

B. Seifert

Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene des Umweltbundesamtes, Berlin

# Richtwerte für die Innenraumluft\*

## Die Beurteilung der Innenraumluftqualität mit Hilfe der Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC-Wert)

Anders als die Luft am industriellen Arbeitsplatz, wo produktionsbedingt ein in seiner Zusammensetzung meist annähernd bekanntes Stoffgemisch vorliegt, enthält die Luft von privaten, öffentlichen und anderen nicht industriellen Räumen ein wesentlich komplexer zusammengesetztes Gemisch von Verbindungen. Dies gilt besonders für die Vielzahl der in der Innenraumluft anzutreffenden flüchtigen organischen Verbindungen (VOC; von „Volatile Organic Compounds“). Angesichts ihres unterschiedlichen chemischen Charakters und ihres unterschiedlichen Wirkungspotentials ist es jedoch sehr fraglich, ob die Einhaltung von Richtwerten für Einzelsubstanzen – selbst bei Berücksichtigung einer ähnlichen Wirkung von Stoffen gleicher chemischer Verbindungs-klasse – ausreicht, auch die unspezifischen Beschwerden abzustellen, über die von den Nutzern vieler Räume immer wieder geklagt wird.

Es hat in der Vergangenheit nicht an Versuchen gefehlt, trotz dieser Komplexität eine Bewertungsmöglichkeit für die Vielzahl der VOC, die in der Innenraumluft anzutreffen sind, zu finden. Dabei liegt es nahe, sich eines Konstruktes in Form einer Indikatorgröße zu bedienen. Im Falle der VOC kommt als Indikator für die VOC-Konzentration die Summe der Konzentrationen der Einzelverbindungen in Frage, die als TVOC-

Wert bezeichnet wird (von „Total Volatile Organic Compounds“). Es kann allerdings nicht deutlich genug betont werden, daß das „Zusammenschieben“ der wirkungsmäßig höchst komplexen Aspekte der VOC in eine einzige Indikatorgröße, wie sie ein solcher TVOC-Wert darstellt, Probleme mit sich bringt. Diese Probleme wurden in einem kürzlich erschienenen Bericht der European Collaborative Action „Indoor Air Quality and its Impact on Man“ ausführlich beleuchtet [1].

Es sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, daß es wegen der Besonderheiten, die bei einem komplexen Substanzgemisch zu berücksichtigen sind, nicht möglich ist, das für die Ableitung von Innenraumluft-Richtwerten entwickelte Basisschema [2] für die TVOC-Betrachtung anzuwenden, da dieses Schema für Einzelverbindungen konzipiert wurde. Wegen der Besonderheiten des Themas konnte auch die Kapitelabfolge und -bezeichnung nicht so beibehalten werden, wie sie sich bei den bisher in dieser Reihe veröffentlichten Artikeln über Richtwerte für die Innenraumluft [3–8] bewährt hat. Die abgeleiteten Bewertungsmaßstäbe sind wegen eben dieser Besonderheiten auch nicht im Sinne der im Basisschema verwendeten Begriffe „Richtwert I“ und „Richtwert II“ zu interpretieren.

Im vorliegenden Artikel werden die vorhandenen Grundlagen für die Ableitung und Verwendung von Bewertungsmaßstäben für TVOC-Konzentrationen diskutiert. Da dies nicht ohne das Eingehen auf die Frage geschehen kann, wie der TVOC-Meßwert aus den Ergebnissen einer Raumluftanalyse gebildet wird, werden zu Beginn einige Aspekte der VOC-Analytik erörtert.

### Analytische Erfassung von VOC in der Raumluft

Anders als im Falle der Bestimmung eines einzelnen Stoffes in der Raumluft, bei der das „Meßobjekt“ eindeutig definiert ist (also z.B. bei der Bestimmung von n-Decan, Toluol oder Formaldehyd) muß man sich bei der Analyse eines VOC-Gemisches darüber einig sein, welche Stoffe als VOC bezeichnet werden sollen. Um hier eine einheitliche Vorgehensweise zu erreichen, wurde bereits

\*Unter dieser Hauptüberschrift wurden bisher ein Basisschema [2] sowie Ausarbeitungen zu Toluol [3], Dichlormethan [4], Pentachlorphenol [5], Kohlenmonoxid [6], Stickstoffdioxid [7] und Styrol [8] veröffentlicht

Dr. B. Seifert  
Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene  
des Umweltbundesamtes, Corrensplatz 1,  
D-14195 Berlin

Tabelle 1

**Klassifizierung von organischen Verbindungen in der Innenraumluft; nach WHO [10]**

Gruppenbezeichnung <sup>a</sup>	Abkürzung	Siedepunktsbereich <sup>b</sup> [°C]	Probenahmetechnik
Very volatile organic compounds	VVOC	<0 bis 50–100	Gasmaus oder Kanister; Adsorption an Aktivkohle
Volatile organic compounds	VOC	50–100 bis 250–260	Adsorption an Tenax, graphitisierem Kohlenstoff oder Aktivkohle
Semivolatile organic compounds	SVOC	250–260 bis 380–500	Adsorption an Polyurethanschaum oder XAD-2
Organic compounds associated with particulate matter or particulate organic matter	POM	>380	Probenahme mit Filtern

