

Master-Thesis zu Wohnungslüftung und Schimmelpilzrisiko – Rezension, ergänzende Diskussion und Schlussfolgerungen für eine effektive Wohnungslüftung unter den Aspekten des energieökonomischen Bauens

Prof. Dr. Klaus Fiedler

Im Juni 2011 legte Peter Hoft eine Masterarbeit zum Thema „Untersuchung des Einflusses der Wohnungslüftung nach DIN 1946-6 auf das Schimmelpilzrisiko und den Energiebedarf von Geschosswohnungen“ am Lehrstuhl für Bauphysik der Universität Stuttgart vor. Diese Arbeit erhielt den Förderpreis 2012 des Bundesverbandes Schimmelsanierung BSS e.V. Mit dem BSS-Förderpreis werden studentische Masterarbeiten aus dem Bereich der Sanierung, Untersuchung und Prävention von Schimmelpilzschäden beziehungsweise mikrobiellen Schäden prämiert.

Wir möchten wichtige Aspekte dieser Arbeit den Lesern vorstellen und einige Ergebnisse kommentieren.

Aus energieökonomischen Gründen werden in den letzten Jahren die Gebäude immer luftdichter ausgeführt. Hierdurch wächst das Risiko einer unzulänglichen Abführung der Luftfeuchtigkeit und der Innenraumemissionen.

Im Mai 2009 erschien die neue DIN 1946-6. Die vorhergehende Regelung von 1998 sah noch die Fensterlüftung als mögliches Planungskonzept für die Wohnungslüftung vor, in der neuen Fassung der DIN wird versucht, die Wohnungslüftung unabhängig vom Nutzer zu regeln.

Durch die Norm wird die Auslegung, Bemessung und Ausführung der freien Quer- und Schachtlüftung sowie der ventilatorgestützten Lüftung geregelt. Der Grundgedanke der Norm besteht darin, dass der mindestens erforderliche Außenvolumenstrom vom Nutzer unabhängig sicherzustellen ist. Durch ein Lüftungskonzept soll überprüft werden, ob hierfür Lüftungstechnische Maßnahmen erforderlich sind.

Die DIN 1946-6 gilt für alle neu zu errichtenden Gebäude sowie Gebäude im Bestand, wenn durch bauliche Maßnahmen an der Gebäudehülle die Luftdichtheit erhöht wird. Konkret ist hierzu festgelegt, dass das Lüftungskonzept zu erarbeiten ist, wenn im Mehrfamilienhaus mehr als ein Drittel der vorhandenen Fenster ausgetauscht sowie im Einfamilienhaus mehr als ein Drittel der vorhandenen Fenster ausgetauscht bzw. mehr als ein Drittel der Dachfläche abgedichtet werden.

Lüftungstechnische Maßnahmen sind immer dann erforderlich, wenn der Außenluftvolumenstrom, welcher zur Verhinderung von Schimmelbefall erforderlich wird, größer ist als der vorhandene Luftvolumenstrom durch Infiltration.

Die vorliegende Arbeit sollte untersuchen, welchen Einfluss die Lüftungstechnischen Maßnahmen der neuen DIN bei typischen Wohnungen im Geschosswohnungsbau auf das Schimmelpilzrisiko und den Energiebedarf haben.

Anhand je eines typischen Wohnungstyps für eine Neubau- und einer Altbausituation für charakteristische Klimastandorte in Deutschland wurden hygrothermische Berechnungen (Simulationen) mit den Softwareprogrammen WUFI® durchgeführt.

Ein wichtiges Problem in diesem Zusammenhang ist die Belegung der Wohnungen. Es wird ein nicht mehr ordnungsgemäßes Nutzerverhalten durch eine zu hohe Belegung ab einem Raumvolumen von weniger als 50 – 60 m³ pro Person angegeben (Oster und Mitarbeiter 2007), was bei einer Raumhöhe von 2,5 m einer personenbezogenen Wohnfläche von 20 – 24 m² pro Person entsprechen würde.

Für die Außenwand eines Neubaus wurde ein U-Wert von 0,5 – 0,2 W/(m² K) und für Bestandsgebäude zwischen 1949 bis 1978 zwischen 1,4 – 0,9 W/(m² K) als typisch angenommen.

Zu hohe Raumluftfeuchtigkeit begünstigt die Entwicklung von Schimmelpilzen. Nach Sedlbauer (2001) sind folgende Wachstumsvoraussetzungen für das Auskeimen und Wachstum von Schimmelpilzen erforderlich:

- Oberflächentemperatur des Bauteils: – 8 °C bis 60 °C
- relative Feuchte an der Bauteiloberfläche: 70 % bis 100 %
- Nährstoffgehalt: Nährstoffe sind überall vorhanden, Staub reicht als Nahrungsquelle aus
- pH-Wert der Oberfläche: 2 bis 11
- Zeit (Stunden pro Tag): 1 h/d
- Sauerstoffgehalt: 0,25 %, in der Raumluft ist immer ausreichend Sauerstoff enthalten
- Licht: Licht ist zum Wachstum der Schimmelpilze nicht erforderlich

Entscheidend für die Wachstumsbedingungen von Schimmelpilzen in Gebäuden sind die Feuchte, die Zeit und das Material (Substrat). Hierbei ist es für die Schimmelpilze möglich, die Feuchte auch aus der Luft aufzunehmen. Jede Spezies hat einen eigenen, charakteristischen Feuchtebereich zum Auskeimen und Wachsen. Die Auskeimungsdauer und Wachstumsgrößen können in Abhängigkeit von der Temperatur und der Feuchtigkeit in sogenannten Isoplethensystemen dargestellt werden. Hieraus ist ersichtlich, dass unter 70 % Feuchte sich die Schimmelpilze in der Regel nicht entwickeln, die optimale Feuchtigkeit bei 90 – 95 % liegt und auch auf sehr kühlen Oberflächen unter 0 °C kein Wachstum stattfindet. Ein Wachstum beginnt erst, wenn die Mindestwachstumsbedingungen in der Regel fünf Tage lang gegeben sind.

