

Prof. Ph. Dr.-Ing. Bjarne W. Olesen

# Energieeffiziente Lüftung von Gebäuden

## Einleitung

In den letzten Jahren hat sich das Interesse hinsichtlich des Innenraumklimas stark auf die Lüftung von Gebäuden fokussiert. Die Anforderungen an die Absenkung des Wärmeverbrauchs für die Heizung bedeuten, dass die Häuser oft dichter geworden sind und eine minimale Lüftung nicht immer gewährleistet ist. Dieses und die Einführung vieler neuer Baumaterialien führt oft zu kleinen Lüftungsmengen und schlechter Raumluftqualität und in Gebäuden häufig zu Bauschäden (Schimmelpilz). Aufgrund der höheren Anforderungen an die Wärmedämmung von Gebäuden werden die Transmissionswärmeverluste kleiner. Da sich Lüftungsmenge und damit Wärmeverluste durch die Lüftung nicht viel ändern, sind die Wärmeverluste durch Lüftung heute oft ebenso groß bzw. größer als die Verluste bei Transmission. Die Möglichkeiten, diese Verluste abzusenken, sind Wärmerückgewinn oder kleinere Luftmengen. Das ist aber nur akzeptabel, wenn die Raumluftqualität zufriedenstellend ist.

Durch die o. g. Verhältnisse wurden Forschungs- wie Normungsarbeit auf diesem Gebiet intensiviert und eine neue Europäische Norm, EN15251 wurde in 2008 publiziert.

In diesem Bericht werden einige neue Ergebnisse hinsichtlich des Einflusses der Lüftung auf die Leistung der Nutzer und neue Erkenntnisse über Quellen zur Luftverunreinigung dargestellt. Ferner wird der heutige Stand der Normungs- und Richtlinien-Arbeit zur

Bestimmung der erforderlichen Lüftungsraten im Wohnungsbau und in Büros/Versammlungsräumen präsentiert.

Letztendlich stellt der Bericht auch verschiedene Konzepte der Lüftungssysteme dar.

## Lüftung, Gesundheit, Behaglichkeit und Leistung

Um die erforderlichen Lüftungsraten zu bestimmen, müssen Gesundheit, Behaglichkeit und Leistung der Raumnutzer zuzüglich der Bauschäden berücksichtigt werden.

### Gesundheit

Wenn die Lüftungsraten auf Basis der Behaglichkeit festgelegt werden, ist in der Regel auch die Gesundheit gewährleistet, aber nicht immer. Es gibt z. B. Schadstoffe wie Radon und Kohlenmonoxid (CO), die eine Person nicht direkt bemerken kann (Geruch, Irritation), aber diese Stoffe sind gesundheitsgefährdend.

Richtlinien und Normen wie ASHRAE 62.1-2007 und EN15251 beschäftigen sich mit Begriffen wie „Raumluftqualität“ und „Empfundene Raumluftqualität“ „Akzeptable (zufriedenstellende) Raumluftqualität“, „Prozentsatz unzufriedener Personen“.

ASHRAE-Standard gibt wie folgt die Definition von „Akzeptable Raumluftqualität“:

- Raumluft, in der eine erhebliche Anzahl von Personen (80 % oder mehr), die sich in einem Raum aufhalten, keine Unzufriedenheit ausdrücken, und in der es keine bekannten Schadstoffe in Konzentration gibt, die zu signifikanten Risiken führen können (bestimmt bei anerkannten Autoritäten).

Diese Definition beinhaltet Gesundheit und Behaglichkeit.

In den Normenausschüssen (ASHRAE-62.1, ISOTC205) befindet sich ebenfalls eine Definition für Raumluftqualität, die die Gesundheit nicht berücksichtigt.

Hier wird von „Akzeptable empfundene Raumluftqualität“ gesprochen, und eine Definition lautet:

- Raumluft, in der eine erhebliche Anzahl von Personen die sich in dem Raum aufhält, keine Unzufriedenheit auf Basis des Geruches und Wahrnehmungsirritationen ausdrückt. Akzeptable empfundene Raumluftqualität ist notwendig, aber nicht ausreichend, um die Definition von akzeptabler Raumluftqualität in diesem Standard zu erfüllen.

Diese kleinen Unterschiede in den zwei Definitionen sind sehr wichtig für die Anforderungen an die Lüftung. Es gibt z. B. Schadstoffe (Radon, CO), die keine Gerüche oder Irritationen verursachen, so dass es relativ einfach ist, eine akzeptable empfundene Luftqualität zu erreichen.

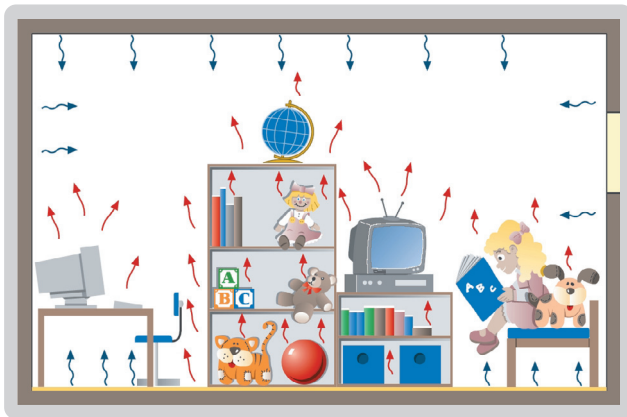


Abbildung 1: Verunreinigungsquellen in einem Kinderzimmer

Die Zahl der Allergiker und Asthmakranken in den Industrieländern hat sich innerhalb der letzten zwei Jahrzehnte verdoppelt. Diese Krankheiten stellen derzeit eines der größten Probleme des öffentlichen Gesundheitswesens dar, mit enormen Kosten durch Arzneien, Behandlungen und Krankschreibungen. In vielen Industrieländern leidet die Hälfte der Schulkinder an diesen allergischen Krankheiten; dies ist auch einer der Hauptgründe für Abwesenheiten in der Schule. Verschlechtert hat sich die Raumluftqualität teils wegen der umfangreichen Energieeinsparungs-Kampagnen und teils wegen der hohen Energiepreise. Diese haben die Leute motiviert, ihre Wohnräume abzudichten und die Luftwechselrate zu verringern, so dass der Luftaustausch in vielen Wohnungen auf einem historischen Tiefpunkt ist. Andere Faktoren für eine schlechte Raumluftqualität sind die zahlreichen neuen Materialien, insbesondere Polymere, und die vielen Elektrogeräte, die in den letzten Jahrzehnten vor allem in Kinderzimmern Einzug gehalten haben (Abbildung 1).

Die weltweit größte Studie (Bornehag 2003, 2004) über den Zusammenhang zwischen schlechter Raumluftqualität und Asthma wurde an 11.000 Kindern durchgeführt. In 200 Häusern mit asthmakranken und 200 Häusern mit gesunden Kindern wurden detaillierte chemische, physikalische, biologische und medizinische Maßnahmen umgesetzt. Diese Häuser lagen in Gebieten mit einer ausgezeichneten Außenluftqualität. Die Ergebnisse zeigen, dass eine niedrige Ventilation das Risiko von allergischen Symptomen erheblich steigert (Abbildung 2) und dass die Emission von Phthalaten aus Polyvinylchlorid und Weichmachern in Kinderzimmern das Asthmarisiko drastisch erhöht (Abbildung 3). Die weltweite Produktion an Weichmachern hat seit den 50er Jahren enorm zugenommen und liegt bei derzeit 3,5 Millionen Tonnen pro Jahr. Diese Ergebnisse können die zukünftige Entwicklung von Raumbedingungen einschneidend beeinflussen, um Kinder vor Asthma und Allergien zu schützen. Es liegt nicht viel Material vor. Allerdings konnten Zusammenhänge zwischen einer Reihe von Baufaktoren und gesundheitlichen Erscheinungen identifiziert werden.