<sup>a</sup>Um die Herkunft der auch in deutschen Texten gebräuchlichen Abkürzungen besser zu dokumentieren, wurden in dieser Spalte die englischen Bezeichnungen verwendet. Im Deutschen entsprechen dem die folgenden Bezeichnung: VVOC=Sehr/leicht flüchtige organische Verbindungen, VOC=Flüchtige organische Verbindungen (häufig als FOV abgekürzt), SVOC=Schwerflüchtige organische Verbindungen, POM=Partikelgebundene organische Verbindungen

<sup>b</sup>Polare Verbindungen sind am oberen Ende des Bereiches zu finden

frühzeitig von einer Arbeitsgruppe der Weltgesundheitsorganisation, die sich mit Organika in der Raumluft befaßte, eine Klassifizierung der organischen Verbindungen vorgenommen [9]. Die WHO-Klassifizierung, die auf Siedepunkten basiert, ist in Tabelle 1 dargestellt. Es sei an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, daß nach dieser Definition z.B. weder Formaldehyd noch Diethylhexylphthalat zu den VOC gehören. Diese Klassifizierung hat bislang gute Dienste geleistet, obwohl sie für die Siedepunktsbereiche „weiche“ Enden zeigt. Die Einbeziehung der Spalte „Probenahmetechnik“ in die Tabelle soll belegen, daß die Definition nicht ohne die jeweils verfügbaren analytischen Möglichkeiten gesehen werden darf.

Die WHO-Definition der VOC gibt keine Auskunft darüber, wie nach beendeter Analyse aus den Ergebnissen ein TVOC-Wert zu bilden ist. Es finden sich daher in der Literatur Angaben über TVOC-Konzentrationen, die auf die unterschiedlichste Art erhalten oder konstruiert wurden. In den meisten Fällen wird nach einer der folgenden Methoden vorgegangen (vgl. [10]):

- ▀ Ablesung des mit einem direkt anzeigenden Gerät erhaltenen Signals, das dann als TVOC-Wert bezeichnet wird.

Der Nachweis von organischen Verbindungen in der Luft mit Hilfe (handelsüblicher) kontinuierlich registrierender Geräte erfolgt im allgemeinen unter Verwendung eines Flammenionisationsdetektors (FID), eines Photoionisationsdetektors (PID) oder eines photoakustischen Sensors (PAS). Die Geräte arbeiten ohne Trennung der einzelnen Stoffe, so daß neben den VOC teilweise auch die in der Raumluft vorhandenen VVOC und SVOC erfaßt werden. Obwohl die einzelnen Verbindungen ein teilweise extrem unterschiedliches Ansprechverhalten im Detektor zeigen, wird der Detektor mit nur einer Verbindung kalibriert.

- ▀ Anreicherung der organischen Verbindungen an einem festen Sorbens mit anschließender gaschromatographischer Trennung und Errechnen der TVOC-Konzentration.

Das Errechnen der TVOC-Konzentration geschieht hauptsächlich auf zwei Arten:

- ▀ Unter Verwendung der WHO-Definition für die VOC wird die entsprechende Fläche unter dem Chromatogramm betrachtet. Mit Hilfe des Ansprechfaktors einer Referenzverbindung (häufig Toluol) wird daraus die TVOC-Konzentration errechnet.

- ▀ Unter Verwendung der WHO-Definition für die VOC wird der entsprechende Bereich im Chromatogramm betrachtet. Es werden die Konzentrationen der einzelnen in diesem Bereich identifizierten Verbindungen unter Verwendung des jeweils für sie gültigen Ansprechfaktors ermittelt. Die aufsummierten Konzentrationen stellen die TVOC-Konzentration dar.

Die angegebenen Methoden beschreiben die in der Literatur hauptsächlich aufzufindenden Vorgehensweisen. Besonders bezüglich Variante B werden teilweise aber auch Zwischenformen verwendet, so z.B. eine Kombination des Verfahrens B2 mit dem Verfahren B1 (wobei B1 für die nicht identifizierten Verbindungen eingesetzt wird) oder das Auswerten und Summieren der Konzentrationen von nur einer kleinen Zahl von VOC im Chromatogramm. Auch in solchen Fällen wird das Ergebnis als TVOC-Wert bezeichnet. Variante A sollte für verlässliche Aussagen eigentlich nur eingesetzt werden, wenn zuvor die Stabilität der Korrelation mit einer der Varianten B nachgewiesen wurde. Dies setzt in den meisten Fällen eine Konstanz des VOC-Profiles voraus. Es muß allerdings auch darauf hingewiesen werden, daß allein schon die Verwendung unterschiedlicher So-

rbentien für die Probenahme auch bei ausschließlichem Einsatz der Variante B2 Unterschiede um einen Faktor 2 im Ergebnis bedingen kann [11].

### Methodenbewertung

Eine Zusammenfassung und Bewertung von Methoden, die bislang in der wissenschaftlichen Praxis zur Ermittlung von TVOC-Konzentrationen eingesetzt wurden, wurde kürzlich von Hodgson gegeben [12]. In der Arbeit wird darüber hinaus über Vergleichsmessungen mit drei Verfahren berichtet:

- ▶ gaschromatographische Trennung mit FID-Detektion und Kalibrierung mit dem mittleren Ansprechfaktor eines  $C_9$ - $C_{11}$ -Alkan-Gemisches,
- ▶ gaschromatographische Trennung mit Massenspektrometer-Detektion und Kalibrierung mit dem mittleren Ansprechfaktor von 17 VOC,
- ▶ Einsatz eines mit Toluol kalibrierten photoakustischen IR-Monitors.

