

## Raumluftechnik für Gebäude mit Raucherlaubnis

Klaus Fitzner

Hermann-Rietschel-Institut für Heizungs- und Klimatechnik  
Technische Universität Berlin

### Zusammenfassung

Raucher verunreinigen die Luft in Räumen erheblich. Das muß aber kein Grund für ein allgemeines Rauchverbot sein. Wenn Raumströmung und Gebäudedurchströmung richtig gehandhabt werden, lassen sich viele Belästigungen vermeiden.

Hier wird nur auf die Gebäudedurchströmung eingegangen, weil die Raumströmung in einem parallel veröffentlichten Vortrag besprochen wird [1]. Mit raumluftechnischen Anlagen läßt sich die Luftqualität am besten sicherstellen. Wie raumluftechnische Anlagen arbeiten, wird als bekannt vorausgesetzt, und deshalb wird nur auf einige Besonderheiten hingewiesen, daß z. B. möglichst keine Umluft aus anderen Räumen verwendet werden soll und daß Wärmerückgewinner mit rotierenden Speichermassen für Gebäude mit Rauchern ungeeignet sind.

Aber auch mit freier Lüftung lassen sich in manchen Fällen schon Verbesserungen erreichen. Da die Grundregeln der freien Lüftung nicht sehr bekannt sind, wird darauf etwas näher eingegangen. Das ist deshalb nötig, weil RLT-Anlagen heute immer häufiger in Kombination mit freier Lüftung gebaut werden. Dann muß der RLT-Anlagenbauer möglichst auch die Regeln der freien Belüftung beherrschen, damit das Zusammenwirken funktioniert und richtige Abgrenzungen getroffen werden können.

Der Außenluftbedarf aufgrund der Überlegungen, die sich aus Fangers Verfahren zur Bestimmung der empfundenen Luftqualität ergeben, wird beschrieben. Obwohl das Verfahren noch nicht allgemein anerkannt und sicher auch verbesserungsfähig ist, stellt es doch zur Zeit die differenzierteste Methode dar, verlässliche Werte zu erhalten. Die Werte einiger nationaler Normen werden zum Vergleich angegeben. Man erkennt, daß die Werte im allgemeinen zu niedrig liegen.

### 1. Einleitung

Raumluftechnik wird zwar am häufigsten angewendet, um thermische Lasten aus den Räumen zu schaffen, sie ist aber bekanntlich genauso gut geeignet gegen Stofflasten. Eine viel diskutierte und wenig beliebte Stofflast ist Tabakrauch<sup>1</sup>. Die Toleranz der Nichtraucher gegenüber dieser Verunreinigung wurde im Laufe der Zeit immer geringer. Das ist verständlich, denn neben der Belästigung ist das Mitrauchen gesundheitsschädlich.

In begrenztem Maße lassen sich die Probleme schon mit freier<sup>2</sup> Lüftung lösen, viel besser natürlich mit Raumluftechnischen Anlagen. Deshalb soll zusammengestellt werden, welche Möglichkeiten es gibt, die entstehenden Probleme ohne allgemeines Rauchverbot zu lösen.

---

<sup>1</sup>Im Englischen: ETS Environmental Tobacco Smoke

<sup>2</sup>Im Englischen: Natural Ventilation

Den Gesamtkomplex kann man aus der Sicht der Raumluftechnik aufteilen in den Einfluß der Raumströmung und den Einfluß der Gebäudedurchströmung. Hier soll nur der Einfluß der Gebäudedurchströmung beschrieben werden. Auf den ganz wesentlichen Einfluß der Raumströmung wird in einem anderen gleichzeitig veröffentlichten Artikel eingegangen [1].

Die Gebäudedurchströmung muß möglichst so verlaufen, daß Tabakrauch, der sich in einem Raume ansammelt, schnell entfernt wird und nicht in andere Räume des Gebäudes überströmt.

## **2. Gebäudedurchströmung bei freier und maschineller Lüftung**

### **2.1 Freie Lüftung**

Häufig wird ein Unterschied gemacht zwischen maschineller und freier Lüftung von Räumen und Gebäuden. Aus der Sicht der Gebäudedurchströmung gibt es große Unterschiede bei diesen beiden Lüftungsarten, während dieser Unterschied aus der Sicht der Raumströmung kaum existiert, denn in beiden Fällen ist ein Druckunterschied zwischen Raum und Umgebung an Öffnungen die treibende Kraft der Strömung. Der eigentliche Unterschied zwischen maschineller und freier Lüftung besteht bei Räumen in der unterschiedlichen Art der Ausführung der Luftdurchlässe. Bei der freien Lüftung findet man als Luftdurchlässe häufig Türen, Fenster oder andere nicht speziell als Luftdurchlässe konzipierte Öffnungen, die aus der Sicht der Lüftungstechnik nicht immer die beste denkbare Lösung darstellen. Außerdem hat die freie Lüftung zeitlich keinen konstanten Antrieb. An warmen, windstillen Sommertagen kann der Antrieb gegen null gehen. Das ist einer der großen Nachteile der freien Lüftung.

Die Druckdifferenz am Raum oder am Gebäude bei der freien Lüftung entsteht entweder durch Winddruck, durch Temperaturunterschiede zwischen innen und außen oder beides. Der Einfluß des Windes sorgt für Über- und Unterdruckzonen in den Luv- und Leezonen am Gebäude, und je nach Druckdifferenzen und Öffnungsquerschnitten auf dem Strömungsweg wird das Gebäude durchströmt. Die Durchströmung infolge des Windes wird im allgemeinen dadurch geregelt, daß die Fenster und Türen von den Raumnutzern entsprechend geöffnet oder geschlossen werden, so daß zu starker Wind weniger problematisch ist als zu geringer. Fenster für freie Lüftung sollten deshalb so konstruiert werden, daß sie sehr kleine, aber auch große Öffnungsquerschnitte einzustellen erlauben. Das wird durch Fenster mit verschiedenen großen, möglichst fest einstellbaren Fensterflügeln ermöglicht. Häufig wird angenommen, daß Fensterlüftung in Hochhäusern wegen des Winddruckes nicht möglich sei. Das ist ein Irrtum, wie viele Hochhäuser mit Fensterlüftung beweisen. Die Fenster müssen allerdings dicht genug schließen. Sie müssen so dicht sein, daß bei Sturm und geschlossenen Fenstern gerade der Mindestluftwechsel eintritt. Außerdem muß das Gebäude innen von Raum zu Raum und vor allem von Geschoß zu Geschoß möglichst dicht sein.