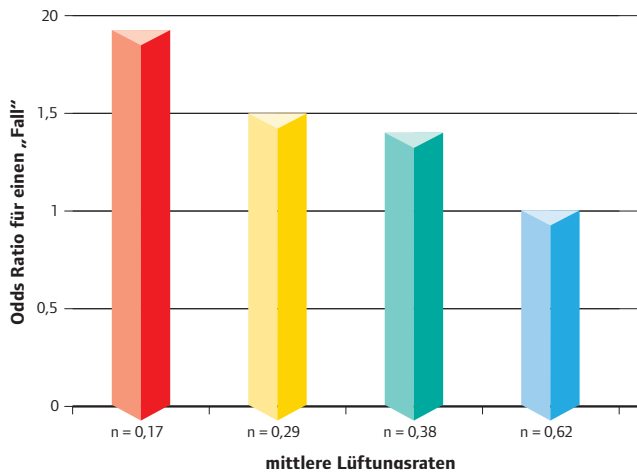


Abbildung 2: Odds ratio für einen „Fall“. d.h. für Kinder mit wenigstens zwei von dreimöglichen Symptomen (Stridor, Rhinitis, Ekzem) in Abhängigkeit von der Luftwechselzahl in Einfamilienhäusern. (Bornehag et al., 2003)

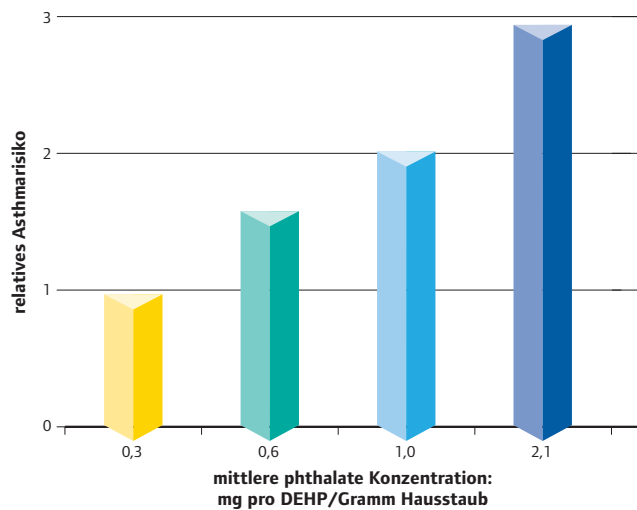


Abbildung 3: Weichmacher für Polyvinylchlorid in Wohnräumen erhöhen das Asthmarisiko für Kinder. Jede Spalte steht für etwa 90 Wohnräume. DEHP: Diethylhexylphthalat.

## Behaglichkeit

Wie oben erwähnt, ist die Behaglichkeit eine Frage der empfundenen Raumluftqualität. In EN 15251 werden mehrere Kategorien für Raumluftqualität angeführt.

Verschiedene Parameter wie %-Unzufriedene (Abbildung 4), CO<sub>2</sub>-Konzentration (Abbildung 5) und die erforderliche Lüftungsrate (Tabelle 1) werden verwendet, um diese Kategorien zu bestimmen. Der Zusammenhang zwischen der Lüftungsrate pro Standard-Person und der Raumluftqualität ist bekannt (Abbildung 4).

Für die erforderlichen Lüftungsraten ist es entscheidend, ob die empfundene Luftqualität für die Personen, die gerade in einen Raum hineinkommen, oder Personen, die sich in einem Raum aufhalten, akzeptabel ist. Personen gewöhnen sich (adoptieren) schnell an viele Gerüche wie von Personen (Bioeffluenten) (Gunarsen and Fanger 1992). Für Tabakrauch und andere Quellen gibt es auch eine Adaption zum Geruch, aber weniger, und hinzu kommt ein Gefühl von Irritation (Augen, Nase, Schleimhaut), das mit der Zeit schlimmer werden kann. Grundsätzlich sind die Anforderungen an die existierenden Normen und Richtlinien (EN15251) auf Basis von nicht adaptierten Personen gemacht worden (Tabelle 1, Abbildung 4). Für adaptierte Personen braucht man nur ein Drittel der Lüftung.

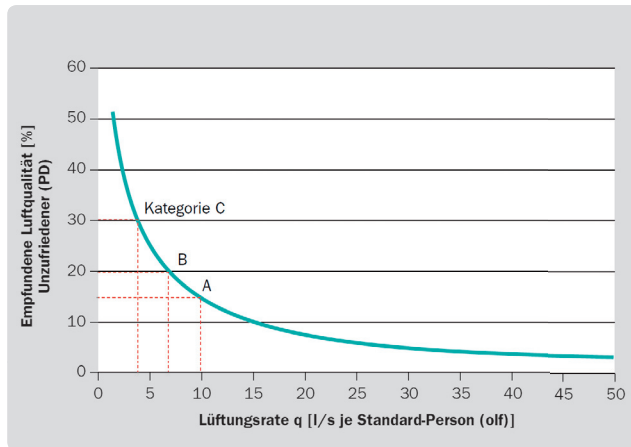


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen der Lüftungsrate pro Standard-Person und der Raumluftqualität

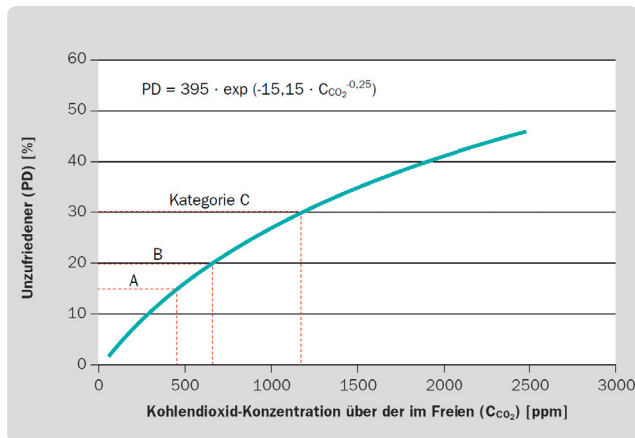


Abbildung 5: Kohlendioxid als Indikator für Belastung durch menschlichen Stoffwechsel

Anmerkung: Die Kurve zeigt die empfundene Luftqualität (% Unzufriedene) als Funktion der Kohlendioxid-Konzentration über der der Außenluft. Sie gilt für Räume, in denen sitzende Personen die einzige Verunreinigungsquelle bilden, und basiert auf denselben Daten wie Abbildung 4. Die Kohlendioxid-Konzentration im Freien beträgt gewöhnlich etwa 350 ppm (700 mg/m<sup>3</sup>).

## Leistung

Schlechte Raumluft resultiert in steigenden ökonomischen Kosten durch eine erhöhte Anzahl von Krankheiten und Krankentagen, niedrigere Leistung und hohe Kosten für medizinische Behandlung [Seppänen].

Auswirkungen der Raumluft auf die Produktivität sind erst im letzten Jahrzehnt zu einem Thema geworden. Ursache waren umfassende Forschungen und ein Verständnis für die engen Zusammenhänge zwischen Faktoren wie Entlüftung, Klimatisierung, Schadstoffen in der Raumluft und der Beeinträchtigung von Gesundheit und Wohlbefinden. Die Komplexität einer realen Umgebung erschwert die Einschätzung des Einflusses einzelner Parameter auf die menschliche Leistungsfähigkeit, weil viele dieser Parameter gleichzeitig vorhanden sind und deshalb auch gemeinsamen Einfluss auf jede Person ausüben. Darüber hinaus beeinflusst die Motivation der Beschäftigten das Verhältnis zwischen Leistung und Umgebungsbedingungen (so kommt es z.B. bei hochmotivierten Beschäftigten seltener zu Leistungseinbrüchen wegen ungünstiger Umgebungsbedingungen; sie können allerdings müder werden, was auch einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit haben kann).