Als Ergebnis der mit verschiedenen zusammengesetzten VOC-Gemischen durchgeführten Vergleichsmessungen läßt sich festhalten, daß die Verfahren (a) und (b) für eine Reihe von Gemischen zu vergleichbaren Ergebnissen führen, obwohl sich die Meßprinzipien unterscheiden. Es wurden im Mittel etwa 75% der vorgegebenen Gesamtkonzentration angezeigt. Abweichungen sind zu erwarten, wenn in der Luft chlor- oder sauerstoffhaltige Verbindungen überwiegen, da Verfahren (a) vor allem chlorhaltige VOC zu niedrig anzeigt. Die durch unterschiedliche experimentelle Rahmenbedingungen und unterschiedliche Zusammensetzung von VOC-Gemischen bedingte Unsicherheit eines mit Verfahren (a) oder (b) erhaltenen Ergebnisses wird auf bis zu 50% geschätzt. Nach Verfahren (c) erhaltene Ergebnisse lagen meist erheblich über den vorgegebenen Konzentrationen, in den schlechtesten Fällen etwa um den Faktor 4 bis 5.

Es ist verständlich, daß bei derart unterschiedlich zustande kommenden Konzentrationsangaben die Korrelation von TVOC-Werten mit Aussagen über gesundheitliche Beschwerden kein kla-

res Bild ergibt, da solche Werte die VOC-Exposition nur pauschal widerspiegeln. Die Verwendung eines TVOC-Wertes im regulatorischen Sinne ist daher nicht unproblematisch. In den folgenden Abschnitten werden nach einer kurzen Übersicht über die Expositionssituation die über die Wirkungen von VOC-Gemischen vorliegenden Erkenntnisse und die sich daraus ableitende Bewertung dargestellt.

### Exposition

Sieht man einmal davon ab, daß manche VOC in nenneswertem Maße auch von außen durch Lüftungsvorgänge in die Innenraumluft gelangen, so gibt es eine Vielzahl von Quellen im Innenraum selbst, die das Auftreten von VOC bedingen. Am wichtigsten sind neben dem Tabakrauch sicher Haushalts- und Hobby- und Bauprodukte sowie die bei ihrer Verarbeitung eingesetzten Materialien und die verschiedenartigsten Einrichtungsgegenstände. Der Natur von flüchtigen Verbindungen entsprechend verringern sich die VOC-Emissionen von neu in einen Raum gebrachten Materialien, Anstrichstoffen oder Einrichtungsgegenständen im Laufe der Zeit.

Mit dem zu beobachtenden Ersatz leichter flüchtiger Lösemittel durch höher siedende Stoffe verlängert sich die Zeitspanne, während welcher mit Emissionen zu rechnen ist. Wie lang die jeweilige Zeitspanne im einzelnen ist, hängt ab vom Charakter der einzelnen Verbindung und den räumlichen Bedingungen, hauptsächlich von der Lüftungsintensität, aber auch von der Raumtemperatur. Aus diesem Grunde kann es für einen bestimmten Raum aus der Erfahrung zwar Hinweise dafür geben, nach welcher Zeit, z.B. nach einer Renovierung, die VOC-Konzentration auf einen vorgegebenen Wert abgesunken ist, nicht aber eine absolut sichere Prognose. Wenn keine erkennbaren besonderen Quellen im Raum oder in der näheren Umgebung einer Wohnung vorhanden sind, übersteigt die Konzentration einzelner VOC nur in seltenen Fällen Werte zwischen 10 und 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Für viele VOC liegt sie im Mittel sogar unter 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Die TVOC-Konzentration be-

wegt sich im Mittel in der Größenordnung von einigen hundert  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dies hat sich im Umwelt-Survey 1985/86 für deutsche Wohnungen gezeigt [13, 14] und ist auch durch eine Reihe von Studien im Ausland belegt (vgl. [15]).

In neuen Gebäuden, nach Renovierungs- oder intensiven Reinigungsarbeiten oder nach Einbringen neuer Einrichtungsgegenstände in einen Raum können die Konzentrationen kurzzeitig leicht um den Faktor 10 höher liegen, für einzelne VOC sind sogar noch höhere Konzentrationen möglich. Auch in Räumen, die in der unmittelbaren Nachbarschaft von Gewerbebetrieben liegen, evtl. sogar unmittelbar an die Betriebsräume angrenzen, wie häufig im Falle von Chemischreinigungen und anderen Kleinbetrieben in Mischgebieten, können für bestimmte VOC Konzentrationen im  $\text{mg}/\text{m}^3$ -Bereich angetroffen werden [16]. Die Spannweite der in der Praxis auftretenden Konzentrationen läßt sich etwa aus den von Rothweiler et al. [11] veröffentlichten Ergebnissen ermes- sen: Bei einstündiger Probenahme in drei neuen Gebäuden wurden unter vergleichbaren Bedingungen vor dem Bezug TVOC-Konzentrationen zwischen 10 und 20  $\text{mg}/\text{m}^3$  gefunden. In einem vierten Gebäude betrug die TVOC-Konzentration acht Wochen nach Einzug der Bewohner etwa 1,5  $\text{mg}/\text{m}^3$ . In zwei weiteren Objekten ergaben Messungen vor einer Renovierung und eine Woche danach TVOC-Konzentrationen von etwa 0,7  $\text{mg}/\text{m}^3$  bzw. rund 5–7  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Die Außenluftkonzentrationen betragen im Mittel 0,17  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Seifert et al. [17] verfolgten die VOC-Konzentrationen in zehn Häusern in Berlin über ein Jahr hinweg. Während dieser Zeit wurden in einem Raum auch die Wände mit Dispersionsfarben gestrichen. Die TVOC-Konzentration, die als Mittelwert über zwei Wochen bestimmt wurde, stieg dabei um einen Faktor von knapp 5, wobei der Hauptbeitrag von  $C_9$ - bis  $C_{11}$ -Aliphaten geleistet wurde. Bei der Neuverlegung von Teppichboden in einem klimatisierten kanadischen Bürogebäude [18] fiel die TVOC-Konzentration bei einer Luftwechselzahl von 1,5  $\text{h}^{-1}$  innerhalb von etwa zehn Tagen von rund 10  $\text{mg}/\text{m}^3$  auf rund 0,2  $\text{mg}/\text{m}^3$  ab.