Besonders im Winter treten neben den Windkräften Auftriebskräfte auf. Bei Doppelfassaden entstehen ähnlich große Auftriebskräfte auch an Sommertagen durch die Erwärmung des Raumes zwischen den Scheiben. Die Auftriebskräfte nehmen mit der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen und mit der Höhendifferenz zwischen den Ein- und Austrittsöffnungen zu. An einem 100 m hohen Gebäude entsteht im Winter bei 30 K Temperaturunterschied an einem von unten bis oben durchgehenden Schacht eine Druckdifferenz von 120 Pa, vergleichbar mit dem Staudruck bei Windgeschwindigkeiten von 10 bis 14 m/s, also etwa Windstärke 5 bis 6. Deshalb sollten Gebäude, die für freie Fensterlüftung vorgesehen sind, möglichst keine Schächte haben, die Räume mit größeren Höhenunterschieden

verbinden. Treppenhäuser, offene Innenräume, Schächte, vor allem Aufzugsschächte müssen durch entsprechende Schleusen abgeschottet sein. Andererseits kann die Schachtwirkung erwünscht sein, damit an windstillen Sommertagen eine Gebäudedurchströmung ermöglicht wird. Die Schächte sollten aber über regulierbare Öffnungen verfügen, die nachts im Winter gut dicht sein müssen.

Die Schachtwirkung eines Gebäudes wird veranschaulicht durch die Skizze eines sogenannten Schachttypgebäudes auf Bild 2-1 [2]. Es handelt sich um ein Gebäude, dessen Geschosse nicht luftdicht voneinander getrennt sind. Die Verbindungen können durch Treppenhäuser, Technik- und Aufzugsschächte oder Atrien entstehen. Wenn in solchen Gebäuden die Temperatur innen höher als außen ist, bildet sich eine Druckdifferenz  $\Delta p$  von unten nach oben aus, die der Dichtedifferenz  $\Delta \rho$  der Luft außen und innen und der Gebäudehöhe  $h$  proportional ist:

$$\Delta p = \Delta \rho \cdot g \cdot h \quad (1)$$

$$\Delta \rho = \left| \rho \frac{\Delta T}{T} \right| \quad (2)$$

Die Höhendifferenz  $h$  ist der vertikale Abstand zwischen oberer und unterer Öffnung.  $\Delta T$  ist die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen und  $T$  die absolute Temperatur.

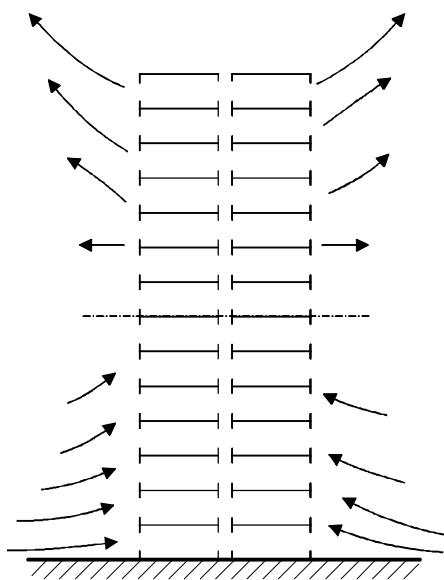


Bild 2-1 Schachttypgebäude

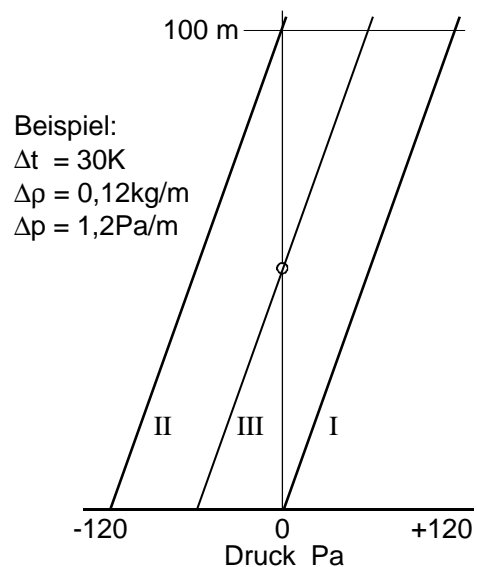


Bild 2-2: Druckverteilung am Schachttypgebäude

Die Druckdifferenz ist damit vorgegeben. Die Druckverteilung in verschiedenen Gebäudehöhen hängt davon ab, wie die Undichtigkeiten der Gebäudehülle verteilt sind. Drei Grenzfälle sind in Bild 2-2 eingezeichnet. Wenn das Gebäude vollkommen dicht ist und nur unten eine Öffnung hat, tritt die Druckverteilung (I) von Bild 2-2 ein. Unten ist kein Druckunterschied gegenüber außen, oben ist er am größten. Der umgekehrte Fall tritt ein, wenn ein dichtes Gebäude eine Öffnung oben hat (II). Weil im Mittel die Undichtigkeiten eines wirklichen Gebäudes über der Oberfläche gleichmäßig verteilt sind, tritt die Verteilung (III) am häufigsten auf. Unterdruck unten, Überdruck oben. In Gebäudemitte besteht kein Druckunterschied, eine neutrale Zone. In diesem Fall strömt Luft im unteren Teil des Gebäudes ein, durchströmt es von unten nach oben und verläßt das Gebäude oben wieder. Die schlechte-

ste Luftqualität findet man deshalb oben im Gebäude, wenn in den unteren Geschossen entsprechende Verunreinigungsquellen sind. Deshalb sollten in Hotels die Nichtraucheretagen auch nicht in den oberen Geschossen vorgesehen werden, wie man es häufig antrifft. In den mittleren Geschossen findet nur geringer Luftaustausch statt. Das richtige Gebäude für Raucher wäre der Typ II, nur oben offen, z. B. oben offener Innenhof.

Um das Überströmen der Luft aus den unteren in die oberen Geschosse zu vermeiden, können Abzugschächte aus den einzelnen Geschossen bis zum Dach vorgesehen werden, wie auf Bild 2-4 dargestellt.

Ein großer Vorteil der freien Lüftung ist die Möglichkeit, zu Zeiten angenehmer Außenklimabedingungen verhältnismäßig große Außenluftwechsel im Raum mit entsprechend guter Luftqualität ohne Energieaufwand zu erzielen. Das setzt natürlich entsprechend gute Außenluftqualität und niedrige Lärmpegel außen voraus. Die freie Lüftung ist bei Außentemperaturen zwischen 12 und 20 °C möglich.

Die freie Lüftung ist am ehesten problematisch, wenn kein Wind weht und Außen- und Innentemperaturen ungefähr gleich groß sind. Für diesen Fall sollten möglich große Fensteröffnungen zur Verfügung stehen, um ausreichenden Luftwechsel auch bei kleinsten Temperaturdifferenzen oder Windgeschwindigkeiten zu erreichen.

Bild 2-3 zeigt den vereinfachten Grundriß eines eingeschossigen Hauses mit freier Lüftung. Es sollte so ausgerichtet sein, daß die Räume mit der besseren Luftqualität zur häufigsten Windrichtung hin ausgerichtet sind, also im allgemeinen nach West oder Nordwest.