Hierdurch kam man im Fachbericht der DIN 4108-8 zu der Aussage, dass in der Praxis mit einer Schimmelpilzbildung auf Bauteiloberflächen gerechnet werden kann, wenn die relative Luftfeuchte auf der Bauteiloberfläche an mindestens fünf aufeinanderfolgenden Tagen und für mindestens 12 Stunden pro Tag einen Wert von mehr als 80 % aufweist.

Da die Isoplethensysteme in der Literatur meist auf einem vollen Medium als Substrat beruhen, derartig ideale Nährböden aber im Gebäude nicht vorhanden sind, hat Sedlbauer (2001) die verfügbaren Wachstumsbedingungen der am häufigsten in Gebäuden anzutreffenden Pilze in Isoplethensysteme für unterschiedliche Substratgruppen zusammengefasst:

- Substratsgruppe 0: optimaler Nährboden: Vollmedium, unterste Wachstumsgrenze
- Substratsgruppe I: biologisch gut verwertbar: Tapeten, Gipsplatten, Baumaterialien aus gut abbaubaren Rohstoffen (z.B. Holz), Dichtstoffugen, stark verschmutzte Bauteiloberflächen
- Substratsgruppe II: biologisch kaum verwertbar: mineralische Baustoffe mit porigem Gefüge, Putzmörtel, einige Hölzer, Dämmstoffe

Nach Untersuchungen von Oswald und Mitarbeitern (2008) weisen 9,3 % aller vor 1995 errichteten Wohnungen mit geringem Dämmniveau und 8,2 % aller Wohnungen, die nach 1995 hergestellt oder modernisiert wurden, Schimmelpilzschäden auf. Hierbei treten die meisten Schäden (ein Drittel) in Schlafzimmern, gefolgt von Badezimmern, Wohnzimmern und Küchen auf.

Entscheidend für eine mögliche Schimmelpilzbildung ist die in den Wohnungen entstehende Feuchtebelastung. Im DIN-Fachbericht 4108 Teil 8 (9/2010) werden die durchschnittlichen Feuchteabgaben in Wohnungen unterschiedlicher Haushaltsgrößen bei üblichem Wohnverhalten in der heutigen Zeit wie folgt angegeben (letzte Ziffer mit Wäsche waschen):

- 1-Personenhaushalt: 2,1 bis 2,7 l/d (berufstätig)
- 1-Personenhaushalt: 3,1 bis 3,8 l/d (anwesend)
- 2-Personenhaushalt: 3,9 bis 5,2 l/d
- 3-Personenhaushalt: 5,6 bis 7,5 l/d
- 4-Personenhaushalt: 6,6 bis 9,1 l/d

Bei der Fensterlüftung ist die Mitwirkung des Nutzers erforderlich, sonst findet nur der Infiltrationsluftwechsel statt. Bei geschlossenen Fenstern erfolgt der Luftaustausch über die Funktionsfuge zwischen Flügel und Rahmen. Erst seit ca. 1960 wurden mit der Einführung der Kunststoff- und Aluminiumfenster Dichtungen im Fensterfalz üblich.

Bei der Wohnungslüftung werden vier unterschiedliche Betriebsstufen (BS) unterschieden:

1. *Lüftung zum Feuchteschutz (LF)*: Es sollen feuchtigkeitsbedingte Schäden an den Bauteilen unter üblichen Nutzungsbedingungen verhindert werden (Nutzer sind zeitweise abwesend, es wird in der Wohnung keine Wäsche getrocknet).
2. *Reduzierte Lüftung (RL)*: Es sollen feuchtigkeitsbedingte Schäden vermieden und die hygienischen Mindestanforderungen (CO_2 -Gerüche) sichergestellt werden (Nutzer sind zeitweise abwesend, es wird Wäschetrocknung in der Wohnung angenommen).
3. *Nennlüftung (NL)*: Grundlüftung zur Sicherung der hygienischen Anforderungen und des Bautenschutzes (Nutzer sind anwesend, es wird Wäschetrocknung in der Wohnung angenommen).
4. *Intensivlüftung (IL)*: Diese höchste Betriebsstufe ist für zeitweilige Lastspitzen (z.B. auch bei vielen Personen) vorgesehen. Hierbei kann der zusätzliche Außenluftvolumenstrom, ausgehend von der Nennlüftung, durch aktive Fensterlüftung erreicht werden.

Die Berechnungen in vorliegender Master-Arbeit wurden anhand einer 73 m² großen Dreizimmerwohnung in einem Mehrfamilienhaus durchgeführt, welche sich im 2. Obergeschoss eines viergeschossigen Hauses befindet. Die Außenwände des Neubaus bestehen aus Mauerwerk mit einem Wärmedämmverbundsystem und erreichen einen U-Wert von 0,24 W/(m² K), das entspricht dem energetischen Standard nach EnEV 2009.