## Wirkungen von VOC-Gemischen

Die möglichen Auswirkungen einzelner VOC auf die Gesundheit und das Wohlbefinden des Menschen umfassen ein weites Spektrum, das von sensorischen Wahrnehmungen bereits bei niedrigen Konzentrationen bis hin zu meist erst bei höheren Konzentrationen auftretenden toxischen Langzeiteffekten reicht. Von besonderer Bedeutung ist die Tatsache, daß es sich bei einem Teil der für niedrigere Konzentrationen angegebenen Effekte um Sinneswahrnehmungen oder andere Wirkungen handelt, die sich der Überprüfung im Tierversuch weitgehend oder gar vollständig entziehen.

### Kontrollierte Wirkungsstudien

Anfang der 80er Jahre wurden von Mølhav et al. [19] Probanden in großen Versuchskammern unter kontrollierten Bedingungen gegenüber verschiedenen Gesamtkonzentrationen des in Tabelle 2 verzeichneten Gemisches von 22 VOC exponiert. Die Zusammensetzung des VOC-Gemisches war auf der Grundlage von Untersuchungen der Emissionen aus Baumaterialien und der Luft in dänischen Häusern Ende der 70er Jahre gewählt worden. Einschränkend wurde festgelegt, daß das Gemisch aus ethischen Gründen keine kanzerogenen Verbindungen enthalten durfte. Das in Tabelle 2 aufgeführte Gemisch wurde bei den Versuchen in einer Gesamtkonzentration von 25 und 5 mg/m<sup>3</sup> eingesetzt. Zusätzlich wurde eine Versuchsserie mit 0 mg/m<sup>3</sup> durchgeführt. Bei allen Versuchen wurden die Probanden über 2,75 Stunden hinweg exponiert, Temperatur und relative Feuchte wurden auf 23°C bzw. 23% eingestellt. Die Untersuchung war als Doppelblindstudie angelegt. Untersucht wurden 62 Personen (davon etwa zwei Drittel Frauen), die über Beschwerden beim Aufenthalt in Innenräumen geklagt hatten, ohne daß erkennbare medizinische Gründe hierfür vorgelegen hätten (z.B. keine Bronchitis, kein Asthma). Die Probanden hatten ein mittleres Alter von 38 Jahren und waren somatisch und psychiatrisch unauffällig. Sie hatten während der Exposition Fragen über subjektive Wahrnehmungen

zu beantworten und wurden einem Leistungs- und Konzentrationstest unterzogen.

Die Versuche von Mølhav et al. [19] wurden in den USA wiederholt, um die Befunde zu überprüfen [20–22]. Dabei wurde mit dem gleichen VOC-Gemisch gearbeitet – allerdings nur bei einer TVOC-Konzentration von 25 mg/m<sup>3</sup> –, und es wurden nur männliche Probanden ( $n=16$ ; 18–50 Jahre) ohne Neigung zu Beschwerden untersucht. In verschiedenen Versuchsreihen wurden mentale Leistungstests durchgeführt. Ferner wurde das Auftreten verschiedener Symptome abgefragt, wie sie u.a. typisch für das „sick building“-Syndrom (SBS) sind (vgl. [23]).

Gegenüber den Kontrollversuchen änderte sich unter Expositionsbedingungen die Testleistung nicht, die Probanden klagten aber vor allem über stärkere Ermüdung, Kopfschmerzen so-

wie Augen- und Rachenreizungen nahmen gegen Ende der Expositionsperiode zu. Etwa 75% der Probanden gaben ein Bedürfnis nach stärkerer Lüftung an. Bei dem Studienteil, der sich mit der Erfassung von Reizerscheinungen befaßte [22], wurde auch die Zahl der Neutrophilen in der Nasallavageflüssigkeit untersucht. Für diejenigen der neun Probanden (von 14 insgesamt), die vor der VOC-Exposition keine offensichtlich anderweitig bedingten Entzündungszeichen aufwiesen, d.h. vor Versuchsbeginn eine niedrige Zahl von Neutrophilen in der Nasallavageflüssigkeit hatten, stieg die Neutrophilenzahl unmittelbar nach der Exposition etwa auf das Fünffache, nach 18 h etwa auf das 20fache an.

