



Ole P. Fanger\*

## Ein neues Komfortmodell für Raumluftqualität

Seit mehr als einem Jahrhundert beziehen sich Lüftungsstandards auf die klassische Theorie von Pettenkofer, welche den Menschen als entscheidende Quelle für Luftverunreinigungen in Wohn- und Gesellschaftsbauten ansieht. Bedauerlicherweise verhindern aber diese Standards nicht, daß in vielen Gebäuden echte Probleme mit der Raumluftqualität bestehen.

Vorgestellt wird nun eine neue Philosophie der Lüftung, die neben den vom Menschen abgegebenen Luftbeimengungen und dem Tabakrauch auch andere Quellen, wie Baumaterialien, Möbel, Anlagen, etc. berücksichtigt. Erreicht wird dies durch *olf* und *decipol*, die neuen Einheiten der empfundenen Luftqualität. Diese beiden Einheiten werden für eine neue Komfortgleichung der Raumluftqualität genutzt, um die erforderlichen Luftvolumenströme bei vorgegebener Luftqualität (in *decipol*) in einem Raum mit bekannten Emissionsquellen (in *olf*) zu bestimmen. Die Gleichung fordert mehr Außenluft als die derzeit gültigen Standards oder aber eine Reduzierung verborgener *olf*, welche die Luft in vielen Gebäuden verunreinigen. Die Komfortgleichung stellt eine rationale Basis für zukünftige Lüftungsstandards dar.

### A new model for evaluating air quality in rooms

For more than a century air quality standards have been based on the Pettenkofer Theory, which regards the human being as the decisive source of air pollution in residential and community building. Regrettably these standards have not prevented many buildings from having serious air quality problems. Presented here is a new philosophy of ventilation, which takes into account pollution sources other than human contaminants and tobacco smoke, e. g. construction materials, furniture, and utilities. Use is made of the new quantities for measuring perceived air quality, the *olf* and the *decipol*. These entities make possible a new comfort equation for room air quality whereby the air exchange volume necessary for a given quality level (expressed in *decipol*) in a room with known pollution sources (expressed in *olf*) can be determined. The equation calls for higher rates of air exchange than do prevailing standards or a reduction of hidden *olf*, which pollute the air in many buildings. The comfort equation provides a rational basis for the ventilation standards of the future.

### Un nouveau modèle de confort pour la qualité de l'air ambiant

Depuis plus d'un siècle, les standards d'aération se réfèrent à la théorie classique de Pettenkofer qui considère l'homme comme source principale de pollution de l'air dans les bâtiments d'habitation et ceux des sociétés. Ces standards n'empêchent malheureusement pas l'existence de vrais problèmes de qualité de l'air ambiant dans de nombreux bâtiments.

L'article présente une nouvelle philosophie de l'aération qui prend en compte, outre les impuretés de l'air provoquées par l'homme et la fumée due au tabac, d'autres sources également, comme les matériaux de construction, les meubles, les installations, etc. Ceci est obtenu par *olf* et *decipol*, les nouvelles unités perçues de la qualité de l'air. Ces deux unités sont utilisées pour une nouvelle équation de confort de la qualité de l'air ambiant pour déterminer les courants volumiques nécessaires de l'air lors d'une qualité d'air donnée (en *decipol*) dans une pièce avec des sources d'émission connues (en *olf*). L'équation exige des échanges d'air plus importants que les standards valables actuellement ou une réduction des *olfs* cachés qui polluent l'air dans de nombreux bâtiments. L'équation de confort est une base rationnelle pour les standards d'aération de demain.

### Einleitung

Die Qualität der Raumluft ist häufig unzumutbar. Viele Menschen halten beim Betreten eines Raumes den Atem an und sind erleichtert, wenn sie ihn wieder verlassen können. Diese Unzufriedenheit wurde in detaillierten Felduntersuchungen in Büros, Schulen, Wohnungen, in Gesellschaftsbauten allgemein, in Europa, Nordamerika und Japan nachgewiesen. Die Beschwerden schließen die Perzeption stickiger, muffiger Luft, die Reizung der Schleimhäute, Kopfschmerzen, Lethargie, etc. ein. Diese Erscheinungen wurden in der Regel auch als sick building syndrome (WHO 1983) bezeichnet.

