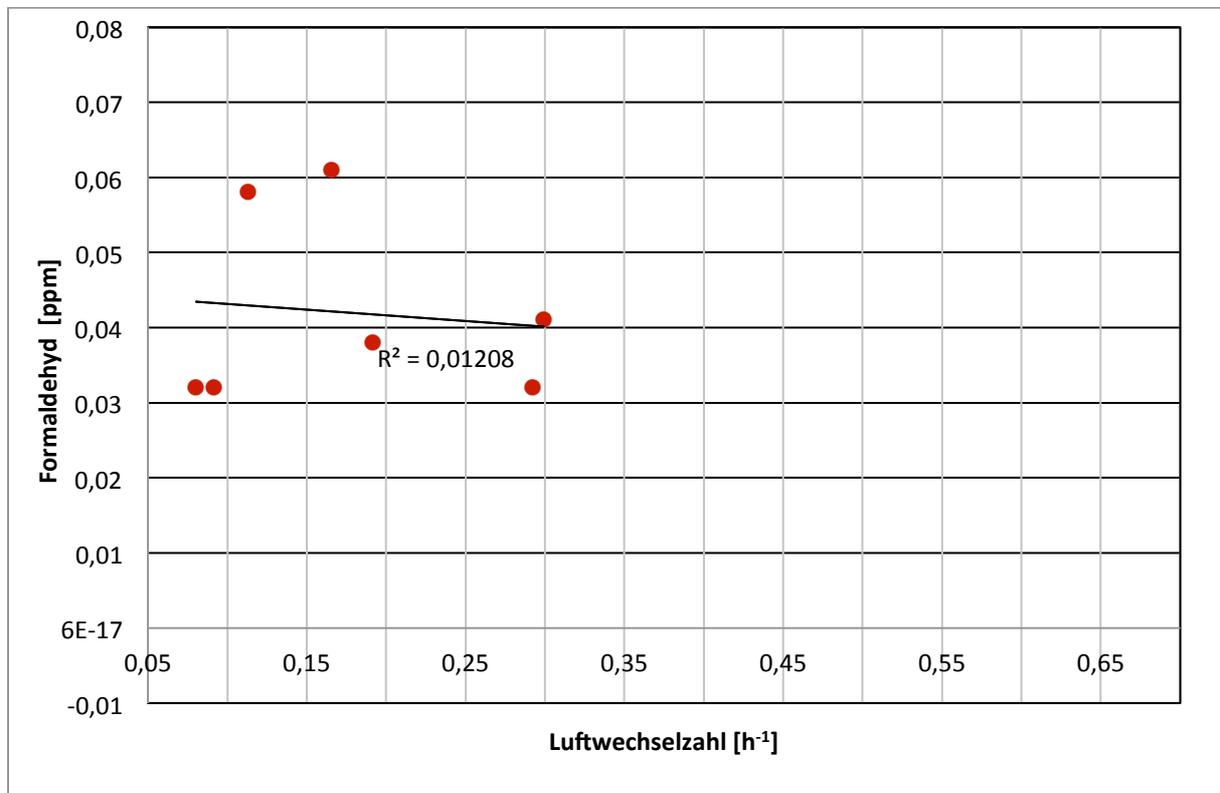


Abbildung 29: Abhängigkeit der Formaldehydkonzentration vom Luftwechsel M2

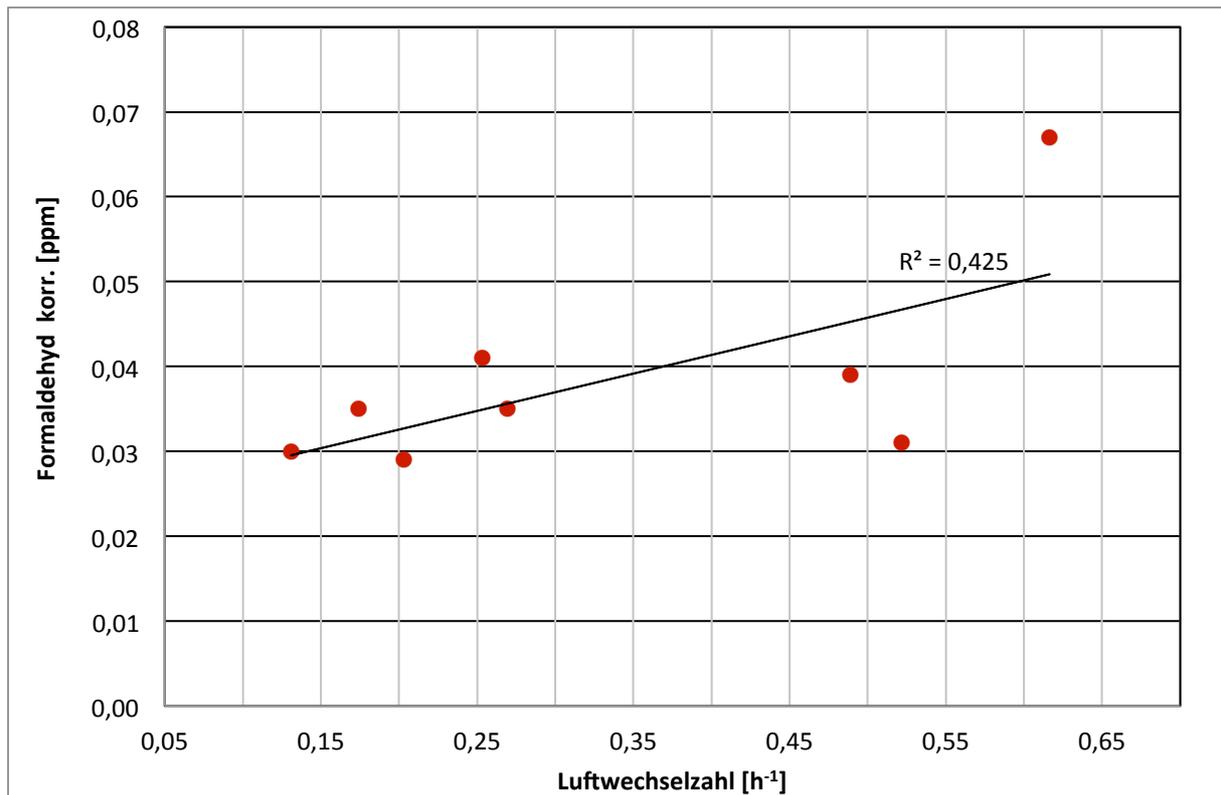


Abbildung 30: Abhängigkeit der Formaldehydkonzentration vom Luftwechsel M1 (nach Andersen)

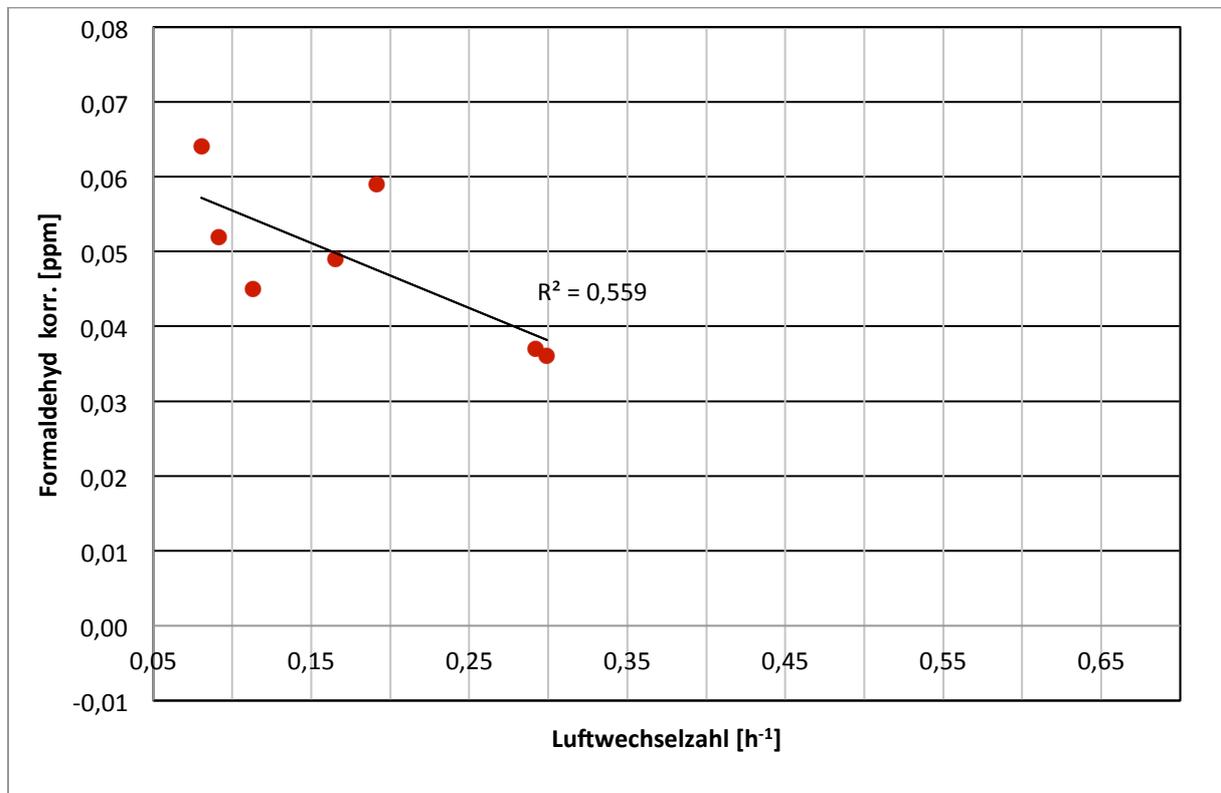


Abbildung 31: Abhängigkeit der Formaldehydkonzentration vom Luftwechsel M2 (nach Andersen)

#### **4.2.3 Abhängigkeit der Formaldehydkonzentration von der Innenraumtemperatur**

Die Korrelation der Messergebnisse der Formaldehydkonzentration mit der Innenraumtemperatur zeigte tendenzielle Zusammenhänge zwischen steigender Innenraumtemperatur und steigender Formaldehydkonzentration. Wie in den beiden nachfolgenden Diagrammen ersichtlich ist, fällt der Zusammenhang bei der Messung nach dem Fenstertausch (*Abbildung 33*) bei weitem dominanter aus als bei der ersten Messreihe (*Abbildung 32*).

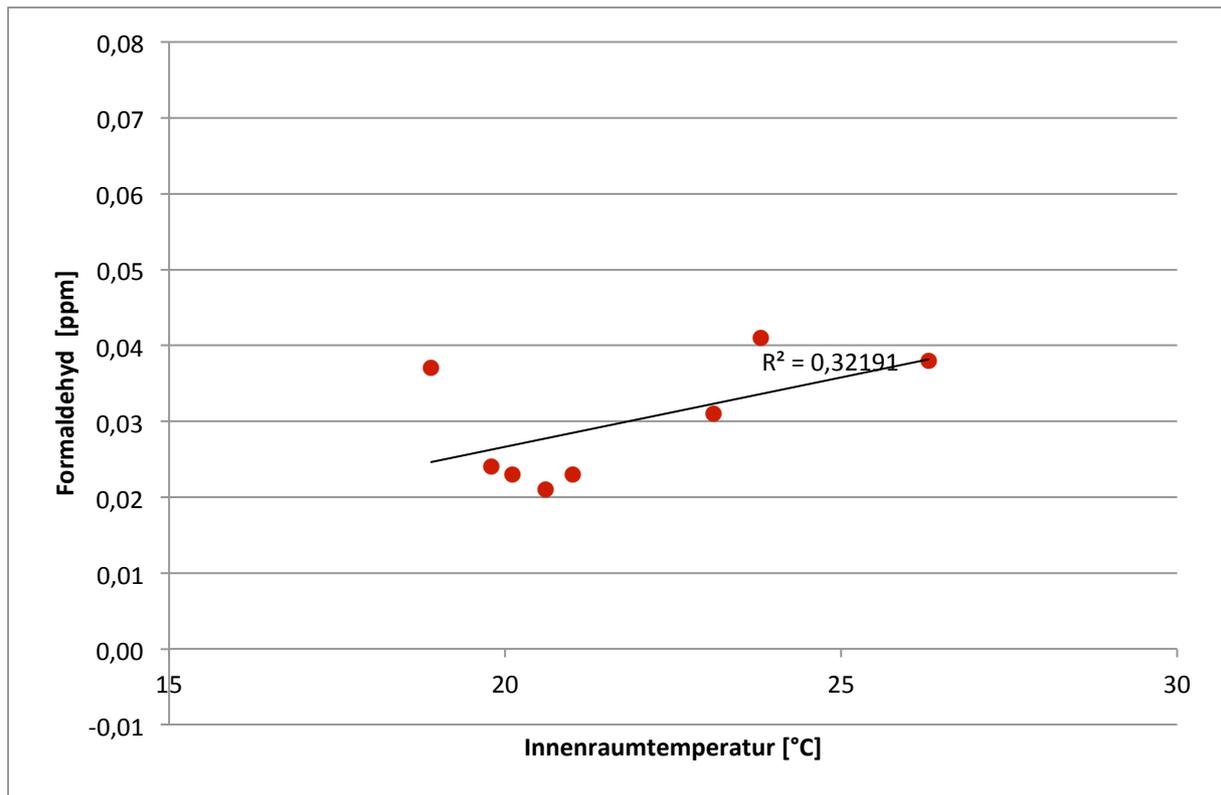


Abbildung 32: Abhängigkeit der Formaldehydkonzentration von der Innenraumtemperatur M1

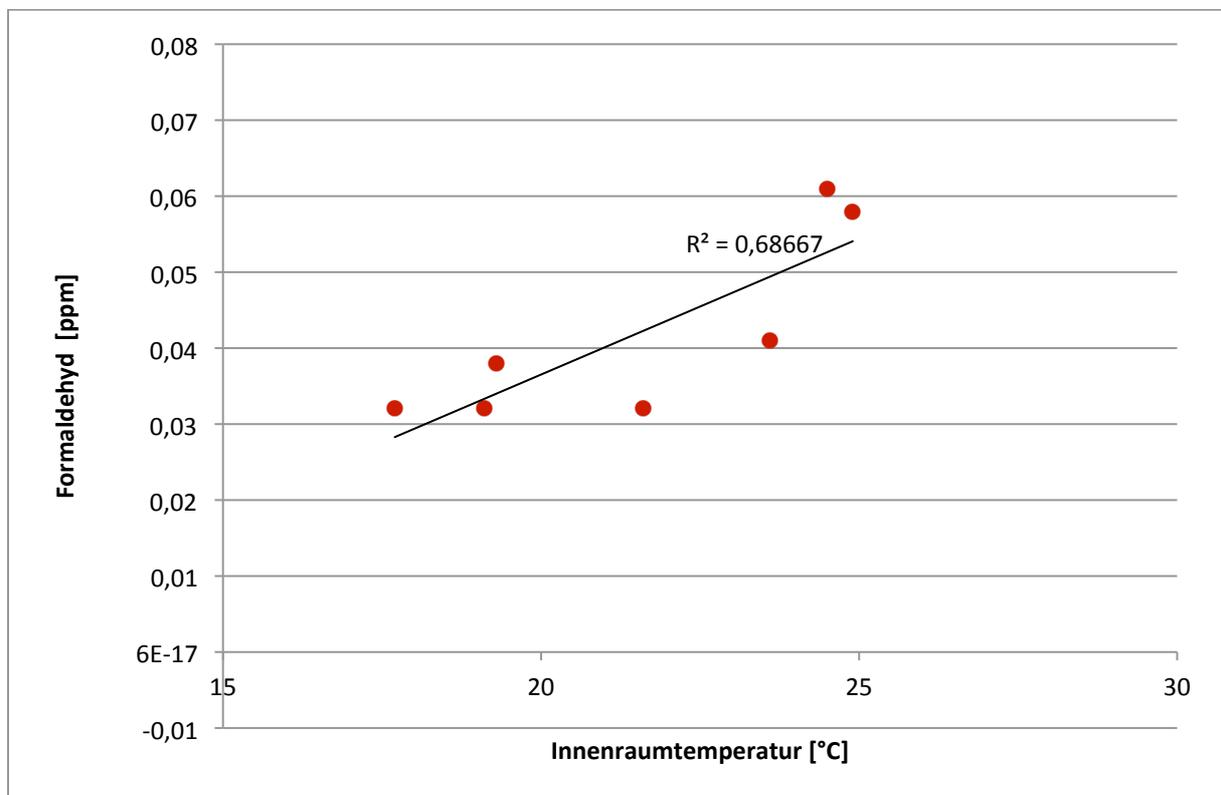


Abbildung 33: Abhängigkeit der Formaldehydkonzentration von der Innenraumtemperatur M2

#### 4.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Formaldehydmessung

In der nachfolgenden *Tabelle 15* sind die Ergebnisse der Messungen der Formaldehydkonzentration im untersuchten Raum zusammengefasst.