Es gibt umfangreiche Indizien, dass eine als schlecht empfundene Raumluftqualität negative Auswirkungen auf die Arbeitsleistung hat. Diese Auswirkungen wurden von Wargocki et al. (1999) erstmalig demonstriert, indem er unbefangene weibliche Personen den Emissionen eines Teppichs unter realistischen Bürobedingungen aussetzte. Die Studie zeigte, dass SBS-Symptome durch eine Verbesserung der empfundenen Luftqualität reduziert werden konnten und die Leistung bei typischen Büroarbeiten gesteigert wurde. Diese Feststellungen wurden später durch mehrere unabhängige Studien in Dänemark mit verschiedenen Luftwechselraten [Wargocki 2000, 2004, 2006], Schadstoffquellen und Testpersonen bestätigt. Auf Grundlage dieser Ergebnisse konnte eine generelle Verbindung zwischen der Lüftungsrate pro Person und der Leistungsfähigkeit hergestellt werden (Abbildung 6). Die quantitativen Zusammen-

**Tabelle 1: Empfohlene Luftwechselraten in Nichtraucher-Räumen in Bürogebäuden gemäß EN15251 [11]**

| Art des Gebäudes oder Raums  | Kategorie | Fläche m <sup>2</sup><br>/Person | q <sub>p</sub><br>l/s, m <sup>2</sup><br>bei einer<br>Nutzung<br>von | für sehr geringfügig<br>verschmutztes<br>Gebäude |                  | für geringfügig<br>verschmutztes<br>Gebäude |                  | für nicht geringfügig<br>verschmutztes<br>Gebäude |                  |
|------------------------------|-----------|----------------------------------|--|--|------------------|---|------------------|---|------------------|
|                              |           |                                  |  | q <sub>B</sub><br>l/s, m <sup>2</sup>            | q <sub>tot</sub> | q <sub>B</sub><br>l/s, m <sup>2</sup>       | q <sub>tot</sub> | q <sub>B</sub><br>l/s, m <sup>2</sup>             | q <sub>tot</sub> |
| Einzelbüro                   | I         | 10                               | 1,0  | 0,5  | 1,5              | 1,0   | 2,0              | 2,0   | 3,0              |
|                              | <b>II</b> | <b>10</b>                        | <b>0,7</b>   | <b>0,3</b>                                       | <b>1,0</b>       | <b>0,7</b>                                  | <b>1,4</b>       | <b>1,4</b>  | <b>2,1</b>       |
|                              | III       | 10                               | 0,4  | 0,2  | 0,6              | 0,4   | 0,8              | 0,8   | 1,2              |
| Untergliedertes Großraumbüro | I         | 15                               | 0,7  | 0,5  | 1,2              | 1,0   | 1,7              | 2,0   | 2,7              |
|                              | <b>II</b> | <b>15</b>                        | <b>0,5</b>   | <b>0,3</b>                                       | <b>0,8</b>       | <b>0,7</b>                                  | <b>1,2</b>       | <b>1,4</b>  | <b>1,9</b>       |
|                              | III       | 15                               | 0,3  | 0,2  | 0,5              | 0,4   | 0,7              | 0,8   | 1,1              |
| Konferenzraum                | I         | 2                                | 5,0  | 0,5  | 5,5              | 1,0   | 6,0              | 2,0   | 7,0              |
|                              | <b>II</b> | <b>2</b>                         | <b>3,5</b>   | <b>0,3</b>                                       | <b>3,8</b>       | <b>0,7</b>                                  | <b>4,2</b>       | <b>1,4</b>  | <b>4,9</b>       |
|                              | III       | 2                                | 2,0  | 0,2  | 2,2              | 0,4   | 2,4              | 0,8   | 2,8              |
| Auditorium                   | I         | 0,75                             | 15   | 0,5  | 15,5             | 1,0   | 16               | 2,0   | 17               |
|                              | <b>II</b> | <b>0,75</b>                      | <b>10,5</b>  | <b>0,3</b>                                       | <b>10,8</b>      | <b>0,7</b>                                  | <b>11,2</b>      | <b>1,4</b>  | <b>11,9</b>      |
|                              | III       | 0,75                             | 6,0  | 0,2  | 0,8              | 0,4   | 6,4              | 0,8   | 6,8              |
| Restaurant                   | I         | 1,5                              | 7,0  | 0,5  | 7,5              | 1,0   | 8,0              | 2,0   | 9,0              |
|                              | <b>II</b> | <b>1,5</b>                       | <b>4,9</b>   | <b>0,3</b>                                       | <b>5,2</b>       | <b>0,7</b>                                  | <b>5,6</b>       | <b>1,4</b>  | <b>6,3</b>       |
|                              | III       | 1,5                              | 2,8  | 0,2  | 3,0              | 0,4   | 3,2              | 0,8   | 3,6              |
| Klassenraum                  | I         | 2,0                              | 5,0  | 0,5  | 5,5              | 1,0   | 6,0              | 2,0   | 7,0              |
|                              | <b>II</b> | <b>2,0</b>                       | <b>3,5</b>   | <b>0,3</b>                                       | <b>3,8</b>       | <b>0,7</b>                                  | <b>4,2</b>       | <b>1,4</b>  | <b>4,9</b>       |
|                              | III       | 2,0                              | 2,0  | 0,2  | 2,2              | 0,4   | 2,4              | 0,8   | 2,8              |
| Kindergarten                 | I         | 2,0                              | 6,0  | 0,5  | 6,5              | 1,0   | 7,0              | 2,0   | 8,0              |
|                              | <b>II</b> | <b>2,0</b>                       | <b>4,2</b>   | <b>0,3</b>                                       | <b>4,5</b>       | <b>0,7</b>                                  | <b>4,9</b>       | <b>1,4</b>  | <b>5,8</b>       |
|                              | III       | 2,0                              | 2,4  | 0,2  | 2,6              | 0,4   | 2,8              | 0,8   | 3,2              |
| Kaufhaus                     | I         | 7                                | 2,1  | 1,0  | 3,1              | 2,0   | 4,1              | 3,0   | 5,1              |
|                              | <b>II</b> | <b>7</b>                         | <b>1,5</b>   | <b>0,7</b>                                       | <b>2,2</b>       | <b>1,4</b>                                  | <b>2,9</b>       | <b>2,1</b>  | <b>3,6</b>       |
|                              | III       | 7                                | 0,9  | 0,4  | 1,3              | 0,8   | 1,7              | 1,2   | 2,1              |

hänge wurden auf Grundlage dieser Ergebnisse hergestellt. Sie zeigen, dass im Bereich zwischen 15 und 68 % Unzufriedenheit bei der Eingabe von Texten für jede 10 % ein Leistungsabfall um ca. 1 % zu erwarten ist.

Die Gehälter von Beschäftigten in typischen Bürogebäuden übertreffen die Energie- und Wartungskosten des Gebäudes ungefähr das Hundertfache. Dasselbe gilt für Gehälter und jährliche Bau- oder Mietkosten [Djukanovic]. Deshalb sollte eine Produktivitätssteigerung von nur 1 % ausreichen, um selbst eine Verdopplung der Energie- oder Wartungskosten oder größere Investitionen in Konstruktions- oder Mietkosten abzudecken.

In sechs identischen Klassenräumen einer Grundschule in Dänemark wurden fünf unabhängige Feldexperimente durchgeführt [Wargocki 2006]. Bei drei Experimenten im Spätsommer und im Winter wurde die Luftwechselrate pro Kind von etwa 3 l/s auf 10 l/s angehoben, bei

zwei Experimenten im Spätsommer die Temperatur von 25 °C auf 20 °C gesenkt. Die Luftwechselrate wurde mit dem vorhandenen mechanischen Ventilationssystem angehoben, die Temperatur wurde durch Betrieb oder Leerlauf der in den Klassen installierten Kühlgeräte abgesenkt. Die 10- bis 12jährigen Schüler erledigten unter allen Bedingungen bis zu acht verschiedene Aufgaben des Schulalltags vom Lesen bis hin zum Rechnen. Die Aufgaben wurden so gewählt, dass sie Bestandteil eines gewöhnlichen Schultags hätten sein können. Lehrer haben den Schülern die Aufgaben erklärt. Weder Schüler noch Lehrer wurden vom Experiment informiert. Unterrichtsplan und normale Schulaktivitäten blieben unverändert, damit Unterrichtsumgebung und tägliche Routine so normal wie möglich waren.