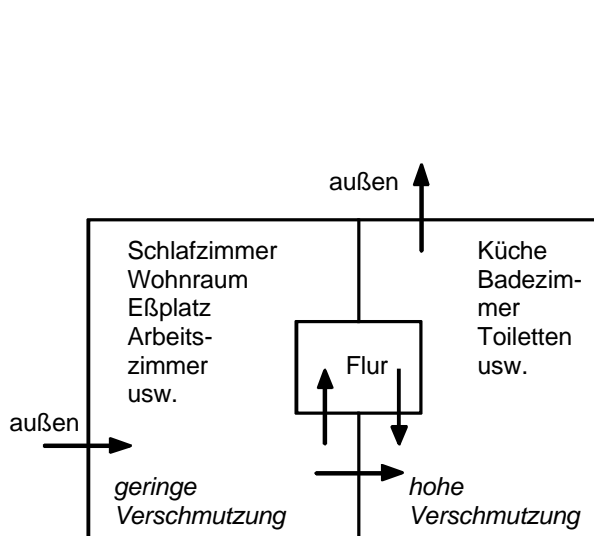


Bild 2-3: Ausrichtung eines eingeschossigen Hauses

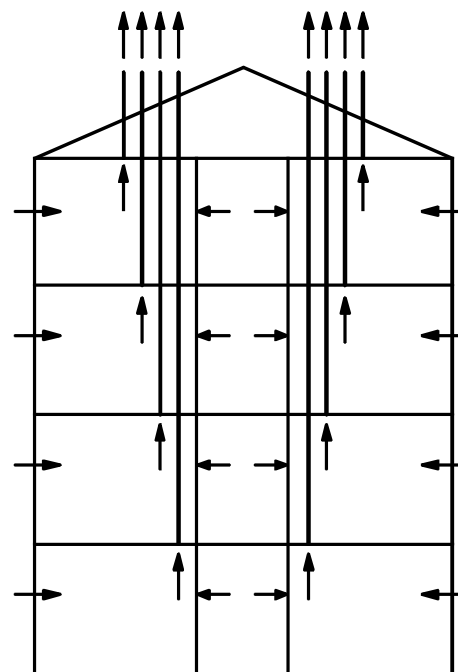


Bild 2-4: Schächte für die freie Lüftung in einem Gebäude mit mehreren Geschossen

Der thermische Auftrieb ist beim eingeschossigen Haus fast zu vernachlässigen. Das sieht anders aus bei mehrgeschossigen Häusern. Bild 2-4 zeigt, wie die Thermik bei freier Lüftung

tung durch senkrechte Schächte aus den einzelnen Etagen zur Lüftung genutzt werden kann. Wenn die Strömungswiderstände dieser Schächte klein sind gegenüber den Widerständen auf den anderen Strömungswegen durchs Gebäude, dann findet kein Überströmen zu den höheren Geschossen statt.

Das Thema freie Lüftung ist komplizierter und umfangreicher als maschinelle Lüftung. Deshalb kann es hier nicht erschöpfend behandelt werden. Es gibt aber umfangreiche Literatur zu dem Thema, u. a. [3].

## 2.2 Maschinelle Lüftung

Bei der maschinellen Lüftung, bei der eine Raumluftechnische-(RLT)-Anlage, also mindestens ein Ventilator, für den erforderlichen Druckunterschied und die Luftbewegung sorgt, lassen sich viele der Probleme der freien Lüftung einfacher lösen.

Die Möglichkeiten der Über- und Unterdruckhaltung sollen im folgenden zunächst an einzelnen Räumen in eingeschossigen Gebäuden erklärt werden. In einem Raum, aus dem ein Ventilator die Luft absaugt, entsteht ein Unterdruck gegenüber der Umgebung. Er ist vom Volumenstrom und der Undichtigkeit der Raumwände abhängig. Je größer der Volumenstrom und je dichter der Raum umso größer ist der Unterdruck. In Gebäuden mit mehreren Räumen, sollte eine Druckhierarchie aufgebaut werden, ähnlich wie bei der freien Lüftung in Bild 2-3. Bild 2-5 und Bild 2-6 zeigen die entsprechenden Skizzen für Unter- und Überdruck im Gebäude. Die Abhängigkeit von der Windrichtung besteht jetzt nicht mehr.

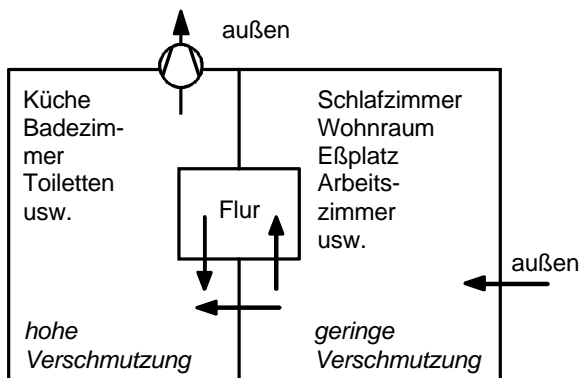


Bild 2-5: Gebäude mit Abluft

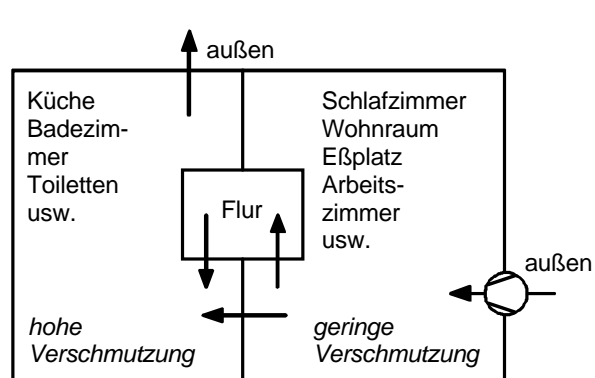


Bild 2-6: Gebäude mit Zuluft

In Bild 2-5 fördert der Ventilator nach außen und erzeugt einen Unterdruck im Gebäude, auf Bild 2-6 fördert er nach innen, und es entsteht ein Überdruck im Raum. Die Lösung von Bild 2-5 oder 2-6 findet man häufig in einfachen Gaststätten. Ein Abluftventilator hat den Vorteil, daß im Winter kein Kaltluftstrahl zu Zugerscheinungen führt, weil die Luft aus Nachbarräumen angesaugt wird. Das kann allerdings auch ein Nachteil sein, wenn die Luftqualität der Nachbarräume schlecht ist. Abluftventilatoren sind anzubringen in Räumen mit schlechter Luftqualität, Zuluftventilatoren in Räumen, in denen gute Luftqualität gewünscht wird.

Wird Gleichdruck oder nur geringer Über- oder Unterdruck angestrebt, so ist ein Zu- und ein Abluftventilator erforderlich. Je nachdem welcher Volumenstrom größer ist, stellt sich ein geringer Über- oder Unterdruck ein. Bild 2-7 verdeutlicht diese Lösung.

Werden die beiden Ventilatoren in einem Gerät kombiniert, so verfügt das Gebäude bereits über eine richtige Raumluftechnische (RLT)-Anlage, die zusätzlich im allgemeinen mit

Wärmetauschern zum Heizen, Kühlen und Entfeuchten, mit Filtern, Schalldämpfern und möglicherweise auch Befeuchtern versehen werden kann. Ein solches RLT-Gerät ist in Bild 2-8 skizziert.