		Messzyklus M1	Messzyklus M2
Anzahl Messungen	[-]	8	7
Konz. – arithm. Mittel	[ppm]	0,030	0,042
Konz. <sub>Andersen</sub> – arithm. Mittel	[ppm]	0,038	0,049
Standardabweichung	[-]	±0,007	±0,012
Konz. <sub>min</sub>	[ppm]	0,021	0,032
Konz. <sub>max</sub>	[ppm]	0,041	0,061
Konzentration Differenz min. – max.	[ppm]	0,020	0,029
Verhältnis Konz. <sub>max</sub> / Konz. <sub>min</sub>	[-]	1,95	1,91

Konz.                      Konzentration

Tabelle 15: Zusammenfassung der Ergebnisse der Formaldehydmessung

#### 4.3 Ergebnis der Untersuchung der VOC-Konzentration

In den beiden angeführten Tabellen (*Tabelle 16* und *Tabelle 17*) ist die Summenkonzentration der versuchsweise verdampften organischen flüchtigen Verbindungen (VOC), die in der Raumluft detektiert wurden, samt den zum Messzeitpunkt herrschenden Umgebungsparametern, angeführt. Bei der ersten Messreihe vor dem Fenstertausch ist keine Korrelation zwischen Luftwechsel und VOC-Konzentration (*Tabelle 16*) zu erkennen. Eine mögliche Tendenz zwischen dem Luftwechsel und der Summenkonzentration von VOC besteht bei den Messergebnissen der zweiten Messreihe, die in *Tabelle 17* zusammengefasst sind. Die ermittelten Messergebnisse der Gesamtkonzentration der emittierten VOCs sind in den beiden Tabellen auf 3 signifikante Stellen gerundet angeführt.

Die VOC-Messergebnisse der beiden Messreihen sind nicht direkt vergleichbar, da bei der zweiten Messung eine unterschiedliche Zusammensetzung des VOC-Gemisches zur Anwendung kam.

Es muss allerdings angemerkt werden, dass aufgrund der geringen Anzahl von Probennahmen eine allgemeine Aussage über einen Zusammenhang zwischen VOC-Konzentration und Luftwechselzahl nur bedingt möglich ist.

		03.04.08	05.04.08	05.04.08	06.04.08	07.04.08	07.04.08	08.04.08	08.04.08
Probenahmebeginn	[hh:mm]	17:23	07:27	13:35	08:48	08:22	13:02	08:48	21:19
Probenahmeende	[hh:mm]	18:21	08:21	14:20	09:36	09:05	13:53	09:24	22:07
Sammelvolumen	[m <sup>3</sup> ]	0,080	0,080	0,095	0,095	0,085	0,100	0,090	0,095
Mittlere Raumtemperatur	[°C]	20,6	20,1	21,0	26,3	18,9	19,8	23,1	23,8
Mittlere rel. Luftfeuchte	[%]	46	45	44	39	45	45	39	41
Luftdruck Absolut	[hPa]	973	971	966	955	950	955	962	957
<b>Ergebnisse</b>									
<b>Konzentration VOC-Gesamt</b>	<b>[µg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>10.900</b>	<b>15.300</b>	<b>10.600</b>	<b>9.600</b>	<b>13.100</b>	<b>10.000</b>	<b>12.800</b>	<b>11.400</b>
Mittlerer LW	[h <sup>-1</sup> ]	0,20	0,27	0,52	0,13	0,62	0,49	0,17	0,25

Tabelle 16: Übersicht VOC-Konzentrations-Messungen vor der Sanierung

		22.11.08	23.11.08	24.11.08	26.11.08	27.11.08	28.11.08	30.11.08	-
Probenahmebeginn	[hh:mm]	16:37	09:46	09:11	08:26	14:40	11:44	13:30	-
Probenahmeende	[hh:mm]	17:22	10:30	10:02	09:10	15:26	12:28	14:14	-
Sammelvolumen	[m <sup>3</sup> ]	0,102	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	-
Mittlere Raumtemperatur	[°C]	21,6	19,3	17,7	23,6	24,9	24,5	19,1	-
Mittlere rel. Luftfeuchte	[%]	48	49	51	47	46	47	49	-
Luftdruck Absolut	[hPa]	951	958	948	976	974	965	954	-
<b>Ergebnisse</b>									
<b>Konzentration VOC-Gesamt</b>	<b>[µg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>1.300</b>	<b>4.900</b>	<b>6.800</b>	<b>1.600</b>	<b>1.900</b>	<b>1.800</b>	<b>5.100</b>	<b>-</b>
Mittlerer LW	[h <sup>-1</sup> ]	0,29	0,19	0,08	0,30	0,11	0,17	0,09	-

Tabelle 17: Übersicht VOC-Konzentrations-Messungen nach der Sanierung

#### 4.3.1 Abhängigkeit der VOC-Konzentration vom Luftwechsel

In den folgenden beiden Diagrammen in *Abbildung 34* und *Abbildung 35* ist der Zusammenhang zwischen der Gesamtkonzentration der VOCs und dem gemittelten gleitenden Stundenmittelwert des Luftwechsels während der VOC-Messung dargestellt, wodurch der Luftwechsel der Stunde vor der Messung und während der Messung erfasst wurde. Vor dem Fenstertausch ist keine Korrelation zwischen den beiden Parametern festzustellen, hingegen ist bei den Messungen nach dem Fenstertausch eine mögliche einfache Tendenz zu höheren VOC-Konzentrationen bei sinkender Luftwechselzahl zu erkennen.

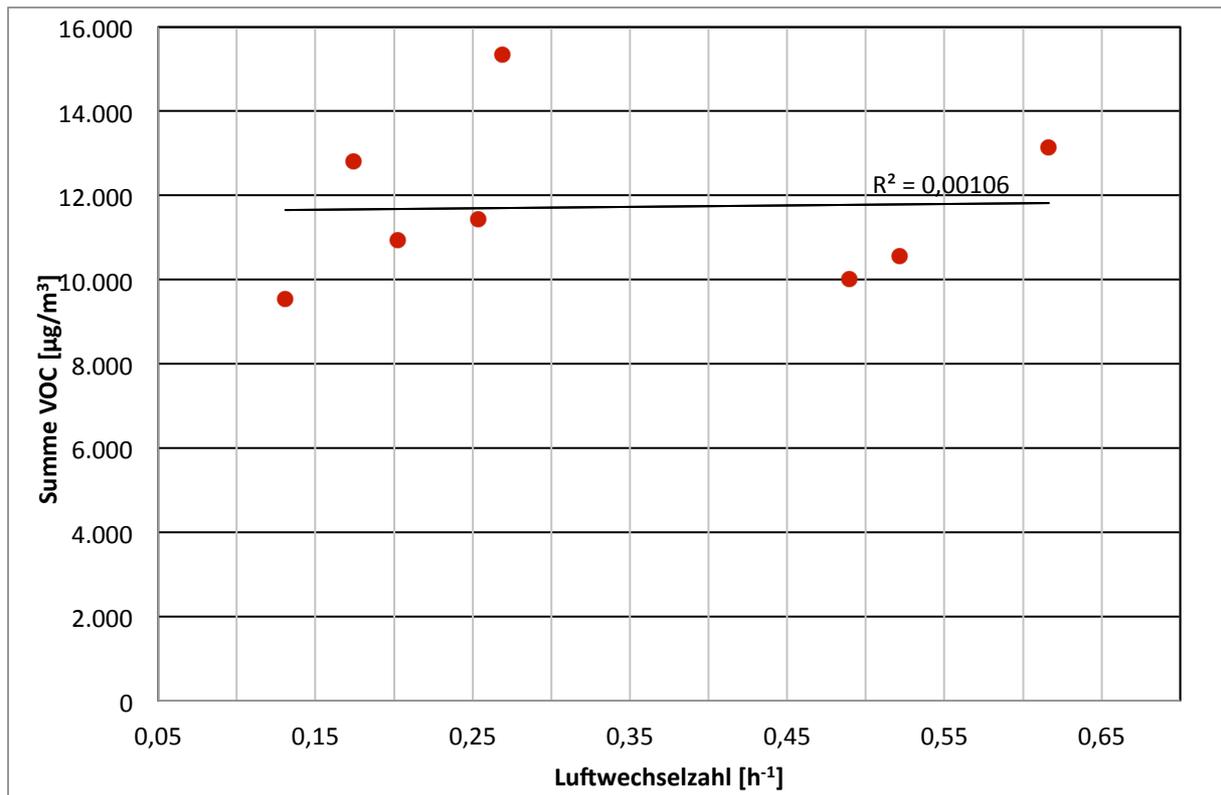


Abbildung 34: Abhängigkeit der VOC-Konzentration vom Luftwechsel M1

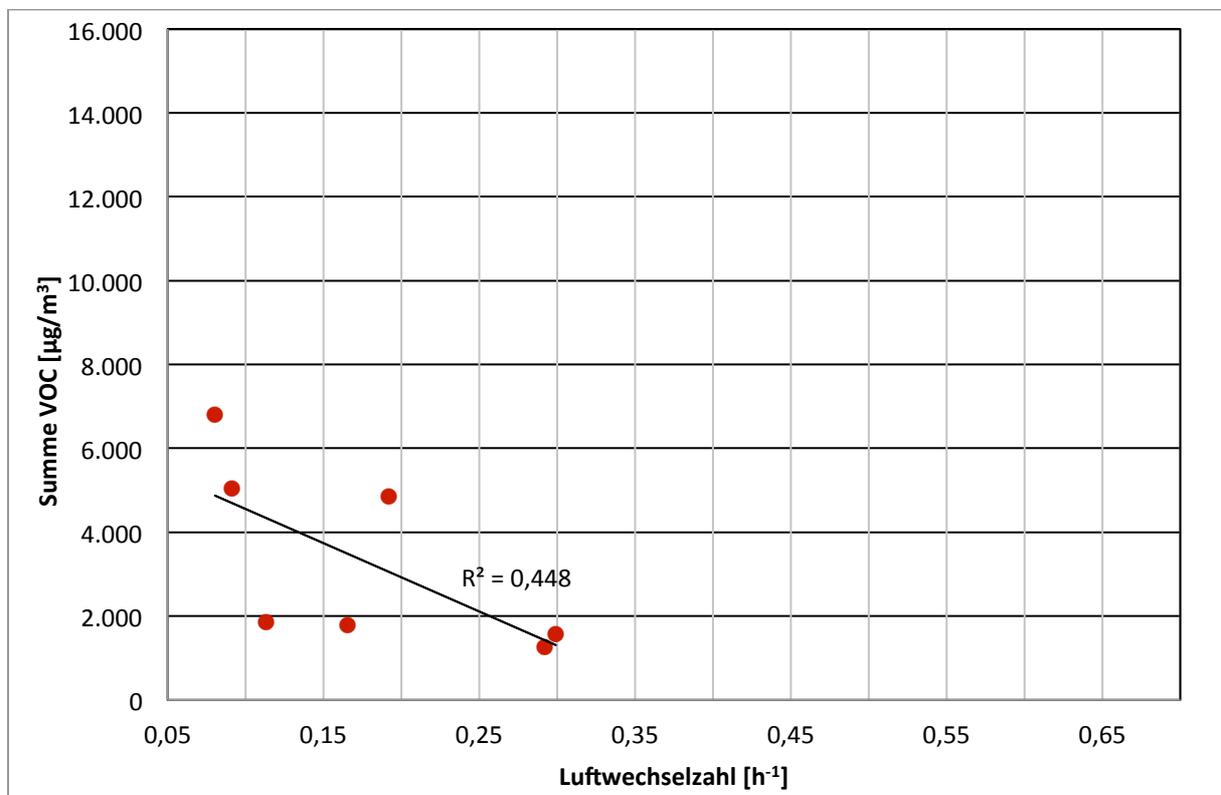


Abbildung 35: Abhängigkeit der VOC-Konzentration vom Luftwechsel M2

#### 4.3.2 Grafische Darstellung der einzelnen VOC-Verbindungen

In den beiden folgenden Diagrammen (*Abbildung 36* und *Abbildung 37*) sind die Konzentrationen der einzelnen VOC-Verbindungen in Prozent, ausgehend vom arithmetischen Mittelwert, in der zeitlichen Reihenfolge der Probennahme dargestellt. Zusätzlich wurde bei jedem Messwert der während einer Einzelmessung herrschende mittlere Luftwechsel angeführt. Diese Darstellungsweise soll zeigen, wie sich die einzelnen VOC-Verbindungen bei sich änderndem Luftwechsel zueinander verhalten. Die Abbildungen zeigen, dass keine Anreicherung der VOCs über die Zeit stattfand, sondern dass die Konzentrationen der VOCs über den gesamten Versuchszeitraum einen breiten Schwankungsbereich aufwiesen. Weiters ist zu sehen, dass sich das Verhältnis der einzelnen VOC-Verbindungen zu einander nahezu immer gleich verhalten hat, ausgenommen Tetrachlorethen, das während der ersten Messreihe einige Male vom Verhältnis zu den anderen Substanzen abwich.

In den darauffolgenden Diagrammen (*Abbildung 38* und *Abbildung 39*) sind die Einzelkonzentrationen der Verbindungen dargestellt. Dabei zeigt sich, dass sich die prozentuale Konzentration der einzelnen Verbindungen, bei sich ändernden Konzentration, ähnlich der Gesamtkonzentration (ausgenommen Tetrachlorethen bei der ersten Messreihe) der gemessenen Verbindungen verhalten.

