

Pilotstudie zur Untersuchung des Luftwechsels in Innenräumen

P. Tappler, F. Twardik, B. Damberger, K. Mitterer, H.-P. Hutter

Zusammenfassung Im Rahmen einer Pilotstudie wurden in je einem Innenraum von drei unterschiedlichen Gebäuden (Altbau, renovierter Altbau, Niedrigenergiehaus) Messungen des natürlichen Luftwechsels und weiterer Parameter wie Temperaturdifferenz innen/außen, Luftdruckdifferenz innen/außen und Windgeschwindigkeit durchgeführt. In einem der Räume wurden über einige Tage Rohspanplatten exponiert und die Raumluftkonzentration von Formaldehyd erfasst. Über den Beobachtungszeitraum Ende Oktober bis Mitte Dezember zeigte sich eine breite zeitliche Variation der Luftwechselzahl, wobei die relativ höchsten Werte um jeweils einen Faktor 2,6 bis 3,6 über den niedrigsten lagen, starke Variationen wurden auch im Tagesverlauf gemessen. Abhängigkeiten der Luftwechselzahl von den Parametern Temperaturdifferenz innen/außen bzw. Windgeschwindigkeit waren ansatzweise gegeben. Nur in einem der untersuchten Räume (Altbau) ergab sich eine deutliche Korrelation zwischen dem Luftwechsel und der Luftdruckdifferenz innen/außen. Es wurde keine Abhängigkeit der jeweiligen Raumluftkonzentration von Formaldehyd von den Luftwechselzahlen festgestellt. Der Grund dafür liegt vermutlich bei der starken Adsorptionsneigung von Formaldehyd.

Pilot study for the examination of air change rates in indoor spaces

Abstract Within the framework of a pilot study measurements of the natural air change rate and of additional parameters such as temperature difference between inside and outside, difference in air pressure between inside and outside, and wind speed were taken in the interior of three different buildings (old building, renovated old building, low energy house). In one of the rooms untreated chipboard panels were exposed over a period of several days and the concentration of formaldehyde in the air in the room was subsequently measured. Over an observation period extending from the end of October to mid-December wide differences were revealed in the air change rates over the course of time, in each case the highest values were between 2.6 and 3.6 times the lowest values. Considerable variations were also recorded in the course of a single day. Indications were recorded of a connection between the air change rate and the parameters of temperature difference inside/outside or wind speed. A clear correlation between the air change rate and the difference in air pressure between inside and outside was recorded only in one of the rooms examined (in the old building). No connection was established between the concentration of formaldehyde in the air in the room and the air change figures; the reason for this most probably lies in formaldehyde's marked tendency to be adsorbed to building materials.

Dipl.-Ing. Peter Tappler,

Department für Bauen und Umwelt der Donauuniversität Krems.

Dipl.-Ing. Felix Twardik, Dipl.-Ing. Bernhard Damberger, Karl Mitterer,

Österreichisches Institut für Baubiologie und -ökologie, Wien.

Dr. Hans-Peter Hutter,

Institut für Umwelthygiene der Medizinischen Universität Wien.

1 Vorgangsweise und Methodik

Im Rahmen einer Pilotstudie wurden in drei unterschiedlichen Innenräumen kontinuierliche Messungen der Luftwechselzahl und weiterer Parameter wie Temperaturdifferenz innen/außen, Luftdruckdifferenz innen/außen und Windgeschwindigkeit durchgeführt. Die Auswertung der Daten erfolgte auf der Basis von Stundenmittelwerten. In einem der Räume wurde die Raumluftkonzentration an Formaldehyd untersucht. In allen untersuchten Räumen wurde der n_{50} -Wert des Raums punktuell erfasst.

Im Beobachtungszeitraum Ende Oktober bis Mitte Dezember 2006 war eine der Jahreszeit entsprechende Variation des Außenklimas zu beobachten. Es traten jedoch keine extremen Wetterbedingungen auf. Die ausgewählten Räume unterschieden sich in wesentlichen Parametern, wie z. B. Baualter, Nutzung, Lage im Gebäude und Dichtheit der Gebäudehülle.