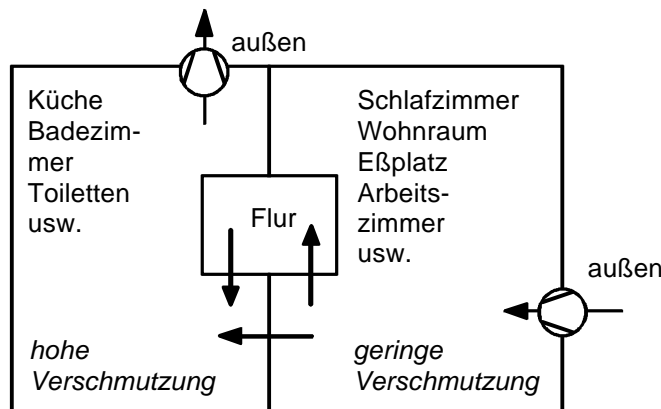


Bild 2-7: Gebäude mit Zu- und Abluftventilator

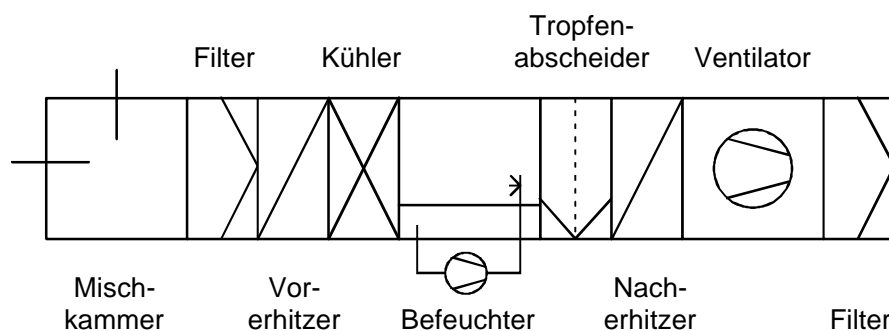


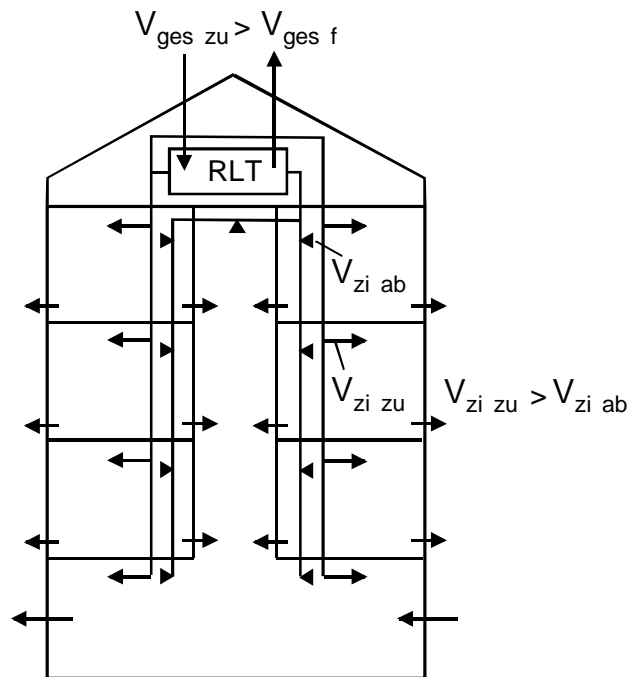
Bild 2-8: RLT-Gerät

Betrachtet man nun nicht nur einen Raum, sondern ein Gebäude mit vielen Räumen, dann muß die Volumenstrombilanz an der äußeren Hülle, aber auch von Raum zu Raum beachtet werden.

Zunächst muß es definierte Öffnungen in der Gebäudehülle und darin definierte Volumenströme geben. Sie lassen sich so einstellen, daß im gesamten Gebäude leichter Überdruck herrscht. Der sorgt dafür, daß an den unkontrollierten Undichtigkeiten Luft nach außen entweicht, so daß das Eindringen von Außenluft, die sogenannte Infiltration, nicht eintritt. Das setzt voraus, daß die Undichtigkeiten der Gebäudehülle klein sind im Verhältnis zu den definierten Öffnungen. Bei der maschinellen Lüftung können die Einflüsse von Wind oder Auftrieb auf die Gebäude- und Raumdurchströmung vernachlässigt werden, wenn die Volumenströme im Gebäude entsprechend eingestellt wurden.

Die Bedingung dafür ist, daß die Volumenstrombilanzen zwischen den einzelnen Räumen so eingestellt sind, daß ein Überströmen nur in der gewünschten Richtung eintritt. Raucheräume müßten deshalb mit geringem Unterdruck gegenüber der Umgebung betrieben werden. Das wird erreicht durch richtige Einstellung der unterschiedlichen Zu- und Abluftvolumenströme.

Bild 2-9: Gebäude mit ausgeglichener Volumenstrombilanz bei Räumen und Gebäude



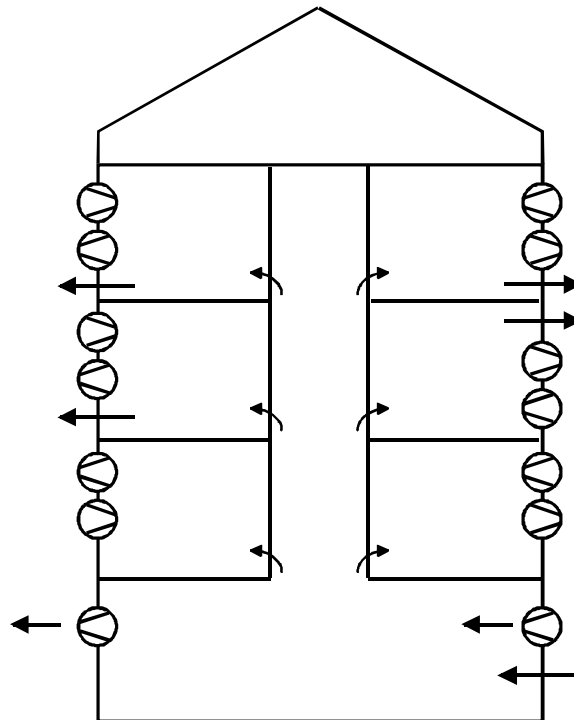
Die erforderlichen treibenden Kräfte für den Luftaustausch sind bei der maschinellen Lüftung zu jeder Zeit vorhanden, weil sie durch die Ventilatoren aufgebracht werden. Wegen dieser einfachen Zusammenhänge beim Betrieb von RLT-Anlagen konnten sich Klimatechniker lange nicht damit anfreunden, neben der RLT-Anlage freie Lüftung zuzulassen, selbst wenn die Außenklimadaten das erlaubten. Selbstverständlich ist es möglich und auch empfehlenswert, Gebäude nicht nur mit RLT-Anlagen, sondern auch mit öffnbaren Fenstern auszurüsten und die Fensterlüftung auch zu nutzen, wenn die Außen- und Innenklimadaten das zulassen. Raucherräume sind dann aber so anzuordnen, daß sie möglichst oben im Gebäude oder auf der Leeseite des Gebäudes liegen, und überhaupt sind alle Regeln zu beachten, die im Zusammenhang mit der freien Lüftung genannt wurden. Denn sobald mehrere Fenster geöffnet werden, gelten die Regeln der freien Lüftung. Der Mehrpreis für öffnbare Fenster, Lüftungsschächte und zusätzliche Luftschleusen innerhalb des Gebäudes muß bei dieser Lösung aufgebracht werden.