Die Ergebnisse zeigten, dass eine erhöhte Luftwechselrate und eine verringerte Raumtemperatur bei vielen Aufgaben zu einer deutlichen Leistungssteigerung führten – insbesondere bei der Schnelligkeit, aber auch hinsichtlich der Fehlerhäufigkeit: Eine Verdopplung der

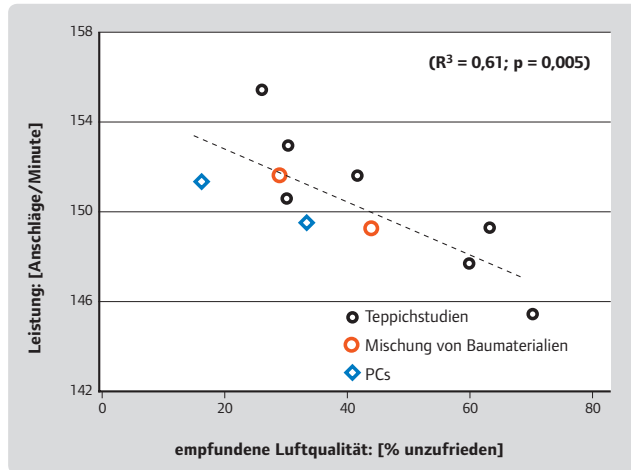


Abbildung 6: Leistung bei der Texteingabe abhängig von der empfundenen Luftqualität in % der unzufriedenen Beschäftigten, basierend auf Laborstudien mit typischen Quellen für Raumluftverschmutzung wie Teppich, Linoleum, Bücher und Papier auf Holzregalen, Dichtungsmittel und PCs (1, 8, 17, 19, 20, 21)

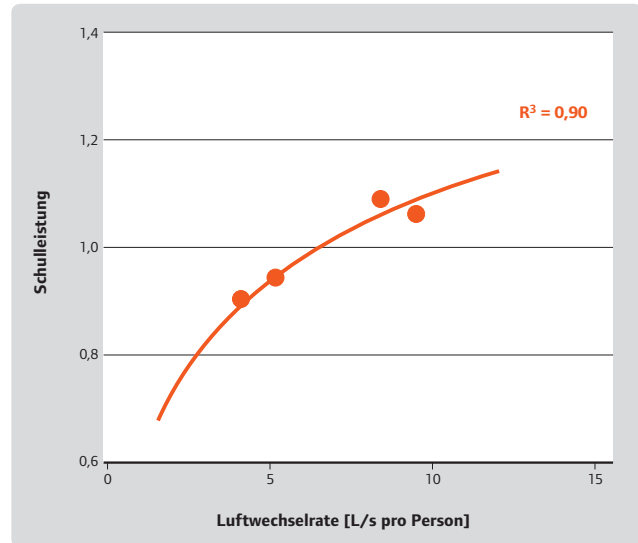


Abbildung 7: Leistung bei der Schularbeit abhängig von der Luftwechselrate

|                                       | Sensorische Verunreinigungslast olf / Person | Kohlendioxid I/(h × Person) | Kohlenmonoxid I/(h × Person) <sup>a)</sup> | Wasserdampf <sup>b)</sup> g/(h × Person) |
|---------------------------------------|--|-----------------------------|--|--|
| <b>Sitzend, 1 bis 1,2 met</b>         |  |                             |  |  |
| 0 % Raucher <sup>c)</sup>             | 1  | 19                          |  | 50                                       |
| 20 % Raucher <sup>c)</sup>            | 2  | 19                          | 11 × 10 <sup>-3</sup>                      | 50                                       |
| 40 % Raucher <sup>c)</sup>            | 3  | 19                          | 21 × 10 <sup>-3</sup>                      | 50                                       |
| <b>Körperliche Tätigkeit</b>          |  |                             |  |  |
| Niedriges Niveau, 3 met               | 4  | 50                          |  | 200                                      |
| Mittleres Niveau, 6 met               | 10   | 100                         |  | 430                                      |
| Hohes Niveau (Sportler), 10 met       | 20   | 170                         |  | 750                                      |
| <b>Kinder</b>                         |  |                             |  |  |
| Kindergarten, 3 bis 6 Jahre, 2,7 met  | 1,2  | 18                          |  | 90                                       |
| Schule, 6 bis 14 Jahre, 1 bis 1,2 met | 1,3  | 19                          |  | 50                                       |

<sup>a)</sup> Durch Tabakrauch

<sup>b)</sup> Gilt für Personen nahe an der thermischen Neutralität

<sup>c)</sup> Durchschnittsraucher, 1 bis 2 Zigaretten/h je Raucher, Emission 44 ml CO je Zigarette

**Tabelle 2: Durch Personen verursachte Verunreinigungslast (CR 1752)**

Luftwechselrate steigerte die Leistung bei der Schularbeit um etwa 14,5 % (Abbildung 7), eine Verringerung der Lufttemperatur in der Klasse um 1 K führte zu einer Leistungssteigerung von etwa 3,5 %.

Die vorliegenden Studien legen nahe, dass eine Verbesserung der Raumluftqualität durch Erhöhung der Luftwechselrate und Senkung der Klassenraumtemperaturen bei einer ganzen Reihe typischer Schularbeiten zu einer wesentlichen Leistungssteigerung führen kann. Dies betrifft sowohl regelbasierende logische und mathematische Aufgaben, bei denen Konzentration und logisches Denken gefordert ist, als auch sprachbasierte Aufgaben, die Konzentration und Begriffsvermögen verlangen. Man kann also behaupten, dass Luftqualität und Temperatur in Klassenräumen sehr wichtige Faktoren im Lernprozess sind, denen neben Lehrmaterial und -methoden eine hohe pädagogische Bedeutung zukommt.

Obwohl die Experimente mit dänischen Schülern durchgeführt wurden, können die Ergebnisse auch auf andere europäische Länder und die USA übertragen werden, da die Bedingungen in den Klassenräumen

und Bildungsniveau und Bildungsprogramme in Dänemark mit denen der anderen Industrieländer vergleichbar sind.

### Luftverunreinigungsquellen

Früher wurden in fast allen Normen und Richtlinien die erforderlichen Lüftungsraten pro Person in l/s oder m<sup>3</sup>/h angegeben, als ob die Personen (Nutzer) allein die Verunreinigungsquellen waren. Seit Jahren haben aber Labor- und Felduntersuchungen gezeigt, dass Personen und ihre Tätigkeit (Aktivitätsniveau, Raucher), Gebäudeeinrichtung (Fußbodenbelag, Möbel, Farben, Reinigung etc.) Raumlufttechnische Anlagen (Kanäle, Filter etc.) und sogar die Außenluft Quellen zur Luftverunreinigung sind.

Es ist aber schwierig, die verschiedenen Quellen miteinander zu vergleichen. Mit der Einführung der Olf-Decipol-Einheit (Fanger, 1988) wurde es aber möglich, den Einfluss der verschiedenen Quellen zu bewerten.

## Personen

Deswegen wurde die Einheit für Luftverunreinigungsquellen, Olf, auch definiert als die Luftverunreinigung, die eine Standard-Person (sitzende, thermische Neutralität) abgibt. Die Tabelle 2 zeigt die Verunreinigungsquellen von Personen. Oft wird die CO<sub>2</sub> Emission als Indikator für die Bioeffluente von Personen verwendet. CO<sub>2</sub> selbst ist keine Luftverunreinigungsquelle.

## Gebäudeeinrichtung

Es gibt relativ wenig quantitative Kenntnisse über Luftverunreinigung der Gebäudeeinrichtung (Fanger et. al. 1988a, Fanger 1988, Bluyssen et. al.1996). Einige der Ergebnisse sind in Tabelle 3 aufgelistet.