Beim Altbau wurden die Berechnungen an einer Wohnung mit Außenwänden aus einem beidseitig verputzten Hochlochziegel (wie bis 1976 gebaut), durchgeführt. Der U-Wert beträgt 1,21 W/(m² K) und entspricht somit dem damaligen Wärmedämmstandard. Die alten Fenster wurden durch Kunststofffenster mit einer Zwei-Scheiben-Isolierverglasung ersetzt (U-Wert 1,2 W/(m² K)).

Die Innenraumtemperatur betrug 21 °C und es wurden zwei Fälle mit unterschiedlichen Feuchtelasten untersucht. Im 1. Fall wurde eine übliche Belegung mit einem Dreipersonenhaushalt angenommen (maximal übliche Belegungsdichte einer 73 m² großen Wohnung) und eine zeitweilige Abwesenheit der Nutzer infolge Berufsausübung oder Schulbesuch unterstellt. Die eingetragene Feuchte wurde mit 6,1 kg/d ohne und 8,2 kg/d mit Wäschetrocknen in der Wohnung angenommen. Die Tagesproduktionen der Feuchte liegen ca. 8 % über den Annahmen der DIN 4108-8. Die Berechnungen erfolgten mit einer angenommenen Innenraumtemperatur von 21 °C.

Für den CO₂-Eintrag wird eine personenbezogene CO₂-Last von 19,2 g/h = 10 l/h für die schlafende Person und von 39,2 g/h = 20,4 l/h für die wache stehende Person angenommen.

Der Infiltrationsluftwechsel für die Modellwohnung wurde wie folgt berechnet (DIN 1946 Teil 6):

Gebäude	n ₅₀ -Wert (h ⁻¹)	Infiltrationsluftwechsel (h ⁻¹)	
		windschwache Region	windstarke Region
Neubau	1,0	0,06	0,09
Altbau, modernisiert	1,5	0,09	0,14
Altbau, nicht modernisiert	4,5	0,26	0,42

Die Berechnung der Modellwohnung in den unterschiedlichen Varianten Neubau, Altbau, windschwacher und windstarker Standort ergaben, dass für alle Fälle lüftungstechnische Maßnahmen nach DIN 1946-6 erforderlich werden, weil der Infiltrationsluftwechsel kleiner ist als der Luftwechsel, welcher für die Betriebsstufe zum Feuchteschutz gefordert wird.

Als Ergebnis zeigte sich für den Neubau, dass bei einer normalen Feuchtelast, drei Personen ohne Wäschetrocknung in der Wohnung im Schlafzimmer ab einem Luftwechsel von 0,09 h⁻¹, kein Schimmelpilzwachstum auftrat, dafür jedoch in den windschwachen Gegenden als Folge des geringeren Infiltrationsluftwechsels. Bei einer höheren Feuchtelast ist ein doppelt so hoher Luftwechsel erforderlich, um Schimmelpilzwachstum zu verhindern.

Bei der Stoßlüftung wird ein Teil der Raumluftfeuchte in der Zeit zwischen den Öffnungen der Fenster von den Bauteilen adsorbiert. Die kurzen Zeiten der Stoßlüftung reichen aber nicht aus, damit durch Desorption die Feuchte an die Außenluft abgegeben werden kann. Dahingegen wird bei einer kontinuierlichen Lüftung die Feuchte sukzessiv abgeführt. In der Küche ist ein Schimmelpilzrisiko erst ab einem Luftwechsel von 0,46 h⁻¹ nicht mehr gegeben. Diesem Schimmelpilzrisiko ist nur vorzubeugen, wenn die Tür zu den benachbarten Räumen offen gehalten wird. Dem steht jedoch entgegen, dass diese Tür oft geschlossen gehalten wird, um die Küchengerüche nicht in andere Räume der Wohnung eindringen zu lassen.

Für einen Altbau (U-Wert von 1,21 W/(m² Kelvin) reicht bei normaler Feuchtelast eines Dreipersonenhaushaltes ohne Wäschetrocknung das zweimal tägliche Fensterlüften in windschwachen Gebieten nicht aus, damit kein Schimmel wächst. Um ein Schimmelpilzrisiko zu vermeiden, ist ein Luftwechsel von 0,46 – 0,53 h⁻¹ erforderlich. Die entsprechenden Zahlen für die Küche betragen bis zu 0,64 h⁻¹. Bei hoher Feuchtelast im gleichen Altbau sind entsprechend höhere Lüftungsraten erforderlich. So wird zur Vermeidung der Schimmelpilzbildung im Schlafzimmer ein Luftwechsel von 0,42 h⁻¹ erforderlich anstelle von 0,28 h⁻¹ im

Fall ohne Wäschetrocknung. Mit einer ausschließlichen Fensteröffnung kann der erforderliche Außenluftvolumenstrom selbst bei viermal täglicher Fensterlüftung nicht mehr sichergestellt werden. In diesem Falle wäre eine konstante Lüftung zum Feuchteschutz erforderlich. Auch für das Wohnzimmer reichen die Fensterlüftungsszenarien nicht aus, um Schimmelpilzwachstum zu vermeiden. Erst bei einer höheren Lüftungsstufe, der reduzierten Lüftung, ist bei einem Luftwechsel von $0,53 \text{ h}^{-1}$ kein Schimmelpilzwachstum mehr zu befürchten. Für das kleine Raumvolumen der Küche entsteht bei einem Luftwechsel von $0,92 \text{ h}^{-1}$ gerade so noch kein Schimmelpilzwachstum.