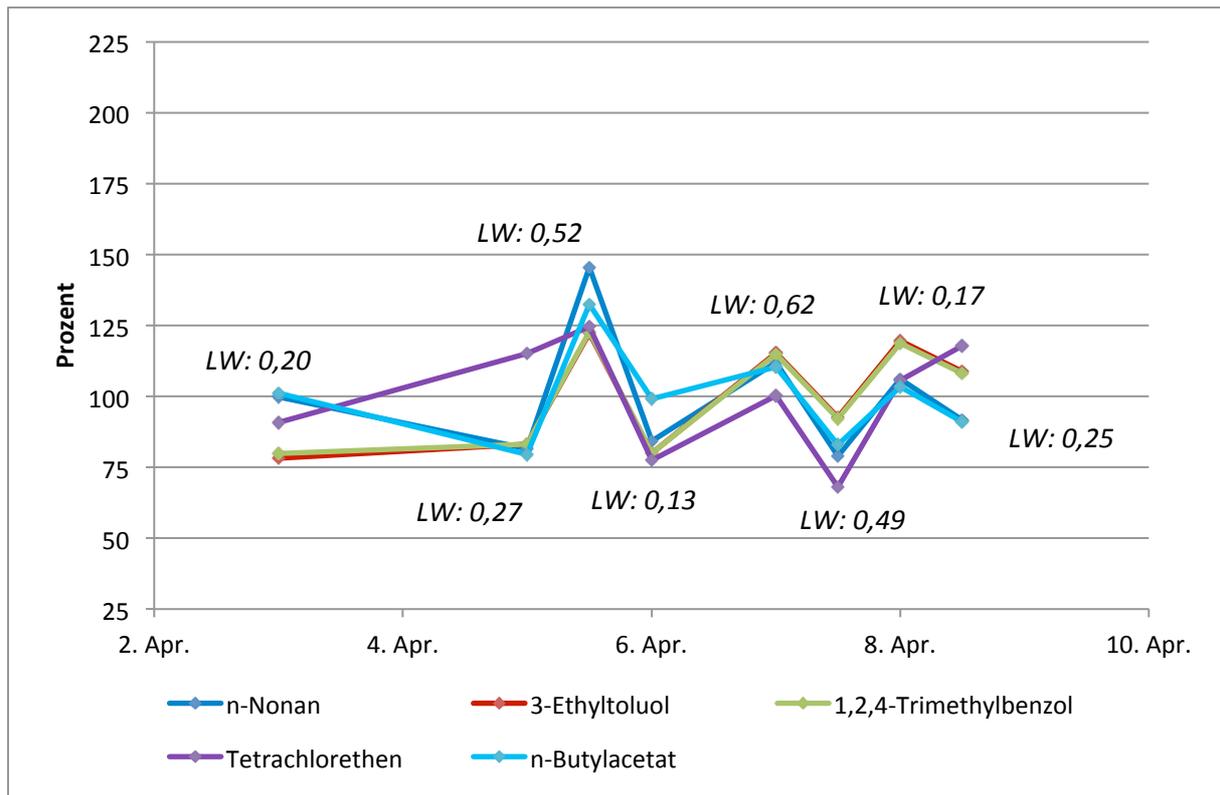


Abbildung 36: Abweichung der einzelnen VOC-Konzentrationen vom Mittelwert M1

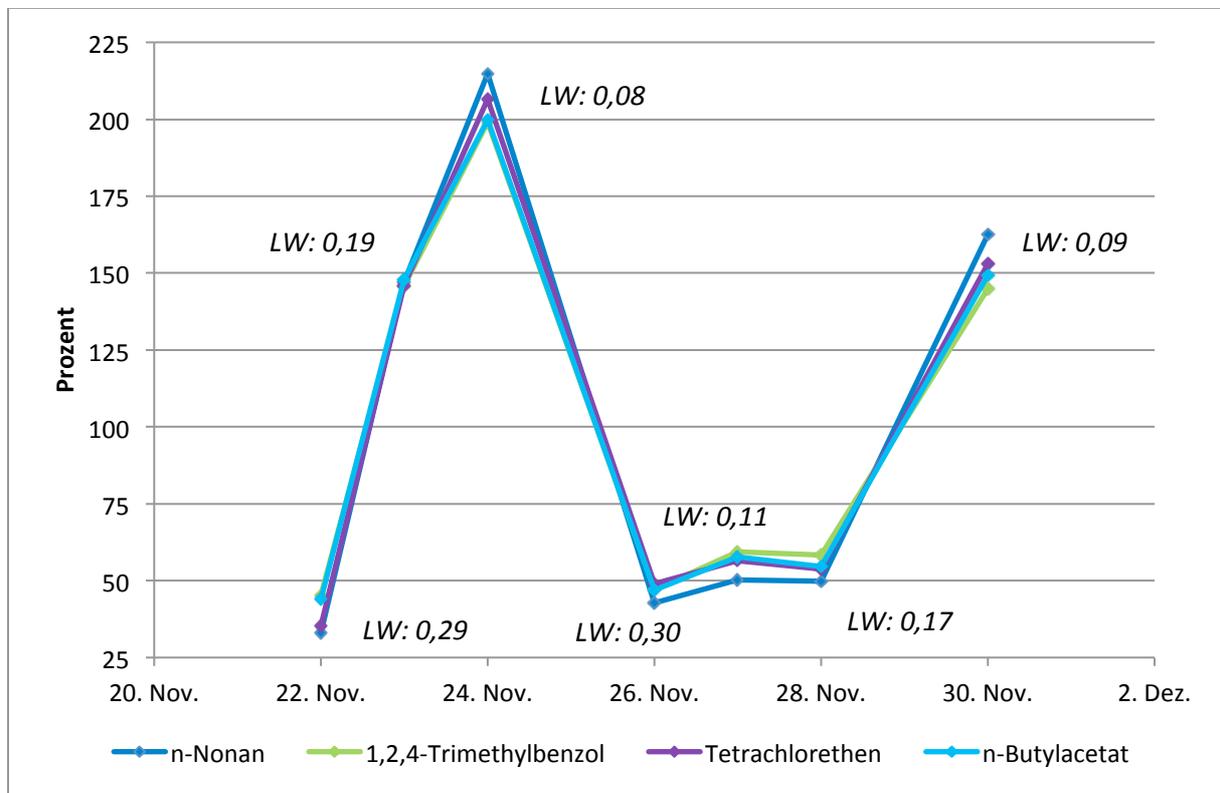


Abbildung 37: Abweichung der einzelnen VOC-Konzentrationen vom Mittelwert M2

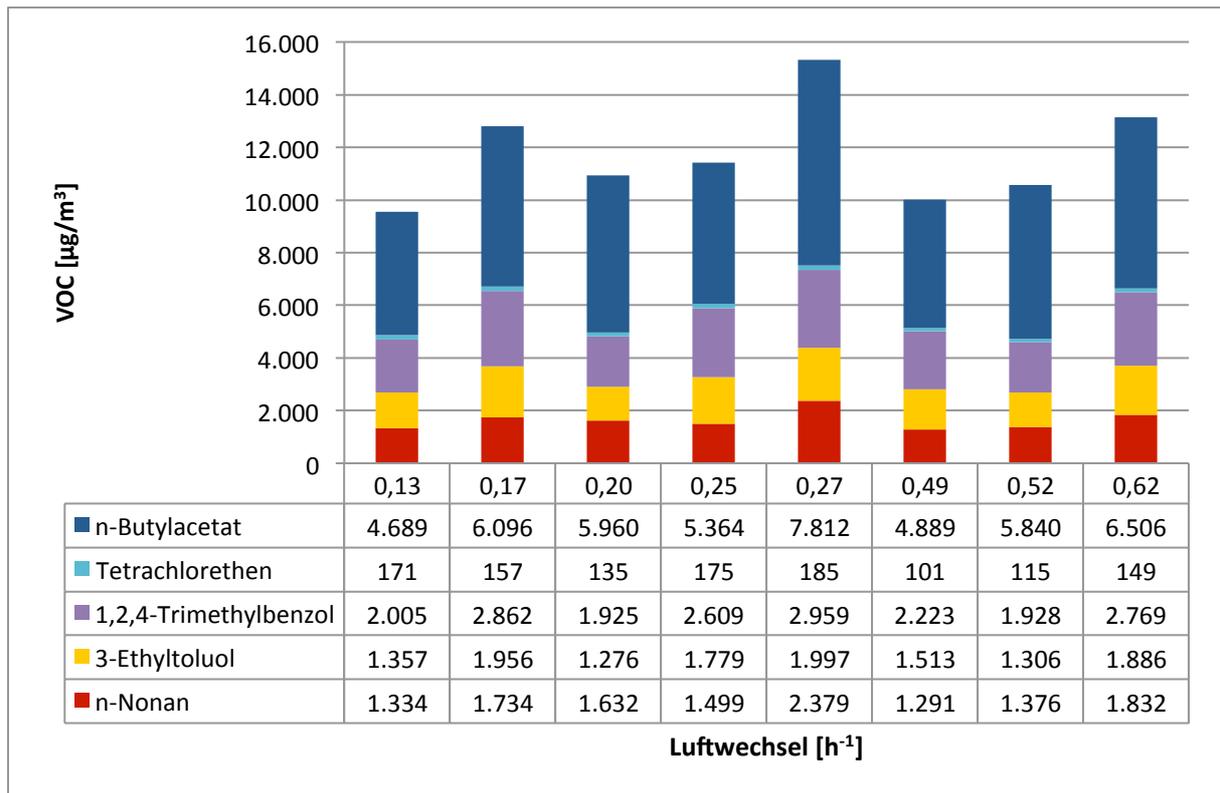


Abbildung 38: Abhängigkeit der einzelnen VOC-Konzentrationen vom Luftwechsel M1

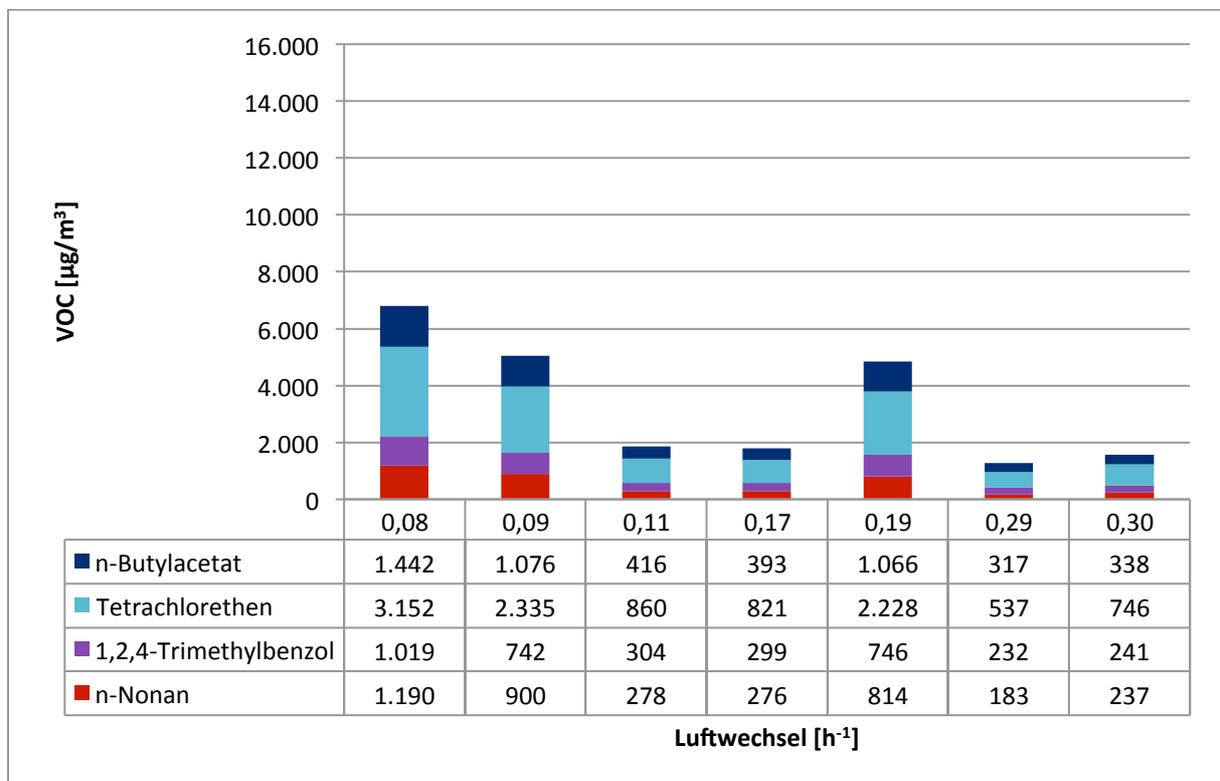


Abbildung 39: Abhängigkeit der einzelnen VOC-Konzentrationen vom Luftwechsel M2

### **4.3.3 Abhängigkeit VOC-Konzentration von Innenraumtemperatur und Luftdruck**

Eine dominante Abhängigkeit zeigte sich während der zweiten Messreihe zwischen der gemessenen Gesamtkonzentration der flüchtigen organischen Verbindungen und der bei der Probenahme herrschenden Innenraumtemperatur (*Abbildung 41*).

Es konnte hier festgestellt werden, dass ein dominanter Zusammenhang zwischen sinkender Innenraumtemperatur und steigender VOC-Konzentration besteht. Bei der ersten Messreihe (*Abbildung 40*) konnten diese Tendenz in einem nur sehr geringen Ausmaß festgestellt werden.

Neben der Innenraumtemperatur wurde auch der, während der Messung herrschende, mittlere absolute Luftdruck in Zusammenhang mit der gemessenen VOC-Konzentration gesetzt. Bei der ersten Messreihe (*Abbildung 42*) zeigte sich keine Korrelation der Werte, bei der Messreihe 2 konnte eine Tendenz zu steigender VOC-Konzentration bei fallendem absolutem Luftdruck festgestellt werden (*Abbildung 43*).