Die Beschwerden sind nicht typisch für einige wenige und spezielle Gebäude und deren Räume, im Gegenteil, ein breites Spektrum von Raumnutzern ist beeinträchtigt. In einigen Gebäuden gibt es objektive Gründe für eine schlechte Raumluftqualität: der tatsächliche Außenluftvolumenstrom mag hier geringer als der geforderte sein. Aber das eigentlich Frustrierende ist, daß die meisten der in aller Welt untersuchten Gebäude den lüftungstechnischen Vorschriften entsprechen, die Konzentrationen von Luftbeimengungen innerhalb der festgelegten Grenzen, oft sogar unterhalb der Nachweisgrenze liegen. Dennoch akzeptieren

20 %, 40 % oder selbst 60 % der Raumnutzer die Qualität ihrer Atemluft nicht.

Die Aufgabe eines Lüftungsstandards ist es, dem sich im Raum Aufhaltenden zumutbare Luftqualität zu garantieren. Wird dies nicht erreicht, erfüllt dieser Standard sein Anliegen nicht. Ausgangspunkte aller dieser Lüftungsnormen sind auch heute noch die Philosophie Pettenkofers (1858), der die moderne Hygiene begründete, und die klassischen Studien von Yaglou et al. (1936). Ihre Experimente über die menschlichen Ausdünstungen (Bioeffluenten) haben einen entscheidenden Einfluß auf die Lüftungsstandards unseres Jahrhunderts ausgeübt. In Büros, Gesellschaftsbauten, kurz in allen Räumen, die nicht der Produktion dienen, wurde angenommen, daß der Mensch die vorherrschende bzw. alleinige Quelle von Verunreinigungen ist; Lüftungsvorschriften wurden daher auf den Nutzer bezogen. Wenn auch einige Standards auf andere Emissionsquellen hinweisen, gehen sie doch davon aus, daß sowohl der Raum, als auch die Klima- oder Lüftungsanlage absolut rein sind und keinen Beitrag zur Luftverunreinigung liefern.

Erstmals haben Fanger et al. (1988) diverse Emissionsquellen in Räumen und Klimaanlagen durch Untersuchung von genutzten und ungenutzten Räumen ermittelt. Die Einführung der Einheit *olf* (Fanger, 1988) ermöglicht es, unterschiedliche Quellen in Zahlen zu fassen und damit zu vergleichen. Im Mittel konnte für menschliche Bioeffluenten nur ein Anteil von 13 % an der

\* Manuskript eingereicht März 1990  
Veröffentlicht in ASHRAE-Journal Oktober 1989

Gesamtemission ermittelt werden. In den Raum eingebrachte Materialien und die Komponenten des Lüftungssystems, in den gängigen Standards als Emissionsquellen seit über einem Jahrhundert ignoriert, waren Hauptursache der schlechten Luft, die in den meisten der untersuchten Gebäude beobachtet wurde. Versteckte olfs sind also für das sick building syndrome verantwortlich zu machen.

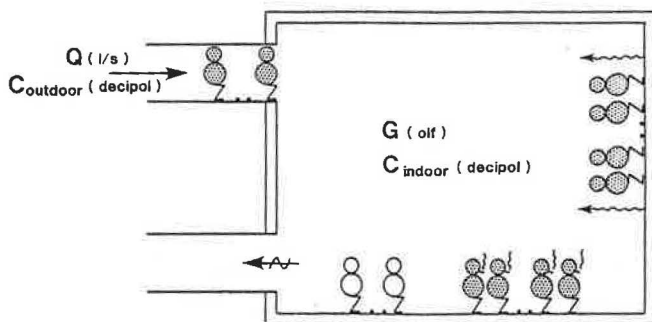
Die vorliegende Arbeit führt eine neue Philosophie der Lüftung ein, eine Philosophie, die keine Emissionsquellen vernachlässigt. Diese Philosophie führt auch zu einer neuen Komfortgleichung der Raumluftqualität, die auf den Größen olf und decipol basiert. Diese neuen Größen integrieren Luftbeimengungen in der gleichen Weise, wie es unsere Sinne tun (Fanger, 1988). Leitgedanke ist dabei, alle Emissionsquellen durch die Einheit olf zahlenmäßig auszudrücken. Über die Gesamtbilanz des Raumes wird es dann möglich, den für eine zufriedenstellende Raumluftqualität erforderlichen Außenluftvolumenstrom zu berechnen.