Die Unterschiede in den Reaktionen von 21 Gesunden und 14 Personen, die unter SBS-Symptomen litten, wurden mit dem gleichen VOC-Gemisch bei einer Gesamtkonzentration von 25 mg/m<sup>3</sup>

Tabelle 2  
Zusammensetzung des von Mølhav et al. [19] verwendeten VOC-Gemisches

Nr.	Verbindung	Konzentrationsanteil im Gemisch
1	p-Xylol	10
2	n-Butylacetat	10
3	n-Hexan	1
4	n-Nonan	1
5	n-Decan	1
6	1-Decen	1
7	Ethylbenzol	1
8	alpha-Pinen	1
9	1,1-Dichlorethan	1
10	Ethoxyethylacetat	1
11	n-Hexanal	1
12	n-Butanol	1
13	n-Undecan	0,1
14	n-Propylbenzol	0,1
15	1,2,5-Trimethylbenzol	0,1
16	Cyclohexan	0,1
17	2-Butanon	0,1
18	3-Methyl-2-butanon	0,1
19	5-Methyl-2-pentanon	0,1
20	n-Pentanal	0,1
21	Isopropanol	0,1
22	1-Octen	0,01

untersucht [24]. Beide Gruppen gaben im Vergleich zu der Situation bei reiner Luft Geruchswahrnehmungen, den Eindruck schlechter Luftqualität und verstärkt Schleimhautreizungen an Auge, Rachen und Nase an. Bei den an SBS-Symptomen leidenden Probanden waren die Effekte stärker ausgeprägt. In dieser Gruppe führte die Exposition auch zu einer Reduzierung der Lungenfunktionswerte. Beide Gruppen wiesen eine Erhöhung der polymorphkernigen Leukozyten in der Tränenflüssigkeit, nicht aber im Nasensekret, auf. In weiteren Versuchen – ebenfalls mit dem Gemisch der 22 VOC – untersuchten Kjærgaard et al. [25] die Reaktion von 18 Patienten mit Heuschnupfen und 18 Kontrollen bei 20 mg/m<sup>3</sup> und einer Expositionsdauer von fünf Stunden. Die Heuschnupfen-Probanden berichteten über stärkere Effekte (mehr Reizwirkungen, mehr Kopfschmerzen, usw.). Objektiv konnten durch Messungen u.a. verstärkte Effekte am Auge festgestellt werden.

Mølhav et al. [26] verwendeten das gleiche VOC-Gemisch mit dem Ziel, eine Beziehung zwischen Expositionskonzentration und beobachteter Wirkung zu ermitteln. Untersucht wurden 25 gesunde Probanden, die sich etwa gleichmäßig auf vier Altersgruppen zwischen 16 und 65 Jahren verteilten, mit je etwa der Hälfte Männer und Frauen bzw. Raucher und Nichtraucher. Die experimentell eingestellten Konzentrationen betragen 0, 1, 3, 8 und 25 mg/m<sup>3</sup>, exponiert wurde über 50 Minuten.

Geruchswahrnehmungen traten – offensichtlich als Folge von Adsorptions- und Desorptionseffekten an den Kammerwänden – auch bei den Nullluftexperimenten auf, jedoch wurde ab einer Konzentration von 3 mg/m<sup>3</sup> eine deutliche Zunahme beobachtet. Dies erklärt sich wahrscheinlich durch die unterhalb von 3 mg/m<sup>3</sup> liegenden Geruchsschwellen von p-Xylol und n-Butylacetat, die zusammen rund zwei Drittel des Gemisches ausmachten. Ab 8 mg/m<sup>3</sup> wurde der Geruch als unangenehm empfunden und verstärkte Lüftung verlangt. Schleimhautreizungen, vor allem an Auge und Nase, traten ebenfalls ab 8 mg/m<sup>3</sup> signifikant häufiger gegenüber dem Nullluftexperiment auf.

### Bei Felduntersuchungen beobachtete Wirkungen

Anders als dies beispielsweise für NO<sub>2</sub> der Fall ist, wurden bislang kaum epidemiologische Studien *allein* zur Erfassung der Wirkung von VOC durchgeführt. Der Anlaß für die meisten Studien, bei denen dann *auch* VOC gemessen wurden, war vielmehr der Wunsch nach Aufklärung von SBS-Beschwerden, deren Genese lange Zeit zu einem erheblichen Maße auf die Gegenwart von chemischen Innenraumluftverunreinigungen, vor allem von VOC, zurückgeführt wurde. Leider ist aber aus den Ergebnissen der inzwischen in recht großer Zahl vorliegenden SBS-Studien, bei denen neben Wirkungsparametern oder bestimmten Beschwerdebildern auch VOC erfaßt wurden, derzeit keine klare Aussage über die tatsächliche Wirkung von VOC-Gemischen, charakterisiert durch die TVOC-Konzentration, ableitbar.

Während in einigen Studien positive Zusammenhänge zwischen Symptomen und TVOC-Konzentrationen festgestellt wurden [27–30], konnten solche Zusammenhänge in anderen Studien [31–33] nicht gefunden werden. In einigen Untersuchungen wurde sogar eine Verringerung der Symptommhäufigkeit mit zunehmender TVOC-Konzentration beobachtet [34–37].

Wie bereits oben angedeutet, ist es unklar, ob (und ggf. in welchem Umfang) die Widersprüchlichkeit dieser Ergebnisse mit der unterschiedlichen Art der Ermittlung der TVOC-Konzentration in den verschiedenen Studien bzw. mit der jeweiligen Zusammensetzung des VOC-Gemisches zu erklären ist. Es gibt jedoch gute Gründe für die Annahme, daß für die überwiegende Zahl der in der Praxis vorkommenden VOC-Gemische die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Beschwerden mit steigender TVOC-Konzentration zunimmt. Ebenso dürfte anzunehmen sein, daß die Effekte von Substanzgemischen unterschiedlicher Zusammensetzung selbst bei gleicher TVOC-Konzentration unterschiedlich stark sind. Allerdings hat sich beim Vergleich verschiedener größerer Studien über das Vorkommen von VOC in der Innenraumluft gezeigt, daß sogar zwi-

schen verschiedenen Ländern im Mittel eine recht große Ähnlichkeit im VOC-Grundmuster besteht [9].