Die Untersuchungen der Luftwechselzahl (natürlicher Luftwechsel) wurden unter Zugrundelegung der Richtlinie VDI 4300 Blatt 7 [1] durchgeführt. Der Raumluft wurde am Beginn der Beobachtungszeiträume ein inertes Tracergas (SF_6) beigemischt und mit einem Ventilator gleichmäßig verteilt (Abklingmethode). Die Konzentration des Tracergases wurde mithilfe eines Detektors mit dem Funktionsprinzip der fotoakustischen Infrarotspektroskopie mit selektivem Filter (Briel & Kjaer Single Gas Monitor) über einen Zeitraum von mehreren Stunden gemessen und aufgezeichnet. Aus der Abklingkurve wurde die Luftwechselzahl nach der Richtlinie zur Durchführung von Formaldehydmessungen in Häusern aus Holz und Holzwerkstoffen rechnerisch ermittelt [2]. Die jeweiligen Messreihen mit einer Dauer zwischen drei und zehn Stunden wurden in zeitliche Abschnitte zu ganzen Stunden unterteilt und die Luftwechselzahl wurde über ein Regressionsverfahren (Minimierung der Abweichungsquadratsumme zwischen Messwert und Rechenwert – Least Square Fit-Verfahren) ermittelt.

Für die Tracergas-Abklingkurve gilt folgende Exponentialfunktion:

$$y = f(x) = A \cdot e^{-x \cdot LW}$$

mit

y Tracergaskonzentration zum Zeitpunkt x in mg/m^3

A Konstante (unterschiedlich in jedem betrachteten Messzeitraum)

x Zeit in h

LW Luftwechselzahl in 1/h

Zur Messung der Luftdurchlässigkeit wurde ein stationäres Differenzdruckverfahren nach EN 13829 (Minneapolis Blower-Door-Modell 4) [3] eingesetzt. Unter Einbeziehung des Luftvolumens des untersuchten Raums wird die Luftwechselrate pro Stunde bei einem Differenzdruck von 50 Pa (n_{50}) errechnet.

Um etwaige Zusammenhänge der Konzentration eines Luftschadstoffs mit dem Luftwechsel zu untersuchen, wurde im Rahmen der Pilotstudie der klassische Innenraumschadstoff

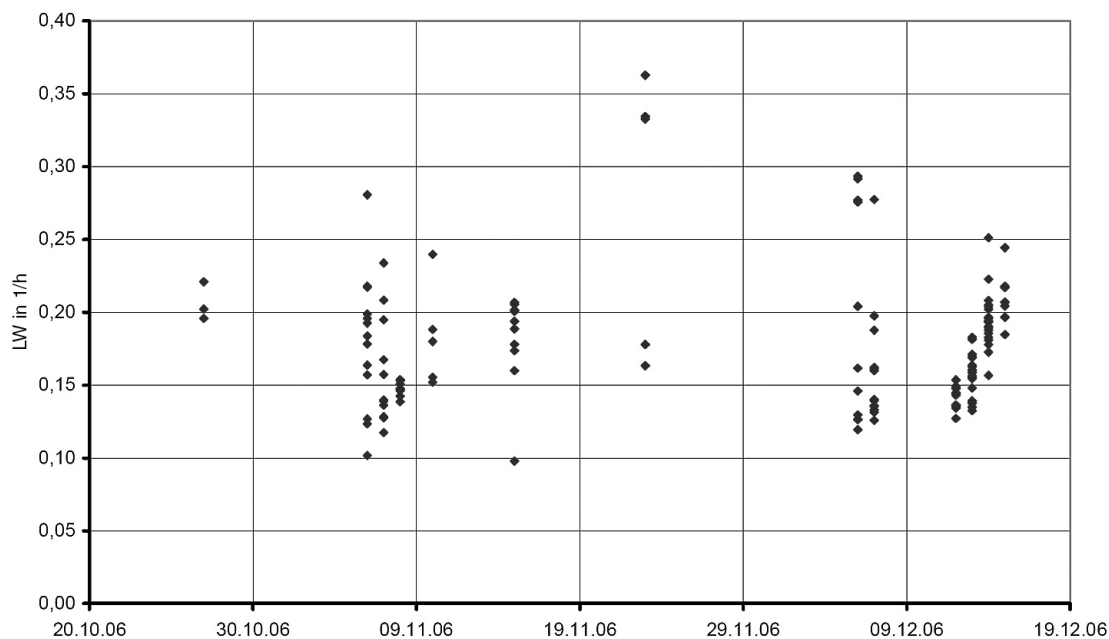


Bild 1. Stundenmittelwerte der Luftwechselzahl (LW) im Raum 1.