Für Gebäude mit freier und maschineller Lüftung sind die Übergangszeiten zwischen beiden zu klären. Es gibt einige Arten von RLT-Anlagen, die partiell und in Kombination mit freier Lüftung betrieben werden können. Speziell bei Luft-Wassersystemen besteht allerdings Kondensationsgefahr.

Die erwähnten Vorteile der maschinellen Lüftung treten, wie man aus den Erläuterungen erkennt, allerdings nur bei richtiger Anlagenkonzeption ein. Es reicht nicht aus, einzelne Räume zu be- und entlüften. So gibt es immer wieder Gebäude, bei denen die wesentlichen Grundregeln nicht beachtet werden. In Gasthäusern und einfachen Hotels findet man häufig große Gasträume im Erdgeschoß mit großen, nicht dicht schließenden Türen zu außenliegenden Terrassen. Die Restaurants haben zwar eine Zu- und Abluftanlage, aber der Restaurantbereich ist über die Lobby und das Treppenhaus und den Aufzugsschacht mit den oberen Geschossen verbunden. In den oberen Geschossen liegen die Bettenräume mit Naßzellen, die häufig nur Abluftventilatoren in der Naßzelle und manchmal auch Zuluftventilatoren im Raum haben. Hier strömt verunreinigte Luft aus dem Restaurantbereich über die Treppenhäuser und Flure in die Gästezimmer, selbst wenn im Restaurant durch Zu- und

Abluftanlagen eine ausgeglichene Volumenstrombilanz besteht. Auf Bild 2-10 ist eine solche Lösung dargestellt, die im Winter zu Problemen führt.

Bild 2-10: Gebäude mit RLT-Anlagen in einzelnen Räumen, aber überlagerter unerwünschter freier Lüftung



Die Luftströmung im Raum ist bei Anwendung von RLT-Anlagen ebenfalls unproblematischer, wenn die Luftdurchlässe für die auftretenden thermischen Lasten und die Raumdurchströmung richtig ausgelegt wurden. Darauf soll hier aber nicht eingegangen werden. Bei freier Lüftung gibt es eine obere Grenze der thermischen Last, wenn zugfrei gelüftet werden soll [4]. Sie liegt bei freier Lüftung etwa bei  $40 \text{ W/m}^2$ , während sie bei maschineller Lüftung bei  $100 \text{ W/m}^2$  und bei speziellen Systemen auch darüber liegen kann.

### 3. Raumluftechnische Anlagen

Das Prinzip eines Raumluftechnischen Gerätes wurde in Bild 2-8 schon dargestellt. Wird ein solches Gerät mit Luftleitungen für Zu- und Abluft zu den einzelnen Räumen versehen, so entsteht eine Raumluftechnische Anlage. Jeder Raum kann jetzt je nach Anlagentyp mit Zu- und Abluft versorgt werden. Je nachdem, ob der Zu- oder Abluftvolumenstrom größer oder kleiner ist, ergeben sich Über- oder Unterdrücke zu den Nachbarräumen. Im Hinblick auf die Luftverunreinigung mit Rauch, müßte aus den Raucherräumen ein geringfügig größerer Volumenstrom abgesaugt werden, so daß dort ein Unterdruck gegenüber der Umgebung entsteht.

Viele RLT-Anlagen werden so konzipiert, daß ein Teil der Abluft aus anderen Räumen der Zuluft als Umluft wieder beigefügt werden kann. Das soll vor allem bei sogenannten Nurluftanlagen, bei denen bei hohen thermischen Lasten mehr Luft gefördert werden muß, als es dem Außenluftbedarf entspricht, zur Energieeinsparung genutzt werden. Eine solche Lösung ist sehr schlecht und sollte vermieden werden, auch wenn nur ein Teil der Räume, aus denen Umluft abgesaugt wird, von Rauchern benutzt wird. Ein RLT-Gerät sollte von Anfang an so konstruiert werden, daß die Umluftnutzung ausgeschlossen ist. Selbst im Anfahrzustand oder außerhalb der eigentlichen Betriebszeiten sollte solche Umluft nicht

verwendet werden, weil die gesamte Anlage durch die Umluft durch Adsorption verschmutzt wird. Wärmerückgewinner sind hier zu bevorzugen. Allerdings nicht jede Art!

Ein Stoffaustausches, der vermieden werden sollte, tritt auf bei rotierenden Wärmetauschern zur Wärmerückgewinnung oder neuerdings für adsorptive Kühlung, bekannter unter dem Namen Dessicant Cooling. Diese Systeme sind ungeeignet für Gebäude mit Raucheräumen.

Die Reinigung der Umluft durch Aktivkohlefilter ist im Prinzip möglich, scheitert im praktischen Fall aber an der geringen Standzeit der Filter und der Desorption schon bei mittlerer Beladung.

#### 4. Arten der Luftverunreinigung und erforderlicher Luftwechsel

##### 4.1 Analytisch nachweisbare Verunreinigungen

Tabakrauch besteht aus zahlreichen chemischen Substanzen, die als Aerosol oder gasförmig abgegeben werden, auf die hier nur kurz eingegangen werden soll. Neben anorganischen Bestandteilen, wie Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Formaldehyd, Ammoniak und Stickoxiden werden zahlreiche organische Stoffe abgegeben.

Verschiedene Meßergebnisse werden in [5] wiedergegeben. Als Beispiel wird dort ein 36 m<sup>3</sup> großer Raum mit einfachem Luftwechsel angegeben, in dem 2 Raucher 5 Zigaretten je Stunde rauchen. Es wurden bei einer CO-Konzentration von 10 ppm folgende Stoffkonzentrationen von Kohlenwasserstoffen in ng/m<sup>3</sup> gefunden:

Fluoranthen	99	Perylen	11
Pyren	66	Diabenz(a,j)anthracen	6
Benzo(a)fluoren	39	Indeno(1.2.3-c,d)pyren/	
Benzo(a)anthracen (Chrysen)	100	Dibenz(a,h)anthracen	13
Benzo(b, j, k)fluoranthen	35	Benzo(g,h,i)perylene	17
Benzo(e)pyren	18	Anthanthren	3
Benzo(a)pyren	22		

Die Zusammensetzung der Verunreinigungen hängt von verschiedenen Einflüssen ab. Vor allem spielt die Verbrennungstemperatur, die beim Haupt- und Nebenstromrauchen unterschiedlich ist, eine große Rolle.

