

Schadstoffbelastete Gebäude – Chancen und Risiken der Energetischen Sanierung

Uwe Münzenberg und Jörg Thumulla

anbus analytik GmbH

Gesellschaft für Umweltanalytik

Gebäuediagnostik und Umweltkommunikation

Mathildenstraße 48

90762 Fürth

Tel.: 0911-7437170

Fax: 0911-7437176

eMail: info@anbus-analytik.de, www.anbus-analytik.de

Problemstellung

Zum Schutz der Umwelt und der natürlichen Ressourcen werden erhebliche Mittel in die energetische Sanierung von Gebäuden investiert. Gleichzeitig werden zum Schutz der Gebäudenutzer ebenfalls erhebliche Mittel in die Sanierungen von Schadstoffbelastungen investiert. Das Problem ist, dass in aller Regel bei der Planung einer Sanierung nur der eine dieser beiden Sanierungszwecke berücksichtigt wird. So werden die Chancen einer umfassenden Sanierung und das Potential der synergistischen Effekte nicht genutzt. Im Gegenteil: Durch die Nicht-Beachtung des Schadstoffaspektes bei einer energetischen Sanierung werden vorhandene Schadstoffprobleme verstärkt.

Drei alltägliche Beispiele:

In einer Schule aus den 70er Jahren werden die Fenster im Rahmen einer energetischen Sanierung erneuert. Oberhalb der abgehängten Decke befindet sich eine verlorene Schaltung aus Spanplatten. Durch die neuen Fenster sinkt der natürliche Luftwechsel in den Räumen, so dass der Formaldehydgehalt, der dank der undichten Fenster vorher noch nicht auffällig geworden war über den Grenzwert steigt und eine Sanierung der Schule erneut beginnt, diesmal eine Schadstoffsanierung.

Oder: bei der Sanierung von Wohnblöcken wird durch die notwendige Erhöhung der Luftdichtigkeit der natürliche Luftwechsel nahezu auf null reduziert. Als Folge kann durch die Wohnungsnutzung entstehende Feuchtigkeit über die übliche Fensterlüftung nicht mehr ausreichend abtransportiert werden. Die Folge ist Schimmelpilzbildung an bauphysikalischen Schwachstellen – trotz Außendämmung.

Auf der anderen Seite wird beispielsweise bei der PCB-Sanierung ein erheblicher Aufwand getrieben, um auch die letzte sekundäre Belastung zu beseitigen, obwohl sich mit einem

Lüftungskonzept, z.B. einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung die Sanierungszielwerte kostengünstiger erreichen ließen. Ein zusätzlicher positiver Effekt wäre, dass auch gleichzeitig die energetische Sanierung der Schule ein gutes Stück voran gebracht würde.

Schließlich wird durch konsequente Auswahl schadstoff- und emissionsarmer Baustoffe der Einbau neuer Altlasten vermieden. Bei besserer Nutzerzufriedenheit ist ein niedriger und damit energetisch günstigerer Luftwechsel zu erreichen. Das Prüfen neu einzubauender Baustoffe vor ihrer Verwendung erhöht bei größeren Projekten die Baukosten nur im Promille-Bereich. Das Risiko von finanziellen Schäden durch nicht nutzbare Räume und Sanierungskosten ist unkalkulierbar erhöht.

Das Problem ist die fehlende Kommunikation zwischen Innenraumhygienikern und Energieplanern. Vielfach wissen die einen noch nicht einmal von den Möglichkeiten der anderen.

Als Grundlage für die Kommunikation zwischen Energieplanern und Innenraumhygienikern soll im folgenden ein kurzer Einblick in die Schadstoffproblematik von Gebäuden gegeben werden.

Mittel- und Schwerflüchtige Organische Verbindungen

Holzschutzmittel

Häufigste Vertreter, die jedoch praktisch nur noch in Altlasten vorkommen, sind Pentachlorphenol (PCP) und Lindan. PCP wurde als Fungizid bis in die 80er Jahre eingesetzt und ist seit 1989 in Deutschland verboten. Lindan wurde als Insektizid in Holzschutzmitteln und Insektenbekämpfungsmitteln wie Holzwurmtod eingesetzt. Der Einsatz dieser Mittel führte zum Holzschutzmittelsyndrom und hat zu einem der längsten Gerichtsprozesse, dem Holzschutzmittelprozess¹ geführt. In den 80er Jahren wurde insbesondere PCP durch eine Vielzahl andere Wirkstoffe wie das Dichlofluanid, Tolyfluanid, Fumecycloxy, Chlorthalonil oder die Triazole Terbufunazol und Propiconazol ersetzt². In den 90er Jahren setzt sich die Erkenntnis durch, dass in Wohnräumen keine Holzschutzmittel eingesetzt werden sollten. Das BgVV begründet dies mit der Vermeidung jeder unnötiger Belastung der Bevölkerung mit biologisch wirksamen Chemikalien. Großflächiges Ausbringen von Holzschutzmitteln in Innenräumen ist laut BgVV als unsachgemäße Anwendung von Holzschutzmitteln einzustufen, die zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen des Anwenders und seiner Mittel führen kann.³

Ein Problem insbesondere in den neuen Bundesländern und ehemals von den amerikanischen Streitkräften genutzten Gebäuden ist der Einsatz von DDT zum Holzschutz in Dachstuhl. Während der Einsatz von DDT in den alten Bundesländern 1972 verboten wurde, ist in den neuen Bundesländern bis Ende der 80er Jahre mit einer Anwendung zu

1 Von Ratten und Menschen

2 Bremer Umweltinstitut (Hrsg.) *Gift im Holz*, Eigenverlag, Bremen 1994

3 Bundesamt für gesundheitlichen Verbraucherschutz und Veterinärmedizin: Broschüre „Vom Umgang mit Holzschutzmitteln“, 1997

rechnen. Insbesondere in Leichtbauten wie Pavillons ist bis in die frühen 70er Jahre mit Chlornaphthalinen als Holzschutzmittel zu rechnen, die häufig für einen muffigen Geruch verantwortlich sind.