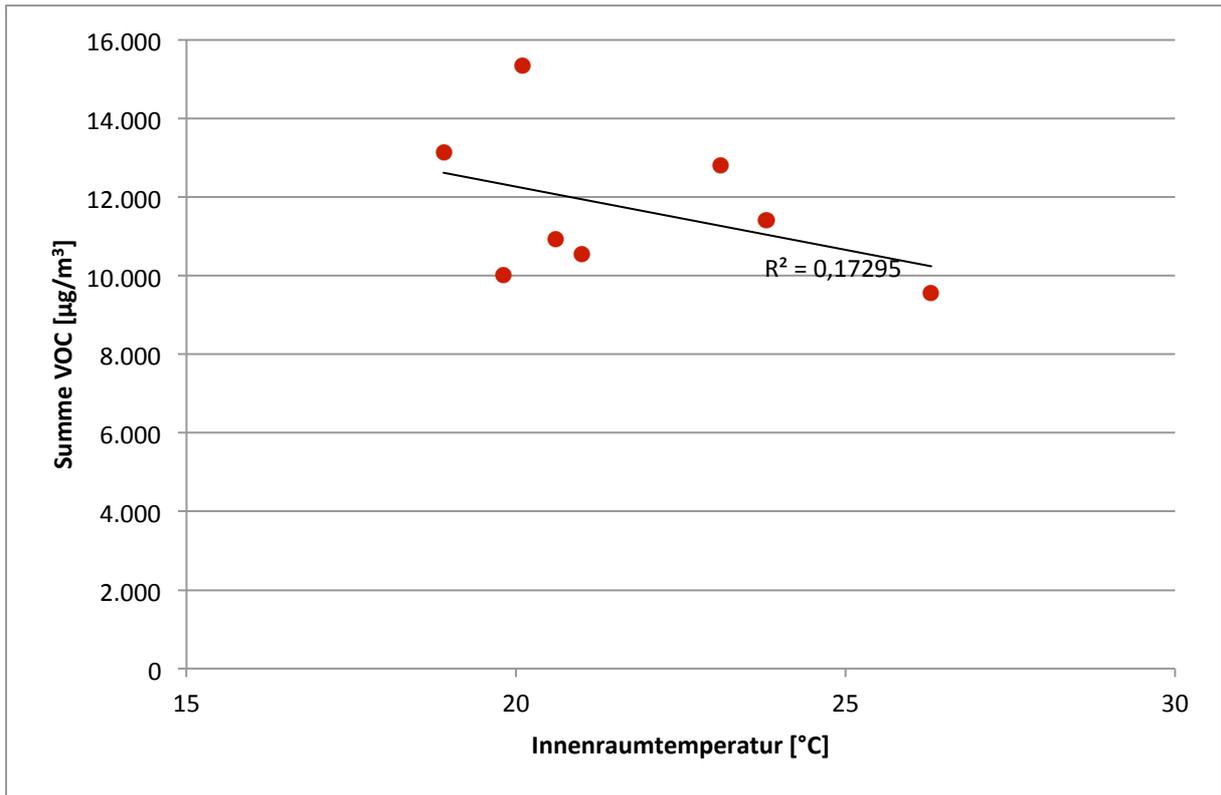


Abbildung 40: Abhängigkeit der VOC-Konzentration von der Innenraumtemperatur M1

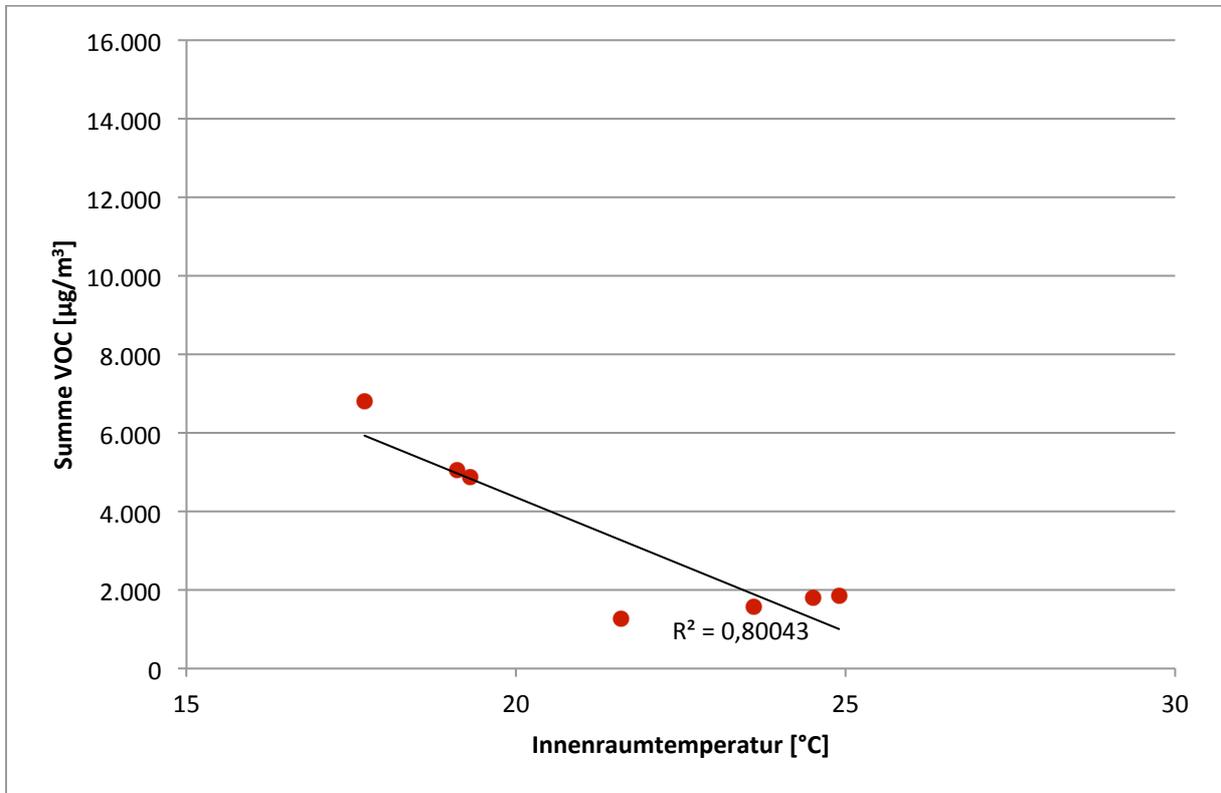


Abbildung 41: Abhängigkeit der VOC-Konzentration von der Innenraumtemperatur M2

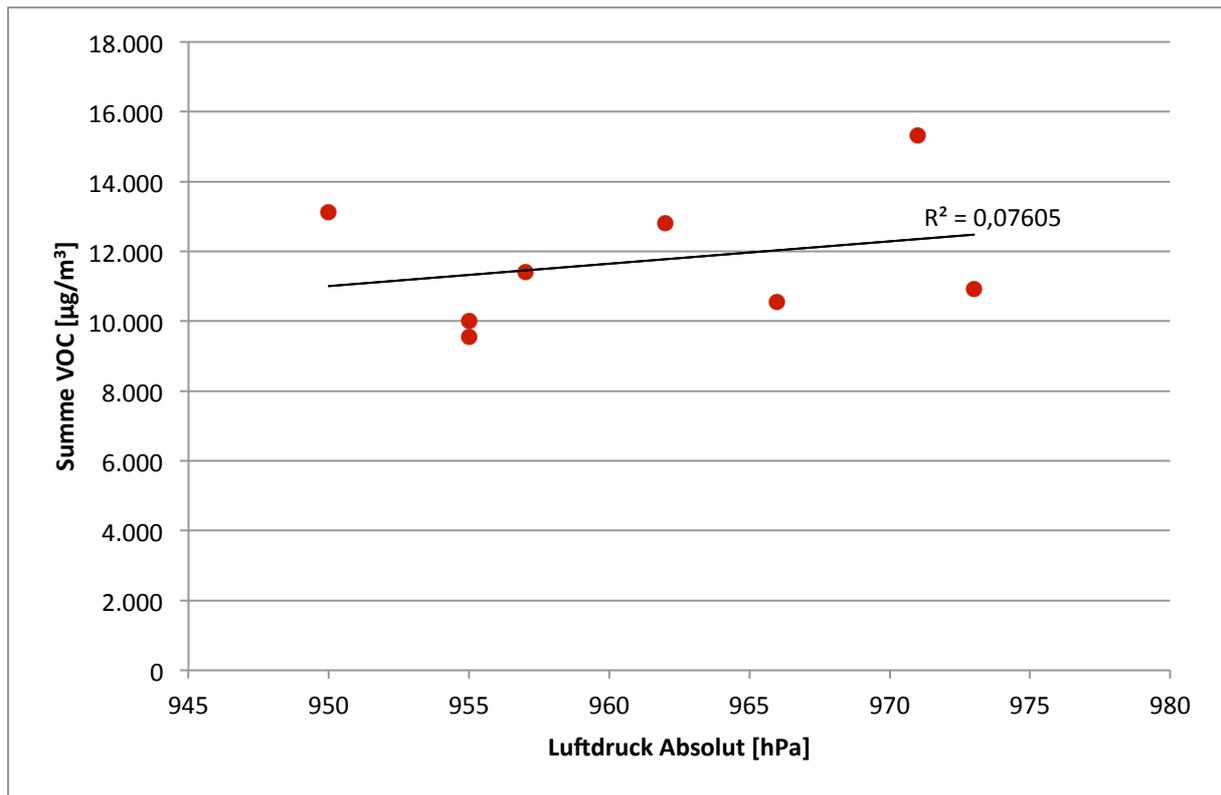


Abbildung 42: Abhängigkeit der VOC-Konzentration vom absoluten Luftdruck M1

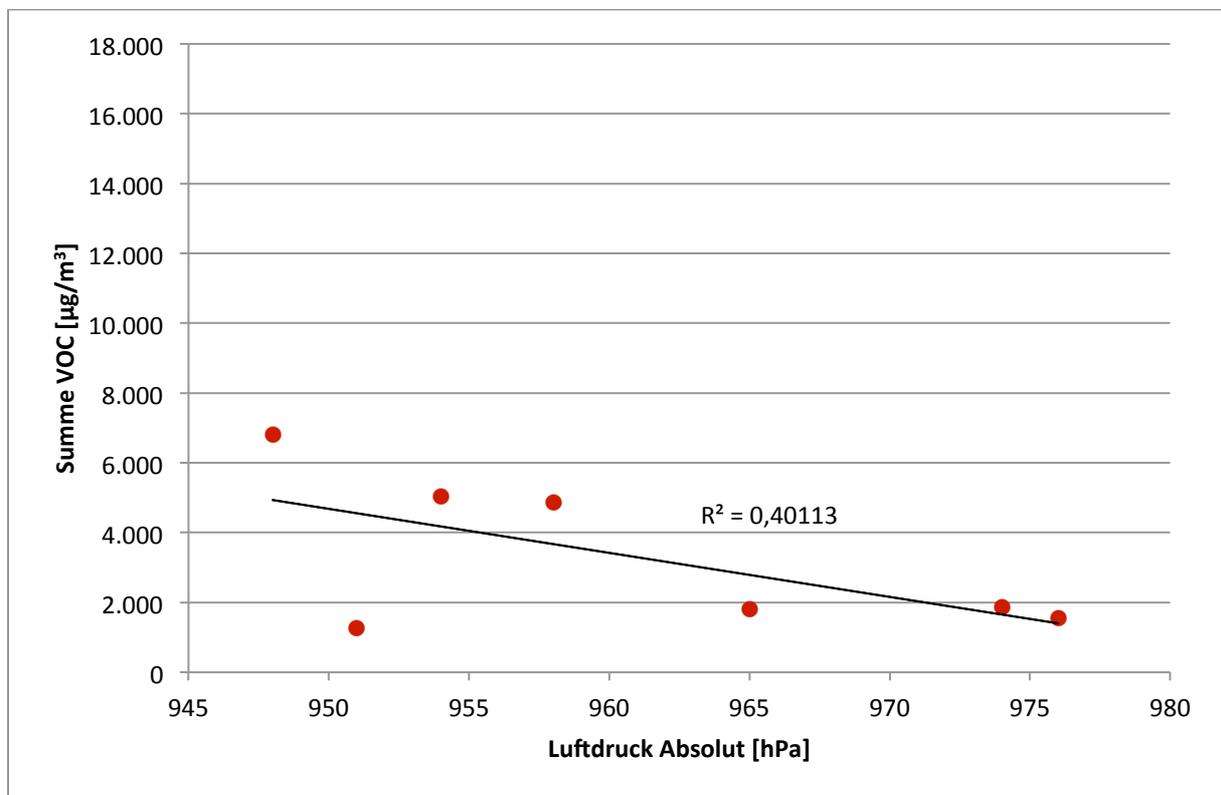


Abbildung 43: Abhängigkeit der VOC-Konzentration vom absoluten Luftdruck M2

#### 4.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der VOC-Messung

In der nachfolgenden *Tabelle 18* sind die Ergebnisse der VOC-Messungen zusammengefasst.

		Messzyklus M1	Messzyklus M2
Anzahl Messungen	[-]	8	7
Konz. – arithm. Mittel	[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	11.700	3.300
Standardabweichung	[-]	$\pm 1.800$	$\pm 2.100$
Konz. <sub>min</sub>	[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	9.600	1.300
Konz. <sub>max</sub>	[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	15.300	6.800
Konzentration Differenz min. – max.	[ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	5.700	5.500
Verhältnis Konz. <sub>max</sub> / Konz. <sub>min</sub>	[-]	1,6	5,2

Konz.                      Konzentration

Tabelle 18: Zusammenfassung der Ergebnisse der VOC-Messung

#### 4.4 Ergebnis der Untersuchung der Luftdurchlässigkeit der Raumhülle

In *Tabelle 19* sind die Messergebnisse der Luftdurchlässigkeitsbestimmung zusammengefasst. Insgesamt ergibt sich durch die Sanierungsmaßnahme eine Verringerung der Luftwechselzahl  $n_{50}$  um etwa 50 %.

		$n_{50}$	
		Vor Sanierung M1	Nach Sanierung M2
Luftwechselzahl Unterdruck $n_{50}$	[ $\text{h}^{-1}$ ]	17,4	8,9
Luftwechselzahl Überdruck $n_{50}$	[ $\text{h}^{-1}$ ]	15,9	8,3
Mittelwert Unter- und Überdruck $n_{50}$	[ $\text{h}^{-1}$ ]	<b>16,7</b>	<b>8,6</b>

Tabelle 19: Messergebnisse der Luftdurchlässigkeitsbestimmung

## 5 BEURTEILUNG DER MESSERGEBNISSE

### 5.1 Erkenntnisse zur Luftdurchlässigkeit des Raumes

#### 5.1.1 Auswirkungen auf den untersuchten Raum

Wie erwartet konnte die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle durch den Fenstertausch und den sachgemäßen Einbau des Stockrahmens deutlich verbessert werden.

Bereits bei der Voruntersuchung mit Hilfe des Differenzdruckmessverfahrens vor Beginn des zweiten Messzykluses zeigte sich eine deutlich Verbesserung der Dichtigkeit der Raumhülle. Der  $n_{50}$ -Wert reduzierte sich um etwa 50 Prozent, liegt allerdings mit einem Wert von  $8,6 \text{ h}^{-1}$  noch immer sehr hoch. Hypothetisch wurde mit einer höheren Dichtigkeit des untersuchten Raumes gerechnet.

Die vor dem Fenstertausch festgestellten Leckagen im Bereich der Bauanschlussfugen, entlang der Fensterflügel (siehe *Abbildung 44*) und bei der Durchführung des Gestänges für den Sonnenschutz, konnten nach der Montage des neuen Fensters nicht mehr festgestellt werden. Der trotzdem relativ hohe Leckagevolumenstrom nach dem Fenstertausch könnte auf die hölzerne Deckenkonstruktion gegenüber dem Keller zurückzuführen sein. Eine tatsächliche Beurteilung und Verbesserung der Luftdurchlässigkeit in diesem Bereich wäre allerdings nur mit einem massiven bautechnischen Eingriff möglich.



Abbildung 44: Leckageortung Fensterflügel (vor Fenstertausch)



Abbildung 45: Leckageortung Fußbodenkonstruktion (vor Fenstertausch)

Neben der Differenzdruckmessung zeigte auch die Messung nach der Konzentrations-Abklingmethode eine Reduzierung der durchschnittlichen, gleitenden Luftwechselzahl von  $0,35 \text{ h}^{-1}$  auf  $0,15 \text{ h}^{-1}$ , dies bedeutet eine Verbesserung um 57 Prozent. Die Verbesserung der Dichtigkeit des untersuchten Innenraums zeigt sich deutlich in der Gegenüberstellung der beiden Häufigkeitsverteilungen der Luftwechselzahlen (*Abbildung 14*) aus den beiden unterschiedlichen Versuchsreihen. Bei der zweiten Messreihe ist eine sehr geringe Standardabweichung zu beobachten, dies ist vor allem auch deshalb interessant, da

während der zweiten Messreihe am Beginn starke Windgeschwindigkeiten vorherrschten (die Windgeschwindigkeit konnte auf Grund der falschen Messergebnisse der Wetterstation nicht quantifiziert werden, es handelt sich dabei um eine rein subjektive Beobachtung).

Die Undichtigkeiten gegenüber dem Keller scheinen für den natürlich induzierten Luftwechsel einen wesentlich geringeren Einfluss zu haben als dies bei der Differenzdruckmessung der Fall war.

Generell konnte bei beiden Versuchsabläufen eine hohe Variation des Luftwechsels festgestellt werden. So lag das Verhältnis von dem höchsten gemessenen Wert zum niedrigsten bei der ersten Messreihe bei 14,1 bzw. bei der Zweiten bei 8,3. Die Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten gemessenen Wert liegt vor dem Fenstertausch bei  $1,05 \text{ h}^{-1}$  bzw.  $0,29 \text{ h}^{-1}$  nach dem Fenstertausch, dabei zeigt sich aber deutlich, dass sich die Bandbreite der Luftwechselzahlen  $n$  nach dem Fenstertausch um 60 Prozent reduziert hat.

Bei den Gegenüberstellungen der Luftwechselzahlen mit den Umgebungsparametern konnten, wenn überhaupt, nur bei der zweiten Messreihe leichte Tendenzen festgestellt werden, bei der Messung vor dem Fenstertausch konnten keine einfachen Zusammenhänge zwischen den Umgebungsparametern und der Luftwechselzahl erkannt werden. Bei der zweiten Messreihe nach dem Fenstertausch konnte beobachtet werden, dass tendenziell, allerdings in einem nur sehr geringen Umfang, mit steigender Druckdifferenz auch die Luftwechselzahl steigt (*Abbildung 18*), dieser Zusammenhang konnte auch in der Studie von Tappler et al. (2006) festgestellt werden.

Es stellt sich die Frage warum bei der Messreihe vor dem Fenstertausch keine erkennbaren Zusammenhänge zwischen den Umgebungsparametern und dem Luftwechsel erkannt werden konnte. Es erscheint so, als ob die hohe Undichtigkeit der Gebäudehülle so dominant ist, dass die Umgebungsparameter nur einen untergeordneten Einfluss auf den Luftwechsel haben.

Da nur ein Raum des Gebäudes auf den natürlichen Luftwechsel untersucht wurde, kann man allerdings davon ausgehen, dass die Luftwechselzahlen für das gesamte Gebäude betrachtet deutlich geringer ausfallen würden, da in diesem Fall interzonale Luftströmungen, wie in dem untersuchten Raum zwischen Gang, nicht zum Tragen kämen.