Für einige Szenarien erfolgte die Berechnung der maximalen CO_2 -Konzentration. Um einen Zielwert der CO_2 -Konzentration von ca. 1500 ppm für die Modellwohnung in einem Dreipersonenhaushalt einzuhalten, wird ein stündlicher Luftwechsel von ca. $0,3 - 0,4$ erforderlich. Für einen Zielwert von 1000 ppm müsste der Luftwechsel bei $0,5 \text{ h}^{-1}$ liegen. Für das Schlafzimmer lag die maximale CO_2 -Konzentration bei knapp über 2000 ppm bei einem Luftwechsel von ca. $0,4 - 0,5 \text{ h}^{-1}$. Bei einer Luftwechselzahl von $0,2 \text{ h}^{-1}$ stieg die berechnete CO_2 -Konzentration auf ca. 4500 ppm an! Erst bei Lüftungsraten ab ca. $0,9 \text{ h}^{-1}$ werden 1000 ppm unterschritten.

Hieraus ergibt sich, dass bereits ein Zielwert der CO_2 -Konzentration von 1500 ppm bei normaler Belegung in einem Dreipersonenhaushalt in der Betriebsstufe der Lüftung zum Feuchteschutz nicht erreicht werden kann, und dass der Luftwechsel zur Sicherung der hygienischen Anforderungen deutlich höher sein muss!

Zusammenfassend ist nach den Ergebnissen der Untersuchung zu sagen, dass für Neubauten bei mittlerer und hoher Feuchtelast kein Schimmelpilzrisiko für Wohn- und Schlafzimmer besteht. Für die Küchen sind jedoch zusätzliche Stoßlüftungen erforderlich, um die Feuchtigkeit ausreichend abzuführen.

Für Altbauten ist nur bei niedriger Feuchtelast und zusätzlicher Stoßlüftung gewährleistet, dass kein Schimmelpilzwachstum auftritt. Bei einer normalen und hohen Feuchtelast ist Schimmelpilzwachstum allein durch Stoßlüftung nicht zu verhindern. Deshalb müssen für energetisch nicht modernisierte Altbauten in Verbindung mit einem Austausch der Fenster Lüftungstechnische Maßnahmen nach DIN 1946-6 durchgeführt werden, damit kein Schimmelpilzwachstum erfolgt.

Die vorliegende Arbeit ist ein sehr interessanter und wichtiger Beitrag sowohl zum erforderlichen Luftwechsel zur Vermeidung der Schimmelpilzbildung als auch zur Verhinderung erhöhter Kohlendioxidkonzentrationen in Wohnräumen. Durch eine Vielzahl farbiger Abbildungen werden die Berechnungen überzeugend dargestellt. Eine Simulationsrechnung ist eine hilfreiche Maßnahme zur Entscheidungsfindung, wenn die Randbedingungen eindeutig sind. Allerdings kann man hier nicht alle bei einer realen Wohnungsnutzung wirklich vorhandenen Gegebenheiten berücksichtigen.

Der Rezensent möchte hierzu noch einige Ergänzungen anfügen:

Die Berechnungen wurden mit einer durchschnittlichen Feuchtigkeitsentwicklung (+8 %) angenommen. Gegenwärtig zeigt sich jedoch eine Tendenz, dass trotz steigender Wasserpreise in manchen Haushalten aus gesundheitlichen Gründen mehr Wasser verbraucht wird, z.B. zur Abhärtung mit wechselwarmen Duschen. Auch finden wir eine zunehmende Anzahl und Größe von Grünpflanzen in der Wohnung. In diesen Fällen dürften die Berechnungen noch deutlich höhere erforderliche Luftwechselraten zur Abführung der Feuchtigkeit erfordern. Natürlich sind auch die Haustiere noch in die Berechnung einzubeziehen.

Erschwerend kommt hinzu, dass es in der Ausstattung der Wohnungen zunehmend weniger Materialien gibt, welche Feuchtigkeit zwischenspeichern. So wird in vielen Wohnungen auf Teppiche und Gardinen verzichtet und Kunststoffe erobern mehr und mehr auch den häuslichen Innenraum.

Weiter ist festzustellen, dass die Temperaturen in den Schlafzimmern – dort wo der häufigste Schimmelpilzbefall auftritt – meist deutlich niedriger liegen, als im Rechenmodell angenommen. So erfolgte die Berechnung mit einer Durchschnittstemperatur von 21 °C, während erfahrungsgemäß die Temperatur im Schlafzimmer in der kalten Jahreszeit im Allgemeinen deutlich, das heißt bis zu 5 °C darunter liegt. Die Ursache dieser Absenkung der Temperatur im Schlafzimmer hat energieökonomische Ursachen, liegt aber auch darin begründet, dass nach allgemeiner Auffassung das Schlafen bei niedrigerer Raumtemperatur als gesund gilt. Eigene Untersuchungen ergaben jedoch, dass die Rate akuter respiratorischer Infektionen bei einer Raumtemperatur im Schlafzimmer von unter 16 °C signifikant zunimmt. Die oben genannten Faktoren erhöhen die Gefahr des Schimmelpilzwachstums in Wohnungen deutlich.