**Komfortgleichung der Raumluftqualität**

Die Anwendung von olf und decipol macht es möglich, eine Emissionsbilanz für die Luft eines Raumes aufzustellen (s. Bild 1). Gleichung (1) gibt an, daß die im Raum emittierten Verunreinigungen auf den Außenluftvolumenstrom zu beziehen sind:

$$C_i = C_o + 10 \cdot G / \dot{Q} \quad (1)$$

- mit  $C_i$  . . . empfundene Raumluftqualität, decipol
- $C_o$  . . . empfundene Außenluftqualität, decipol
- $G$  . . . Summe aller Emissionsquellen im Raum und im Lüftungssystem, olf
- $\dot{Q}$  . . . Außenluftvolumenstrom, l/s



**Bild 1** Raum mit summarischer Emissionsquelle G und empfundener Luftqualität  $C_i$ , belüftet mit einem Außenluftvolumenstrom Q der Luftqualität  $C_o$ .

Für die Projektierung ist es im allgemeinen erforderlich, den Außenluftvolumenstrom zu bestimmen, was durch Gleichung (2) ermöglicht wird. Den Zusammenhang zwischen der Einheit decipol und der Anzahl Unzufriedener gibt diese Beziehung gleichfalls an (Fanger, 1988).

$$\dot{Q} = 10 \cdot G / (C_i - C_o) \quad (2)$$

- mit  $C_i = 112 \cdot (\ln(PD) - 5,98)^4$
- PD . . . Anteil Unzufriedener, %

Die Gleichung (2) stellt den mathematischen Ausdruck olfaktorischen Komforts dar. Für eine festzulegende Raumluftqualität, d. h. für eine bestimmte Anzahl Unzufriedener ermittelt diese Beziehung den erforderlichen Außenluftvolumenstrom. Auch die empfundene Luftqualität der Außenluft beeinflusst den erforderlichen Volumenstrom und muß daher bestimmt werden.

Die Komfortgleichung kann gleichfalls genutzt werden, um die Luftqualität eines Raumes zu bestimmen (in decipol oder % Unzufriedene), wenn die Emissionsrate und der Außenluftvolumenstrom bekannt sind. Darüber hinaus ist es möglich, experi-

mentell die Emissionsquellen eines Raumes als olf zu erfassen, indem der Luftwechsel gemessen wird und sowohl Raum- als auch Außenluft durch eine trainierte Probandengruppe olfaktorisch (decipol) charakterisiert werden (Fanger et al., 1988).

Die Komfortgleichung ist für steady-state-Bedingungen und vollständige Durchmischung der Raumluft anwendbar. Eine Anpassung der Gleichung für Übergangsbedingungen und beliebige Lüftungsintensität ist leicht möglich.

Eine wichtige Voraussetzung bestehender Normen seit Pettenkofer und Yaglou war, daß der Mensch beim Betreten des Raumes dessen Luft annehmbar findet. Unrealistisch hingegen sind solche Bestrebungen, die auf eine höhere Akzeptanz durch Adaptation hinweisend, erst nach längerem Aufenthalt im Raum eine Aussage zur Luftqualität erheben. Die vorliegende Komfortgleichung greift den Gedanken des ersten Eindrucks auf; sie begründet sich auf die Beurteilung der Raumluft sofort nach dem Betreten des Raumes. Es sei jedoch hervorgehoben, daß Gleichung (2) nur ausdrückt, wie die Luft empfunden wird. Einige Beimengungen, wie z. B. Radon und Kohlenmonoxid, werden vom Menschen nicht wahrgenommen, stellen mitunter aber ein hohes Gesundheitsrisiko dar. Daher müssen solche, meist typische und bekannte Emissionen gesondert betrachtet werden.