Neue Untersuchungen (Wargocki et. al., 2002a) in Nichtraucher-Gebäuden zeigen Werte um 0,08 – 0,13 olf/m<sup>2</sup>. Diese Werte liegen im Bereich der Werte in Tabelle 1, die in EN15251 für die drei Gebäudekategorien „sehr-verunreinigungsarme“ „verunreinigungsarme“ und „nicht-verunreinigungsarme“ verwendet werden.

Wie bei vielen Verunreinigungsquellen in der Gebäudeeinrichtung (Teppich, Möbel, Farben etc.) ist die Emission bei neuen Produkten am höchsten.

## Raumlufttechnische Anlagen (RLT-Anlagen)

Lüftungsanlagen werden installiert, um die Raumluftqualität zu verbessern, aber mehrere Untersuchungen zeigen, dass RLT-Anlagen selbst eine Quelle zur Luftverunreinigung sind (Kruppa 1999, Wargocki et. al. 2002c, Bluyssen et. al. 2000). Schlechte Wartung, mangelnde Hygiene in den Anlagen, Feuchtigkeit und die verwendeten Materialien für RLT-Anlagen und alte Filter sind oft die Ursache. Heute werden Filter üblicherweise eingesetzt, um die RLT-Anlagen zu schützen (Partikel, Verschmutzung). Für die Raumnutzer sind die Filter auf der einen Seite zwar vorteilhaft, weil sie Partikel wie Pollen von der Außenluft stoppen, auf der anderen Seite sind die Filter aber auch eine Quelle zur Luftverunreinigung.

**Tabelle 3: Durch das Gebäude verursachte Verunreinigungslast, einschließlich der Möbel, Teppiche und raumluftechnischen Anlagen**

|                                      | Sensorische Verunreinigungslast olf/(m <sup>2</sup> Fußboden) |             |
|--------------------------------------|---|-------------|
|                                      | Mittel  | Bereich     |
| <b>Bestehende Gebäude</b>            |   |             |
| Büros <sup>a)</sup>                  | 0,3 <sup>d)</sup>   | 0,02 – 0,95 |
| Büros <sup>b)</sup>                  | 0,6 <sup>c)</sup>   | 0 – 3       |
| Schulen (Klassenräume) <sup>a)</sup> | 0,3   | 0,12 – 0,54 |
| Kindergärten <sup>a)</sup>           | 0,4   | 0,20 – 0,74 |
| Versammlungsräume <sup>a)</sup>      | 0,3 <sup>d)</sup>   | 0,13 – 1,32 |
| <b>Neue Gebäude (Nichtraucher)</b>   |   |             |
| Sehr verunreinigungsarme Gebäude     | 0,02  |             |
| Verunreinigungsarme Gebäude          | 0,1   |             |
| Nicht verunreinigungsarme Gebäude    | 0,2   |             |

<sup>a)</sup> Die Daten stammen aus mehr als 40 maschinell belüfteten Gebäuden in Dänemark.

<sup>b)</sup> Die Daten stammen aus dem europäischen Audit-Projekt zur Optimierung der Innenraum-Luftqualität und des Energieverbrauchs in Bürogebäuden, 1992-1995.

<sup>c)</sup> Enthält die Belastung, die durch anwesenden und vorher anwesende Tabakraucher verursacht wird.

<sup>d)</sup> Enthält die Belastung durch vorher anwesende Tabakraucher.

Anmerkung:

Über die Verunreinigungslast vieler Werkstoffe, die in der Praxis verwendet werden, stehen wenig Informationen zur Verfügung. Es ist immer wichtig zu versuchen, die durch das Gebäude verursachte Verunreinigungslast zu minimieren. Es werden Untersuchungen durchgeführt, um Informationen über die Verunreinigungslast von Werkstoffen sowie deren Verringerung zur Verfügung zu stellen.

Neue Entwicklungen von Filtertechniken und Luftreiniger (elektrostatistisch, Ozon, ultraviolette Strahlung etc.) werden in den kommenden Jahre neue Möglichkeiten bieten.

## Außenluft

Die Außenluft dient überwiegend dazu, die Raumluftqualität zu verbessern. Aber eine akzeptable Luftqualität ist in vielen Großstädten und Industriegebieten nicht immer gewährleistet. In EN13799 (Tabelle 4) werden Empfehlungen für eine akzeptable Außenluft genannt. Diese Anforderungen liegen nicht in der Verantwortung der Planer, sondern der Behörden. Aber die Planer von RLT-Anlagen müssen die Qualität der Außenluft berücksichtigen und vielleicht notwendige Filter und Luftreiniger einsetzen.

**Tabelle 4: Beispiele für die Qualität der Außenluft nach EN13779**

| Pollutant                           | averaging time | guideline value                                | source   |
|-------------------------------------|----------------|--|----------|
| Sulphur dioxide SO <sub>2</sub>     | 24 hrs         | 125 µg/m <sup>3</sup>                          | WHO 1999 |
| Sulphur dioxide SO <sub>2</sub>     | 1 year         | 50 µg/m <sup>3</sup>                           | WHO 1999 |
| Ozone O <sub>3</sub>                | 8 hrs          | 120 µg/m <sup>3</sup>                          | WHO 1999 |
| Nitrogen dioxide NO <sub>2</sub>    | 1 year         | 40 µg/m <sup>3</sup>                           | WHO 1999 |
| Nitrogen dioxide NO <sub>2</sub>    | 1 hr           | 200 µg/m <sup>3</sup>                          | WHO 1999 |
| Particulate Matter PM <sub>10</sub> | 24 hrs         | 50 µg/m <sup>3</sup><br>max. 35 days exceeding | 99/30/EC |
| Particulate Matter PM <sub>10</sub> | 1 year         | 40 µg/m <sup>3</sup>                           | 99/30/EC |

### Erforderliche Lüftungsraten

Obwohl in vielen Fällen die Luftverunreinigungsquellen im Wohnungsbau (Einfamilienhäuser) und in Büro-/Verwaltungsgebäuden gleich sind, werden die Anforderungen an die Lüftungsraten getrennt und in verschiedenen Normen behandelt.

Eine andere Frage ist, ob es notwendig ist, für alle Verschmutzungsquellen zu lüften. Ist es nicht so, dass, wenn für die Emission von Baumaterialien gelüftet wird, d.h. die Konzentration von Schadstoffen wird geringer, dann auch gleichzeitig für die Emission von Personen (Bioeffluente) gelüftet wird?

Wenn es sich um Gesundheit und Vermeidung von zu hohen Schadstoffkonzentrationen handelt, werden nur die gleichen Schadstoffe

**Tabelle 5: Anforderungen an die Lüftungsraten in Wohnungen nach EN15251**

| Kategorie | Luftwechselrate <sup>1)</sup> |     | Aufenthaltsräume und Schlafzimmer |                         | Abluft, l/s |          |              |
|-----------|-------------------------------|-----|-----------------------------------|-------------------------|-------------|----------|--------------|
|           | l/s, m <sup>2</sup> (1)       | ach | l/s, pers <sup>2)</sup> (2)       | l/s, m <sup>2</sup> (3) | Küche (4a)  | Bad (4b) | Toilette (4) |
| I         | 0,49                          | 0,7 | 10                                | 1,4                     | 28          | 20       | 14           |
| II        | 0,42                          | 0,6 | 7                                 | 1,0                     | 20          | 15       | 10           |
| III       | 0,35                          | 0,5 | 4                                 | 0,6                     | 14          | 10       | 7            |

<sup>1)</sup> Die Luftwechselrate und Luftmenge in ach und l/sm<sup>2</sup> sind gleich bei einer Raumhöhe von 2,5 m

<sup>2)</sup> Anzahl von Personen könnte auf Basis der Anzahl an Schlafzimmern bestimmt werden.

von verschiedenen Quellen addiert und die erforderliche Lüftungsrate wird berechnet (siehe analytische Methode später).