Formaldehyd, der in praktisch jedem eingerichteten Innenraum nachweisbar ist [4], ausgewählt. Zur Einstellung einer signifikanten Raumluftkonzentration an Formaldehyd im Raum 1 wurden Bauteile aus Holzwerkstoffen, die eine relevante Emission an Formaldehyd aufwiesen, exponiert (elf mit Textilien allseitig ummantelte Rohspanplattenelemente mit einer Gesamtoberfläche von 25,8 m² (inklusive Seitenkanten) bei einem Raumvolumen von 65,5 m³). Die Sammlung und Auswertung für die Bestimmung von Formaldehyd erfolgte mit der Acetylaceton-Methode nach VDI 5484 Blatt 2 [5] unter Verwendung eines Spektralfotometers (Shimadzu UV 1202).

2 Ergebnisse und Diskussion

2.1 Luftwechsel und Blower Door

Die Pilotstudie zeigte in allen Räumen eine auffallend breite zeitliche Variation der Luftwechselzahl; in Bild 1 sind die Stundenmittelwerte der Luftwechselzahl im Beobachtungszeitraum exemplarisch für Raum 1 dargestellt. Insgesamt lagen die relativ höchsten Werte jeweils um einen Faktor 2,6

bis 3,6 über den niedrigsten Werten (siehe Tabelle 1). Es ist anzunehmen, dass bei sehr niedrigen oder sehr hohen Außentemperaturen bzw. sehr hohen Windstärken, die im Beobachtungsintervall jedoch nicht auftraten, eine noch größere Variationsbreite feststellbar wäre. Auch im Tagesverlauf zeigte sich eine deutliche zeitliche Variation der Luftwechselzahl (Bild 2). Qualitativ ähnliche Ergebnisse im Hinblick auf eine deutliche zeitliche Variation der Luftwechselzahl wurden auch in einer anderen Untersuchung [6] gefunden. Die Differenz der Absolutwerte des niedrigsten zum höchsten Wert war im Raum 2 (Neubau) mit 0,07 h⁻¹ am niedrigsten, in den anderen Räumen (Altbauten) mit 0,25 h⁻¹ bzw. 0,26 h⁻¹ deutlich höher (Tabelle 1).

Eine annähernd lineare Korrelation zwischen dem Luftwechsel und dem Differenzdruck zwischen dem Innenraum und der Außenluft konnte nur im Raum 3 (Altbau mit eher undichten Fenstern) festgestellt werden (Bild 3). Speziell im Raum 1 war zu beobachten, dass je nachdem, ob im Innenraum oder in der Außenluft der höhere Druck herrschte, die erzielte Korrelation unterschiedlich ausfiel. Im Raum 1 ergab sich auch eine deutliche Korrelation des Differenz-

Tabelle 1. Ergebnisse der zeitlichen Variation des Luftwechsels und des n₅₀-Wertes (Blower-Door).

Parameter	Einheit	Raum 1	Raum 2	Raum 3
Beschreibung des Raumes		Altbau etwa 1920, 1997 renoviert (Fenster einfache Lippendichtung)	Neubau 2001 (Fenster einfache Lippendichtung)	Altbau etwa 1900, (Holzkastenfenster ohne Dichtung)
Anzahl der Messungen		141	51	56
n ₅₀ -(Blower-Door)-Wert	h ⁻¹	6,3	4,8	8,3
LW – arithm. Mittel	h ⁻¹	0,18	0,07	0,22
LW – min	h ⁻¹	0,10	0,05	0,13
LW – max	h ⁻¹	0,36	0,13	0,38
LW – Differenz min – max	h ⁻¹	0,26	0,07	0,25
Faktor f		3,6	2,6	2,8