Über die entstehenden Aerosolkonzentrationen gibt es ebenfalls verschiedene Veröffentlichungen. Wichtig sind in diesem Zusammenhang die lungengängigen Aerosole (respirable suspended particles, RSP). Hier sei auf eine Arbeit hingewiesen, die in Europa ein großes Nord-Süd-Gefälle der Verunreinigungen festgestellt hat [6]. In Bild 4-1 ist die Summenhäufigkeit der ermittelten Daten für fünf europäische Städte wiedergegeben. Dabei wurden von Versuchspersonen Sammler getragen, die Luftproben über 24 Stunden sammelten. Die RSP-Werte korrespondierten mit dem Nikotingehalt der Luft. Der 95-Perzentil-Wert in Barcelona für Nikotin betrug 7,4 µg/m<sup>3</sup>, also etwa 3% des RSP-Wertes. Prozentual ähnliche Werte ergaben sich an den anderen Orten.

Es ist einigermaßen bekannt, wieviele und welche Stoffe beim Rauchen freigesetzt werden, es ist aber noch nicht allgemein verbindlich, wieviel Außenluft benötigt wird, um die Luftverunreinigung durch Rauchen für die Nichtraucher auf ein erträgliches Maß zu reduzieren,

weil eigentlich nur sensorische Verfahren der Luftqualitätsbestimmung geeignet sind, darüber Aussagen zu machen. Diese Verfahren werden aber zur Zeit gerade erst entwickelt.

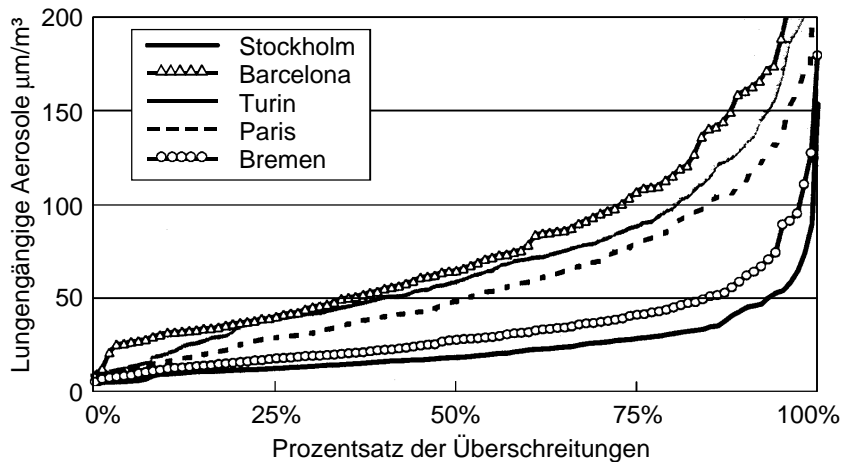


Bild 4-1: Verteilung der lungengängigen Aerosole in europäischen Städten [6]

Ein Verfahren der Luftqualitätsbestimmung, das sich in den letzten Jahren für die Bestimmung der Innenraumlufthqualität durchzusetzen beginnt und vermutlich am ehesten geeignet ist, Aussagen über den erforderlichen Luftwechsel oder über die zulässige Luftverschmutzung zu machen, ist das von Fanger vorgeschlagene Verfahren zur Bestimmung der empfundenen Luftqualität.

1 g Tabak erzeugt etwa 20 mg Aerosole, eine Zigarette wiegt etwa 0,6 g. Die Verunreinigungen vor allem durch die Aerosole haben eine weitere Wirkung, die sich vor allem in Räumen auswirken, in denen sehr viel geraucht wird, wie Bars, Restaurants oder Spielkasinos. Der Mittelwert der Aerosolkonzentration über 24 h wurde in Bars und Restaurants zwischen 100 und 360 µg/m³ ermittelt

Die Aerosole schlagen sich auf den Oberflächen der Materialien im Raum und der Abluftleitungen nieder. Das kann dazu führen, daß der Raum ohne Raucher durch Desorption und Verdunstung bis zu 50 % mehr Geruchstoffe abgibt als mit Rauchern. Darauf wird von Pejtersen et al [13] hingewiesen. Deshalb sollte Mischlüftung im Raum nicht verwendet werden, und wie später noch erläutert wird, sollte keine Umluft benutzt werden.

#### 4.2 Empfundene Luftqualität und empfohlene Außenluftvolumenströme

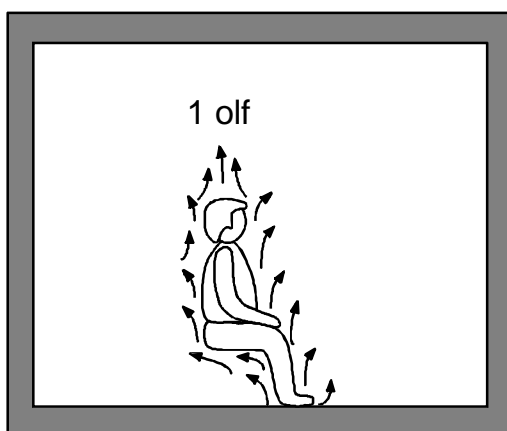
Fanger [7] schlägt vor, nicht länger zu warten, bis es ein brauchbares Meßgerät für Luftqualität gibt, sondern für die Übergangszeit die menschliche Nase zum Messen oder Bestimmen der Luftqualität, der sogenannten Empfundene Luftqualität, zu verwenden.

Ein erstes relativ einfaches Verfahren arbeitet so, daß Personen beim Betreten eines Raumes befragt werden, ob sie mit der Luftqualität zufrieden sind und ob sie sich vorstellen können, bei der angetroffenen Luftqualität einen Tag lang zu arbeiten. Die Nein-Antworten werden gezählt und auf die Gesamtzahl der Befragten bezogen. So erhält man den Prozentsatz Unzufriedener.

Weiterhin wurden die Einheiten olf und dezipol für die Stärke einer Verunreinigungsquelle und die Konzentration der Verunreinigung von Fanger festgelegt (Bild 4-2 und 4-3).