### 5.1.2 Auswirkungen der erhöhten Dichtigkeit der Raumhülle auf den Differenzdruck

Besonders interessant war bei der Auswertung der Luftwechselzahlen in Bezug auf die Druckdifferenz, dass die maximal auftretende Druckdifferenz zwischen Außenbereich und dem untersuchten Innenraum bei der Messung vor dem Fenstertausch einen Wert von 2 Pa nicht überschritten hat (*Abbildung 17*). Aus der *Abbildung 18* ist hingegen ersichtlich, dass bei der Messung nach dem Fenstertausch Druckdifferenzen bis zu 10 Pa auftraten. Im ersten Moment wurde der starke Wind, der teilweise bei der zweiten Messserie herrschte dafür verantwortlich gemacht. Bei der näheren Betrachtung konnte allerdings festgestellt werden, dass sich durch die undichte Gebäudehülle nur ein sehr geringer Differenzdruck aufbauen kann, dieser Zusammenhang kann mit der Gleichung für den Druckabfall an Blenden <sup>49</sup> (*Formel 5*) dargestellt werden.

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2$$

$\Delta p$	Druckdifferenz [Pa]
$\zeta$	Widerstandsbeiwert
$\rho$	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$v$	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

Formel 5: Druckabfall an Blenden

Setzt man nun für die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  den Quotienten aus Volumenstrom durch die Öffnung und die Fläche der Öffnung erhält man die Gleichung die in der *Formel 6* dargestellt ist.

$$\Delta p = \zeta \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left( \frac{\dot{V}}{A} \right)^2$$

$\Delta p$	Druckdifferenz [Pa]
$\zeta$	Widerstandsbeiwert
$\rho$	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$\dot{V}$	Volumenstrom [m <sup>3</sup> /s]
$A$	Fläche [m <sup>2</sup> ]

Formel 6: Druckabfall an Blenden umgeformt

<sup>49</sup> Recknagel et al., 2009, S. 282

Setzt man nun für  $\zeta$  einmal einen hohen Wert, also einen hohen Widerstand der sich durch die Dichtigkeit des Raumes ergibt, und einmal einen niedrigen Wert an, erhält man die Abhängigkeit Differenzdruck zu Luftwechsel, diese Abhängigkeit ist in *Abbildung 46* skizziert.

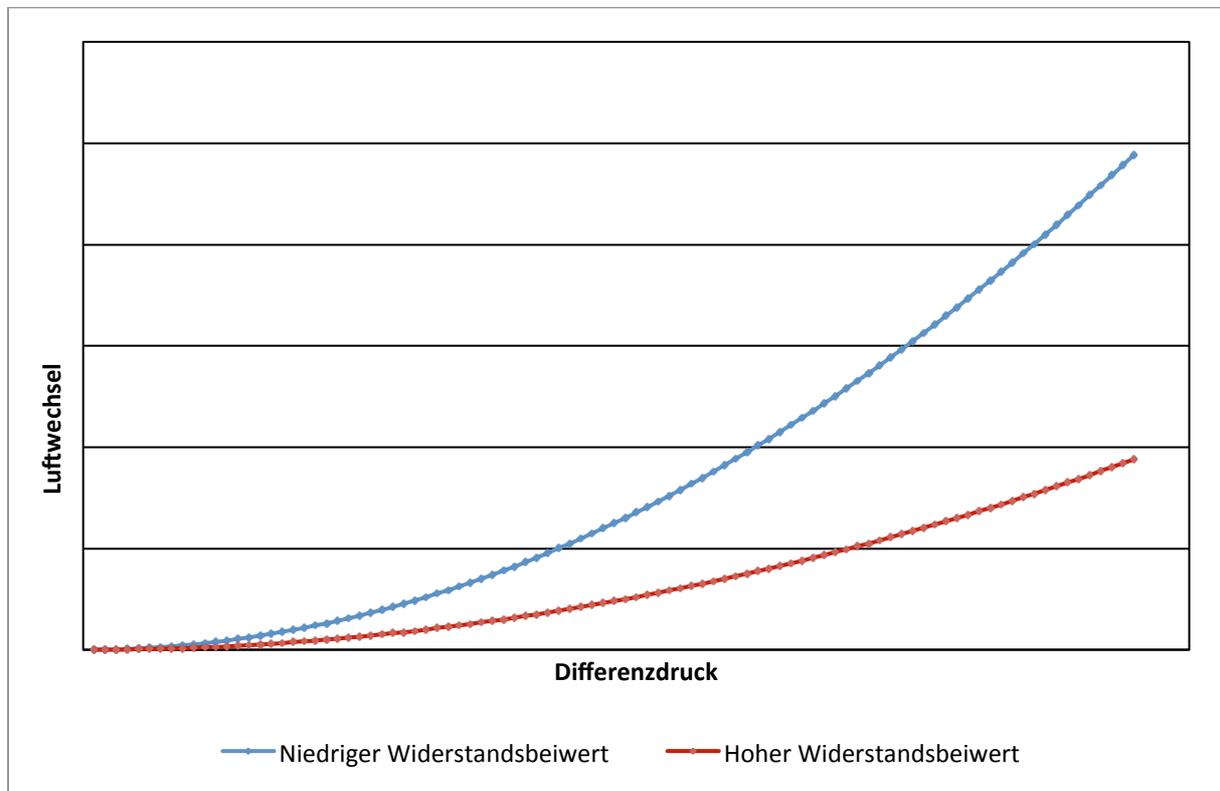


Abbildung 46: Zusammenhang Luftwechsel – Differenzdruck

Das bedeutet, dass in Räumen mit einer dichten Hülle ein größerer Differenzdruck notwendig ist, damit sich derselbe Luftwechsel wie in einem Raum mit einer undichten Hülle einstellt.

## 5.2 Auswirkungen der Messergebnisse auf das Innenraumklima

### 5.2.1 CO<sub>2</sub> – Konzentration im Innenraum

Seit Jahrzehnten hat sich Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) als die Leitgröße für die Luftgüte in der Klima- und Lüftungstechnik etabliert. Bereits in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts beschäftigte sich der deutsche Hygieniker *Max von Pettenkofer* mit Luftwechsel, Luftverunreinigung, Schadstoffgehalt der Luft und der CO<sub>2</sub>-Konzentration in Räumen. Die Kohlenstoffdioxidkonzentration im Innenraum, die hauptsächlich menschlichen Ursprungs ist, hängt von der Belegungsdichte, der Raumgröße und der Belüftungssituation ab. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration gilt vor allem deshalb als guter Indikator für die Güte der Innenraumluft, da mit einem Anstieg der Kohlenstoffdioxidkonzentration auch ein Anstieg der Geruchsbelästigung durch menschliche Ausdünstungen zu beobachten ist. Die vom Menschen abgegebene CO<sub>2</sub>-

Menge steht nicht nur mit der menschlichen Geruchsintensität in Zusammenhang, sondern auch direkt mit der Menge an flüchtigen organischen Verbindungen, die zu einem Teil als Träger des vom Körper ausgehenden Geruchs angesehen werden kann. Pettenkofer ermittelte in umfangreichen Versuchen den CO<sub>2</sub>-Gehalt in verschiedenen Räumen und Gebäuden und setzte die Messergebnisse mit der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Außenbereich in Verhältnis. Als Schlussfolgerung seiner Untersuchungen zeigte sich, dass 0,1 Volumensprozent von Kohlenstoffdioxid als Indikator für eine gute Raumlufthinherangezogen werden kann. Dieser Wert von 0,1 Vol.-Prozent, oder auch 1.000 ppm, ist als „Pettenkofer-Zahl“ bekannt und gilt als Basis für Berechnungen und Regelungen im Bereich der Raumluftechnik<sup>50</sup>.

Es stellt sich die Frage, in wie weit die Sanierungsmaßnahmen einen Einfluss auf die Kohlenstoffdioxidkonzentration im untersuchten Raum haben. Mit einer Massenbilanzgleichung (Formel 7) kann der Verlauf des Konzentrationsanstieges von Kohlenstoffdioxid im Innenraum darstellen werden.

$$\dot{K} + \dot{V} \cdot k_a = \dot{V} \cdot k_i$$

$\dot{K}$  Schadstoffproduktion im Raum [m<sup>3</sup>/h]

$\dot{V}$  Zugeführtes Luftvolumen [m<sup>3</sup>/h]

$k_a$  Schadstoffkonzentration der Außenluft [cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

$k_i$  Zulässige oder erwünschte Schadstoffkonzentration der Innenluft [cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

Formel 7: Massenbilanz eines zu lüftenden Raums<sup>51</sup>

Der Sauerstoffverbrauch eines Menschen hängt von der Atemfrequenz und damit dem Betätigungsgrad ab. Kennt man die Aktivität einer Person, die in [met] angegeben wird, kann man auf die CO<sub>2</sub>-Produktion eines Menschen schließen. Dabei entsprechen z.B. 1,2 met leichter körperlicher Anstrengung einer Normalperson. Bei diesem Anstrengungsgrad werden ca. 0,5 m<sup>3</sup> Luft veratmet. In der ausgeatmeten Luft befinden sich danach rund 4 Vol.-Prozent CO<sub>2</sub>. Mit der Massenbilanzgleichung kann der erforderliche Zuluftstrom  $\dot{V}$ , der notwendig ist, damit sich eine bestimmte Kohlenstoffdioxidkonzentration einstellt, bestimmt werden. Dabei ist die Menge des im Raum, während einer Zeiteinheit anfallenden

<sup>50</sup> vgl. BMLFUW (2006) Richtlinie zur Bewertung der Innenraumlufth, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumlufth am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) – Physikalische Faktoren Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter, S. 6-30

<sup>51</sup> Recknagel et al., 2009, S.104f

schädlichen Stoffes  $\dot{K}$  zu züglich der mit der Außenluft zugeführten Stoffmenge, dem  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Abluft bzw. Raumluft gleichzusetzen (*Abbildung 47*):

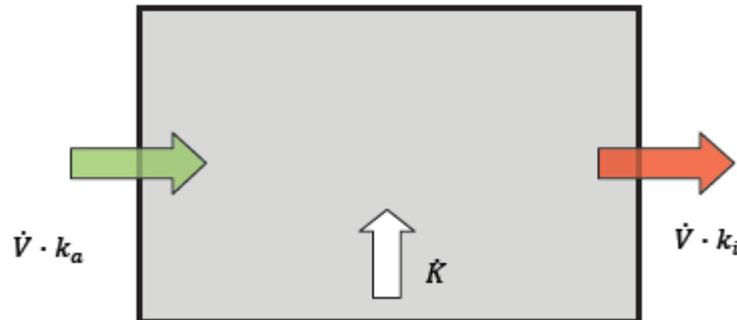


Abbildung 47: Schadstoffbilanz eines zu lüftenden Raums (Quelle: Recknagel et al. <sup>52</sup>)

Der zeitliche Verlauf der  $\text{CO}_2$ -Konzentration über eine bestimmte Zeitspanne, kann mit der *Formel 8: Zeitlicher Verlauf der  $\text{CO}_2$ -Konzentration* <sup>53</sup> ermittelt werden. Wobei die 3 Summanden folgendes bedeuten:

$$I = (V_{\text{spez.,Raum}} - V_{\text{Zu}} - V_{\text{Atmung}}) \cdot k_i$$

$$II = V_{\text{Zu}} \cdot k_a$$

$$III = V_{\text{Atmung}} \cdot k_{\text{CO}_2}$$

$$k_{i,\text{neu}} = \frac{I + II + III}{V_{\text{spez.,Raum}}}$$

$V_{\text{Zu}}$	Zugeführtes Luftvolumen [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]
$V_{\text{spez.,Raum}}$	Spezifisches Raumvolumen pro Person [ $\text{m}^3/\text{Person}$ ]
$V_{\text{Atmung}}$	Veratmetes Luftvolumen pro Person [ $\text{m}^3/\text{Person}$ ]
$k_a$	Schadstoffkonzentration der Außenluft [ $\text{cm}^3/\text{m}^3$ ]
$k_{i,\text{neu}}$	Neue Zulässige oder erwünschte Schadstoffkonzentration der Innenluft [ $\text{cm}^3/\text{m}^3$ ]
$k_{\text{CO}_2}$	Konzentration von reinem $\text{CO}_2$ [ $\text{cm}^3/\text{m}^3$ ]

Formel 8: Zeitlicher Verlauf der  $\text{CO}_2$ -Konzentration

<sup>52</sup> Recknagel et al., 2009, S.104

<sup>53</sup> Keßling, 2008, S. 117-120

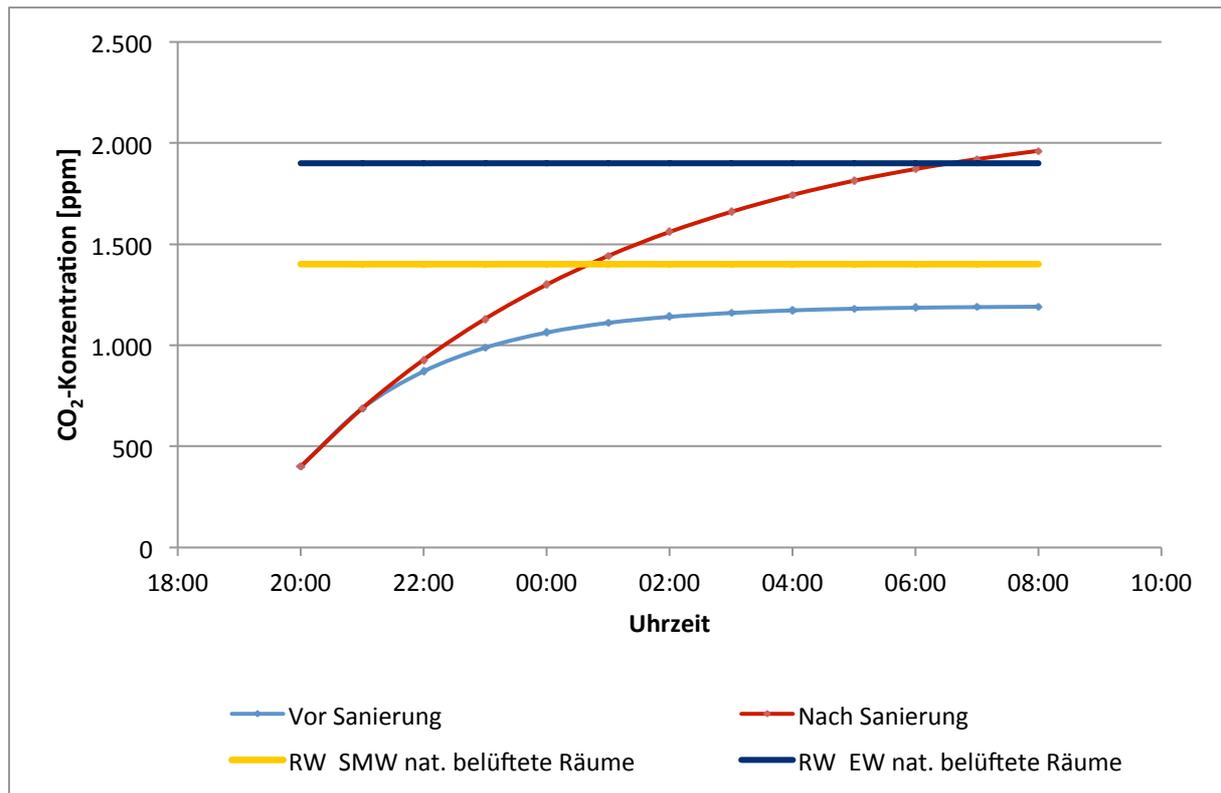
Setzt man nun die gemittelte Luftwechselzahl aus den beiden Messreihen vor und nach der Sanierung in die Formel ein, erhält man den Verlauf der Schadstoffkonzentrationen (*Tabelle 20*).