**Lüftungsnormen in der Zukunft**

Die Komfortgleichung der Raumluftqualität kann eine realistische Grundlage zukünftiger Lüftungsstandards sein! Sie bezieht erstmals alle Emissionsquellen ein und beschränkt sich nicht nur auf menschliche Bioeffluente und Tabakrauch. Erstmals ermöglicht sie, die Qualität der Raum- und der Außenluft in Zahlen zu fassen.

Der erste Schritt einer nun zu gestaltenden Lüftungsnorm ist, die gewünschte Luftqualität des betreffenden Raumes festzulegen. Dies erfolgte bereits im neuen ASHRAE-Standard (ASHRAE, 1989), der festlegt, daß die Raumluftqualität von mindestens 80 % der Raumnutzer akzeptiert werden muß. Dies entspricht 20 % Unzufriedenen oder 1,4 decipol. Natürlich kann eine zukünftige Norm hier weitaus detaillierter Kenngrößen in Abhängigkeit von Raumarten und spezieller Nutzung festlegen.

Der nächste Schritt ist, zu ermitteln, ob die Qualität der Außenluft für eine Belüftung von Räumen geeignet ist. So kann es im Falle hoher extramuraler Emissionen erforderlich sein, die Zuluft zu reinigen, um belüften zu können. Tab. 1 führt einige der ermittelten Werte für die Außenluft an; es ist jedoch wichtig, zukünftig weitere Daten für typische Standorte und Höhen über NN zu bestimmen.

**Tab. 1** Empfundene Außenluftqualität

Bedingung	$C_o$ olf
Stadt, während Smogepisoden bei mäßiger Luftverunreinigung	> 1,0 0,05 - 0,3
im Gebirge, an der See	0,01

Als dritter Schritt folgt die Bestimmung aller Emissionsquellen im Raum und im Lüftungssystem, da die gesamte olf-Last des Raumes zu berechnen ist. Tab. 2 zeigt als Beispiel die in Büroräumen ermittelten und auf die Raumfläche bezogenen Emissionen. Ein Teil der Gesamlast wird vom Menschen erzeugt. Da nach Definition eine Person einem olf entspricht und eine Grundfläche von 10 m<sup>2</sup> pro Person angenommen wurde, ergibt dies den Wert von 0,1 olf/m<sup>2</sup>. Besteht kein Rauchverbot, wird ein zusätzlicher Anteil eingebracht (Cain et al., 1983). Für 40 % Raucher, was als typisch für Europa angenommen wird, muß mit 0,2 olf/m<sup>2</sup> gerechnet werden. In Nordamerika rauchen zwar weniger als 30 % der