### Wohnungen und Einfamilienhäuser

In Wohngebäuden geht es hauptsächlich um drei Typen von Luftverunreinigungsquellen:

- Verunreinigung direkt zu der Person relatiert (Bioeffluente, Feuchtigkeit, Tabakrauch, Tabelle 2)
- Verunreinigung indirekt zu den Personen relatiert (Feuchtigkeit vom Kochen, Duschen, Waschen, Hausstaubmilben)
- Verunreinigung zu dem Gebäude relatiert (Emission von Gebäudematerialien und Möbel, Baufeuchte, Schimmelpilz, Radon).

Tabelle 5 zeigt die Empfehlungen in EN15251.

Wegen Bioeffluente ist für nichtadaptierte Personen und eine Raumluftqualität von mehr als 80 % Zufriedene die erforderliche Lüftungsrate 7,5 l/s . Person. In Wohnungen wäre es aber akzeptabel, für adaptierte Personen zu lüften.

Wenn eine Wohnung nicht jeden Tag 24 Stunden voll benutzt ist und auch die Räume unterschiedlich benutzt und belastet sind, gibt es für eine bedarfsgeregelte Lüftung ebenfalls gute Möglichkeiten.

Ein Szenario könnte sein:

|               |   |
|---------------|---|
| 00:00 – 07:00 | Erhöhte Zuluft im Elternschlafzimmer;<br>niedrigere Zuluft in den unbenutzten Räumen (Wohnzimmer, Küche, Bad) |
| 07:00 – 08:00 | Erhöhte Luftabsaugung in Küche und Bad  |
| 08:00 – 17:00 | Niedrige Basislüftung oder nur Infiltration   |
| 17:00 – 19:00 | Erhöhte Luftabsaugung in der Küche  |
| 19:00 – 24:00 | Erhöhte Zuluft im Wohnzimmer  |

## Büro- und Verwaltungsgebäude

In diesem Abschnitt werden die Anforderungen in EN15251 für die Berechnung der erforderlichen Lüftungsraten dargestellt.

In den Normen sind oft mehr als eine Methode für die Bestimmung des erforderlichen Außenluftstroms angegeben. Es gibt eine vorgeschriebene Methode, bei der Anforderungen für die erforderlichen Luftströme als Tabellenwerte für die verschiedenen Räume gegeben sind. Es gibt zusätzlich auch eine analytische Methode, bei der der erforderliche Luftstrom in Abhängigkeit von welchen Schadstoffen, Schadstoffemissionen und Anforderungen an maximal erlaubte Schadstoffkonzentrationen berechnet wird.

Früher waren die Anforderungen an Lüftungsraten als Anforderungen zu l/s oder m<sup>3</sup>/h pro Person zu sehen. Heute wissen wir, dass auch andere Quellen die Luft in Innenräumen verschmutzen können. Darum wird in neuen Richtlinien hauptsächlich von zwei Quellen gesprochen:

1. Personen und ihre Tätigkeit (Bioeffluenten) ,
  2. Gebäude und Lufttechnische Anlagen (VOC's, Staub),
- Die erforderlichen Lüftungsraten für die zwei Gruppen von Verschmutzungsquellen werden addiert:

Lüftungsrate

$$V = R_p \cdot P_D \cdot A_b + R_r \cdot P_r \cdot A_b \quad \text{l/s} \quad (1)$$

dabei sind

|       |                                      |                       |
|-------|--------------------------------------|-----------------------|
| $R_p$ | = Außenluftstrom pro Person          | l/s Person            |
| $P_D$ | = Belegung Person pro m <sup>2</sup> | Person/m <sup>2</sup> |
| $R_r$ | = Außenluftstrom für Gebäude         | l/s · m <sup>2</sup>  |
| $A_b$ | = Bodenfläche                        | m <sup>2</sup>        |

In EN15251 werden aber drei Kategorien auf Basis von 15 % (Kategorie I), 20 % (Kategorie II) und 30 % (Kategorie III) Unzufriedene empfohlen (Tabelle 1 und Abbildung 4).

Die Anforderungen sind für die erforderliche Lüftungsrate im Atmungsbereich in der Aufenthaltszone. Um die Gesamtlüftungsrate zu bestimmen muss auch die Lüftungseffektivität nach folgender Gleichung berücksichtigt werden:

$$\text{Gesamt Lüftungsrate} = V/\varepsilon_v$$

## Analytische Methoden

Alle die Normen haben auch eine analytische Methode in dem Normtext oder in einem informativen Anhang. Die analytischen Methoden haben alle eine Berechnung des erforderlichen Luftstroms auf Gesundheitsbasis und eine auf Komfortbasis. Der größte Wert wird dann für die Planung eingesetzt.

Die Basis für die Berechnungen ist basiert auf einem Massen-gleichgewicht.

Der erforderliche Außenluftstrom wird berechnet als:

$$Q = \frac{G}{(C_i - C_o) \cdot \varepsilon_v} \quad \text{l/s}$$

dabei sind

|                 |                             |      |
|-----------------|-----------------------------|------|
| $G$             | = Gesamtbelastung           | mg/s |
| $C_i$           | = Zugelassene Konzentration | mg/l |
| $C_o$           | = Außenluftkonzentration    | mg/l |
| $\varepsilon_v$ | = Lüftungseffektivität      |      |

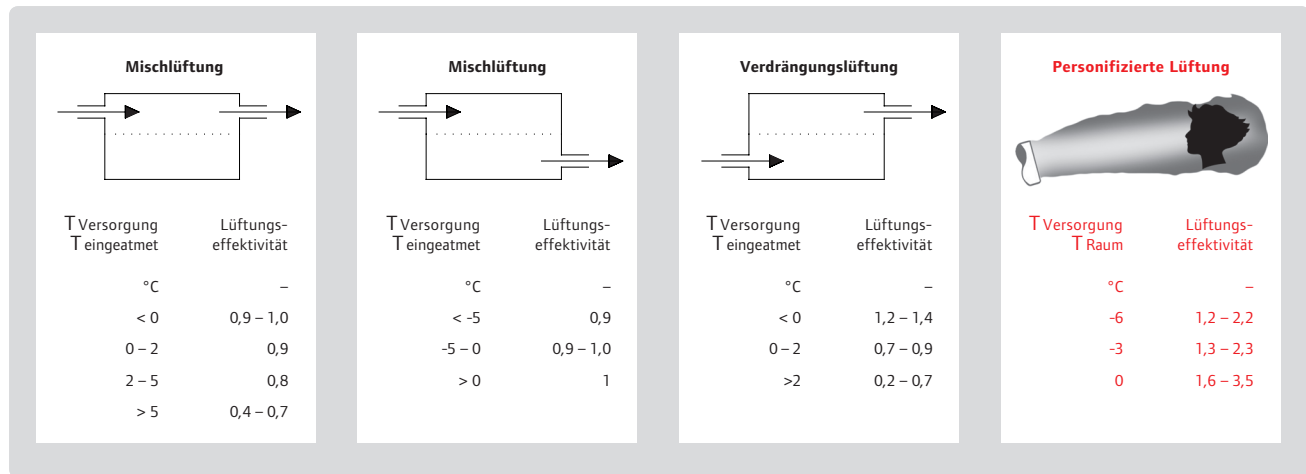


Abbildung 8: Lüftungseffektivität

Für jeden Schadstoff, der in Betracht kommt, wird eine Berechnung gemacht. Leider sind aber die Kenntnisse über Emission von Schadstoffen (G) und zugelassene Konzentration ( $C_i$ ) sehr mangelhaft. Aus Forschungsergebnissen und Materialprüfungen erfolgt in den nächsten Jahren jedoch viel mehr Information.

### Lüftungseffektivität

Den in Tabelle 1 angegebenen Lüftungsraten liegt ein Lüftungssystem mit völliger Vermischung, d. h. Lüftungseffektivität = 1 zugrunde.