PAK (Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe)

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe sind eine Gruppe von mehreren hundert Einzelverbindungen, die bei Erhitzungs- oder Verbrennungsprozessen unter Sauerstoffmangel (Pyrolyse) entstehen und daher z.B. in Ruß in großen Mengen enthalten sind. Sie sind daher Bestandteil der Emissionen vieler industrieller Prozesse und des Kfz-Verkehrs und sind in der Umwelt ubiquitär verbreitet. Innenraumhygienisch relevant sind PAK vor allem durch den Einsatz von Steinkohlenteer als Parkettkleber bis Ende der 60er Jahre. Weitere Quellen sind Teeranstriche⁴ und der Einsatz von Teerölen als Holzschutzmittel (Carbolineum). Eine Besonderheit ist das Naphthalin, das früher als Mottenschutzmittel eingesetzt wurde. Wegen seines muffigen Geruchs und seiner krebserregenden Eigenschaften wird es seit Jahren nicht mehr verwendet.

Zahlreiche Vertreter der PAK sind als krebserzeugend (K2) eingestuft. Für die Aromatengemische des Steinkohlenteers und der Steinkohlenteeröle ist die krebserzeugende Wirkung beim Menschen epidemiologisch nachgewiesen. Deshalb wurden sie als beim Menschen eindeutig krebserzeugend eingestuft (K1).

Phosphorsäureester

Während anorganische Flammschutzmittel festgebunden im Material vorliegen, kann der Einsatz von organischen Flammschutzmittel zu erheblichen Kontaminationen von Innenräumen über die Raumluft und den Hausstaub führen. Beispiele sind das Tris(2-chlorethyl)phosphat (TCEP) und das Tris(monochlorpropyl)phosphat (TCPP). Sie finden Einsatz in PU-Schäumen, Farbanstrichen und Tapeten. Neben den beschriebenen Reizwirkungen ist diese insbesondere problematisch weil TCEP mittlerweile in Deutschland als krebserregend (K2) eingestuft ist.⁵

Phthalsäureanhydrid

Phthalsäureanhydrid. gehört zu den technisch wichtigsten aromatischen Verbindungen, z.B. bei der Synthese von Alkydharzen, ungesättigten Polyesterharzen, Lacken, Kunststoffen oder Phthalat-Weichmachern. Bei höheren Konzentrationen zeigt es Reizwirkung auf Augen, Haut und Schleimhäute wobei die Gefahr der Sensibilisierung besteht, weshalb es zu den relevanten Innenraumallergenen gehört.

Polychlorierte Biphenyle (PCB)

PCB befinden sich aktuell wieder in der Diskussion. Sie wurden in Innenräumen insbesondere durch Fugendichtmassen, Lacke, Farben und Kondensatoren eingebracht. Verdächtig sind insbesondere öffentliche Bauten der 60er und 70er Jahre. Es konnten jedoch auch

4 M. Köhler, U. Hoernes und C. Zorn PAK-Anstriche durch Teeranstriche und ihre Sanierung in AGÖF 2001

5 G. Ingerowski, A. Friedle und J. Thumulla: *Chlorinated Ethyl and Isopropyl Phosphoric Acid Triesters in the Indoor Environment – An Inter-Laboratory Study*, in *Indoor Air* 2001 11: 145-149

relevante Konzentrationen an PCB bei Wohngebäuden in Plattenbauweise festgestellt werden (alte Bundesländer).

Die Stoffgruppe der PCB besteht aus 209 unterschiedlichen Substanzen (Kongeneren), wobei in der Praxis technische Gemische unterschiedlichster PCB eingesetzt werden. Die Toxizität der einzelnen Kongenere kann in Abhängigkeit von ihrem Chlorierungsgrad und damit ihrer Flüchtigkeit und Ihrer Struktur erheblich differenzieren. Die schwerer flüchtigen PCB werden hauptsächlich über die Nahrung aufgenommen und reichern sich im Fettgewebe an. Ihre biologischen Halbwertszeiten liegen bei bis zu 28 Jahren. Höher chlorierte PCB sind eher für die systemischen Effekte (Nervensystem, Immunsystem) verantwortlich.

Für Innenraumbelastungen relevanter sind die leichter flüchtigen PCB. So ist bei den leichter abbaubaren flüchtigeren PCB zwar mit geringerer Anreicherung im Körper aber möglicherweise mit verstärktem Auftreten von genotoxischen Metaboliten zu rechnen. Es gibt Hinweise darauf, dass die flüchtigeren PCB toxischer als die weniger flüchtigen wirken. Ein besonderes Problem sind die sog. planaren PCB, die in unterschiedlichen Mengen in allen PCB-Gemischen vorkommen. Sie sind von der toxischen Wirkung her mit Dioxinen vergleichbar.⁶

Seit der PCB-Verbotsverordnung (1989) ist in Deutschland das Inverkehrbringen von Polychlorierten Biphenylen sowie von Zubereitungen mit einem Gehalt von mehr als 50 mg/kg PCB verboten. Eine aktuelle Übersicht über die PCB-Problematik findet sich in der Broschüre PCB: Begrenzter Nutzen - grenzenloser Schaden⁷ sowie dem Buch PCB-Belastung in Gebäuden⁸.

Flüchtige organische Verbindungen

In der Innenraumluft lassen sich weit über hundert flüchtige organische Verbindungen (VOC) nachweisen, die aus verschiedenen Quellen in die Raumluft emittiert werden. Da sich die Zusammensetzung vieler in Innenräumen eingesetzter Produkte im Laufe der Zeit ändert, ist davon auszugehen, dass sich auch die Zusammensetzung des in der Innenraumluft beobachteten VOC-Gemisches über Jahre hinweg ändert. Ursache hierfür sind z.B. ein geändertes Konsumverhalten der Bewohner, beispielsweise beim Möbelkauf oder bei der Auswahl von Anstrichstoffen, und die Substitution von Verbindungen mit nachgewiesener und vermuteter toxikologischer Relevanz. Über Prüfkammeruntersuchungen können die Emissionen von Möbel zur Vergabe von Umweltzeichen geprüft werden⁹. Die Konzentrationsverteilungen von VOC in der Innenraumluft wurden mittlerweile in einigen

6 M. Hassauer und F. Kalberlah, *Polychlorierte Biphenyle*, in Eikmann et. Al. (Hrsg.) Gefährdungsabschätzung von Umweltschadstoffen, Erich Schmidt Verlag, Berlin 1999.