### Bewertung

Bei der Entwicklung des Basisschemas zur Ableitung von Richtwerten für die Innenraumluft [2] war ausdrücklich betont worden, daß das Schema primär für die gesundheitliche Bewertung von Einzelsubstanzen entwickelt wurde. In der Tat basieren die aus der Toxikologie verfügbaren Erkenntnisse in den meisten Fällen auf Einzelstoffbetrachtungen, da nur selten Wissen über Wechsel- und Kombinationswirkungen von Substanzen verfügbar ist. Wenn überhaupt konkrete Kenntnisse hierzu vorliegen, dann beschränken sie sich auf Gemische von zwei oder drei Stoffen. Üblicherweise kann bei Stoffen einer gleichen Verbindungsklasse eine Ähnlichkeit der Wirkung angenommen und deshalb in der Regel von einer additiven Wirkung ausgegangen werden. Bei diesem Ansatz soll dann in Analogie zu dem für den Arbeitsplatzbereich in der TRGS 403 [38] angegebenen Verfahren die Summe der Quotienten aus aktueller Konzentration des Einzelstoffes und dem für ihn gültigen Richtwert den Wert 1 nicht überschreiten [2]. In der TRGS 403 wird dazu ausgeführt: „Grenzwerte für Stoffgemische in der Luft am Arbeitsplatz lassen sich derzeit in der Regel wissenschaftlich nicht begründen“. Da aber für die zu treffenden sicherheitstechnischen Maßnahmen eine Orientierungshilfe benötigt werde, „bedarf es eines pragmatischen und allgemein anwendbaren Bewertungskonzeptes“.

Seit langem wird immer wieder die Untersuchung von synergistischen Effekten gefordert, jedoch ist bekannt, daß hier wegen der Vielzahl der möglichen Stoffkombinationen grundsätzliche Probleme bestehen, so daß über das Zusammenwirken von mehreren (geschweige denn von einer größeren Zahl von) Luftverunreinigungen nur sehr geringe Kenntnisse vorliegen. Die im Kapitel „Exposition“ dargestellten Untersuchungen geben aber Hinweise darauf, daß besonders im Innenraumbereich die gleichzeitige Gegenwart verschiede-

**Tabelle 3**  
**Anteile einzelner chemischer Klassen an einer TVOC-Konzentration von 0,3 mg/m<sup>3</sup>, nach Seifert [43] (Erläuterungen s. Text)**

Verbindungsklasse	Anteilige Konzentration (mg/m <sup>3</sup> )
Alkane	0,1
Aromaten	0,05
Terpene	0,03
Chlorkohlenwasserstoffe	0,03
Ester	0,02
Aldehyde und Ketone (außer Formaldehyd)	0,02
Andere	0,05

ner Luftverunreinigungen eine der Ursachen für das Auftreten von akuten Beschwerden sein kann. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, daß neuere Forschungsergebnisse [39, 40] darauf hindeuten, daß unter bestimmten Bedingungen chemische Reaktionen in der Innenraumluft ablaufen können, die zur Bildung bislang routinemäßig nur schwer oder gar nicht erfaßbarer, möglicherweise wirkungsmäßig aber relevanter Komponenten führen können. Wenn auch eine klare Dosis-Wirkungsbeziehung zwischen der Gesamtkonzentration an VOC und gesundheitlichen Beschwerden bislang nicht nachgewiesen werden konnte, so ist doch anzunehmen, daß mit steigender TVOC-Konzentration die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten solcher Beschwerden zunimmt [1].

### Bestehende Regelungen und Empfehlungen

Für den Bereich des Arbeitsplatzes hat die DFG-Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe („MAK-Kommission“) keine Werte für Gemische definiert, da der MAK-Wert „in der Regel für die Exposition des reinen Stoffes“ gilt und „nicht ohne weiteres für einen Bestandteil eines Gemisches in der Luft am Arbeitsplatz ... an-

wendbar (ist) ... MAK-Werte für Gemische mehrerer Arbeitsstoffe können wegen der in der Regel sehr unterschiedlichen Wirkungskriterien der einzelnen Komponenten mit einfachen Rechenansätzen nicht befriedigend ermittelt werden; sie können z.Z. nur durch spezielle, d.h. auf die betreffenden Stoffe abgestellte Erwägungen oder Untersuchungen abgeschätzt bzw. angesetzt werden.“ [41]. Trotz dieser Feststellung wurde – um eine Bewertung von Arbeitsplätzen zu ermöglichen, an denen Personen komplexen Stoffgemischen ausgesetzt sind – in der TRGS 403 [38] ein Verfahren zur Bewertung von Stoffgemischen angegeben, das bereits im vorletzten Absatz kurz angesprochen wurde. In der TRGS 901 [42] findet sich u.a. ein speziell auf die Bewertung von Kohlenwasserstoffdämpfen in der Luft am Arbeitsplatz ausgerichtetes Verfahren, bei dem – anders als dies nach TRGS 403 geschieht – auch Einzelstoffe ohne MAK-Wert berücksichtigt werden.