	<b>CO<sub>2</sub>-Konzentration M1</b> [ppm]	<b>CO<sub>2</sub>-Konzentration M2</b> [ppm]
20:00	400	400
21:00	688	688
22:00	871	929
23:00	988	1.131
00:00	1.063	1.300
01:00	1.111	1.442
02:00	1.141	1.561
03:00	1.160	1.660
04:00	1.173	1.744
05:00	1.181	1.814
06:00	1.186	1.872
07:00	1.189	1.921
08:00	1.191	1.962

Tabelle 20: Zeitlicher Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration M1 und M2

In *Abbildung 48* wird eine Nachtphase eines Wintertages abgebildet. Da es sich beim untersuchten Raum um einen Schlafraum handelt, wurde für eine Person eine CO<sub>2</sub>-Emission von 12 l/h angesetzt. Als Ausgangswert der CO<sub>2</sub>-Konzentration wurde ein Wert von 400 ppm (Innenluft und Außenluft) angenommen. Für das zugeführte Volumen wurden die ermittelten durchschnittlichen Luftwechselzahlen (0,35 und 0,15 h<sup>-1</sup>) mit dem Raumvolumen multipliziert.

In *Abbildung 48* ist deutlich zu sehen, dass sich bei der verbesserten Raumhülle eine viel höhere CO<sub>2</sub>-Konzentration einstellt, als im unsanierten Zustand. Durch den hohen Luftwechsel von 0,35 h<sup>-1</sup> vor dem Fenstertausch stellt sich nach ca. 5 Stunden eine Gleichgewichtskonzentration von knapp 1.200 ppm CO<sub>2</sub> ein, im Gegensatz dazu steigt die Schadstoffkonzentration im sanierten Zustand stetig an und erreicht nach etwa 14 Stunden einen Wert von 2.000 ppm.



RW SMW nat. belüftete Räume Richtwert gleitender Stundenmittelwert natürlich belüftete Räume (BMLFUW)

RW EW nat. belüftete Räume Richtwert Einzelwerte natürlich belüftete Räume (BMLFUW)

Abbildung 48: Zeitlicher Verlauf der CO<sub>2</sub>-Konzentration M1 und M2

Im Gegensatz zu den positiven Aspekten der verbesserten Raumhülle in energetischer Hinsicht, stellt die hohe Dichtheit in Bezug auf die Raumlufthygiene eine Verschlechterung der Ausgangslage dar. Der hygienisch notwendige Luftwechsel kann nicht mehr gewährleistet werden. Dies betrifft gerade sensible Bereiche wie Schlafräume, in denen man sich 6 bis 8 Stunden pro Tag aufhält und die nicht ständig gelüftet werden können.

### 5.2.2 Schadstoffbelastung im Innenraum

Neben der Ermittlung des natürlichen Luftwechsels war die Untersuchung des Innenraumes auf Schadstoffkonzentrationen ein zentraler Punkt der Studie. Dabei wurde die Formaldehydkonzentration, die sich durch die Möblierung und die zusätzlich aufgestellten Spanplatten im Innenraum eingestellt hat, ermittelt. Zusätzlich wurden die zur Verdampfung gebrachten flüchtigen organischen Verbindungen in der Innenraumluft gemessen.

Durch die Messergebnisse soll beurteilt werden, in wie weit die dichtere Gebäudehülle einen Einfluss auf die Schadstoffkonzentration im Innenraum hat. Außerdem sollen die so ermittelten Messwerte Auskunft darüber geben, ob eine Reproduzierbarkeit von

Innenraumschadstoffmessungen möglich ist und ob bei der Messung von Innenraumschadstoffen eine zusätzliche Bestimmung des Luftwechsels erforderlich ist.

Grundsätzlich wurde erwartet, dass die Konzentration von Formaldehyd bei verbesserter Dichtigkeit der Raumhülle ansteigt und eine Abhängigkeit vom Luftwechsel erkennbar wird, sodass geringere Schadstoffkonzentrationen bei höherem Luftwechsel auftreten.

Formaldehyd liegt aufgrund seiner weiten Verbreitung, vor allem in der Möbelindustrie, nahezu in jeden Innenraum vor und gilt als klassischer Innenraumschadstoff. Die bei den Messungen vor und nach dem Fenstertausch festgestellten Formaldehydkonzentrationen fallen sehr gering aus und liegen unter dem Richtwert des Umweltministeriums (BMLFUW) und der Österreichische Akademie der Wissenschaften, die einen Maximalwertwert von  $0,10 \text{ mg/m}^3$ <sup>54</sup> vorsehen. Allerdings wird deutlich, dass sich durch den Fenstertausch und der damit verbesserten Dichtigkeit der Raumhülle, ein Anstieg der mittleren Formaldehydkonzentration um 30 Prozent einstellt.

Die Schwankungsbreite der Formaldehydkonzentrationen während eines Messzykluses, befindet sich in einem Band von 0,030 ppm zwischen dem niedrigsten und dem höchsten gemessenen Wert. Eine Korrelation zwischen dem Luftwechsel und den unkorrigierten Messwerten ist nicht erkennbar (*Abbildung 28* und *Abbildung 29*).

Für die nach der Andersen-Formel korrigierten Werte in der ersten Messreihe (*Abbildung 30*) zeigt sich eine mögliche Tendenz, wobei allerdings der einzelne Wert, der signifikant über dem Niveau der anderen Werte lag, bei einer relativ niedrigen Raumtemperatur erzielt wurde, wodurch sich der korrigierte Wert stark erhöhte. Einzig bei den nach Andersen korrigierten Werten in der zweiten Messreihe (*Abbildung 31*) könnte ein dominanter einfacher Zusammenhang, also geringere Formaldehydkonzentrationen bei höherem Luftwechsel zu erkennen sein.

Ein möglicher dominanter Zusammenhang zeigt sich zwischen steigender Raumluftkonzentration von Formaldehyd und der Innenraumtemperatur (*Abbildung 32* und *Abbildung 33*), insbesondere bei den Werten der zweiten Messreihe. Dies kann durch die Freisetzungsvorgänge von Formaldehyd aus den Holzspanplatten erklärt werden. Dieser Effekt ist dadurch zu erklären, dass steigende Temperaturen auch die Freisetzung von

---

<sup>54</sup> BMLFUW (2009) Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) - Formaldehyd, S.30

Formaldehyd begünstigen<sup>55</sup>. Daher ist daraus zu schließen, dass das Innenraumklima einen möglichen Einfluss auf die Raumluftkonzentration von Formaldehyd hat. Dieser Effekt wird wahrscheinlich auch deshalb besonders deutlich, da die Formaldehydkonzentrationen in einem niedrigen Bereich lagen und teilweise nahe an der Bestimmungsgrenze von 0,010 ppm lagen.

Eine weitere Ursache für den, wenn überhaupt vorhandenen, nur geringen Zusammenhang zwischen Luftwechsel und Formaldehydkonzentration könnten auch Adsorptionseffekte sein. Bei erhöhtem Luftwechsel und der damit verbundenen geringeren Formaldehydkonzentration in der Innenraumluft, kann zuvor eingelagertes Formaldehyd aus Sorptionsflächen wie zum Beispiel Wänden vermehrt abgegeben werden und zu einem raschen Anstieg der Formaldehydkonzentration im Innenraum führen. Ähnliche Ergebnisse zeigten sich auch in einer vergleichbaren Studie zur Bestimmung der Formaldehydkonzentration in Fertigteilhäusern (Tappler et al. 1997). Hierbei stieg die Schadstoffkonzentration nach einem Luftaustausch viel schneller als erwartet wieder auf den Ausgangswert an.

Neben Formaldehyd finden sich auch flüchtige organische Verbindungen als Luftschadstoffe in Innenräumen. Um die Vorgänge der Raumluftkonzentration im Messraum, in Bezug auf den Luftwechsel, beurteilen zu können, wurden im Messraum verschiedene flüchtige organische Verbindungen zur Verdampfung gebracht. Ähnlich wie bei Formaldehyd war die Hypothese, dass bei steigendem Luftwechsel mit einer Reduktion der VOC-Konzentration zu rechnen ist.

Tatsächlich zeigte sich jedoch, dass bei der Messreihe vor dem Fenstertausch (*Abbildung 34*) kein einfacher Zusammenhang zwischen dem Luftwechsel und der gemessenen Gesamtkonzentration flüchtiger organischer Verbindungen bestand. Bei der zweiten Messreihe (*Abbildung 35*) konnte ein möglicher tendenzieller Zusammenhang festgestellt werden. Es ergab sich eine breite Varianz zwischen der höchsten und niedrigsten gemessenen VOC-Konzentration, bei der Messung vor dem Fenstertausch lag das Verhältnis vom niedrigsten zum höchsten Messwert bei 1,6, und bei der Messung nach dem Fenstertausch sogar bei 5,4. Somit muss eine zurzeit unbekannte Einflussgröße bestehen, die eine derart hohe Varianz der Schadstoffkonzentration bewirkt.

---

<sup>55</sup> vgl. BMLFUW (2009) Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) - Formaldehyd, S.8

Es zeigte sich, dass keine Anreicherung der VOCs über die Zeit im untersuchten Raum stattfand, sondern dass die Konzentrationen der VOCs über den gesamten Versuchszeitraum stark nach oben und unten schwankten. Weiters ist zu sehen, dass sich das Verhältnis der Konzentrationen der einzelnen VOC-Verbindungen zu einander nahezu immer gleich verhalten hat, ausgenommen Tetrachlorethen (*Abbildung 36*), deren Konzentration während der ersten Messreihe einige Male vom Verhältnis zu den anderen Substanzen abwich. Bei der zweiten Messreihe (*Abbildung 37*) ergab sich keine erkennbare Abweichung der Konzentration von Tetrachlorethen. Es war die Hypothese, dass der erhöhte Luftwechsel vor der Sanierung einen Einfluss auf die Konzentration der einzelnen VOC-Verbindungen hat, dies wurde allerdings durch die Messungen nicht bestätigt. Es bestehen jedoch, derzeit noch unbekannte Einflussfaktoren, die die Höhe der Konzentrationen der VOCs beeinflussen.

Tendenziell zeigte sich, dass sich bei den Messungen vor dem Fenstertausch eine größere Varianz des Verhältnisses der verschiedenen VOC-Verbindungen zueinander einstellte als nach dem Fenstertausch. Bei der zweiten Messreihe ergab sich zwar eine absolut größere Abweichung vom Mittelwert der Gesamtkonzentration als bei der ersten Messreihe, das Verhältnis der Einzelkonzentrationen zueinander lag dafür in einem sehr engen Spektrum.

Auffällig war der dominante Einfluss der Innenraumtemperatur auf die gemessene Gesamtkonzentration der flüchtigen organischen Verbindungen bei der zweiten Messreihe. Die gemessene VOC-Konzentration stieg hier mit fallender Innenraumtemperatur, (*Abbildung 41*). Für dieses Phänomen konnte keine plausible Erklärung gefunden werden.

Neben der Bestimmung der Abhängigkeit der Konzentration der Innenluftschadstoffe vom Luftwechsel sollte auch eine Beurteilung der Reproduzierbarkeit von Luftschadstoffmessungen erfolgen. Die breite Variation der Messergebnisse, vor allem bei der Ermittlung der VOC-Konzentrationen, zeigt eindeutig, dass eine Einzelmessung nur unzureichend Aussage über die möglichen Konzentrationen eines Luftschadstoffes in einem realen Messraum geben kann. Dies betrifft insbesondere Messungen, die zur Überprüfung der Einhaltung von Richt- und Grenzwerten durchgeführt werden. Es konnte kein Umgebungsparameter identifiziert werden, mit dessen Hilfe ein Rückschluss vom aktuellen Luftwechsel auf eine berechnete Durchschnittskonzentration der Luftschadstoffe möglich wäre.

Es muss allerdings angemerkt werden, dass durch die geringe Anzahl von Messungen und die Beschränkung der Untersuchung auf nur einen Raum eine allgemeine Aussage nicht bzw. nur sehr bedingt möglich war.

Im Gegensatz zu den positiven Aspekten der verbesserten Raumhülle in energetischer Hinsicht, stellt die hohe Dichtigkeit in Bezug auf die Belastung mit Innenraumschadstoffen eine Verschlechterung der Ausgangslage dar. Beim Rauminhaltsstoff Formaldehyd zeigte sich eine Erhöhung der Schadstoffkonzentration durch die dichte Raumhülle um etwa 30 Prozent. Das bedeutet, dass zur Erreichung der Konzentrationswerte, wie sie vor dem Fenstertausch waren, ein erhöhter Lüftungsbedarf notwendig ist. Dies steht allerdings im Gegensatz zur erwünschten Reduzierung der Lüftungswärmeverluste.

Die gewonnene hohe Dichtigkeit der Raumhülle und die dadurch erhöhte Schadstoffbelastung im Innenraum erfordert eine umgehende Beratung und Information des Bauwerbers durch die Planer und die ausführenden Gewerke, um zumindest die Qualität der Innenraumluft vor den Sanierungsmaßnahmen zu gewährleisten und um gesundheitliche Schäden bei Bewohnern zu vermeiden.

## **5.3 Auswirkungen der Messergebnisse auf den Energieverbrauch**

### **5.3.1 Lüftungswärmeverluste**

Der spezifische Wärmeverlust eines Gebäudes ergibt sich aus den Transmissionswärmeverlusten über die Außenbauteile und dem Lüftungswärmeverlust. Der spezifische Wärmeverlust durch Lüftung setzt sich aus dem hygienisch notwendigen Luftaustausch, der stark vom Benutzerverhalten abhängig ist, und aus dem natürlichen Luftwechsel über Infiltration durch Undichtigkeiten zusammen. Der natürliche Luftwechsel ist eine maßgebende Einflussgröße für die Ermittlung des Lüftungswärmeverlustes bei Gebäuden. Deshalb sollte der natürliche Luftwechsel so gering als möglich gehalten werden.

Bei der Ermittlung des Wärmeverlusts eines Gebäudes, das nicht mit einer mechanischen Be- und Entlüftungsanlage versehen ist, wird bei der Ermittlung des Lüftungswärmeverlustes der natürliche und der hygienisch notwendige Luftwechsel pauschal mit einer Luftwechselzahl  $n = 0,40 \text{ h}^{-1}$  angesetzt<sup>56</sup>. Mit dieser pauschalen Zahl werden der hygienische und der natürliche Luftwechsel gemeinsam bei der Ermittlung des Lüftungswärmeverlustes, abgedeckt. Bei Bestandsgebäuden mit einer großen Zahl an Undichtigkeiten scheint dieser Wert als durchaus realistisch. Hingegen zeigt sich, durch die Messergebnisse der gegenständlichen Studie und anderer (z.B. Tappler et al. 2006) bestätigt, dass sich bei modernen Gebäuden bzw. sanierten Objekten ein viel geringerer

<sup>56</sup> NÖ Landesregierung, 2006, S. 15

natürlicher Luftwechsel einstellt. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass ein Raum nicht durchgehend benutzt wird und somit ein stetiger hygienischer Luftaustausch als nicht notwendig zu betrachten ist bzw. praktikabel erscheint.

Der Lüftungswärmeverlust (*Formel 9*) eines Gebäudes bzw. Gebäudeteiles errechnet sich nach folgender Formel:

$$Q_V = V_R \cdot n \cdot c_{air} \cdot \Delta\theta \cdot t$$

$Q_V$	Lüftungswärmeverlust [Wh]
$V_R$	Nettoraumvolumen [m <sup>3</sup> ]
$n$	Luftwechselzahl [h <sup>-1</sup> ]
$c_{air}$	Spezifische Wärmekapazität von Luft [Wh/m <sup>3</sup> K]
$\Delta\theta$	Temperaturdifferenz Innen – Außen [K]
$t$	Zeit [h]

Formel 9: Berechnung des Lüftungswärmeverlustes

Zur Ermittlung der Lüftungswärmeverluste im Messraum wurden folgende Annahmen getroffen:

Für die Luftwechselzahl  $n$  wurde nur der natürliche Luftwechsel betrachtet, der hygienisch notwendige Luftwechsel, der stark vom Nutzerverhalten abhängig ist, wurde vernachlässigt. Ebenso wird davon ausgegangen, dass der Luftwechsel ausschließlich über die Außenbauteile erfolgt. Für die Temperaturdifferenz und den Zeitraum können die Heizgradtage (3885 Kd/a<sup>57</sup>) für den Standort herangezogen werden. Die spezifische Wärmekapazität von Luft beträgt 0,33 Wh/m<sup>3</sup>K.