LW: Luftwechselzahl
 Faktor f: Verhältnis LW-max/LW-min

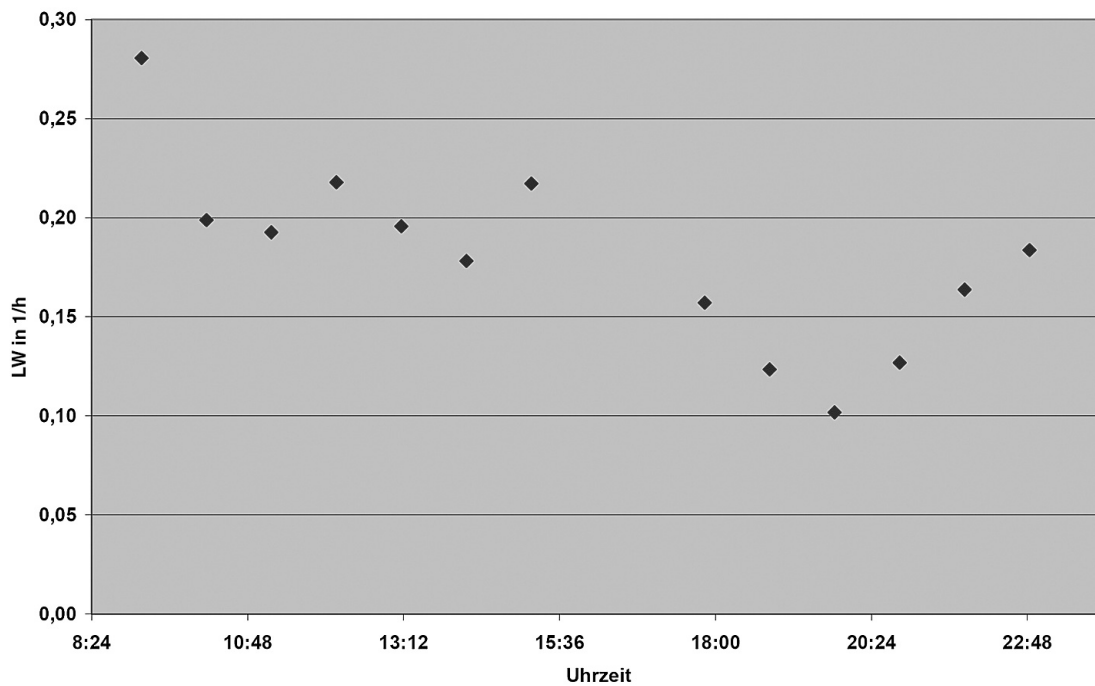


Bild 2. Zeitliche Variation der Stundenmittelwerte der Luftwechselzahl im Raum 1 im Tagesverlauf am 6. November 2006.

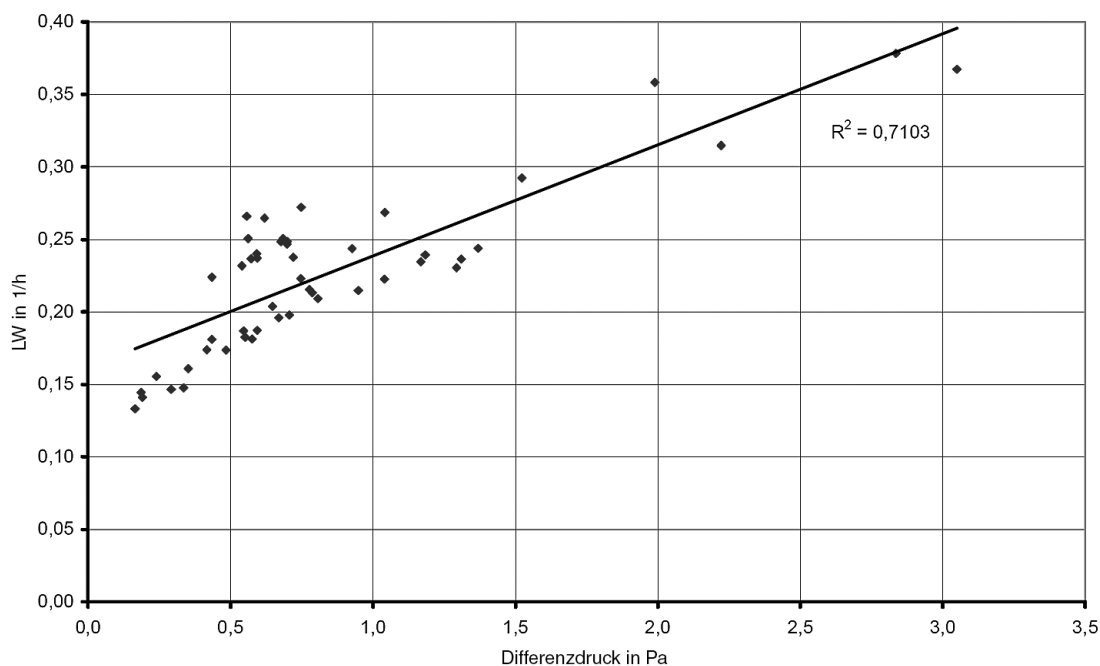


Bild 3. Luftwechselzahl in Raum 3 in Abhängigkeit zum Differenzdruck.

drucks mit der Windgeschwindigkeit im Außenbereich. Im Raum 2 (Neubau mit eher dichten Fenstern) konnten hingegen keine derartigen Zusammenhänge festgestellt werden (Tabelle 2).