7 Verein für Umwelt- und Arbeitsschutz e.V. u. Bremer Umweltinstitut e.V. (Hrsg.): *PCB: Begrenzter Nutzen - grenzenloser Schaden*, Eigenverlag, Bremen 1999

8 Katalyse e.V. (Hrsg.): *PCB-Belastung in Gebäuden Erkennen – Bewerten – Sanieren*, Wiesbaden, Berlin 1995

9 O. Jann et al.: *Emissionsarme Möbel: Emissionsverhalten, Prüfanforderungen, Umweltzeichen*, AGÖF 1999

Studien¹⁰¹¹¹² beschrieben, wobei der Umwelt-Survey aus den Jahren 1985/86 aufgrund veränderter Produkte nicht mehr dem heutigen Stand entsprechen dürfte. Eine ausführliche Übersicht zu Innenraumbelastungen durch Lösemittel gibt der Verein für Umwelt- und Arbeitsschutz e.V. und das Bremer Umweltinstitut e.V.¹³

Kohlenwasserstoffe

Kohlenwasserstoffe sind Bestandteile des Erdöls und gelangen als Lösemittel (Testbenzin etc.) oder als Bestandteile von Heizöl und Kraftstoffen in Innenräume. Innerhalb der Kohlenwasserstoffe kann man drei Gruppen unterscheiden: die gesättigten, die ungesättigten und die aromatischen Kohlenwasserstoffe.¹⁴ Problematisch sind insbesondere die aromatischen Verbindungen, insbesondere das als krebserregend eingestufte Benzol, das aber mittlerweile nur noch über KFZ-Abgase beispielsweise aus integrierten Garagen in die Innenräume gelangt¹⁵. Die ungesättigten Verbindungen wie das trimere Isobuten oder das 4-Phenylcyclohexen sind hauptsächlich Verunreinigungen bei der Herstellung von Polymeren (z.B. SyntheselateX) und sind insbesondere im Zusammenhang mit Geruchsproblemen relevant.¹⁶

Terpene

Terpene gehören ebenfalls zu den ungesättigten Kohlenwasserstoffen. Aufgrund ihrer natürlichen Herkunft werden sie jedoch von diesen unterschieden. Sie sind Bestandteile etherischer Öle und in der Regel geruchsintensiv. In Innenräumen gelangen sie als Lösemittel für Naturfarben oder als Ausdünstungen aus frischem Holz. Problematisch ist insbesondere das sensibilisierend wirkende Δ^3 -Caren, das in Nadelholz enthalten ist. Es ist daher i.d.R. in Naturfarben nicht mehr enthalten. Pinene stammen aus frischem Nadelholz, und sind Hauptbestandteil von Terpentinölen. Limonen ist hauptsächlich in den Schalen von Zitrusfrüchten enthalten und wird als Lösemittel in Naturfarben und Zitrus-Duft in Reinigungsmitteln und Kosmetika eingesetzt.¹⁷

10 Krause, C.; Chutsch, M.; Henke, M.; Huber, M.; Kliem, C.; Leiske, M.; Mailahn, W.; Schulz, C.; Schwarz, E.; Seifert, B.; Ullrich, D.: *Umwelt-Survey Band IIIc Wohn-Innenraum: Raumluft*; Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene des Bundesgesundheitsamts Eigenverlag; Berlin; 1991

11 Scholz, H.: *Vorkommen ausgewählter VOC in Innenräumen und deren Bedeutung*. In: Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF): *Gebäudestandard 2000: Energie und Raumluftqualität – Ergebnisse des 4. Fachkongresses der Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF) am 25. und 26. September 1998 in Nürnberg*; 205-214; 1998

12 U. Hott et. al.: *Konzentrationen flüchtiger organischer Verbindungen in der Innenraumluft im Zeitraum 1988 bis 1999*, in AGÖF 2001

13 Verein für Umwelt- und Arbeitsschutz e.V. u. Bremer Umweltinstitut e.V. (Hrsg): *Vorsicht Lösemittel – Nicht nur frisch gestrichen*, Eigenverlag, Bremen 1997

14 P. Pluschke, Alkane, Alkene und cycloaliphatische Kohlenwasserstoffe, in *Luft-Schadstoffe in Innenräumen: ein Leitfaden*, S. 161-179, Springer, Berlin 1996

15 U. Siemers u. P. Stolz, *VOC-Belastungen aus Kraftstoffen in Wohnungen über Garagen*, in AGÖF 1997 *Ökologisches Bauen und Sanieren*, Hrsg. Diel, F.; Feist, W.; Krieg, H.-U.; Linden, W., Verlag C.F. Müller Heidelberg 1998

16 F. Kuebart, *Prüfkammeruntersuchungen von Baustoffen – Ökologische Verträglichkeit*, in AGÖF 1993

17 P. Pluschke, *Isoprenoide: Terpene, Campher und verwandte Verbindungen* in *Luft-Schadstoffe in Innenräumen: ein Leitfaden*, S. 161-179, Springer, Berlin 1996

Höhere Aldehyde

Aufgrund ihrer relativ niedrigen Geruchsschwelle besitzen Aldehyde eine erhebliche Bedeutung für die Qualität der Innenraumluft. Eine Übersicht über die zu erwartenden Konzentrationen in der Raumluft gibt¹⁸. Insbesondere n-Hexanal stellt eine Leitkomponente dar, wenn die Geruchsbelästigungen mit Aldehyden in Verbindung gebracht werden können. Im Vergleich zu anderen Aldehyden wie Furfural und Benzaldehyd weisen die höheren aliphatischen Aldehyde eine vergleichsweise geringe Toxizität auf¹⁹. Quellen sind einerseits Materialien aus Holz und Zellulose-haltigem Material wie Paneele, Laminat, Fertigparkett oder OSB-Platten, bei denen die Aldehyde produktionsbedingt aus Restbeständen von Harzen entstehen. Hierbei treten in geringeren Konzentrationen auch ungesättigten Aldehyde und Ketone auf, die teilweise extrem niedrige Geruchsschwellen besitzen - z.B. 1-Nonen-3-on = $0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ - und somit bereits in Spuren einen deutlichen Beitrag zu der Geruchsbelastung liefern. Weitere Quellen sind Produkte auf Basis von Leinöl, das beispielsweise als Bindemittel in Naturfarben und zur Herstellung von Linoleum eingesetzt wird. Ausreichend ausgereifte Produkte sind jedoch unproblematisch.