Angestellten, dafür aber intensiver. Aus diesem Grund dürfte auch hier mit dem o. g. Wert zu rechnen sein. Die durch Materialien und das Lüftungssystem erzeugten Emissionslasten wurden (Fanger et al., 1988) in 15 Bürogebäuden Kopenhagens ermittelt. Dabei stellte sich heraus, daß schon in den unbesetzten Räumen starke Emissionen auftraten. Die olfaktorisch gefundenen Werte lagen im Mittel bei 0,4 olf/m<sup>2</sup>, wobei die Einzelwerte zwischen 0,1 und 0,9 olf/m<sup>2</sup> schwankten. Als Quellen konnten alle Arten von Baumaterialien, Teppiche, Möbel, Bücher, Büromaschinen, etc. und vor allem auch die Lüftungsanlage identifiziert werden. Als ein erster grober Wert für die Einschätzung der Emissionslasten durch die zuletzt genannten Quellen empfiehlt es sich, für Bürogebäude mit 0,4 olf/m<sup>2</sup> zu rechnen. Wichtige Schlußfolgerung für den Projektanten ist, alle einzusetzenden Materialien hinsichtlich ihrer olf-Werte zu prüfen und gleichen Maßstab auch an die Lüftungs- oder Klimaanlage zu legen. Darüber hinaus wird es erforderlich sein, durch ein rigores Wartungsschema den niedrigen olf-Pegel der Anlage über die gesamte Betriebszeit zu garantieren. Erst hierdurch wird es möglich sein, low-olf-Gebäude zu projektieren und zu betreiben. Daß dies praktisch möglich ist, zeigen die besten Gebäude der Kopenhagen-Studie mit Werten um 0,1 olf/m<sup>2</sup> für Emissionen aus Materialien und Lüftungsanlage. Weitere Felduntersuchungen in einer möglichst großen Zahl unbesetzter, vorhandener und zukünftiger Gebäude zur Bestimmung charakteristischer olf-Werte sind zu empfehlen.

Tab. 2 In Büroräumen ermittelte und auf die Raumfläche bezogene olf-Lasten

Emissionsquelle	G olf/m <sup>2</sup>
Nutzer (1 Person pro 10 m <sup>2</sup> )	
Bioeffluente	0,1
Zusatzlast durch 20% Raucher	0,1
40% Raucher	0,2
60% Raucher	0,3
Materialien und Lüftungssystem	
Mittelwert in untersuchten Bürogebäuden	0,4
low-olf-Gebäude	0,1
Gesamtlast in Bürogebäuden	
Mittelwert, 40% Raucher	0,7
low-olf-Gebäude, Rauchverbot	0,2

Die in Tab. 2 aufgeführten Emissionslasten in olf/m<sup>2</sup> sind analog zu groben Werten der Heiz- und Kühllast von Gebäuden, meist in W/m<sup>2</sup> angegeben, zu sehen. Eine genauere Analyse der thermischen Last erfordert Angaben zu den Wärmeleitwiderständen der Umfassungskonstruktion. Gleichermaßen benötigt eine detaillierte Analyse der Emissionsquellen Angaben über die olf-Werte aller im Raum und in der Lüftungsanlage eingesetzten Materialien. Ein derartiger olf-Katalog existiert natürlich derzeit noch nicht – wünschenswert dürfte er für den Projektanten jedoch schon heute sein.

Tab. 2 gibt darüber hinaus die Gesamtemissionslast von Bürogebäuden an. Im Mittel liegt dieser Wert unter der Voraussetzung, daß der Anteil an Rauchern ca. 40 % beträgt, als Summe der Emissionen von Nutzern, Material und Lüftungs-/Klimaanlage bei etwa 0,7 olf/m<sup>2</sup>. In low-olf-Gebäuden und bei gleichzeitigem Rauchverbot würde sich diese Last auf 0,2 olf/m<sup>2</sup> vermindern lassen.

Für Bürogebäude können Lüftungsvorschriften nun mit der neuen Komfortgleichung vorgegeben werden. Um eine Raumluftqualität von 1,4 decipol (damit würden sich 80 % der Nutzer einverstanden erklären) zu garantieren, ist ein Außenluftvolumenstrom von durchschnittlich 5 l/s · m<sup>2</sup> zu fordern (Tab. 3). Das entspricht dem Dreifachen des in den gängigen Lüftungsstandards geforderten! Solch eine Erhöhung des Luftwechsels ist natürlich für die Praxis nicht zu empfehlen; besser dürfte schon die Alternative sein, verborgene und unnötige olf zu reduzieren. Damit würde nicht nur die Raumluftqualität verbessert, sondern mit den Luftvolu-

menströmen verringern sich gleichzeitig Energieverbrauch und lokaler thermischer Diskomfort durch Zugerscheinungen.