Obwohl sich die Arbeit vorwiegend mit dem Schimmelpilzrisiko beschäftigt, zeigen die berechneten Ergebnisse auch eine zum Teil völlig ungenügende Abfuhr von Kohlendioxyd bis zu extrem erhöhten Konzentrationen. Hierbei sollte aber generell von einer erforderlichen Innenraumluftkonzentration von CO₂ von 1000 ppm und nicht von 1500 ppm ausgegangen werden (siehe unten).

Die erforderliche Lüftung von Wohnräumen ist abhängig von

- der Raumgröße
- der Zahl der Personen beziehungsweise Tiere im Raum und deren Aktivitäten
- den Feuchtigkeitsquellen im Raum (z.B. auch Pflanzen, Aquarien, Zimmerspringbrunnen)
- den Innenraumemissionen
- der Innen- und Außenlufttemperatur sowie der Wandtemperatur: Warme Luft nimmt mehr Feuchte auf als kalte. Deshalb kann man, wenn es außen kälter ist als in der Wohnung, durch Lüften und folgendes Aufheizen der Luft, die Räume gut trocknen. Andererseits kann es überall in Wohnungen, wo niedrige Temperaturen auftreten, kritisch feucht werden. So kommt es z.B. häufig vor, dass man im Schlafzimmer nicht heizt, weil man kühl schlafen will und vor dem zu Bett gehen die Tür zum warmen Wohnzimmer öffnet. Die höhere Feuchtigkeitsmenge, welche die Luft im warmen Wohnzimmer aufnehmen kann, wird dann vielfach an den kalten Schlafzimmerwänden durch Taupunktunterschreitung kondensieren.

Da die Menschen im Gegensatz zum Temperaturempfinden, kein Gefühl für Feuchte haben, empfiehlt es sich, den Effekt der Lüftung durch Messgeräte zu überprüfen. Lediglich extreme Situationen können vom Menschen registriert werden, zum Beispiel eine hohe Luftfeuchte und gleichzeitig hohe Lufttemperatur (Schwüle), sowie sehr trockene Luft (Kratzen im Hals durch Austrocknen der Schleimhäute).

Die *Kohlendioxidkonzentrationen in der Innenraumluft* gilt als allgemeiner Indikator für die vom Menschen abgegebenen organischen Emissionen und ist ein Leitparameter für die Beurteilung der Lüftungssituation.

Bereits 1858 schlug der Deutsche Hygieniker Max von Pettenkofer einen Richtwert von 1000 ppm (0,1 Volumenprozent) Kohlendioxid für natürlich belüftete Innenräume vor. Dieser Wert hatte mehr als 150 Jahre Bestand.

Gesundheitliche Wirkungen ungünstiger Innenraumluftqualität werden meist mit den CO₂-Konzentrationen korreliert. Bei den ermittelten Wirkungen ist aber auch die Gesamtbelastung des Innenraums zu betrachten:

- Myhrvold et al. (1996) untersuchten in Schulklassen mit Schülern im Alter von 15 – 20 Jahren den Einfluss der Kohlendioxidkonzentrationen auf Gesundheit und Leistungsfähigkeit. Sie stellten eine deutliche Zunahme von Kopfschmerzen, Müdigkeit, Schwindel und Konzentrationsschwäche bei CO₂-Konzentrationen über 1500 ppm (1,5 Volumenprozent) fest.
- In einer kanadischen Studie zeigte sich, dass die Häufigkeit von tiefen Atemwegsinfektionen bei Inuit-Kindern unter fünf Jahren, signifikant mit der durchschnittlichen CO₂-Konzentration in der Wohnung assoziiert war (Kovesi et al., 2007).
- Gemäß European Collaborative Action (ECA, 1992) ist ab 1000 ppm CO₂ mit einer Unzufriedenheitsrate der Raumnutzer von circa 20 % und ab 2000 ppm mit etwa 30 % zu rechnen.
- Fehlmann und Wanner (1993) untersuchten Schlafzimmer, welche in den letzten 15 – 20 Jahren gebaut oder erneuert wurden und fanden bei unterschiedlichen Lüftungs- und Belegungsbedingungen Medianwerte der CO₂-Konzentration für jeweils eine Nacht zwischen 519 und 2973 ppm. Die gemessenen Lüftungsraten betragen bei geschlossenen Fenstern zwischen 0,01 h⁻¹ und 0,5 h⁻¹. Bei Belegung des Schlafzimmers mit zwei Personen und bei geschlossenen Fenstern und Türen wurden CO₂-Konzentrationen bis zu 4300 ppm gemessen, 1500 ppm wurde häufig überschritten.
- Erst 2008 erfolgte eine *Neubewertung* der gesundheitlichen Wirkungen von Kohlendioxid in der Raumluft (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes). Hierbei wurden Leitwerte festgelegt, welche wissenschaftlich begründete, praxisorientierte Handlungsempfehlungen darstellen:

< 1000 ppm	hygienisch unbedenklich
1000 – 2000 ppm	hygienisch auffällig
> 2000 ppm	hygienisch inakzeptabel
- Hiernach soll bei Überschreitung eines Wertes von 1000 ppm CO₂ gelüftet werden und ab 2000 ppm muss gelüftet werden. Die Ad-hoc-Arbeitsgruppe empfiehlt, die Kohlendioxid-Leitwerte im Sinne einer Lüftungssampel (grün-gelb-rot) zu verwenden.
- Für Schulräume wird ein Luftaustausch von 25 bis 30 m³ pro Person gefordert (Umweltbundesamt 2008). Das ist auch die Menge, welche aus hygienischer Sicht mindestens den Wohnräumen zugeführt werden sollte, um die Konzentrationen von 1000 ppm Kohlendioxid nicht zu überschreiten.
- Nach Münzenberg et al. (2003) wird in einem durchschnittlichen Schlafzimmer, das mit zwei Personen belegt ist, bei einer Luftwechselzahl von 0,2 bereits nach einer Stunde der Richtwert von 1000 ppm CO₂ erreicht. Ein Raum von 50 m³ (20 × 2,5), der mit zwei Personen belegt ist, erfordert bei geschlossenen Fenstern und Türen bereits einen Luftwechsel von 1,0⁻¹, um den Richtwert einzuhalten. Hierbei ist zu beachten, dass das Schlafzimmer der Raum ist, in dem wir die meiste Zeit des Tages verbringen.
- Kopfschmerzen und mangelnde Leistungsfähigkeit nach dem Aufwachen dürften bei mangelnder Lüftung häufig eine Folge erhöhter Kohlendioxidkonzentrationen sein.
- Hierbei ist bekannt, dass die höchsten Konzentrationen von CO₂ in der Phase des Aufwachens und Aufstehens gemessen werden (Konopinski 1989).
- Natürlich werden durch dicht schließende Fenster auch alle andern Innenraumemissionen schlechter entfernt.

Berechnet man für die statistischen Durchschnittswohnungsgröße (neue Bundesländer 76,5 m², alte Bundesländer 93,9 m²) mit der Belegung von drei Personen den medizinisch erforderlichen Mindestluftwechsel zur Abfuhr des Kohlendioxids (25 m³/h pro Person), so kommt man für die durchschnittliche Wohnungsgröße in den neuen Bundesländern auf einen erforderlichen Luftwechsel von 0,40 h⁻¹ und für die alten Bundesländer auf 0,33 h⁻¹. Die oben genannten Zahlen setzen voraus, dass alle Innentüren des Hauses geöffnet sind und die Luft in allen Räumen zirkulieren kann. Problematischer wird es bei geschlossenen Innenraumbenutzungen und Fenstern:

- Wenn sich z.B. in einem Raum von 25 m² und 2,40 m Höhe drei Personen bei geschlossener Zimmertür aufhalten, wäre bei der erforderlichen Zuführung von 25 m³ Luft je Person pro Stunde bereits eine Luftwechselrate von 1,2 erforderlich. Wird in Wohnräumen geraucht, ist die Zufuhr um mindestens 10 m³ je Person zu erhöhen.
- Neben der Entfernung des Kohlendioxids ist natürlich auch die regelmäßige Entfernung der anderen Innenraumemissionen wichtig. Auch hierfür ist eine Lüftungsrate von 0,5 zu sichern. Hierbei muss man wissen, dass zur Beurteilung der Gesundheitsrelevanz von Materialien der Innenausstattung die Testung der Emissionen dieser Materialien auch bei einer Luftwechselrate von 0,5 h⁻¹ erfolgt.
- Wenn ich nachts die Fenster schließen muss, z.B. wegen
 - Lage der Wohnung an einer Hauptverkehrsstraße oder aus
 - Sicherheitsgründen,ist natürlich auch keine ausreichende Lüftung bei dichtschließenden Fenstern möglich.

Die Problematik einer ausreichenden Lüftung der Wohnräume wird dadurch erschwert, dass sich die Bürger nicht daran gewöhnt haben, dass energieökonomisch optimierte Wohnungen ohne Lüftungsanlagen eine deutlich höhere Lüftungsfrequenz erfordern. Es ist auch umstritten, ob man von Bewohnern verlangen darf, fünfmal und mehr am Tag die Fenster zu Lüftungszwecken zu öffnen.

Auf ein weiteres Problem in dieser Hinsicht macht H. Künzel (2012) aufmerksam: Die Lüftung zur Raum-entfeuchtung einerseits sowie zur Entfernung verschiedener Innenraumemissionen andererseits erfordert unterschiedliche Herangehensweisen:

Wenn es darum geht, die verbrauchte Luft gegen Frischluft auszuwechseln, reicht ein kurzfristiges Öffnen eines bzw. mehrerer Fenster, um einen Luftdurchzug und damit Luftaustausch zu erreichen (Stoßlüftung). Hiermit werden Kohlendioxid, Geruchsstoffe und andere Emissionen sowie die in der Raumluft enthaltene Feuchte abgeführt. Zur Raum-entfeuchtung muss aber nicht nur die Feuchtigkeit aus der Luft, sondern auch aus den Flächen und Gegenständen im Raum abgeführt werden. Hierzu ist erforderlich, dass nach dem Fensterlüften die Fenster wieder geschlossen werden, damit die Luft sich erwärmen und die desorbierende Feuchtigkeit aufnehmen kann. Hierzu empfiehlt Künzel, keinesfalls die Heizung abzuschalten wie es oftmals empfohlen wird und rät, durch eine Spaltlüftung über eine begrenzte Zeit bei kleinem Luftumsatz die Feuchtigkeit zu entfernen. Hierbei ist eine Spaltlüftung in Drehstellung günstiger, als durch eine Kippstellung des Fensters. Bei Ersterer kann im oberen Spaltbereich des Fensters die warme Luft aufgrund der Thermik gut ausströmen und hat im unteren Spaltbereich einen Zustrom von Kaltluft zur Folge, die sich im weiteren Strömungsverlauf erwärmt und dadurch aufnahmefähig für Feuchte wird. Hierbei darf man jedoch nicht vergessen, den Fensterspalt wieder rechtzeitig zu schließen, um keine Heizenergie zu vergeuden