Neben diesen Beispielen der Freisetzung von Aldehyden aus nachwachsenden Rohstoffen können auch synthetische Materialien als Ursache hierfür verantwortlich gemacht werden. So konnten Phthalate, die als Weichmacher Bestandteil von PVC-Bodenbelägen sind, auf zu feuchten Estrichen hydrolysiert und allmählich in die entsprechenden Aldehyde (Ethylhexanal) oxidiert werden. Auch Low Density Polyethylen (LDPE) kann unter ungünstigen Umständen im Kontakt mit Metallen als Katalysator durch radikalische Zersetzung in olefinische Bruchstücke und anschließende Oxidation in die entsprechenden Aldehyde eine unerwartete Geruchsproblematik verursachen.

Alkohole

Zu den bekanntesten Alkoholen zählt Ethanol, das durch Gärungsprozesse entsteht und in großen Mengen in alkoholischen Getränken enthalten ist. Das Vorkommen von iso-Propanol und Ethanol ist hauptsächlich auf deren Einsatz in Reinigungsmitteln, Raumluftsprays und Kosmetika zurückzuführen. Höhere Alkohole werden als Lösungsmittel für Lacke, Farben, Harze, Polituren, Extraktions- und Reinigungsmittel sowie für die Kunststoffherstellung, in Parfümen und Aromastoffen verwendet.

Erhöhte Konzentrationen des Alkohols 2-Ethyl-1-hexanol korrelieren in der Regel mit vorliegenden, häufig versteckten Feuchteschäden und Geruchsproblemen, wobei in großem Umfang das als Weichmacher eingesetzte DEHP unter alkalischen Bedingungen (z.B. auf einem Estrich) hydrolysiert (zersetzt) wird. Die gleiche Beobachtung gilt für den Alkohol n-Butanol, der unter diesen Bedingungen aus dem Weichmacher Dibutylphthalat (DBP) entsteht.²⁰

18 Beratung und Analyse – Verein für Umweltchemie e.V. (Hrsg.): *Analyse und Bewertung der in Innenräumen vorkommenden Konzentrationen an länger-kettigen Aldehyden*, Eigenverlag, Berlin 1993.

19 F. Kuebart, *Aldehyde aus Baustoffen und anderen Werkstoffen*, in AGÖF 2001

20 H. Scholz: *Vorkommen ausgewählter VOC in Innenräumen und deren Bewertung*, in AGÖF 1998

Ester und Ether mehrwertiger Alkohole (Glykolverbindungen)

Ester und Ether mehrwertiger Alkohole (EEMAS) werden vor allem in lösemittelarmen Systemen („Wasserlacke“, Dispersionsfarben, Dispersionskleber) verwendet, um den Gehalt leichtflüchtiger Lösemittelbestandteilen aus Arbeitsschutzgründen zu vermindern. Insofern steigt deren Gehalt der Innenraumluft in den letzten Jahren stark an. Eine Übersicht über die Konzentrationsverteilung in Innenräumen befindet sich in²¹.

Wichtig für ihre Bewertung als potentielle raumlufbelastende Faktoren ist ihre deutlich geringere Flüchtigkeit im Vergleich zu den "klassischen" Lösemittelkomponenten aufgrund der höheren Siedepunkte (zwischen 125°C und 290°C). Dadurch erreichen diese Chemikalien zwar während und unmittelbar nach der Verarbeitung entsprechender Produkte bei weitem nicht so hohe Raumlufkonzentrationen wie die leichtflüchtigen Lösemittel, andererseits gasen sie über sehr lange Zeiträume aus.

Phenole/ Kresole

Aufgrund ihrer recht hohen Siedepunkte um 200°C gehören die Phenole und Kresole eher zu den Hochsiedern. Dies hat zu Folge, dass sie über längere Zeiträume hinweg aus in Innenräumen eingesetzten Materialien ausgasen können. Sie sind in großen Mengen in Teerölen enthalten, die durch Erhitzen von Steinkohle, Braunkohle oder Holz unter Luftausschluss erzeugt werden. Der charakteristische und unangenehme Geruch vieler Phenole und Kresole ist stark durchdringend. Aufgrund ihrer sehr niedrigen Geruchsschwellenwerte (Kresole: 4 µg/m³; Phenol: 200 µg/m³) kann dies zu einer langandauernden Geruchsbelästigung führen. Phenole (K3B) und Kresole (K3A) gelten als möglicherweise krebserzeugend.

Viele Phenole und Kresole wirken stark fungizid und bakterizid und werden daher als Wirkstoffe in Desinfektionsmitteln und zur Konservierung von Leim, Klebstoffen und Tinten eingesetzt. Die biozide Wirkung der Phenole und Kresole macht Teeröle zu sehr wirksamen Holzschutzmitteln ("Carbolineum"). Neben dem Einsatz als Desinfektions- und Reinigungsmittel in der ehemaligen DDR, der bis heute zu erheblichen Geruchsbelästigungen führt, sind Produkten aus Phenolharzen oder andere Phenolverbindungen enthalten.

Acrylate

Die Produktion von Alkylacrylsäureester hat in den vergangenen Jahren stark zugenommen. Vereinzelt lassen sich Alkylacrylsäureester leicht polymerisieren und bieten daher gute Voraussetzungen für die großtechnische Anwendung bzw. Verarbeitung in den verschiedensten Bereichen. Während bei Acryllacken, mit „Blauer Engel Auszeichnung“ keine Acrylatausgasung festzustellen ist, können bei 2-Komponentensystemen Probleme auftreten. Die meisten dieser Acrylate sind als Monomere giftig und stehen im Verdacht, krebserregend zu sein.

Formaldehyd

Formaldehyd ist eine gasförmige, organische Verbindung, die in der Natur u. a. bei der unvollständigen Verbrennung von kohlenstoffhaltigem Material entstehen kann. Es zählt

21 P. Plieninger: *Ester und Ether mehrwertiger Alkohole in der Raumluf – Eine repräsentative Untersuchung in 200 Berliner Haushalten*, in AGÖF 1998

trotz umfangreicher Reglementierungen immer noch zu den bedeutsamen Innenraum-schadstoffen und wird in Innenräumen bis hin zu Konzentrationen im Bereich der maximalen Arbeitsplatzkonzentration in Höhe von 0,5 ppm nachgewiesen. Formaldehyd zählt daher zu den Innenraumverunreinigungen, die in einem vergleichsweise geringen "Sicherheitsabstand" zu bestehenden Arbeitsplatzgrenzwerten in Innenräumen auftreten.²²

Während die Überschreitung des Grenzwertes nach Chemikalienverbotsverordnung für Holzwerkstoffe bei Spanplatten derzeit kaum mehr zu beobachten ist, wird vor allem bei Leim- und Sperrhölzern, verleimten Parkettdielen, OSB-Platten und Laminatböden sowie Holzwerkstoffen, die mit säurehärtenden Lacken behandelt wurden, der Grenzwert für das Verbot des Inverkehrbringens (bestimmt nach EN 717/2 für beschichtete Holzwerkstoffe und Leimhölzer) erreicht oder überschritten. Obwohl es in der Diskussion über Holzwerkstoffplatten immer wieder auftaucht, treten in Massivhölzern keine relevanten Formaldehydkonzentrationen auf²³. Nach wie vor ein Problem ist Formaldehyd in Fertighäusern, insbesondere der 60er, 70er und frühen 80er Jahre.²⁴ Die sich in einem Wohnraum einstellende Raumluftkonzentrationen ist neben der Raumbeladung auch abhängig von raumklimatischen Bedingungen wie Luftwechsel, Luftfeuchte und Raumtemperatur.