Tab. 3 Lüftungsvorschriften für Bürogebäude\*

Vorschrift/Standard	Q l/s · m <sup>2</sup>
Komfortgleichung, C <sub>i</sub> = 1,4 decipol	
G = 0,7 olf/m <sup>2</sup> , 40% Raucher	5,0
G = 0,2 olf/m <sup>2</sup> , Rauchverbot	1,4
ASHRAE-Standard 62-89 (ASHRAE, 1989)	0,8
Nordic Guidelines, NKB (NKB, 1981)	
Raucher	1,0
Rauchverbot	0,4
DIN 1946, Großraumbüros (DIN, 1983)	
Raucher	1,9
Rauchverbot	1,4

\* bezogen auf 0,1 Personen/m<sup>2</sup> und reine Außenluft

In low-olf-Gebäuden werden 1,4 l/s · m<sup>2</sup> Außenluft gefordert. Dieser Volumenstrom entspricht etwa dem in den aufgeführten Normen vorgeschriebenen. Der Schlüssel also, um gute Luftqualität auch bei niedrigem Luftwechsel zu garantieren, liegt in der Senkung von olf-Lasten. Die Projektierung, Nutzung und Wartung derartiger low-olf-Gebäude ist eine faszinierende Aufgabe, denn mit der Verbesserung unserer Raumluftqualität wird es gelingen, sick buildings zu „heilen“ und damit der Erkrankung des Menschen vorzubeugen.

Schlußfolgerungen

- Eine neue Philosophie der Lüftung wird eingeführt und durch eine Komfortgleichung der Raumluftqualität, basierend auf den Einheiten olf und decipol, gestützt.
- Die Komfortgleichung gestattet es, den Luftwechsel zu berechnen, der erforderlich ist, um in einem Raum mit gegebener Emissionslast G (in olf) die empfundene Luftqualität C<sub>i</sub> (in decipol) zu garantieren.
- Die eingeführte Komfortgleichung beschreibt erstmals alle Emissionsquellen und nicht nur die Bioeffluente des Menschen und Tabakrauch; sie faßt zudem die mit menschlichen Sinnen empfundene Qualität der Raum- und Außenluft in Zahlen.
- Die Gleichung fordert höhere Luftwechsel als gängige Standards oder aber eine Verringerung verborgener olf, welche die Raumluftqualität vieler Gebäude beeinträchtigen.
- Die Komfortgleichung dürfte eine rationale Grundlage zukünftiger Lüftungsnormen sein.

Literatur

ASHRAE. 1989. ASHRAE Standard 62-89, „Ventilation for acceptable indoor air quality.“ Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc.  
 Cain, W. S., Leaderer, B. P., Isseroff, R., Berglund, L. G., Huey, R. J., Lipsitt, E. D., and Perlman, D., 1983. „Ventilation requirements in buildings: control of occupancy odor and tobacco smoke odor.“ *Atmos. Environ.*, Vol. 17, No. 6.  
 DIN. 1983. DIN 1946, Teil 2. „Raumlufttechnik – Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln).“ Berlin: Deutsches Institut für Normung.  
 Fanger, P. O., 1988. „Introduction of the olf-and the decipol-unit to quantify air pollution perceived by humans indoors and outdoors.“ *Energy and Buildings*, Vol. 12, 1988, pp. 1-6.  
 Fanger, P. O., Lauridsen, J., Bluyssen, Ph., and Clausen, G., 1988. „Air pollution sources in offices and assembly halls, quantified by the olf unit.“ *Energy and Buildings*, Vol. 12, 1988, pp. 7-19.  
 NKB. 1981. Report No. 41. Indoor Climate. Stockholm, 1981.  
 Pettenkofer, M. S., 1858. „Über den Luftwechsel in Wohngebäuden.“ München, *Cotta'sche Buchhandlung*.  
 WHO. 1983. „Indoor air pollutants: exposure and health effects.“ Euro Reports and Studies 78, pp. 23-26.  
 Yaglou, C. P., Riley, E. C., and Coggins, D. I. „Ventilation Requirements.“ *ASHVE Transactions*, Vol. 42, pp. 133-162.