		Lüftungswärmeverluste	
		Vor Sanierung	Nach Sanierung
Verluste $Q_V$	[kWh/a]	442	189
Verluste $Q_{VWFL}$	[kWh/m <sup>2</sup> <sub>WFL</sub> a]	34	15
<b>Energieersparnis</b>			<b>56 %</b>

WFL Wohnnutzfläche

Tabelle 21: Lüftungswärmeverluste

<sup>57</sup> NÖ Landesregierung, 2006, S. 34

Unter diesen Annahmen ergibt sich eine Reduzierung der Lüftungswärmeverluste im untersuchten Innenraum von 253 kWh/a (*Tabelle 21*).

Der durch die verbesserte Dichte der Außenhülle reduzierte Luftwechsel trägt demnach entscheidend zur Energieeinsparung in einem Gebäude bei. Dies wird bei thermischen Sanierungen vor allem durch den Fenstertausch gewährleistet. Dazu tragen die modernen Fenster mit mehreren Dichtungsebenen und der Einbau des Stockrahmens mit Dichtungsbändern bei.

Aus energetischer Sicht ist somit die Abdichtung der Gebäudehülle ein wesentlicher Beitrag zur thermischen Optimierung eines Objektes und deshalb unumgänglich. Eine dichte Gebäudehülle bietet eine wirksame Möglichkeit, den Heizenergiebedarf in einem Gebäude zu reduzieren.

## **5.4 Auswirkung der Messergebnisse auf raumluftabhängige Feuerstätten**

Feuerstätten hatten seit jeher einen großen Einfluss auf den Luftwechsel in einem Raum. Bereits im 13. Jahrhundert wurden die ersten Rauchfänge in Häuser eingebaut<sup>58</sup>. Somit war es möglich, die schädlichen Verbrennungsprodukte von Feuerstätten aus den Innenräumen abzuführen.

Durch die Feuerstätte, die direkt im Aufenthaltsbereich des Menschen situiert war, wurde ständig frische Luft von Außen in den Aufstellungsraum eingebracht. Eine hohe Undichtigkeit der Raumhülle sorgt somit für genügend Verbrennungsluft für die Feuerstätte.

Heute befinden sich viele Feuerstätten in eigenen Aufstellungs- und Heizräumen, die über eine eigene Be- und Entlüftung verfügen und somit nicht mit der Innenraumluft in Verbindung stehen. Allerdings gibt es auch eine große Zahl von Wärmeerzeugern, die im Wohnungsverband aufgestellt sind. Dies betrifft vor allem den mehrgeschossigen Wohnbau mit dezentraler Wärmebereitstellung wie Gasthermen, Etagenheizungen und Einzelraumfeuerstätten. Diese Feuerstätten, sofern sie raumluftabhängig betrieben werden, entziehen die notwendige Verbrennungsluft dem Raumluftverbund. Das Nachströmen der Luft wird durch die große Anzahl an Undichtigkeiten gewährleistet.

Wird nun ein Raum durch die thermischen Sanierungsmaßnahmen gut abgedichtet, wird das Nachströmen von Luft erheblich behindert. Um dieselbe Luftmenge nachzufördern zu können, muss die Druckdifferenz deutlich erhöht werden, siehe dazu auch *Abbildung 46*.

---

<sup>58</sup> vgl. Beilschmidt 2004, S. 149

Als Richtwert gilt, dass für 1 kWh Wärme 0,9 m<sup>3</sup> Verbrennungszuluft (zur Verbrennung benötigtes Luftvolumen ohne Luftüberschuss) notwendig sind. Daraus ergibt sich für 5 kg Holz, das 3 Stück Scheitholz für einen Kaminofen entspricht, ein benötigtes Luftvolumen von 19 m<sup>3</sup> zur Verbrennung. Rechnet man den benötigten 2 bis 3-fachen Luftüberschuss dazu, ergibt sich daraus ein tatsächliches Verbrennungsluftvolumen von 40 bis 60 m<sup>3</sup> pro Stunde.

Dieser zur Verbrennung benötigte Luftvolumenstrom ist bei dichter Raumhülle nur durch einen hohen Unterdruck, also einer hohen Druckdifferenz möglich. Dieser hohe Differenzdruck bewirkt somit ein Überströmen der Zuluft aus anderen Bereichen des Gebäudes. Eine Feuerstätte benötigt zumindest einen Unterdruck von 4 Pa am Rauchrohranschluss der Feuerstätte, um die Verbrennungsgase gesichert abführen zu können. Zusätzlich ist der Widerstand der Feuerstätte zu überwinden, der je nach Bauart der Feuerstätte unterschiedlich ausfallen kann. Liegt nun eine dichte Raumhülle vor und ein Überströmen der benötigten Verbrennungsluft aus anderen Bereichen ist ebenfalls, aufgrund z.B. dichter Innentüren oder kleiner Luftverbunde nicht möglich, tritt Sauerstoffschuld beim Verbrennungsprozess ein.

Bei einer nicht ausreichenden Zufuhr von genügend Verbrennungsluft, kommt es einerseits zu einer nicht vollständigen Verbrennung und damit zu einer erhöhten Schadstoffemission. Andererseits ist eine gesicherte Abfuhr der Verbrennungsgase nicht mehr gewährleistet. Besonderes Gefährdungspotential, das bis zu einer Kohlenmonoxidvergiftung führen kann, besteht hier bei raumluftabhängigen, gasbetriebenen Feuerstätten, da das Abgas farb- und geruchslos ist.

Eine zusätzliche Problematik ergibt sich dadurch, dass geschultes Fachpersonal wie Rauchfangkehrer, Installateure oder Wartungspersonal nur bedingt einen Zugang zu Aufstellungsräumen von Feuerstätten haben und so die unzureichende Verbrennungsluftzufuhr oft schwer erkennen können. Verstärkt wird dieses Problem durch den Trend zur Aufstellung von Einzelraumfeuerstätten, als Gründe für diesen Trend sind die hohen Energiepreise, die Versorgungssicherheit und Behaglichkeitsgefühle zu nennen. Da die Aufstellung und die Inbetriebnahme von Einzelraumfeuerstätten bei der Baubehörde nicht anzeigepflichtig ist, bleibt eine Beurteilung des Luftverbundes durch den Rauchfangkehrer, außer in den Fällen, bei denen sich der Betreiber der Feuerstätte bei einem Rauchfangkehrer meldet und eine Begutachtung der Feuerstätte wünscht, aus.

Einen Schritt zur verpflichtenden Überprüfung der Aufstellung von Einzelraumfeuerstätten wurde in Niederösterreich getätigt. Seit 01.11.2008 gibt es für die Aufstellung von Einzelraumfeuerstätten eine Landesförderung, wobei im Förderansuchen der befugte Fachmann, insbesondere der Rauchfangkehrer, die ordnungsgemäße Aufstellung der

Feuerstätte bestätigen muss, somit kann zumindest gesichert werden, dass der ausreichende Luftverbund zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme gesichert ist<sup>59</sup>.

Aus diesem Grund müssen sich Planer und die ausführenden Gewerke über die Problematik der raumluftabhängigen Feuerstätten im Wohnbereich und der Sicherstellung der ausreichenden Zufuhr von Verbrennungsluft im Zusammenhang mit einem Fenstertausch im Klaren sein und gegebenenfalls zusätzliche Maßnahmen einplanen.

---

<sup>59</sup> vgl. NÖ Landesregierung, 2009, S. 4

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND FOLGERUNGEN

Hohe Energiepreise und lukrative Förderprogramme der Bundes- und Landesregierungen lassen zurzeit die Anzahl der thermischen Sanierungen von Wohngebäuden stark steigen. Durch den Einbau von neuen Fenstern erhöht sich die Dichtheit der Gebäudehülle schlagartig. Die Auswirkungen dieser einschneidenden Maßnahme wurden bis jetzt nur in sehr geringen Umfang beleuchtet.

Die Dichtigkeit der Raumhülle des in dieser Studie untersuchten Innenraumes erhöhte sich durch den Fenstertausch und der normgerechten Montage wie erwartet. Bei einer Differenzdruckmessung, zur Quantifizierung der noch bestehenden Undichtigkeiten, wurde eine Verbesserung des  $n_{50}$ -Wertes um 50 Prozent festgestellt. Bei der Langzeitmessung mittels Tracergastechnik konnte eine Reduzierung der mittleren Luftwechselzahl um 56 Prozent beobachtet werden.

Generell zeigte sich, dass keine dominante Beziehung zwischen zwei ausgewählten Parametern bestand. Eine multivariate Analyse (die im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt wurde) könnte jedoch eventuell zeigen, dass die Variabilität durch die Gesamtheit der Parameter bzw. durch einen Teil der Parameter bestimmt werden kann.

Es zeigte sich eine breite, zeitliche Variation des natürlichen Luftwechsels, wobei sich nach dem Fenstertausch die Differenz zwischen dem höchsten und niedrigsten gemessenen Wert um 60 Prozent reduzierte.

Ein möglicher einfacher Zusammenhang zwischen dem natürlichen Luftwechsel und den gemessenen Umgebungsparametern zeigte sich nur bei der zweiten Messreihe nach dem Fenstertausch. Dabei konnte beobachtet werden, dass bei steigendem Differenzdruck zwischen Innenraum und Außenbereich der Luftwechsel mit einer leichten Tendenz anstieg. Zusätzlich konnte erkannt werden, dass sich bei einer undichten Gebäudehülle nur schwer ein Differenzdruck aufbauen konnte. So erreichte der gemessene Differenzdruck vor dem Fenstertausch keinen Wert über 2 Pa, hingegen wurden nach dem Tausch des Fensters Differenzdrücke bis 10 Pa festgestellt. Neben der Druckdifferenz als mögliche treibende Kraft des natürlichen Luftwechsels, konnte auch eine geringe Tendenz zwischen steigender Innenraumtemperatur und steigender Luftwechselzahl beobachtet werden.

Durch die Reduktion der gemittelten Luftwechselzahl kann bestätigt werden, dass durch eine thermische Sanierung, insbesondere des Fenstertausches, das Ziel der Reduzierung der Lüftungswärmeverluste erreicht werden kann. Der Lüftungswärmeverlust für den untersuchten Raum konnte um 56 Prozent verringert werden, wobei bei der Ermittlung des

Lüftungswärmeverlustes der Luftaustausch zwischen Gang und dem untersuchten Raum vernachlässigt wurde.

Die Verbesserung der Dichtigkeit der Gebäudehülle führt zu einem Anstieg der Formaldehydkonzentration im untersuchten Raum, das einer Verschlechterung der Ausgangslage entspricht. Es zeigte sich, dass die mittlere, gemessene Formaldehydkonzentration nach dem Fenstertausch um 30 Prozent über den gemessenen Werten vor dem Fenstertausch lag. Eine einfache Korrelation zwischen dem Luftwechsel und den gemessenen Formaldehydkonzentrationen konnte nicht festgestellt werden.

Neben der Messung von Formaldehyd wurde die Auswirkung des Luftwechsels auf die Konzentration von flüchtigen organischen Verbindungen untersucht. Die Messergebnisse der im untersuchten Raum zur Verdampfung gebrachten VOC-Verbindungen zeigten eine breite Varianz, ein möglicher Zusammenhang der gemessenen Konzentrationen mit dem Luftwechsel konnte nur im Rahmen der zweiten Messreihe tendenziell festgestellt werden, die Werte der Messreihe vor dem Fenstertausch zeigten keine einfachen Zusammenhänge.

Die breite Variation der Messergebnisse, vor allem bei der Ermittlung der VOC-Konzentrationen, zeigt, dass eine Einzelmessung vermutlich keine bzw. nur bedingt repräsentative Aussage über die Konzentration eines Luftschadstoffes in einem Innenraum geben kann.

Aufgrund der geringen Anzahl von Proben ist allerdings eine verallgemeinernde Aussage nicht möglich. Eine Weiterführung von Untersuchungen zur Sammlung weiterer Daten erscheint in diesem Fall als sinnvoll, um allgemein gültige Aussagen treffen zu können.

Neben den Einfluss auf die Erhöhung der der Konzentration von Formaldehyd bewirkt die dichte Raumhülle, dass bei der Benutzung durch den Menschen ausgeatmetes Kohlenstoffdioxid, so ferne nicht ständig gelüftet wird, in nur unzureichender Konzentration abgeführt werden kann. Der hygienisch notwendige Luftwechsel kann somit nicht mehr gewährleistet werden. Dies betrifft besonders Bereiche wie Schlafräume, in denen man sich 6 bis 8 Stunden pro Tag aufhält und die nicht ständig gelüftet werden können.

Diese Studie zeigt, dass durch thermische Sanierungsmaßnahmen, bei denen die Raumhülle deutlich an Dichtigkeit gewinnt, die Aufstellung und der Betrieb von raumluftabhängigen Feuerstätten problematisch werden kann. Durch die dichte Raumhülle kann, wenn kein Überströmen aus anderen Bereichen möglich ist, nicht ausreichend benötigte Verbrennungsluft zugeführt werden. Eine unvollständige Verbrennung mit erhöhten

Schadstoffemissionen ist die Folge, zusätzlich ist ein gesicherter Abtransport der Verbrennungsgase nicht möglich, durch austretendes Abgas kann Gefahr für Menschen entstehen.

Auch in diesem Punkt besteht eindeutig Handlungsbedarf, einerseits sind alle bei einer thermischen Sanierung beteiligte Gewerke gefordert auf eine ausreichende und gesicherte Verbrennungsluftzufuhr zu achten, andererseits besteht aus der Sicht des Verfasser Handlungsbedarf durch die Baubehörde, um hier die Gesundheit und das Leben der Menschen zu wahren.

Durch die gewonnenen Daten zeigt sich, dass durch den Tausch der Fenster und einer dichten Gebäudehülle tatsächlich Energie sparen lässt. Allerdings wurde auch festgestellt, dass die dichte Gebäudehülle mögliche negative Einflüsse auf das Innenraumklima und somit auf den Menschen haben kann.