Die Aufnahme von Formaldehyd erfolgt überwiegend über die Atmung. Es wird im Atemtrakt vollständig aufgenommen. Die Ausscheidung erfolgt teilweise nach Metabolisierung zu Ameisensäure über den Urin, teilweise als Kohlendioxid über die Lunge.

Bei langandauernder Formaldehyd-Exposition können sich folgende Symptome zeigen: Husten, Kopf- und Ohrenscherzen, Nasen- und Halsentzündungen. Dazu sind allgemeine Zeichen des Unwohlseins wie Atem- und Kreislaufbeschwerden, Schwindelgefühl, Übelkeit bis hin zu Erbrechen, Schlaflosigkeit, Nervosität, Depressionen, Stressanfälligkeit, Störungen des Erinnerungsvermögens sowie allergische Erkrankungen (auch Asthma) möglich. Chronische Belastung mit ständiger Reizung der Atmungsorgane lässt die Schleimhäute anfällig werden gegenüber Pollen, Schimmelpilze und andere Umweltgifte. Dies führt wiederum zu weiteren allergischen Reaktionen. Als Folge chronischer Einwirkung sind auch Nieren-, Leber- und Lungenschäden möglich.

Bei Personen mit einem gestörten Formaldehydstoffwechsel wurden Störungen des zentralen Nervensystems beobachtet: Konzentrationsstörungen, Wortfindungsstörungen, Übelkeit, Unruhe (häufig mit Diarrhöe), auch Erbrechen. Diese Symptome werden oft als psychosomatische Beschwerden gedeutet.²⁵

Biogene Schadstoffe

Schimmelpilzbelastungen in Gebäuden sind eines der häufigsten Umweltprobleme in Innenräumen. Ursachen von mikrobiellen Wachstum sind neben Baumängel und unsachgemäß sanierten Wasserschäden immer häufiger ein ungenügender Wärmedämmstandard bei Altbausanierungen im Zusammenspiel mit gleichzeitiger Verringerung des natürli-

22 Helmut Scholz: *Vorkommen von Formaldehyd in Innenräumen*, in AGÖF 1998

23 H.-U. Krieg, *Formaldehyd aus natürlichem Holz*, in AGÖF 2001

24 A. Wichmann, *Formaldehyd und Luftwechselraten in Fertighäusern*, AGÖF 1993

25 A. Vogel (Hrsg.), *Politik Formaldehyd*, AbeKra-Verlag 1997

chen Luftwechsels durch bauliche Veränderungen. Das Thema Schimmelpilz in Innenräumen ist heute daher so aktuell wie nie zuvor.

Schimmelpilze bilden in Wohnräumen eine zunehmende Allergenquelle. Nach Studien der New Yorker Mount Sinai School of Medicine reicht das Spektrum allergischer Reaktionen von Hautreizungen, grippeähnlichen Beschwerden über schwere Erschöpfungszustände bis hin zu Schwindel sowie Gedächtnis- und Sprachstörungen. Einen weiteren Hauptkomplex bilden Atemwegserkrankungen, verbunden mit Reizhusten und Engegefühl in der Brust bis hin zum allergischen Asthma.

Als typische Erkrankungen sind zu nennen: Erkrankungen der oberen und unteren Atemwege, Rhinitis, Sinusitis, Laryngitis, Bronchitis, Alveolitis; Reizerscheinungen in den Augen und auf der Haut; erhöhte Infektanfälligkeit, chronischer Erschöpfungszustand (chronic fatigue syndrome) und Allergien. Es gibt auch Hinweise darauf, dass es bei einigen immungeschwächten Individuen, sowie immunsupprimierten Patienten, zu ernstesten u.U. auch tödlichen Erkrankungen kommen kann.

Bestimmte Schimmelpilze, wie zum Beispiel *Stachybotrys atra*, *Aspergillus spp.*, *Penicillium spp.*, *Trichoderma*, *Paecilomyces* können Mykotoxine produzieren (Ueno 1983, Hendry und Cole 1993). Diese sind hauptsächlich in den Sporen enthalten und können durch luftgetragene Sporen zu einer signifikanten Luftkontaminierung beitragen (Sorenson et al 1987). Einzelne Pilzarten können mehrere Toxine bilden. Wiederum können einzelne Toxine unabhängig von mehreren Pilzarten gebildet werden. In neueren klinisch-epidemiologischen Untersuchungen und Fallbeschreibungen werden nun auch Zeichen einer inhalationsbedingten Intoxikation beschrieben.²⁶

Luftwechsel und Schadstoffkonzentrationen

Mit einer kritischen Betrachtung möglicher Altlasten im Bestand sowie die Auswahl neuer schadstoffarmer Baustoffen bei der energetischen Sanierung von Altbauten ist jedoch erst die Hälfte der Wegstrecke erreicht. Probleme treten insbesondere auf, wenn der veränderte Luftwechsel durch energetische Sanierungen nicht berücksichtigt wird. Denn wenn der Luftwechsel nicht ausreichend ist, ist es selbst mit einer kritischen Auswahl von schadstoffarmen Baustoffen nicht möglich ein nach baubiologischen Kriterien gesundes Raumklima zu schaffen.

Besonders deutlich wird das Problem am Beispiel Schimmelpilzbefall in Altbauwohnungen nach einer (unzureichenden) energetischen Sanierung.