Schlussfolgerungen

- Die Lüftung eines Raumes entscheidet in erheblichem Maße darüber, ob ein Raum trocken wird, oder feucht bleibt.
- Die Lüftung eines Raumes entscheidet in erheblichem Maße darüber, ob in einem Raum Schadstoffkonzentrationen überschritten werden oder nicht.
- Die Lüftung eines Raumes ist das Zünglein an der Waage, das darüber entscheidet, ob die klassischen wohnmedizinischen Kriterien Feuchtigkeit und Innenraumemissionen gesundheitsrelevant werden.
- Es besteht kein Zweifel, dass zur Sicherung der Gesundheit der Bewohner sowie zum Schutz der Bausubstanz an der Forderung eines Mindestluftwechsels von $0,5 \text{ h}^{-1}$ festgehalten werden muss.
- Nur durch Fugenlüftung können in gemäß der Energiesparverordnung errichteten bzw. nachträglich abgedichteten Wohnungen weder ausreichend Feuchtigkeit noch andere Innenraumemissionen einschließlich Kohlendioxid bis zu einer hygienisch unbedenklichen Raumluftkonzentration abgeführt werden.
- Aus dem oben Gesagten ergibt sich die Konsequenz, dass nur durch aktives Fensterlüften der Bewohner ggf. mit Einsatz von Außenwanddurchlasselementen (ALD) oder durch ventilatorgestützte Systeme der hygienisch erforderliche Luftwechsel in gemäß der Energiesparverordnung errichteten bzw. nachträglich abgedichteten Wohnungen dauerhaft gesichert werden kann!!
- Folgerichtig ist die Erstellung eines Lüftungskonzepts mit Planungsbeginn des Hausbaus bzw. der Sanierung von entscheidender Bedeutung. Hierbei hat bei energieökonomisch errichteten oder sanierten Wohnungen eine grundsätzliche Entscheidung zu erfolgen über:
 - Bauen ohne Lüftungsanlage, d.h. ausschließlich freie Lüftung durch Fugen unter aktiver Zulüftung der Differenz zwischen der bei geschlossenen Fenstern vorhandenen und der aus bauphysikalischen und gesundheitlichen Gründen erforderlichen Luftwechselzahl, ggf. mithilfe von geregelten Außenwandluftdurchlässen (ALD),
 - Einsatz einer maschinellen (ventilatorgestützten) Entlüftung einschließlich zentral gesteuerter Anlagen (RLT-Anlagen) mit Zuluft- und Abluftsystem, ggf. mit Erwärmung, Kühlung (im Sommer) und Befeuchtung der zugeführten Luft.
- Entscheidet man sich dafür, die aktive Mithilfe der Bewohner für den erforderlichen Luftaustausch in das Lüftungskonzept einzubeziehen, ist auf jeden Fall eine Belehrung der Nutzer der betreffenden Wohnungen über das richtige Lüftungsverhalten erforderlich.

Problematisch wird es aber immer dann werden, wenn die Bewohner nicht oder nicht mehr in der Lage sind, aktiv in das Lüftungsregime einzugreifen oder die Mitarbeit in dieser Beziehung verweigern, bzw. nur unzureichend kooperieren. Zu bedenken ist hierbei auch, dass die Wohnungen viele Jahrzehnte bestehen, durch verschieden hohe Benutzerzahlen mit differierenden Nutzungsqualitäten und -intensitäten belegt werden und natürlich auch das Wollen und Können zur Durchsetzung eines adäquaten Lüftungsregimes bei den verschiedenen Bewohnern des gleichen Objektes erheblich unterschiedlich sein kann. Hier wird dann im Zweifelsfall auch wieder die Frage der „Zumutbarkeit“ der Mitwirkung der Bewohner bei der Lüftung akut, welche bisher schon mehrfach nicht nur die Juristen beschäftigte.
- Bei der Entscheidung über eine ausschließlich freie Lüftung durch Fugen oder eine maschinelle Lüftung sind nicht nur Klimazone, Windbelastung, Bauweise, Größe und wechselnde Belegung einer Wohnung zu berücksichtigen, sondern auch deren Lage im Wohngebiet, ob z.B. Aspekte der Lärmbelästigung und der Sicherheit ein ausreichendes Öffnen von Fenstern möglich bzw. wahrscheinlich

machen. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass Wohnungen in einer höheren Etage eines Hauses meist eine bessere Durchlüftung durch den stärkeren Winddruck haben, als die im Erdgeschoss gelegenen.