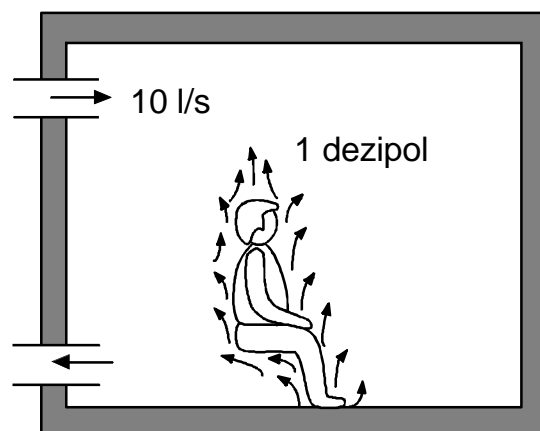
Inzwischen wurde auch ein Verfahren entwickelt, Personen mit Hilfe von Vergleichsgeruchsquellen so zu trainieren, daß sie die Luftqualität in dezipol schätzen [8] können. Zum Trainieren werden bestimmte Konzentrationen von Azeton oder anderen Stoffen benutzt. Obwohl das Verfahren aufwendig ist, liegen die Kosten der Luftqualitätsermittlung nicht höher als die Messungen anderer Raumluftparameter mit heutigen Präzisionsmeßgeräten, und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist erstaunlich gut.

Seit einiger Zeit sind Meßergebnisse nach diesem Verfahren bekannt, die Aufschluß geben über die Größenordnung und den Ort der Verunreinigungen. Bild 4-4 zeigt ein Ergebnis früherer Messungen von Fanger [9]. Die Ergebnisse werden in der Tendenz bestätigt von Messungen der Luftqualitäten, die in 10 europäischen Ländern in je 6 verschiedenen Verwaltungsgebäuden mit und ohne raumluftechnischen Anlagen bestimmt wurden.



1 olf ist die Luftverunreinigung durch eine erwachsene Person bei sitzender Beschäftigung.

Bild 4-2 Definition von olf [7]



1 dezipol ist die empfundene Luftverunreinigung, wenn 10 l/s reine Luft durch 1 olf verunreinigt werden.

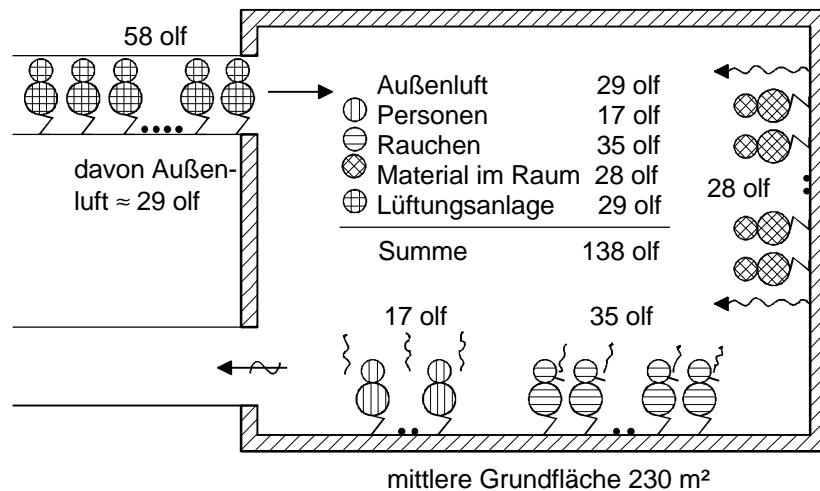
Bild 4-3 Definition von dezipol

Die Ergebnisse verdeutlichen, daß das Verfahren, mit der Nase die Luftqualität zu bestimmen, gut funktioniert und zu verwertbaren quantitativen Aussagen führt, die mit anderen heute bekannten Meßgeräten noch nicht gefunden werden können.

In der deutschen Normung DIN 1946 Blatt 2 wurden Grenzwerte, die nach diesem Verfahren zu ermitteln sind, schon aufgenommen.

Während eine Person bei geringer Aktivität definitionsgemäß 1 olf an Verunreinigung abgibt, erzeugt ein Raucher während des Rauchens 25 olf. Da er nicht ununterbrochen raucht, ergibt sich ein Mittelwert von 6 olf. Nimmt man wie Fanger an, daß ein linearer Zusammenhang zwischen Empfindung und Reiz besteht, so müßte für einen Raucher, wenn auch kurzfristige Störungen nicht eintreten sollen, 25 mal so viel Luft in den Raum eingebracht werden, oder eine Störung eines Nichtraucherers durch einen Raucher würde in einem Raum mit Quelllüftung erst in einer Entfernung von etwa 4 m vermieden, denn in dieser Entfernung ist die Konzentration einer Quelle auf ein fünfundzwanzigstel abgebaut [1].

Bild 4-4: Verunreinigungsquellen in Bürogebäuden [9]



Während der Mensch sich an viele andere Gerüche adaptiert und sie nach 10 bis 15 Minuten fast um den Faktor 4 weniger wahrnimmt, ist das bei Tabakrauch nicht der Fall [10]. Aus dieser Untersuchung lassen sich auch ungefähr ähnliche Verdünnungsanforderungen ableiten, wie sie sich mit Fangers Werten ergeben.

Der Grund, weshalb die Luftzufuhr in Raucherräume nicht um den Faktor 25 erhöht werden muß, läßt sich an Bild 4-4 erläutern. Es gibt neben den Verunreinigungen der Luft durch Raucher noch andere Quellen. Bei dem gezeigten Beispiel, das Mittelwerte darstellt, haben von den 17 Personen ungefähr 5 Personen geraucht, wenn man 6 olf je Raucher ansetzt. Sie haben nur etwa ein Viertel der Luftverschmutzung ausgemacht.

In dem Technischen Bericht CR 1752 [11] des Europäischen Komitees für Normung CEN wird deshalb auch von folgenden Verunreinigungen ausgegangen (Tabelle 4-1)

Tabelle 4-1: Luftverunreinigung durch Raucher

	Sensorische Verunreinigungslast	Kohlenmonoxid durch Rauchen
	olf/Person	l/Person
Nichtraucher	1	0
20%-Raucher	2	11*10 <sup>-3</sup>
40%-Raucher	3	21*10 <sup>-3</sup>

Bei Büros wird von einer Verunreinigung (ca. 14 m<sup>2</sup>/Person) ausgegangen von:

- durch eine Person (Nichtraucher) 0,07 olf/m<sup>2</sup>
- durch das Gebäude mit geringer Verunreinigung 0,10 olf/m<sup>2</sup>
- mit „nicht geringer Verunreinigung“ (normal) 0,20 olf/m<sup>2</sup>

Es wird außerdem zwischen drei Luftqualitätskategorien, A, B und C unterschieden. Durch die unterschiedlichen Prozentsätze der Raucher und die unterschiedlichen Kategorien der Luftqualität ergibt sich eine verhältnismäßig große Bandbreite der erforderlichen Außenluftströme. Die Werte für die erforderlichen Außenluftvolumenströme für Raucher- und Nichtraucherräume für die verschiedenen Kategorien sind in der folgenden Tabelle wiedergegeben. Für das Gebäude wurde mit geringer Verunreinigung der Räume gerechnet, Bestwer-

te, die heute selten angetroffen werden, und in der letzten Spalte auch für "nicht geringe Verunreinigung", die man heute noch überwiegend vorfindet.