Die Frage, wer die Schuld an einem Schimmelbefall hat, beschäftigt Gerichte tagtäglich. Nach wie vor treffen Sachverständige in ihren Gutachten pauschale Aussagen: „Für Feuchtigkeit und die daraus resultierenden mikrobiellen Probleme ist der Bewohner durch mangelhaftes Lüften verantwortlich.“ Die Fragestellung an den Bausachverständigen lautet in der Regel wie folgt: *Liegt ein Baumangel oder ein Fehler im Nutzerverhalten vor?* Kann

26 (Hintikka 1987; Hendry und Cole 1993; Johanning, Morey, Goldberg 1993; Auger, Gourdeau und Auger 1995, Johanning 1998), ausführliche Zitate werden nachgereicht

kein offenkundiger Baumangel wie von außen eindringende Feuchtigkeit durch fehlerhafte Abdichtung festgestellt werden, wird häufig der einfache Schluss gezogen, dass fehlerhaftes Nutzerverhalten vorliegt. Mit dieser gutachterlichen Feststellung läuft der Wohnungsnutzer Gefahr, für die Beseitigung des Schadens die Kosten zu tragen und durch ein „richtiges“ Lüftungsverhalten in Zukunft dafür zu sorgen, dass der Schaden nicht wieder auftritt. Ihm wird damit möglicherweise die Bürde auferlegt, eine z.B. unzureichende Sanierung des Gebäudes durch ein aktives Nutzerverhalten auszugleichen. Denn selten wird bei einer Altbausanierung bedacht, dass die damaligen Erbauer das Gebäude für andere Nutzungsgewohnheiten konstruierten, als sie für moderne Wohnmenschen heute selbstverständlich erscheinen. Da häufig bei Teilsanierungen die komplexen bauphysikalischen Zusammenhänge über Luftführungen in Gebäuden nicht ausreichend berücksichtigt werden, wird nicht selten Feuchtigkeit in ehemals trockene Altbauten mit eingebaut.

Bis zu 40% der Mehrfamilienhäuser im Altbaubestand mit veraltetem Wärmeschutz, welche jedoch mit modernen Fenstern ausgerüstet wurden, sollen sichtbaren Schimmelpilzbefall aufweisen^[27, 28]. Befragungsergebnisse von 53 großen Wohnungsgesellschaften^[3], welche zusammen über 500.000 Wohnungen verwalten, geben an, dass nach dem Fensteraustausch in 70 % der Wohnungen Schimmelpilz auftrat. Insgesamt geben die Wohnungsbaugesellschaften an, dass gut 10 % aller Wohnungen, also Neubau und Altbau zusammen, einen Schimmelpilzbefall aufweisen.^[4]

Diese Zahlen stammen aus Befragungen. Die Dunkelziffer könnte noch größer sein, da der Schimmelpilz von den Bewohnern erst einmal erkannt werden muss, um überhaupt erfasst werden zu können. Viele Nutzer scheuen sich, den Befall anzugeben, tun ihn als unbedeutend ab oder haben diesen hinter Möbeln noch gar nicht entdeckt.

Häufigste Ursache für den Schimmelpilz in Wohnräumen ist die Kondensation von Luftfeuchtigkeit an kühleren Oberflächen. Bei der Frage nach Strategien gegen dieses vermeidbare gesundheitliche Risiko hat die Kenntnis über den Luftwechsel^[5] in Gebäuden eine zentrale Bedeutung. Denn je geringer der Feuchtegehalt der Raumluft ist, desto weniger Feuchtigkeit fällt an kühlen Wandoberflächen an. Der notwendige Luftwechsel kann daher sehr unterschiedlich sein.

Schimmelpilzbefall ist daher ein typisches Problem von Altbauten. Für Sanierungsempfehlungen ist es daher von entscheidender Bedeutung, Kenntnisse über den tatsächlichen natürlichen Luftwechsel zu haben. Nur wenn diese vorhanden sind, können sinnvolle Sanierungsstrategien entwickelt werden. Ohne dieses Wissen ist die häufig gegebene Empfehlung von Experten, einfach mehr zu lüften, nicht mehr als ein gut gemeinter Ratschlag.

27 Erhorn: Schäden durch Schimmelpilzschäden im modernisiertem Mietwohnungsbau. Bauphysik 5/88, S. 129-134

28 Heinz: (Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V.): Schornsteinfegerhandwerk, 9/98, S. 24-37

29 Clausnitzer: Zur Notwendigkeit der Überprüfung und Reinigung von Lüftungsanlagen in Wohngebäuden. Studie des Bremer Energie-Institutes, Januar 1997.

30 Bischof: Erste Ergebnisse der bundesweiten Erhebung über die Ursachen von Feuchteschäden und Schimmelpilzbildungen in Wohnungen, Schornsteinfegerhandwerk, Heft 7/2002

31 Der Luftwechsel ist definiert als der Quotient aus dem je Stunde ausgetauschten Luftvolumenstrom und dem Raumvolumen.

Die Relevanz des Luftwechsels wird deutlich, wenn man sich einen Überblick über den Gebäudebestand verschafft. Hierzu führte AnBUS e.V. im Rahmen seiner gebäude-diagnostischen Tätigkeit ein Forschungsprojekt zur Bestimmung des natürlichen Luftwechsels im Altbaubestand anhand von Blower-Door-Messungen durch^[6].

Ein Ergebnis dieses Projektes sind Erkenntnisse über den natürlichen Luftwechsel im Gebäudebestand anhand von 80 beispielhaften Gebäuden aus dem Altbaubestand, welche im folgenden vorgestellt werden.

Statistische Ergebnisse zum Luftwechsel im Gebäudebestand

Die statistische Auswertung der natürlichen Luftwechsel (Untersuchungszeitraum: Heizperiode 2003, Ein- und Mehrfamilienhäuser meist älter als 30 Jahre) zeigt:

- In 85 % der Wohnungen ist der natürliche Luftwechsel geringer als $0,4 \text{ h}^{-1}$
- 90% der gemessenen natürlichen Luftwechselwerte lagen unter $0,5 \text{ h}^{-1}$
- 50% der gemessenen natürlichen Luftwechselwerte lagen unter $0,18 \text{ h}^{-1}$
- In 20 % der Wohnungen liegt der natürliche Luftwechsel unter $0,1 \text{ h}^{-1}$
- Der Mittelwert der gemessenen natürlichen Luftwechselwerte liegt bei $0,26 \text{ h}^{-1}$.