Die Luftqualität muss nicht überall innerhalb eines belüfteten Raumes gleich sein. Worauf es für die Nutzer ankommt, das ist die Luftqualität im Atmungsbereich. Eine derartige Inhomogenität der Luftqualität in einem Raum hat Auswirkungen auf die Anforderungen an die Lüftung. Dieses wird durch die Lüftungseffektivität ausgedrückt:

$$\varepsilon_v = \frac{C_e - C_s}{C_i - C_s}$$

$\varepsilon_v$  = Lüftungseffektivität

$C_e$  = Verunreinigungskonzentration der Abluft

$C_s$  = Verunreinigungskonzentration der Zuluft

$C_i$  = Verunreinigungskonzentration im Atmungsbereich

Die Lüftungseffektivität ist von der Luftverteilung und von der Lage der Verunreinigungsquellen im Raum abhängig. Sie kann deshalb verschiedene Werte für verschiedene Verunreinigungen haben. Bei vollständiger Vermischung von Luft und Verunreinigungen beträgt die Lüftungseffektivität 1. Wenn die Luft im Atmungsbereich eine bessere Qualität als die Abluft aufweist, ist die Lüftungseffektivität größer als 1 und die gewünschte Luftqualität im Atmungsbereich kann dann mit einem geringeren Luftvolumenstrom erzielt werden. Wenn die Luft im Atmungsbereich eine schlechtere Qualität als die Abluft aufweist, ist

die Lüftungseffektivität kleiner als 1: in diesem Fall ist ein höherer Luftvolumenstrom erforderlich.

Die Lüftungseffektivität ist eine Funktion der Lage sowie der Eigenschaften der Luftdurchlässe und der Verunreinigungsquellen. Ferner ist sie eine Funktion der Zulufttemperatur und des Zuluftvolumenstromes. Die Lüftungseffektivität kann durch numerische Simulation berechnet oder experimentell gemessen werden. Beispiele für die Lüftungseffektivität bei verschiedenen Lüftungsarten sind in Abb. 8 angegeben.

Die Lüftungseffektivität berücksichtigt die Luftverteilung im Raum, aber nicht, wie effektiv die Lüftungsanlage die Außenluft durch die Kanäle zum Raum bringt. Wenn z. B. ein Teil der Außenluft wegen Undichtigkeiten in den Kanälen nicht in den Raum kommt, muss die Außenluft erhöht werden. Diese „Systemeffektivität“ ist noch nicht in den erforderlichen Lüftungsraten berücksichtigt.

### Lüftungskonzepte

Um die erforderlichen Lüftungsraten zu gewährleisten, sind diverse Lüftungskonzepte einsetzbar. Oft wird von nur zwei Konzepten – freie Lüftung – mechanische Lüftung – gesprochen, aber wie Tabelle 6 zeigt, gibt es viele Varianten dazu. In Tabelle 6 sind einige Argumente für und gegen verschiedene Lüftungskonzepte aufgeführt.

Viele Parameter spielen eine Rolle, um das optimale Lüftungskonzept zu wählen – Gebäudetyp, Raumklima, Außenklima, Investitionskosten, Betriebskosten etc. sind alles Faktoren, die berücksichtigt werden müssen.

In diesem Bericht sind nur einige Lüftungskonzepte dargestellt, und es wird nicht versucht, eine Methode zu erstellen, um das optimale Konzept zu finden. Obwohl alle Konzepte sowohl in Wohngebäuden als in auch Büros einsetzbar sind, werden die zwei Einsatzbereiche separat diskutiert.

**Tabelle 6: Vor- und Nachteile unterschiedlicher Lüftungskonzepte**

| Lüftungskonzept                                    | Vorteile  | Nachteile  |
|--|---|--|
| <b>Fensterlüftung</b>                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>– keine Investitionskosten</li> <li>– keine Wartung</li> <li>– einfacher Nutzereinfluss</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>– nutzerabhängig</li> <li>– keine Garantie</li> <li>– min. Lüftung</li> <li>– kein Wärmerückgewinn</li> <li>– Außenschall, Regen, Einbruch</li> <li>– Behaglichkeit – Zug</li> <li>– keine Luftfilterung</li> </ul> |
| <b>Natürliche Lüftung mit Außenluftdurchlässen</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– kostengünstig</li> <li>– einfacher Nutzereinfluss</li> <li>– Schallschutz und Filterung möglich</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>– nutzerabhängig</li> <li>– wetterabhängig (Wind, Temperatur)</li> <li>– kein gesicherter Minimum-Luftwechsel</li> <li>– kein Wärmerückgewinn</li> <li>– Behaglichkeit – Zug</li> <li>– Architektur ?</li> </ul>    |
| <b>Mechanische Abluftanlage</b>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>– zusätzliche Investitionskosten gering</li> <li>– verschiedene Volumenströme möglich</li> <li>– Nutzereinfluss mit Außenluftdurchlässen</li> <li>– Wärmerückgewinn möglich</li> <li>– Filterung bei Außenluftdurchlässen möglich</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Wärmerückgewinn ist aufwändig (Wärmepumpe)</li> <li>– Vermeidung von evtl. Zugrisiko bei Außenluftdurchlässen</li> </ul>  |
| <b>Mechanische Zu-/Abluftanlage</b>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Wohnkomfort (Behaglichkeit, Raumluftqualität)</li> <li>– Wärmerückgewinn</li> <li>– min. Luftwechsel sichern</li> <li>– Bedarfsregelung möglich</li> <li>– Filterung</li> <li>– Schalldämmung</li> </ul>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>– hohe Investitionskosten</li> <li>– Platzbedarf</li> <li>– Wartungsaufwand (Filterwechsel)</li> <li>– Schallemission vom Lüfter</li> </ul>   |

### Wohnungslüftung

In Deutschland und Dänemark werden die meisten Wohngebäude mit Fenstern gelüftet, während in den Niederlanden, Schweden und Finnland fast alle Neubauten mit mechanischer Lüftung versorgt werden. In diesen Ländern wird aber in der Gebäudeverordnung auch eine mechanische Lüftung gefordert. Mit mechanischer Lüftung gibt es die Möglichkeit des Wärmerückgewinns und damit die Möglichkeit von Energieeinsparungen. Aber die Wirtschaftlichkeit ist nicht immer gewährleistet.

Oft sind die Investitions- und Betriebskosten (Ventilatoren, Filter, Reinigung) im Verhältnis zu der Energieeinsparung zu hoch. Oft sind die Häuser zu undicht gebaut. Nicht nur wegen der Bauteile (Fenster, Türen), sondern auch wegen der Installation. Bei undichten Häusern sind die Lüftungsraten sehr abhängig von dem Wetter (Außentemperatur und Wind), und somit kommt nur ein Teil der Lüftung durch das Lüftungssystem und ein Wärmerückgewinn ist nur teilweise möglich. Allein die Argumente für verbesserten Wohnkomfort, Behaglichkeit, Gesundheit und Vermeidung von Feuchtigkeitsschäden genügen, um eine mechanische Lüftung zu installieren. Man kauft ja auch nicht ein Auto mit Klimaanlage, um Energie zu sparen.

Aber mit einer mechanischen Lüftung wird der Wohnkomfort erhöht und gleichzeitig wird Heizenergie eingespart.

Für sehr empfindliche Nutzer (Allergiker) ist eine mechanische Lüftung ein Muss, um die Außenluft zu filtern.

### **Lüftung im Büro**

In Büro- und Versammlungsräumen ist eine mechanische Lüftung oft erforderlich, um ein akzeptables und kontrollierbares Raumklima zu erreichen. Einige Untersuchungen (Kruppa, 1999) haben größere Probleme mit SBS-Symptomen in Gebäuden mit Klimaanlage als in Gebäuden mit freier Lüftung gefunden.

Einige Erklärungen dafür sind Probleme in Klimaanlage mit Be- und Entfeuchtung, keine Wartung (Filteraustausch, schmutzige Kanäle) und die geringe Möglichkeit des Nutzereinflusses auf die Regelung der Lüftrate (geschlossene Fenster).

Der heutige Trend in Bürogebäuden, die Heizung und Kühlung über Wassersysteme (Flächenheizung/-kühlung) vorzunehmen und die RLT-Anlagen hauptsächlich für die Lüftung zu nutzen, gibt eine viel bessere Grundlage, um ein optimales Raumklima und damit auch eine erhöhte Leistung der Nutzer zu erreichen.