Tabelle 4-2: Erforderliche Volumenströme für Büros für verschiedene Prozentsätze von Rauchern und verschiedene Luftqualitätskategorien nach CEN CR 1752 [11]:

Raucher %	Kategorie								
	A			B			C		
	l/s m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /h m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /h/P	l/s m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /h m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /h/P	l/s m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /h m <sup>2</sup>	m <sup>3</sup> /h/P
0	1,7	6	86/136	1,2	4	60/97	0,7	3	35/56
20%	2,4	9	121/171	1,7	6	86/123	1,0	4	50/71
40%	3,1	11	156/206	2,2	8	111/148	1,3	5	66/87

Für andere Raumarten werden in dem technischen Bericht entsprechende Angaben gemacht. Die Empfehlungen von Annex C, Tabelle 3.1 sollen im folgenden wiedergegeben werden, soweit sie Räume mit Raucherlaubnis betreffen. Der Prozentsatz der Raucher wird für Konferenzraum und Restaurant, wie man erkennen kann, unterschiedlich angenommen.

Tabelle 4-3:  
Empfehlungen nach CEN CR 1752 (Annex C, C.1) für Räume mit Raucherlaubnis

Gebäude/ Raum	Personen/ m <sup>2</sup>	Kategorie	Zusätzliche Volumenströme in l/(sm <sup>2</sup> )			
			Minimum Zuluft	Gebäude: geringe Verunrei- gung	Gebäude: nicht ge- ringe Verunr.	Zusätzl. für Raucher
Konferenz- Raum	0,5	A	5,0	1,0	2,0	5,0
		B	3,5	0,7	1,4	3,6
		C	2	0,4	0,8	2,0
Restaurant	0,7	A	7,0	1,0	2,0	verboten
		B	4,9	0,7	1,4	5,0
		C	2,8	0,4	0,8	2,8

Damit ergeben sich folgende Werte im einzelnen. Jeweils für Gebäude mit geringer und nicht geringer Belastung und in den beiden Einheiten l/s und m<sup>3</sup>/h. Die Verunreinigung durch den Raum wirkt sich hier geringer als bei Büros aus, weil die Flächen je Person kleiner sind.

Tabelle 4-4: Erforderliche Volumenströme für Raucher nach Tabelle 4-3:

Raumart	Kategorie			Einheit
	A	B	C	
Konferenz- raum	11,0/12,0	7,8/8,5	4,4/4,8	l/sm <sup>2</sup>
	40/43	28/31	16/17	m <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup>
Restaurant		10,6/11,3	6,0/6,4	l/sm <sup>2</sup>
		38/41	22/23	m <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup>

Im Restaurant Klasse A besteht Rauchverbot.  
Die DIN 1946 Blatt 2 empfiehlt eine Volumenstromerhöhung der Außenluft von 30 auf 50 m<sup>3</sup>/h und Person in Bürogebäuden. Man erkennt daran, daß die in DIN 1946 Blatt 2 ange-

gebenen Mindestwerte etwa der schlechtesten Kategorie, C, im Büro entsprechen, was ungefähr auch der Erfahrung entspricht. Diese Angabe kann selbst bei Kategorie C nur ausreichend sein, wenn die Luftführung im Raum und der Abstand der Personen entsprechend gewählt werden und auch nur ein kleiner Anteil der Personen im Raum raucht.

ASHRAE [12] unterscheidet zur Zeit überhaupt nicht zwischen Raucher- und Nichtraucher-räumen, nachdem der erforderliche Luftaustausch, der früher für Nichtraucher niedriger war, auf die früheren Werte für Raucher heraufgesetzt wurde auf einen Mindestwert von 35 m<sup>3</sup>/h/Person in Büros. Der Wert liegt schon für Nichtraucherräume an der unteren Grenze. Für Räume mit Raucherlaubnis ist der Wert zu niedrig.

### 4.3 Verbesserung der Luftqualität durch Filter

Es gab verschiedene Versuche, die Luftqualität durch Umluftfilter im Raum zu verbessern. Im Prinzip ist es möglich, die gasförmigen Stoffe und auch die Aerosole aus der Luft zu filtern. Für die Aerosole eignen sich besonders gut Elektrofilter. Bei experimentellen Vorführungen solcher Elektrofilter kann man deutliche Unterschiede in der Sichtweite im Raum erkennen, was qualitativ auf das Verschwinden des Rauches und die gute Abscheideleistung der Filter hinweist. Ein großer Verkaufserfolg bei den Geräten blieb bisher trotzdem aus. Das ist darauf zurückzuführen, daß die abgeschiedenen Aerosole wieder verdunsten und die Empfundene Luftqualität wieder entsprechend verschlechtern. Permanente Reinigung der Elektrofilter könnte das gegebenenfalls verhindern. Die gasförmigen Verunreinigungen können durch Adsorptionsfilter (z. B. Aktivkohlefilter) abgeschieden werden. Leider ist die Kapazität dieser Filter begrenzt, und ihre Anwendung scheitert bis heute an dem relativ großen Aufwand für diese Art der Filterung. Dünne zentimeterdicke Filterschichten ergeben zu kurze Standzeiten. Adsorptionsfilter haben auch die unerwünschte Eigenschaft, daß die adsorbierten Stoffe bei geringerer Konzentration der Luft wieder desorbiert werden.

## 5. Literatur

- /1/ Krühne, Holger: Tabakrauch und Raumströmung, in diesem VDI-Bericht
- /2/ DIN 4701 Blatt 1: Heizlastberechnung
- /3/ Richter, W.: Lüftung im Wohnungsbau, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1983
- /4/ Zeidler, O.: Untersuchungen zur Behaglichkeit bei Fensterlüftung, XXIV. Int. Kongreß für TGA, Hannover, '96
- /5/ Witthauer, Horn, Bischof: Raumlufqualität, Verlag CF.Müller, Karlsruhe 1993.
- /6/ Phillips, K. et al.: Assesment of Air Quality in Europe by Personel Monitoring..., INDOOR AIR '96, Vol. 1, S. 495-500
- /7/ Fanger, P. O.: Introduction of the olf and the decipol units to quantify air pollution perceived by humans indoors and outdoors. Energy and Building 12 (1988) S. 1-6
- /8/ Finke, U.: Aufbau einer trainierten Personengruppe für sensorische Messungen, HLH 45 (1994) Nr. 9
- /9/ Fanger, P. O.: Air Pollution Sources in Offices and Assembly Halls Quantified by the Olf-Unit, Energy and Buildings, Vol. 12 No 1 (1988)
- /10/ Thiel, S.; F. Schreiber, K. Fitzner: Adaptation der Geruchsempfindung des Menschen an Luftverunreinigungsquellen in Innenräumen, HLH Bd. 49 (1998) 1, Seite 40 -43
- /11/ CEN CR 1752: Ventilation for Buildings: Design Criteria for the Indoor Environment, Final Draft 1998
- /12/ ASHRAE-Standard 62-89: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta
- /13/ Pejtersen, J., G. Clausen, P. O. Fanger: Olf-Values of Spaces Previously exposed to Tobacco Smoking, Lab. of Heating and Air Conditioning TU of Denmark