Graphische Auswertung

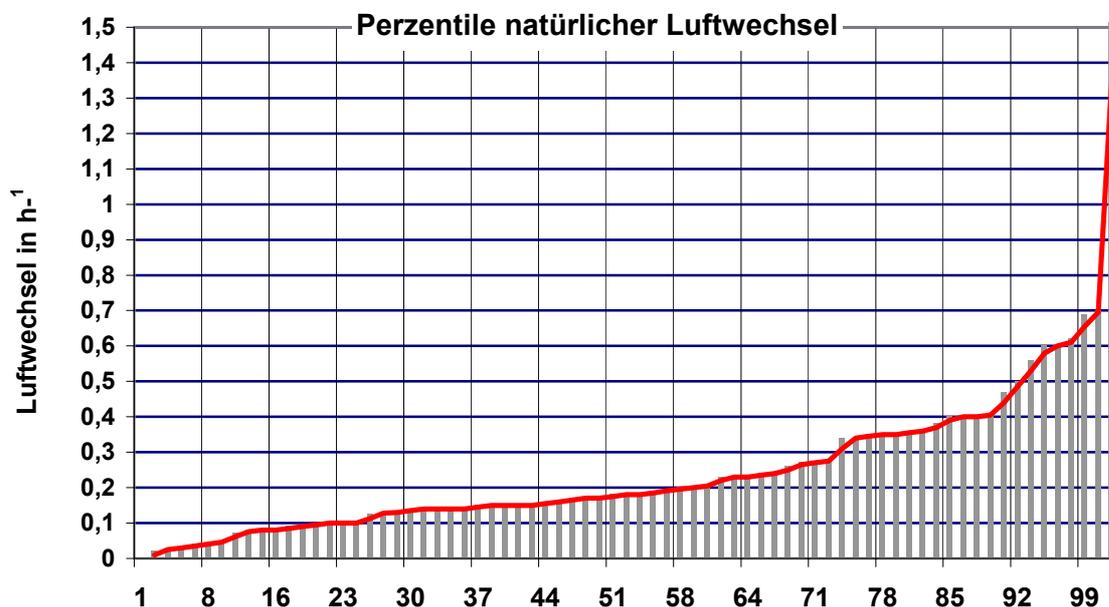


Abb 1: Auswertung des natürlichen Luftwechsels im Gebäudebestand

32 Weithaas, T.: Bestimmung des natürlichen Luftwechsels im Altbaubestand anhand von Blower-Door-Messungen, Korrelation zwischen dem mittels Blower-Door gemessenen Luftwechsel bei 50 Pa n50 und dem mittels Tracergas-Messungen ermittelten „natürlichen“ Luftwechsel, Diplomarbeit an der TH Freiberg, www.anbus.de

Der hygienisch notwendige Mindestluftwechsel

Um die Ergebnisse der vorgestellten natürlichen Luftwechselraten diskutieren zu können, sind Informationen zum notwendigen Mindestluftwechsel erforderlich. Welcher Luftwechsel aus innenraumhygienischen Gründen notwendig ist, wird in der Literatur sehr unterschiedlich angegeben. Die EnEV schreibt lediglich im § 5 (Dichtheit, Mindestluftwechsel) vor: „Zu errichtende Gebäude sind so auszuführen, dass der zum Zwecke der Gesundheit und Beheizung erforderliche Mindestluftwechsel sichergestellt ist.“

Die DIN 1946-6 (Raumluftechnik Teil 6: Lüftung von Wohnungen) nennt für den gesamten Wohnbereich je nach Wohnungsgröße und Belegung einen notwendigen freien Luftwechsel (Infiltrationsluftwechsel und Fensterlüftung) von 0,45 bis 0,7 h⁻¹.

Vergleicht man die Luftwechselraten der untersuchten Wohnungen (AnBUS-Studie) mit den in der DIN angesetzten Mindestluftwechsel einer Wohnung im Altbaubestand, erreichen 15 % der Wohnungen diese Anforderung auch ohne weitere Fensterlüftung durch die Nutzer.

Bei 85% der Wohnungen besteht jedoch ohne weitere Lüftungsmaßnahmen die Gefahr von Schimmelpilzbildung. Es ist also für über 70 % der Wohnungen im Altbaubestand notwendig, sich Gedanken über Lüftungsstrategien zu machen. Entscheidend für eine richtige Lüftungsstrategie ist, welchen tatsächlichen Einfluss die Fensterlüftung auf den effektiven Luftaustausch hat.

Einfluss der Fensterlüftung auf den Luftwechsel

Im Rahmen der AnBUS-Studie wurden experimentell in alltäglichen Situationen Luftwechselraten für Fensterlüftungen bestimmt. Beispielhaft sind zwei typische Bedingungen in nachfolgender Tabelle wiedergegeben.

Fensterstellung	Raum	Witterung	Luftwechsel h ⁻¹
Kippstellung	Schlafzimmer	-3 ° C / windstill	1,2 h ⁻¹
Stoßlüftung	Schlafzimmer	-5 ° C / windstill	8,8 h ⁻¹

Anhand folgender Gleichung kann der Anteil des Luftwechsels der Fensterlüftung über den Tag vereinfacht ermittelt werden:

$$n_{\text{Gesamt}} = \frac{(n_{\text{nat}} \cdot t_{\text{nat}}) + (n_{\text{Fensterlüftung}} \cdot t_{\text{Fensterlüftung}})}{t_{\text{nat}} + t_{\text{Lüftungsdauer}}}$$

33 Richter, Hartmann, Kremonke, Reichel (TU Dresden) Gewährleistung einer guten Raumlufqualität bei weiterer Senkung der Lüftungsverluste; Ressortforschungsvorhaben RS III 4-6741-97.118

Jetzt ist es möglich, anhand dieser Daten verschiedene Lüftungsszenarien beispielhaft zu betrachten:

Zur Erläuterung folgen einzelne Berechnungen über den Einfluss der Fensterlüftung auf den erreichbaren Gesamtluftwechsel bei unterschiedlichem Infiltrationsluftwechsel.

Zur Erläuterung folgen beispielhaft Berechnungen in tabellarischer Form über den Zusammenhang des Luftwechsels durch Fensterlüftung auf den möglichen Gesamtluftwechsel bei unterschiedlichen Szenarien der Fensterlüftung. Ziel der Beispiele ist das Erreichen eines notwendigen Mindestluftwechsels von $0,5 \text{ h}^{-1}$ für ein Schlafzimmer in einem Mehrfamilienhaus.