## 7 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

a	Jahr
bzw.	Beziehungsweise
ca.	Zirka
cm	Zentimeter
cm <sup>3</sup>	Kubikzentimeter
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
dm <sup>3</sup>	Kubikdezimeter
EN	Europäische Norm
h	Stunden
hPa	Hektopascal
IR	Infrarot
kg	Kilogramm
l	Liter
kWh	Kilowattstunde
LW	Luftwechsel
g	Gramm
m	Meter
M1	Messzyklus 1
M2	Messzyklus 2
m <sup>2</sup>	Quadratmeter
mm <sup>2</sup>	Quadratmillimeter
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
MAK	Maximale Arbeitsplatz-Konzentration
mg	Milligramm
mind.	Mindestens
ml	Milliliter
n	Luftwechselzahl
n <sub>50</sub>	Luftwechselzahl bei einem Differenzdruck von 50 Pa
NÖ	Niederösterreich
ÖN	Österreichische Norm
Pa	Pascal
ppm	Parts per million
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß
TVOC	Total volatile organic compound
s	Sekunde
S.	Seite
SF <sub>6</sub>	Schwefelhexafluorid
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VOC	Volatile organic compound (flüchtige, organische Verbindungen)
Vol.	Volums
WFL	Wohnnutzfläche
Wh	Wattstunde

WHO Weltgesundheitsorganisation  
WIR Wirkungsbezogene Innenraumrichtwerte  
z.B. Zum Beispiel  
°C Grad Celsius  
µg Mikrogramm

## 8 QUELLENVERZEICHNIS

### Literaturzitate:

Andersen I, Lundquist GR, Molhave L (1974): Formaldehydabspaltung von spanplattierten Klimakammern, Ugeskr Laeg 136: 2140-2145, zit. nach Pluschke 1996

Beilschmidt A (2004): Das Rauchfangkehrerbuch, Eigenverlag Wilhelmsburg, S. 149

Bundesgesundheitsamt-BGA (1977): Bewertungsmaßstab für Formaldehyd in der Raumluft. BGA-Pressedienst 19/77 vom 12.10.1977, auch: BGA (1984): Formaldehyd. Gemeinsamer Bericht des BGA, der BAU und des UBA. bzw. BGA (1992): Bekanntmachungen des BGA. Zur Gültigkeit des 0,1 ppm-Wertes für Formaldehyd. Bundesgesundheitsblatt 9/92. S. 482-483

Deutsches Bundesministerium für Gesundheit (2005): Aktionsprogramm Umwelt und Gesundheit, APUG-Geschäftsstelle im deutschen Umweltbundesamt, S. 63

Duller C (2007): Einführung in die Statistik mit EXCEL und SPSS, 2. Auflage Physica Verlag Heidelberg, S 149-160

European Collaborative Action (1997): Indoor Air Quality and its Impact on Man: Total volatile organic compounds (TVOC) in indoor air quality investigations, Report No 19, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities

Gerder F (2007): Bestimmung des durchschnittlichen, windinduzierten Luftwechsels in einem Atrium am Beispiel des EnergieForums Berlin, S. 18f, 37

Hutter H-P, Hoshammer H, Wallner P, Tappler P, Twrdik F, Ganglberger E, Geissler S, Wenisch A (2005): Auswirkungen energiesparender Maßnahmen im Wohnbau auf die Innenraumluftqualität und Gesundheit – Anhang, Forschungsvorhaben F 1469, S. 7 – 18

Keßling W (2008): Bauphysik – Thermische Behaglichkeit, Vorlesungsmanuskript Donau Universität Krems, MBS3 Klima-Engineering WS 2007/2008 S. 117-120

Marutzky R (1992): Luftverunreinigende Stoffe in Innenräumen: Ursachen Analytik –Minderung, Vorlesungsmanuskript WKI Wintersemester 1991/92

Österr. Akademie der Wissenschaften, Kommission für Reinhaltung der Luft (1997) Flüchtige Kohlenwasserstoffe in der Atmosphäre – Luftqualitätskriterien VOC, BM für Umwelt, Jugend und Familie

Recknagel H, Sprenger E, Schramek E-R, (2009): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, 74. Auflage Oldenbourg Industrieverlag München, S. 104f, 282, 926

Seifert J (2003): Bestimmung des realen Luftwechsels bei Fensterlüftung aus energetischer und bauphysikalischer Sicht, Fraunhofer IRB Verlag, S. 4

Tappler P, Sulzner M, Scheidl K, Damberger B, Burtscher I (1997): Formaldehyd und Luftwechsel in österreichischen Fertigteilhäusern, IBO Eigenverlag

Tappler P, Damberger B, Twrdik F, Mitterer K, Hutter H-P (2006): Pilotstudie zur Untersuchung des Luftwechsels in Innenräumen, BM für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, S. 10, 12

Tappler P (2008): Ökologie – Lüftung in Innenräumen , Vorlesungsmanuskript Donau Universität Krems, MBS3 Klima-Engineering WS 2007/2008 S. 2

Thumulla J, Weber S (2004): Komplexe Luftwechseluntersuchungen am Beispiel der historischen Anna-Amalia-Bibliothek. 7. Fachkongress der Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF), 04.-05.03 2004, München. S. 278-290

World Health Organization (1983): Indoor air pollutants: exposure and health effects. EURO Reports and Studies No.78. Copenhagen: WHO Reg. Office for Europe

World Health Organization (2000): Air Quality Guidelines for Europe. Second Edition. European Series No. 91. Copenhagen: WHO Reg. Office for Europe

World Health Organization (1989): Indoor air quality: organic pollutants. EURO Reports and Studies No. 111 Copenhagen: WHO Reg. Office for Europe

### **Verordnungen, Normen und Richtlinien:**

BMLFUW (2009): Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) – Formaldehyd, Eigenverlag des BMLFUW, S. 5, 30

BMLFUW (2006): Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) – Physikalische Faktoren Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter, Eigenverlag des BMLFUW, S. 5, 6-30

BMLFUW (2004): Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) – Styrol, Eigenverlag des BMLFUW, S. 22

BMLFUW (2003): Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) – Tetrachlorethen, Eigenverlag des BMLFUW, S. 25

BMLFUW (2006): Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft, erarbeitet vom Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Blau- Weiße Reihe (Loseblattsammlung) – Toluol, Eigenverlag des BMLFUW, S. 22

Grenzwerteverordnung: 2007 Verordnung des BM für Wirtschaft und Arbeit über Grenzwerte für Arbeitsstoffe und krebserzeugende Arbeitsstoffe, BGBl. II Nr. 253/2001 zuletzt geändert durch BGBl. II Nr. 243/2007

NÖ Landesregierung (2006): Leitfaden zur Berechnung des Heizwärmebedarfes: 2006-01-01, Amt der NÖ Landesregierung, Abt. Wohnbauförderung, S. 15, 34

NÖ Landesregierung (2009): Wohnbauförderung Heizungsanlagen mit fester Biomasse / Fernwärme, 5. Auflage [http://www.noel.gv.at/bilder/d3/Ansuchen\\_HF\\_2006\\_1.pdf?1573](http://www.noel.gv.at/bilder/d3/Ansuchen_HF_2006_1.pdf?1573), [Stand: 10.04.2009], S. 4

Österreichisches Institut für Bautechnik (2007): OIB-Richtlinie 3 Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz, OIB-300.3-005/07 ([http://www.oib.or.at/RL3\\_250407.pdf](http://www.oib.or.at/RL3_250407.pdf)) [Stand: 02.05.2009]

ÖNORM B5320: 2000-12-01 Bauanschlussfuge für Fenster, Fenstertüren, Türen und Tore in Außenbauteilen

ÖNORM B 8110-1: 2008-01-01 Wärmeschutz im Hochbau – Anforderungen an den Wärmeschutz und Deklaration des Wärmeschutzes von Gebäuden/Gebäudeteilen – Heizwärmebedarf und Kühlbedarf

ÖNORM EN 120: 1993-02-01 Holzwerkstoffe – Bestimmung des Formaldehydgehaltes – Extraktionsverfahren, genannt Perforatormethode

ÖNORM EN 717-1:2005-02-01 Holzwerkstoffe – Bestimmung der Formaldehydabgabe, Teil 1: Formaldehydabgabe nach der Prüfkammermethode

ÖNORM EN832: 1999-07-01 Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden Berechnung des Heizenergiebedarfs – Wohngebäude

ÖNORM EN 13779: 2008-01-01 Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme, S. 59

ÖNORM EN13829:2001-05-01 Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden, Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren, S. 17

ÖNORM EN ISO 16000-1: 2006-06-01 Innenraumluftverunreinigungen, Teil 1: Allgemeine Aspekte der Probenahmestrategie

ÖNORM EN ISO 16000-2: 2006-06-01 Innenraumluftverunreinigungen, Teil 2: Probenahmestrategie für Formaldehyd

ÖNORM EN ISO 16000-5: 2007-06-01 Innenraumluftverunreinigungen, Teil 5: Probenahmestrategie flüchtige organische Verbindungen (VOC)

ÖNORM M 5700-2: 2002-08-01 Messen von Innenraumluft-Verunreinigungen - Gaschromatographische Bestimmung organischer Verbindungen - Teil 2: Aktive Probenahme durch Anreicherung auf Aktivkohle - Lösemittelextraktion

VDI 4300 Blatt 6: 12/2000 Messen von Innenraumluftverunreinigungen, Messstrategie für flüchtige organische Verbindungen (VOC), S. 3

VDI 4300 Blatt 7: 07/2001 Messen von Innenraumluftverunreinigungen, Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen, S. 7

### **Abbildungen:**

Josko, Josko Diamant 100,

[http://www.josko.at/index.php?option=com\\_content&task=view&id=31&Itemid=66](http://www.josko.at/index.php?option=com_content&task=view&id=31&Itemid=66), [Stand: 10.04.2009]

Recknagel H, Sprenger E, Schramek E-R, (2009): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik, 74. Auflage Oldenbourg Industrieverlag München, S. 104, 926

## 9 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Druckverteilung in einem erwärmten Raum (Quelle: Recknagel et al. ) .....	9
Abbildung 2: Außenansicht des Gebäudes .....	18
Abbildung 3: Außenansicht Messraum.....	19
Abbildung 4: Fenster vor dem Tausch .....	19
Abbildung 5: Fenster nach dem Tausch.....	19
Abbildung 6: Detailansicht Josko Diamant 100 (Quelle: www.josko.at) .....	20
Abbildung 7: Fensterband Außen.....	21
Abbildung 8: Bruel & Kjaer Single Gas Monitor.....	23
Abbildung 9: Kapillarröhrchen zur Messung des Außendruckes .....	26
Abbildung 10: Probenahmeapparatur für Formaldehyd und VOC .....	28
Abbildung 11: Standort der Messgeräte im Versuchsraum.....	33
Abbildung 12: Zeitliche Variation des Luftwechsels M1 .....	37
Abbildung 13: Zeitliche Variation des Luftwechsels M2 .....	37
Abbildung 14: Häufigkeitsverteilung der Luftwechselzahlen M1 und M2 .....	38
Abbildung 15: Beispiel SF <sub>6</sub> Konzentrationsabklingkurve M1 (LW 100-fach überhöht).....	39
Abbildung 16: Beispiel SF <sub>6</sub> Konzentrationsabklingkurve M2 (LW 100-fach überhöht).....	39
Abbildung 17: Luftwechsel in Abhängigkeit zum Differenzdruck (Messraum – Außen) M1 .....	41
Abbildung 18: Luftwechsel in Abhängigkeit zum Differenzdruck (Messraum – Außen) M2 .....	41
Abbildung 19: Luftwechsel in Abhängigkeit zum Differenzdruck (Messraum – Gang) M1 .....	42
Abbildung 20: Luftwechsel in Abhängigkeit zum Differenzdruck (Messraum – Gang) M2.....	42
Abbildung 21: Luftwechsel in Abhängigkeit zur Temperaturdifferenz Innen – Außen M1.....	44
Abbildung 22: Luftwechsel in Abhängigkeit zur Temperaturdifferenz Innen – Außen M2.....	44
Abbildung 23: Luftwechsel in Abhängigkeit zur Innenraumtemperatur M1 .....	45
Abbildung 24: Luftwechsel in Abhängigkeit zur Innenraumtemperatur M2 .....	45
Abbildung 25: Luftwechsel in Abhängigkeit zur Außentemperatur M1 .....	46
Abbildung 26: Luftwechsel in Abhängigkeit zur Außentemperatur M2.....	46
Abbildung 27: Vergleichsmessung Wetterstation und Strömungsmessgerät .....	47
Abbildung 28: Abhängigkeit der Formaldehydkonzentration vom Luftwechsel M1 .....	51
Abbildung 29: Abhängigkeit der Formaldehydkonzentration vom Luftwechsel M2 .....	51
Abbildung 30: Abhängigkeit der Formaldehydkonzentration vom Luftwechsel M1 (nach Andersen) .....	52
Abbildung 31: Abhängigkeit der Formaldehydkonzentration vom Luftwechsel M2 (nach Andersen) .....	52
Abbildung 32: Abhängigkeit der Formaldehydkonzentration von der Innenraumtemperatur M1 .....	54
Abbildung 33: Abhängigkeit der Formaldehydkonzentration von der Innenraumtemperatur M2 .....	54

---

Abbildung 34: Abhängigkeit der VOC-Konzentration vom Luftwechsel M1 .....	57
Abbildung 35: Abhängigkeit der VOC-Konzentration vom Luftwechsel M2 .....	57
Abbildung 36: Abweichung der einzelnen VOC-Konzentrationen vom Mittelwert M1 .....	59
Abbildung 37: Abweichung der einzelnen VOC-Konzentrationen vom Mittelwert M2.....	59
Abbildung 38: Abhängigkeit der einzelnen VOC-Konzentrationen vom Luftwechsel M1 .....	60
Abbildung 39: Abhängigkeit der einzelnen VOC-Konzentrationen vom Luftwechsel M2 .....	60
Abbildung 40: Abhängigkeit der VOC-Konzentration von der Innenraumtemperatur M1 .....	62
Abbildung 41: Abhängigkeit der VOC-Konzentration von der Innenraumtemperatur M2 .....	62
Abbildung 42: Abhängigkeit der VOC-Konzentration vom absoluten Luftdruck M1 .....	63
Abbildung 43: Abhängigkeit der VOC-Konzentration vom absoluten Luftdruck M2 .....	63
Abbildung 44: Leckageortung Fensterflügel (vor Fenstertausch) .....	65
Abbildung 45: Leckageortung Fußbodenkonstruktion (vor Fenstertausch) .....	65
Abbildung 46: Zusammenhang Luftwechsel – Differenzdruck .....	68
Abbildung 47: Schadstoffbilanz eines zu lüftenden Raums (Quelle: Recknagel et al. ).....	70
Abbildung 48: Zeitlicher Verlauf der CO <sub>2</sub> -Konzentration M1 und M2 .....	72

## 10 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Luftwechsel in Abhängigkeit der Gebäudedichtheit und Fensteröffnung (Quelle: Seifert) ...	10
Tabelle 2: Chemische und physikalisch Eigenschaften von Formaldehyd .....	10
Tabelle 3: Übersicht der Richtwerte für die Formaldehydkonzentration.....	12
Tabelle 4: Klassifizierung flüchtiger organischer Verbindungen nach WHO 1989 .....	13
Tabelle 5: WIR von VOC-Verbindungen .....	14
Tabelle 6: Chemische und physikalisch Eigenschaften von Kohlenstoffdioxid .....	15
Tabelle 7: Klassifizierung der Innenraumluft und Anforderungen in Hinblick auf CO <sub>2</sub> .....	17
Tabelle 8: Zusammenfassung der Daten des Messraums.....	21
Tabelle 9: Zusammenfassung verwendete Glaskolben (VOC-Emission) .....	31
Tabelle 10: Exemplarische Darstellung der Messergebnisse vom 03.04.2008 .....	35
Tabelle 11: Bedeutung der Diagrammbezeichnungen .....	36
Tabelle 12: Zusammenfassung der Ergebnisse der Luftwechselbestimmung .....	48
Tabelle 13: Übersicht Formaldehydkonzentrations-Messungen vor der Sanierung .....	49
Tabelle 14: Übersicht Formaldehydkonzentrations-Messungen nach der Sanierung.....	49
Tabelle 15: Zusammenfassung der Ergebnisse der Formaldehydmessung .....	55
Tabelle 16: Übersicht VOC-Konzentrations-Messungen vor der Sanierung .....	56
Tabelle 17: Übersicht VOC-Konzentrations-Messungen nach der Sanierung .....	56
Tabelle 18: Zusammenfassung der Ergebnisse der VOC-Messung .....	64
Tabelle 19: Messergebnisse der Luftdurchlässigkeitsbestimmung .....	64
Tabelle 20: Zeitlicher Verlauf der CO <sub>2</sub> -Konzentration M1 und M2 .....	71
Tabelle 21: Lüftungswärmeverluste .....	77

## 11 FORMELVERZEICHNIS

Formel 1: Luftwechselzahl.....	9
Formel 2: Ermittlung der Luftwechselzahl mit 2 Messwerten.....	24
Formel 3: Andersen-Gleichung (Quelle: Tappler et al., 2006).....	30
Formel 4: Luftwechselzahl bei Differenzdruck 50 Pa .....	32
Formel 5: Druckabfall an Blenden .....	67
Formel 6: Druckabfall an Blenden umgeformt.....	67
Formel 7: Massenbilanz eines zu lüftenden Raums.....	69
Formel 8: Zeitlicher Verlauf der CO <sub>2</sub> -Konzentration.....	70
Formel 9: Berechnung des Lüftungswärmeverlustes .....	77