Speziell für die Innenraumluft wurde von Seifert [43] ein TVOC-Wert von 300 µg/m<sup>3</sup> (entsprechend 0,3 mg/m<sup>3</sup>) vorgeschlagen, *der nicht mit toxikologischen Erkenntnissen begründet wurde*. Dieser Wert, der in der Praxis in oft unkritischer Weise für Bewertungszwecke herangezogen wird, wurde abgeleitet aus

den im Umwelt-Survey 1985/86 für VOC in etwa 500 westdeutschen Wohnräumen gefundenen durchschnittlichen Konzentrationen [13, 14] und wurde zusammengesetzt aus den Beiträgen verschiedener Untergruppen von VOC (vgl. Tabelle 3). Als Randbedingung wurde angegeben, daß keine einzelne Verbindung in einer Klasse, also z.B. Toluol bei den Aromaten, Limonen bei den Terpenen oder Butylacetat bei den Estern, mehr als die Hälfte der ihrer jeweiligen Klasse zugewiesenen Konzentration bzw. 10% der TVOC-Konzentration überschreiten sollte. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß sich das VOC-Spektrum in der Innenraumluft zwischenzeitlich durch das Auftreten früher nicht beobachteter Verbindungen (z.B. Glykolether und Aldehyde) und die deutliche Verringerung der Konzentrationen einiger Verbindungen (z.B. Halogenkohlenwasserstoffe) so verändert hat, daß die in Tabelle 3 angegebenen anteiligen Konzentrationen bei der heutigen Situation nicht mehr herangezogen werden sollten. Der von Seifert [43] angegebene TVOC-Wert wurde weniger zur direkten gesundheitlichen Bewertung einer angetroffenen Situation, sondern vielmehr als Zielgröße konzipiert. Seine wesentliche Bedeutung liegt darin, daß durch ihn die durchschnittliche

**Tabelle 4**  
**Vorläufige „Konzentrations-Wirkungs-Beziehung“ für Beeinträchtigungen durch Exposition gegenüber VOC; nach [44]**

TVOC-Konzentration (mg/m <sup>3</sup> )	Wirkung
<0,20	• Keine Reizung oder Beeinträchtigung des Wohlbefindens
0,20–3,0	• Reizung oder Beeinträchtigung des Wohlbefindens möglich, wenn Wechselwirkung mit anderen Expositionsparametern gegeben ist
3,0–25	• Exposition führt zu einer Wirkung, Kopfschmerzen möglich, wenn Wechselwirkung mit anderen Expositionsparametern gegeben ist
>25	• Kopfschmerzen. Weitere neurotoxische Wirkungen außer Kopfschmerzen möglich

(und offensichtlich erreichbare) TVOC-Konzentration definiert wird, deren Überschreitung einen Hinweis auf das Vorhandensein zusätzlicher Quellen im Innenraum gibt. Er eignet sich damit als Orientierungsmarke für andere Regelungsbereiche, so z.B. für die Begrenzung von Emissionen aus Bauprodukten.

Aus der Einschätzung der vorhandenen Informationen, die vor allem aus den Ergebnissen der bereits im Abschnitt „Kontrollierte Wirkungsstudien“ erwähnten Arbeiten stammen, wurde von Mølhav [44] eine „Konzentrations-Wirkungs-Beziehung“ für Beeinträchtigungen durch VOC in der Innenraumluft aufgestellt, die in Tabelle 4 wiedergegeben ist. Sie beruht hauptsächlich auf der Betrachtung von Reizwirkungen und Geruchswahrnehmungen.

### Bewertung von TVOC-Konzentrationen

Aus kontrollierten Wirkungsstudien mit VOC-Gemischen definierter Zusammensetzung und Gesamtkonzentrationen im Bereich von mehreren Milligramm pro Kubikmeter und darüber kann geschlossen werden, daß die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Reizwirkungen und Geruchswahrnehmungen mit steigender Gesamtkonzentration des Gemisches, ausgedrückt als TVOC-Konzentration, zunimmt. Wegen der Variabilität der Zusammensetzung des VOC-Spektrums und der daraus resultierenden Vielfalt möglicher Wirkungsendpunkte lassen sich keine abgesicherten Dosis-Wirkungs-Beziehungen angeben. TVOC-Konzentrationen eignen sich daher nicht als alleiniges Kriterium für eine gesundheitliche Bewertung, sondern sind vielmehr als Indikator für die Gesamtsituation und die eventuelle Notwendigkeit gezielter Einzelstoffbetrachtungen anzusehen. Zur Beurteilung der Innenraumluftqualität hinsichtlich der vorhandenen VOC, vor allem im Hinblick auf die Vermeidung von Reiz- und Geruchswahrnehmungen, sollen die folgenden Aspekte zugrunde gelegt werden.