Eine statistisch signifikante Abhängigkeit des im Innenraum herrschenden mittleren Luftwechsels mit den Umgebungsparametern Temperaturdifferenz innen/außen bzw. Windgeschwindigkeit konnte nur ansatzweise festgestellt werden. Feststellbar war eine Tendenz zu steigenden mittleren Luftwechselzahlen bei größeren n_{50} -Werten. Da diese Aussage vorerst auf den Messreihen aus drei untersuchten Räumen beruht, ist die Datenbasis zu gering, um daraus eine verallgemeinernde Aussage treffen zu können.

2.2 Luftwechsel und Formaldehyd

Bild 4 zeigt die Konzentration von Formaldehyd in Abhängigkeit von der korrespondierenden Luftwechselzahl im Raum 1. Die Formaldehydmesswerte sind unkorrigiert (■) sowie korrigiert mit der Andersen-Formel [7; 8] ohne Berücksichtigung der Korrekturfaktoren für den Luftwechsel (○) dargestellt, die Raumbeladung mit Holzwerkstoffen wurde in der Formel mit $0,4 \text{ m}^2/\text{m}^3$ vorgegeben.

In den Zeiträumen, in denen der Luftwechsel und die Raumluftkonzentration von Formaldehyd auf der Basis von Stundenmittelwerten bei konstanter Quelle ermittelt wurde, waren trotz deutlicher Variation der Luftwechselzahl keine signifikanten Änderungen der Formaldehydkonzentration erkennbar. Bei den Auswertungen wurde als Vergleichs-

Tabelle 2. Übersicht der Korrelationen des Luftwechsels mit Umgebungsparametern sowie des Differenzdrucks mit der Windgeschwindigkeit.

Korrelation	Bestimmtheitsmaß R ² bei linearer Regression		
	Raum 1	Raum 2	Raum 3
LW/Differenzdruck negativ	0,19	0,17	–
LW/Differenzdruck positiv	< 0,1	–	0,71
LW/Windgeschwindigkeit	< 0,1	0,33	0,23
LW/Temperaturdifferenz	< 0,1	< 0,1	0,23
Differenzdruck/Windgeschwindigkeit	0,82	< 0,1	0,63

LW: Luftwechselzahl
 –: keine bzw. eine zu geringe Anzahl an Messdaten vorhanden

parameter auch die mit der Andersen-Formel korrigierte Konzentration von Formaldehyd (ohne Berücksichtigung der Korrekturfaktoren für den Luftwechsel) herangezogen. Während Luftwechselzahlen zwischen 0,1 h⁻¹ und mehr als 0,3 h⁻¹ beobachtet wurden, schwankten sowohl die gemessenen als auch die korrigierten Formaldehydkonzentrationen nur geringfügig. Im Rahmen der erhobenen Daten war jedenfalls keine Tendenz zu niedrigeren Formaldehyd-Stundenmittelwerten bei höherem Luftwechsel zu erkennen. Einschränkend muss bemerkt werden, dass diese Aussage auf einer noch relativ geringen Anzahl von Messungen in einem einzelnen ausgewählten Raum beruht und demzufolge eine verallgemeinerte Aussage nicht möglich ist. Die vermutlich entscheidende Ursache für den beobachteten Effekt könnte bei der Adsorptionsneigung des Stoffs Formaldehyd liegen, die bewirkt, dass bei stärkerem Luftwechsel und damit stärkerem Abtransport als gegenläufiger Prozess verstärkt Formaldehyd aus Depots in der Wand oder anderen sorptiven Flächen freigesetzt wird, was die geringe Schwankung der Formaldehydkonzentration in der Raumluft erklären würde. Es würde also eine gewisse Pufferwirkung auftreten, die bewirkt, dass kurzfristige Veränderungen des Luftwechsels nicht zu signifikanten Veränderungen der Raumluftkonzentrationen von Formaldehyd führen. Ähnliche Effekte zeigten sich in einer älteren Studie, bei der sich wesentlich schneller als erwartet wieder die ursprünglichen

Formaldehydkonzentrationen in der Raumluft nach einem Lüftungsintervall einstellten [9].