1. Szenario: Stoßlüftung eines Fensters im Schlafzimmer, Stoßlüftung jeweils 5 min:

Angenommener natürlicher Luftwechsel h^{-1}	Luftwechsel bei Stoßlüftung h^{-1}	Anzahl der Fensterlüftungen in 24 Stunden	Resultierender gesamter Luftwechsel im Schlafzimmer h^{-1}
0,3	8,8	2	0,36
0,3	8,8	3	0,39
0,3	8,8	4	0,42
0,3	8,8	5	0,45
0,3	8,8	6	0,48
0,3	8,8	7	0,51
0,3	8,8	8	0,54
0,3	8,8	9	0,58
0,3	8,8	10	0,61

3. Szenario: Kippstellung eines Fensters im Schlafzimmer, Lüftungsdauer jeweils 12 min:

Angenommener natürlicher Luftwechsel h^{-1}	Luftwechsel bei Kippstellung h^{-1}	Anzahl der Fensterlüftungen in 24 Stunden	Resultierender gesamter Luftwechsel im Schlafzimmer h^{-1}
0,3	1,2	2	0,32
0,3	1,2	3	0,33
0,3	1,2	4	0,34
0,3	1,2	5	0,35
0,3	1,2	6	0,36
0,3	1,2	7	0,37
0,3	1,2	8	0,38
0,3	1,2	9	0,39
0,3	1,2	10	0,40

Nimmt man als Beispiel den geforderten Mindestluftwechsel aus der DIN 1946-6 von rund $0,5 \text{ h}^{-1}$ so wird deutlich, dass dieser bei Wohnungen mit einem niedrigen natürlichen Grundluftwechsel mittels Fensterlüftung nur durch ein „engagiertes“ Lüftungsverhalten der Nutzer zu erreichen ist. Wird ein Fenster nur gekippt, selbst bei einer jeweiligen Lüftungsdauer von 30 Minuten, sind die Chancen für einen ausreichenden Luftwechsel in vielen Fällen noch nicht gegeben.

Europäische Normung:

Der deutsche Wohnungsbau liegt bezüglich Luftwechsel deutlich hinter seinen europäischen Nachbarn. Dabei steht die europäische Energie Einsparverordnung - in der Lüftungsanlagen für alle Wohnungen verbindlich vorgeschrieben sind - bereits vor der Tür. Bei unseren europäischen Nachbarn sind Lüftungsanlagen hingegen kein Fremdwort:

1992 wurde in den Niederlanden ein neues Baugesetz eingeführt. Dieses Baugesetz regelt verbindlich den Luftwechsel in Wohnräumen. Ergebnis: Praktisch alle Wohnungen verfügen über passive oder aktive Lüftungssysteme.

In den skandinavischen Ländern existieren jeweils unterschiedliche Standards. Beispielsweise wird in Schweden für den Neubau von Mehrfamilienhäusern mechanische Lüftungsanlagen gesetzlich vorgeschrieben. In Finnland wird in der Baunorm ein Mindestluftwechsel Raumweise festgeschrieben (z.B. für Schlafzimmer 1 h^{-1} und für Wohnräume $0,7 \text{ h}^{-1}$). Das hat zur Folge, dass nahezu alle Gebäude mit mechanischen Lüftungsanlagen ausgestattet sind.

In Dänemark wird pauschal für den gesamten Wohnraum ein Mindestluftwechsel von $0,5 \text{ h}^{-1}$ gefordert.

Fazit

Die Erkenntnisse aus dem Zusammenhang Luftwechsel und Luftfeuchtigkeit und dem damit verbundene Schimmelpilzbefall in sanierten Altbauwohnungen gelten analog bei der Problematik in der Schadstoffkonzentrationen in die Raumluft übertragen werden: Einerseits steigt der Schadstoffgehalt ohne Beseitigung der Quellen nach einer Fensterlüftung, auch wenn ein kompletter Luftaustausch erfolgt, bereits in kurzer Zeit wieder auf seine vorherige Ausgleichskonzentration an. Andererseits ist zu berücksichtigen, dass sich auch relativ geringe Immissionen aus Baustoffen zu bedenklichen Schadstoffkonzentrationen im Innenraum addieren können, wenn diese nicht über einen Luftwechsel in die Außenluft abgeführt werden können.

Eine energetische Sanierung von Altbauten ohne Berücksichtigung von Gebäudealtlasten, der Prüfung neu einzubauender Baustoffe und einem problemorientierten Lüftungskonzept halten wir für bedenklich. Kostenträchtig wird es nach unseren Erfahrungen, wenn zu einem nicht vorhandenen Lüftungskonzept noch eine unkritische Baustoffauswahl erfolgt und emissionsintensive Baustoffe und Oberflächenbeschichtungen in Einsatz kommen.

Literatur

- [1] Bischof: Erste Ergebnisse der bundesweiten Erhebung über die Ursachen von Feuchteschäden und Schimmelpilzbildungen in Wohnungen, Schornsteinfegerhandwerk, Heft 7/2002
- [2] Clausnitzer: Zur Notwendigkeit der Überprüfung und Reinigung von Lüftungsanlagen in Wohngebäuden. Studie des Bremer Energie-Institutes, Januar 1997.
- [3] Erhorn: „Schäden durch Schimmelpilzschäden im modernisiertem Mietwohnungsbau“, in: Bauphysik 5/88, S. 129-134
- [4] Heinz: (Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V.): Schornsteinfegerhandwerk, 9/98, S. 24-37
- [5] Panzhauser et. al.: Die Luftwechselzahlen in Österreichischen Wohnungen; Technische Universität Wien im Auftrag des Österreichischen Bundesministeriums für Bauten und Technik (undatiert)
- [6] Richter, Hartmann, Kremonke, Reichel (TU Dresden): Gewährleistung einer guten Raumluftqualität bei weiterer Senkung der Lüftungsverluste; Ressortforschungsvorhaben RS III 4-6741-97.118 des Bundesministeriums für Raumordnung und Städtebau
- [7] Schmidt, P., Energiedepesche 1995
- [8] Weithaas, T.: Bestimmung des natürlichen Luftwechsels im Altbaubestand anhand von Blower-Door-Messungen, Korrelation zwischen dem mittels Blower-Door gemessenen Luftwechsel bei 50 Pa n_{50} und dem mittels Tracergas-Messungen ermittelten „natürlichen“ Luftwechsel, Diplomarbeit an der TH Freiberg,
- [9] VDI 4300: Bestimmung von Luftwechselzahlen in Innenräumen.