- Vorteile einer kontrollierten (maschinellen) Wohnungslüftung:
 - Garantierte dauerhafte Sicherung des hygienisch erforderliche Luftwechsels,
 - sichere Abfuhr der Luftfeuchte und damit Vermeidung von Schimmelpilzbildung,
 - kontinuierliche Lüfterneuerung auch nachts und in Abwesenheit der Bewohner,
 - da die Fenster geschlossen bleiben können, ggf. Vermeidung von Lärmbelästigungen und Luftverunreinigungen von außen, Verhinderung des Eindringens von Schädlingen und ggf. Erhöhung der Sicherheit,
 - optimale Energieeinsparung bei Sicherung der erforderlichen Innenraumluftqualität.
- Neben der Beachtung der hygienischen Aspekte sind hierbei auch die Kosten einer maschinellen, ventilatorgestützten Lüftung mit der Energieeinsparung durch dichte Gebäudehüllen zu verrechnen, um eine Entscheidung für künftige Bauweisen zu treffen.
- Intelligente Lösungen sind gefragt.
- Bei einer geringen Belegungsdichte ist eine durch CO₂- oder Feuchtesensoren geführte Abluftanlage verglichen mit kontinuierlich betriebenen Zu- und Abluftanlagen mit Wärmerückgewinnung energetisch konkurrenzfähig. Präsenzgeführte Anlagen mit Bewegungsmeldern bleiben hinter den feuchte- und CO₂-geführten Anlagen zurück, da Aktivitätsgrad und Belegungsdichte nicht erfasst werden können und bei Personenanwesenheit immer der maximale Volumenstrom zu realisieren ist (Richter 2001).

Weitere Maßnahmen zur Unterstützung einer ausreichenden Lüftung sind:

- Verwendung emissionsarmer Bauprodukte und Einrichtungsgegenstände,
- systemische Abstimmung von Baustoffen um das Risiko von Geruchsbelästigungen und Schadstoffemissionen beim Zusammenbringen verschiedener Materialien (z.B. Kleber und Fußbodenbelag) zu minimieren,
- zweckmäßige Nutzung der Wohnräume und Verhinderung von Überbelegung,
- Vermittlung von Kenntnissen über eine bedarfsgerechte Lüftung je nach Wohnsituation.

Mangelnde Lüftung, welche zu einer Beeinträchtigung der Gesundheit der Bewohner führen kann, darf in keinem Fall zugelassen werden.

Literatur:

- (1) Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden (2008): Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz 51: H. 11, 1358 – 1368
- (2) DIN 1946 Teil 6 (2009): Raumluftechnik – Lüftung von Wohnungen – allgemeine Anforderungen, Anforderung zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung. Beuth Verlag, Berlin
- (3) DIN-Fachbericht 4108 Teil 8 (2010): Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden – Teil 8: Vermeidung von Schimmelwachstum in Wohngebäuden. Beuth Verlag, Berlin
- (4) ECA (1992): Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings. European Collaborative Action. Indoor Air Quality & its Impact on Man. Report No. 11, EUR 14449

- (5) Fehlmann, J., Wanner, H. (1993): Indoor Climate and Indoor Air Quality in Residential Buildings. *Indoor Air* 3, 41 – 50
 - (6) Hoff, P. (2011): Untersuchung des Einflusses der Wohnungslüftung nach DIN 1946-6 auf das Schimmelpilzrisiko und den Energiebedarf von Geschosswohnungen. Master-Thesis, Lehrstuhl für Bauphysik, Universität Stuttgart
 - (7) Konopinski, V. (1989): Residential Localized Carbon Dioxide Concentrations. In: Brassler L. J., Mulder W. C. (eds.): *Man and his Ecosystem. Proceedings of the 8th World Clean Air Congress 1989*. Elsevier, Amsterdam, New York, 339 – 344
 - (8) Kovesi, T., Gilbert, N.L., Stocco, C. et al. (2007): Indoor Air Quality and the Risk of Lower Respiratory Tract Infections in Young Canadian Inuit Children. *Can. Med. Assoc. J.* 177, 155 – 160
 - (9) Künzel, H. (2012): Richtiges Heizen und Lüften in Wohnungen. 5., überarbeitete und erweiterte Auflage, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart
 - (10) Münzenberg, U., Thumulla, J. (2004): Schadstoffbelastete Gebäude – Chancen und Risiken der energetischen Sanierung. 12. E. U. Z. Baufachtagung, Praxis der energetischen Gebäudemodernisierung, Hannover, 1 – 15
 - (11) Münzenberg, U., Weithaas, T., Thumulla, J. (2003): Luftwechsel im Gebäudebestand. 7. Pilztagung des VDB, „sicher erkennen – sicher sanieren“, Stuttgart
 - (12) Myhrvold, AN., Olsen, E., Lauridsen, O. (1996): Indoor Environment in Schools – Pupils Health and Performance in Regard to CO₂-Concentrations. *Proc. Indoor Air* 4, 369 – 374
 - (13) Oster, N., Bredemeyer, J. und Schmidt, Th. (2007): Nutzereinfluss auf Schäden an Gebäuden. *Schadensfreies Bauen*, Bd. 42. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart
 - (14) Oswald, R., Liebert, G. und Spilker, R. (2008): Schimmelpilzbefall bei hochwärmegedämmten Neu- und Altbauten – Erhebung von Schadensfällen – Ursachen und Konsequenzen. *Bauforschung für die Praxis*, Bd. 84, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart
 - (15) Pettenkofer, M. v. (1858): Besprechung allgemeiner auf die Ventilation bezüglicher Fragen. Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. J. G. Cotta'sche Buchhandlung, München
 - (16) Richter, W. (2001): „Bedarfslüftung im Wohnungsbau“. Technische Universität Dresden, Kurzbericht, gefördert durch Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Förderkennzeichen II 13-800199-13
 - (17) Sedlbauer, K. (2001): Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation, Universität Stuttgart
-