3 Relevanz für die Praxis

Die in der Pilotstudie ermittelte deutliche zeitliche Variation des Luftwechsels schon bei durchschnittlichen Wettersituationen vor allem in den eher undichten Räumen wirft die Frage auf, ob diese Änderungen auch eine Variation der Konzentration von Schadstoffen in Innenräumen unter der Annahme gleicher Quellstärke primärer Quellen zur Folge hat. Obwohl bei der gegenständlichen Untersuchung eine derartige Abhängigkeit für Formaldehyd nicht festgestellt wurde, ist davon auszugehen, dass bei Quellen, die weniger träge reagieren als Spanplatten, eine stärkere Abhängigkeit der Raumluftkonzentration vom Luftwechsel zu erwarten ist. Im deutschsprachigen Raum wurden eine Reihe von Richtwerten für die Innenraumluft publiziert [10; 11]. Bei der Beurteilung von Innenraumschadstoffen anhand dieser (und auch anderer) Richtwerte finden in der Regel aus Kostengründen nur eine oder wenige Probenahmen pro Messstelle statt. Die Beurteilungen der Raumluftsituation anhand der Richtwerte unter Zugrundelegung dieser nur punktuell ermittelten Messdaten haben jedoch in der Praxis mitunter gravierende Konsequenzen für die Beteiligten, die Umsetzung der auf den Ergebnissen aufbauenden Empfehlungen

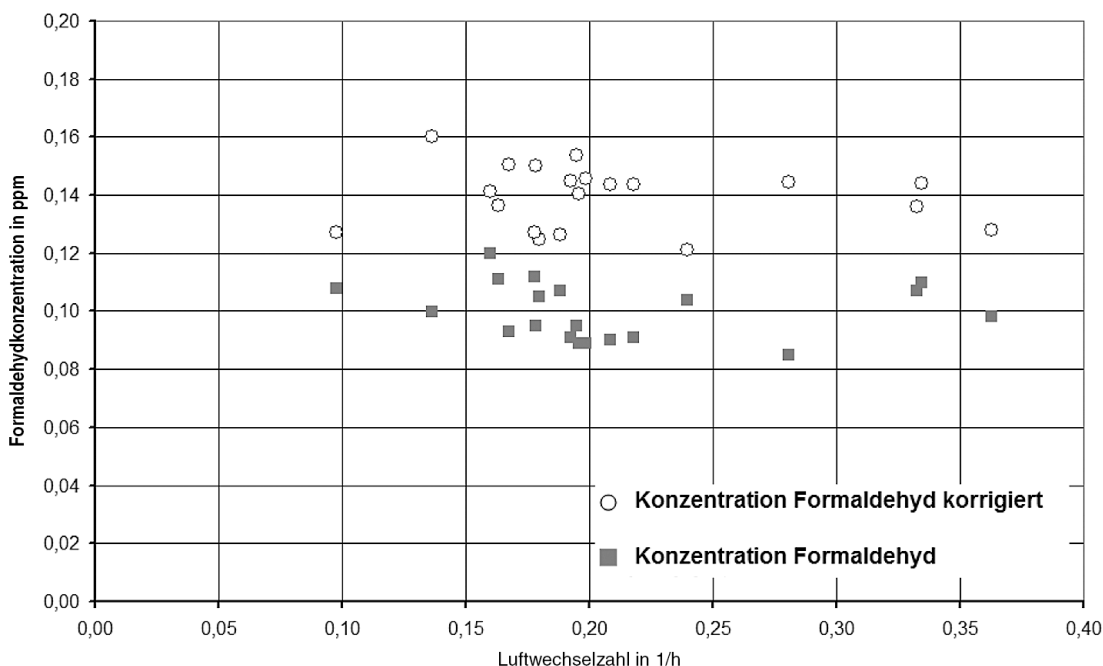


Bild 4. Konzentration von Formaldehyd (Stundenmittelwerte) in Abhängigkeit von der Luftwechselzahl im Raum 1.

können hohe Kosten verursachen. Die Kenntnis der Abhängigkeiten der Raumluftkonzentration unterschiedlicher Schadstoffe von der aktuell vorliegenden Luftwechselzahl für die Bewertung dieser Stoffe wären daher von entscheidender Bedeutung. Sollte eine relevante Abhängigkeit bestehen, würde dies bedeuten, dass bei Schadstoffmessungen in vielen Fällen nicht repräsentative Ergebnisse als Grundlage von Bewertungen herangezogen werden. In diesem Fall wäre die Frage zu stellen, ob eine realistische Bewertung der tatsächlichen Belastungssituation über die Beurteilung von punktuellen Messungen überhaupt möglich ist.