Hinzu kommt der Trend der Hybride-Lüftungssysteme, bei denen, abhängig von der Jahreszeit, die freie Lüftung durch die mechanische Lüftung unterstützt wird.

Zum Schluss sollten auch die persönlichen Lüftungssysteme erwähnt werden. Grundsätzlich ist es effektiver, dem Nutzer die frische Luft direkt an den Arbeitsplatz zu bringen, anstatt diese erst im ganzen Raum zu mischen. Einige neue Untersuchungen (Melikov et. al. 2000 und Cermak et. al. 2002) zeigen auch die Vorteile solcher Lüftungskonzepte, bei denen die verbesserte empfundene Raumluftqualität mit weniger Luftmengen erreicht werden kann.

### **Zusammenfassung**

Heute liegen viele Kenntnisse über erforderliche Lüftungsraten und Lüftungskonzepte vor. Die Anforderungen an die verschiedenen nationalen und internationalen Normen sind aber oft sehr unterschiedlich.

In mehreren Untersuchungen wurde bestätigt, dass eine gewisse Lüftung für die Gesundheit und Behaglichkeit notwendig ist. Eine erhöhte Raumluftqualität erhöht ebenfalls die Leistung der Nutzer.

Grundsätzlich werden heute Verschmutzungsquellen wie Personen (Bioeffluente, Feuchtigkeit), Gebäude (Abgasung von Baumaterialien) und Einrichtung, elektronische Geräte wie PC, TV und RLT-Anlagen berücksichtigt.

In Wohnungen ist eine Grundlüftung von 0,3 bis 0,5 Luftwechseln pro Stunde ( $0,35 \text{ l/s m}^2$ ) erforderlich. In Büro- und Versammlungsräumen ist die erforderliche Lüftung sehr von der Personendichte abhängig und von der Materialwahl für Wände, Böden und Einrichtung. Nur mit mechanischer Lüftung oder einer Mischung aus mechanischer Lüftung und freier Lüftung (hybride Lüftung) ist es möglich, eine optimale Raumluftqualität mit akzeptablem Energieaufwand zu erreichen.

## Referenzen

ASHRAE Standard 62, 2007. ANSI/ASHRAE Standard 62-2001. "Ventilation for acceptable indoor air quality". American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Atlanta.

Blyussen P, de Oliveira Fernandes E, Groes L, Clausen G, Fanger PO, Valbjørn O, Bernhard C, Roulet C., 1996. European indoor air quality audit project in 56 office buildings. International Journal of Indoor Air Quality and Climate. 6, No. 4.

Blyussen P, Seppänen O, Fernandes E, Clausen G, Müller B, Molina J, Roulet CA. 2001. AIRLESS: A European project to optimize Indoor Air Quality and Energy consumption of HVAC-systems. In: Proceedings of CLIMA 2000, Naples.

Bornehag, C, Sundell, J., Sigsgaard, T.: »Dampness in buildings and health (DBH): Report from an ongoing epidemiological investigation on the association between indoor environmental factors and health effects among children in Sweden«. Indoor Air 14(2004), suppl.7, p. 59–66

Bornehag, C-G.; Sundell, J.; Weschler, C.J.; Sigsgaard, T.; Lundgren, B.; Hasselgren, M.; Hagerhed-Engman, I.: (2004) »The Association between Asthma and Allergic Symptoms in Children and Phthalates in House Dust: A Nested Case-Control Study«. Environmental Health Perspectives 112(2004), no. 14, pp. 1393-7

CEN CR 1752, 1996: „Ventilation for Buildings: Design Criteria for the Indoor Environment“.

Cermak, R., Majer, M., Melikov, A.K., 2002: "Measurements and prediction of inhaled air quality with personalized ventilation. Indoor Air 2002.

Djukanovic, R.; Wargocki P.; Fanger, P.O.: »Cost-benefit analysis of improved air quality in an office building«. In: Proceedings of Indoor Air 2002. The 9th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Vol.1. Monterey/Calif.: 2002, pp. 808–813

EN 15251 (2007) Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings-addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. CEN, Brussels, 2007

EN13779, 2007: "Ventilation for non-residential buildings – Performance requirements for ventilation and room-conditioning systems“.

Fanger, P.O. und B. Berg-Munch., 1983.: "Ventilation and body odor". Proc. of Am. Engineering Foundation Conference on Management of Atmospheres in Tightly Enclosed Spaces. Atlanta: Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

Fanger, P.O., 1988: "Introduction of the Olf and the Decipol units to quantify air pollution perceived by humans indoors and outdoors". Energy and Buildings 12: 1-6.

Fanger, P.O., Lauridsen, J., Blyussen, P. and Clausen, G., 1998a: „Air pollution sources in offices and assembly halls quantified by the olf unit“. Energy and Buildings, 129, 7-19.

Gunnarsen, L. and Fanger, P. O., 1992: "Adaptation to indoor air pollution". Energy and Buildings, 18, 43-54.

Kruppa, B., 1999: "Untersuchungsergebnisse der ProKlima Felduntersuchung: Raumklima in Bürohäusern". 21. Internationaler Velta-Kongress, St. Christoph/Tirol.

Melikov, A.K., Cermak, R., Mayer, M., 2001: "Personalized ventilation: evaluation of different air terminal devices". Clima 2000/Napoli 2001 World Congress.

Seppanen, O.; Fisk, W.J.: »Some quantitative relations between indoor environmental quality and work performance or health«. In: Proceedings of 10th International conference on Indoor Air Quality and Climate, Beijing September 2005

Wargocki, P.; Wyon, D.P.; Baik, Y.K.; Clausen, G.; Fanger, P.O.: »Perceived air quality: Sick Building Syndrome (SBS) symptoms and productivity in an office with two different pollution loads«. Indoor Air 9(1999), no. 3, pp. 165–179

Wargocki, P.; Wyon, D.P.: »Effects of HVAC on student performance«. ASHRAE Journal (2006), no. 48

Wargocki, P.; Wyon, D.; Sundell, J.; Clausen, G.; Fanger D.: »The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity«. International Journal of Indoor Air Quality and Climate 10 (2000), pp. 222–236

Wargocki, Pawel; Wyon, David P.; Fanger, P. Ole: »The performance and subjective responses of call-center operators with new and used supply air filters at two outdoor air supply rates«. *Indoor Air* 14(2004), no. 58, p. 7–16

Wargocki, P. and Fanger, P. O., 1997: „Impact of changing the floor material on air quality in an office building“. In: *Proceedings of Healthy Buildings/IAQ '97*, Washington DC, USA, Virginia Polytechnic Institute and State University, Vol. 2, 243-248.

Wargocki P, Wyon, D, Sundell J, Clausen, G Fanger O. 2000.:“The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity“, *International Journal of Indoor Air Quality and Climate*. 10 :222-236.

Wargocki, P., Krupicz, P., Szczecinski, A., Fanger, P.O., Clausen, G, 2002a: “Perceived air quality and sensory pollution loads in six Danish office buildings“. *Indoor Air* 2002.

Wargocki, W., Sundell, J., Bischof, W., Brundrett, G., Fanger, P. O., Gyntelberg, F., Hanssen, S.O, Harrison, P., Pickering, A., Seppänen, O., Wouters, P., 2002b: “Ventilation and health in non-industrial indoor environments“. Report from a European Multidisciplinary Scientific Consensus Meeting. *International Journal of Indoor Air Quality and Climate*. 2002

Wargocki, W., Sundell, J., Bischof, W., Brundrett, G., Fanger, P.O., Gyntelberg, F., Hanssen, S. O, Harrison, P., Pickering, A., Seppänen, O., Wouters, P., 2002c.: “The role of ventilation and HVAC systems for human health in non-industrial indoor environments“. A supplementary review by European group. *Proceedings of Indoor Air 2002 Conference*.