4 Ausblick

Ziel weiterer Untersuchungen sollte vorrangig eine Verbesserung der Datenbasis zur Erarbeitung verallgemeinerter Aussagen zu unterschiedlichen Innenraumschadstoffen

sein. Die Abhängigkeit der Konzentration anderer interessierender, in der Innenraumluft vorkommender Inhalts- und Schadstoffe, wie z. B. flüchtige organische Verbindungen (VOC), die ebenfalls häufig in Innenräumen gemessen werden sowie von anderen Stoffen, wie z. B. Radon, wurde im Zuge der Pilotstudie noch nicht erfasst. In weiteren Messreihen sollten daher zusätzlich zu Formaldehyd häufig vorkommende VOC und andere interessierende Substanzen untersucht werden; es empfiehlt sich eine kontrollierte konstante Freisetzung dieser Substanzen.

Um allgemein gültige Aussagen zur zeitlichen Variation des Luftwechsels zu treffen, ist die Beobachtung der untersuchten Parameter bei einer breiteren Variation der Klimaparameter erforderlich. Insbesondere sollte die Situation bei sehr kalten Witterungsverhältnissen (Fenster üblicherweise über lange Zeiträume geschlossen) und im Sommer erfasst werden.

Literatur

- [1] VDI 4300 Blatt 7: Messen von Innenraumluftverunreinigungen; Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen. Berlin: Beuth 2001.
- [2] *Marutzky, R.*: Formaldehydprüfrichtlinie für Häuser aus Holz und Holzwerkstoffen. Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Holzforschung. München 1993.
- [3] ÖNORM EN 13829: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden; Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden; Differenzdruckverfahren (ISO 9972:1996, modifiziert). Österreichisches Normungsinstitut 2001.
- [4] *Tappler, P.; Gann, M.*: Formaldehydbelastung in österreichischen Innenräumen im Zeitraum 1990-1992. In: Tagungsband der 12. Jahrestagung des IBO „Sick Building Syndrom“, S. 153-160. Wien 1992.
- [5] VDI 3484 Blatt 2: Messen von gasförmigen Immissionen; Messen von Innenraumluftverunreinigungen; Bestimmung der Formaldehydkonzentration nach der Acetylaceton-Methode. Berlin: Beuth 2001.
- [6] *Thumulla, J.; Weber, S.*: Komplexe Luftwechseluntersuchungen am Beispiel der historischen Anna-Amalia-Bibliothek. Tagungsband 7. Fachkongress der Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF), S. 278-290. 4.-5. März 2004, München.
- [7] *Andersen, I.; Lundqvist, G. R.; Molhave, L.*: Formaldehyd-aufspaltung fra spanplader i klimakammer. Ugeskr Laeg 136 (1974), S. 2140-2145. Zit. nach *Pluschke, P.*: Luftschadstoffe in Innenräumen. Berlin: Springer 1996.
- [8] *Andersen, I.; Lundqvist, G. R.; Molhave, L.*: Formaldehyd – Formaldehydafgivelse fra spanplader – en matematik model. Ugeskrift for Laeger 136 (1979), S. 2145-2150. Zit. nach *Marutzky, R.*: Thermische Verwertung von Reststoffen in der Holzwirtschaft. WKI Mitteilung 552. Braunschweig 1992.
- [9] *Tappler, P.; Sulzner, M.; Scheidl, K.; Damberger, B.; Burtcher, I.*: Formaldehyd und Luftwechsel in österreichischen Fertigteilhäusern. Wien: IBO Eigenverlag 1997.
- [10] Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft. Hrsg: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW), Akademie der Wissenschaften – Kommission Reinhaltung der Luft. Wien: Eigenverlag des BMLFUW, Blau-Weiße Reihe (Loseblattsammlung) 2006.
- [11] Gesundheit und Umwelthygiene – Richtwerte für die Innenraumluft. Hrsg.: Umweltbundesamt. Dessau 2007. www.umweltbundesamt.de/gesundheit/innenraumhygiene/richtwerte-irluft.htm