Angesichts der in Laborexperimenten [26] bei bestimmten VOC-Gemischen ab  $8 \text{ mg/m}^3$  beobachteten Reizun-

gen an Auge und Nase (vgl. Abschnitt „Kontrollierte Wirkungsstudien“) sowie der ab  $25 \text{ mg/m}^3$  zusätzlich möglichen Entzündungsreaktionen und Einschränkungen der Lungenfunktion ist ein Aufenthalt in Räumen mit TVOC-Konzentrationen zwischen  $10$  und  $25 \text{ mg/m}^3$  allenfalls vorübergehend täglich zumutbar. Derartige Konzentrationen können im Falle von Renovierungen vorkommen. Wenn sich eine Nutzung der Räume in dieser Zeit nicht vermeiden läßt, muß durch intensive Lüftung dafür gesorgt werden, daß die Konzentrationen während und nach Abschluß der Arbeiten herabgesetzt werden. Erstrebenswert ist es aber in jedem Fall, den Zeitpunkt der Renovierung so zu wählen, daß eine genügend lange Zeitspanne zwischen den Arbeiten und dem Wiederbezug verstreichen kann. Wegen der unterschiedlichen Randbedingungen in den verschiedenen Räumen läßt sich für die hierfür notwendige Zeit kein verbindlicher Wert angeben, jedoch kann nach vorliegenden Erfahrungen damit gerechnet werden, daß z.B. bei Malerarbeiten, ausreichende Lüftung vorausgesetzt, eine Zeitspanne von ein bis zwei Wochen ausreicht.

In Räumen, die für einen längerfristigen Aufenthalt bestimmt sind, sollte auf Dauer ein TVOC-Wert im Bereich von  $1$  bis  $3 \text{ mg/m}^3$  nicht überschritten werden. Erfahrungsgemäß ist davon auszugehen, daß derartige TVOC-Konzentrationen durch eine beschränkte Zahl von chemischen Stoffen oder Stoffklassen bedingt sind. Daher ist das Überschreiten dieses Bereiches als Hinweis dafür aufzufassen, daß eine Einzelstoffbetrachtung durchgeführt werden sollte. Ziel sollte es sein, in Innenräumen im langzeitigen Mittel eine TVOC-Konzentration von  $0,2$  bis  $0,3 \text{ mg/m}^3$  zu erreichen bzw. nach Möglichkeit sogar zu unterschreiten (dabei ist auch zu bedenken, daß die beim Lüften einströmende Außenluft eine mehr oder weniger hohe Grundbelastung aufweist, die durch Entfernen von Quellen im Innenraum nicht beeinflussbar ist). Angesichts einer für VOC-Gemische nicht stringent belegbaren Beziehung zwischen Konzentration und Wirkung (vgl. Tabelle 4) kann dieser Bereich als hygienischer Vorsorgebereich

verstanden werden. Das unter Beachtung der Verhältnismäßigkeit zu fordernde Minimierungsgebot für kanzerogene Stoffe bleibt davon jedoch unberührt.

Die Angabe von Konzentrationsbereichen trägt nicht nur den begrenzten Erkenntnissen über die Wirkungen von VOC-Gemischen Rechnung, sondern berücksichtigt auch analytisch bedingte Unsicherheiten und die Schwankungen, die durch die Probenahme bedingt sind<sup>1</sup>. Es ist daher keinesfalls sinnvoll, die Ergebnisse der Ermittlung von TVOC-Konzentrationen starr mit den oben angegebenen TVOC-Wertebereichen zu vergleichen, insbesondere den Zielwert streng als Sanierungsleitwert zu verwenden, da die Höhe der gemessenen TVOC-Konzentration nur eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenhanges zwischen VOC-Exposition und geäußerten Beschwerden ermöglicht. Je höher die TVOC-Konzentration, desto höher ist diese Wahrscheinlichkeit und desto wichtiger ist es, die Art und Konzentration von Einzelverbindungen zu ermitteln, um so ein aus Einzelverbindungen möglicherweise resultierendes Gefährdungspotential abschätzen zu können. Kenntnisse über Einzelverbindungen und eventuell sogar über Substanzprofile sind auch wichtig, um Quellen identifizieren und gegebenenfalls beseitigen zu können.

Um die Anbindung der Werte an dieselbe analytische Vorgehensweise zu erreichen und damit eine möglichst weitgehende Vereinheitlichung bei der Ermittlung von TVOC-Konzentrationen zu erzielen, sollte nach der im Anhang angegebenen Methode verfahren werden.

---

### Danksagung

Ich danke den Mitgliedern der ad-hoc-Arbeitsgruppe IRK/AOLG für konstruktive Hinweise und Diskussionen.

---

<sup>1</sup>Informationen über eine geeignete Probenahmestrategie bei Innenraumluftuntersuchungen sind den verschiedenen Blättern der VDI-Richtlinienreihe 4300 zu entnehmen [45]

## Literatur

- European Collaborative Action (ECA) (1997) „**Indoor Air Quality and its Impact on Man: Total Volatile Organic Compounds (TVOC) in Indoor Air Quality Investigations.** Report No. 19 (EUR 17675 EN), EC Joint Research Centre, Ispra
- Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumluft-hygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der AGLMB (1996) **Richtwerte für die Innenraumluft: Basisschema.** Bundesgesundhbl 39: 422–426
- Sagunski H (1996) **Richtwerte für die Innenraumluft: Toluol.** Bundesgesundhbl 39: 416–421
- Witten J, Sagunski H, Wildeboer B (1997) **Richtwerte für die Innenraumluft: Dichlormethan.** Bundesgesundhbl 40: 278–284
- Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumluft-hygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der AGLMB (1997) **Richtwerte für die Innenraumluft: Pentachlorphenol.** Bundesgesundhbl 40: 234–236
- Englert N (1997) **Richtwerte für die Innenraumluft: Kohlenmonoxid.** Bundesgesundhbl 40: 425–428
- Englert N (1998) **Richtwerte für die Innenraumluft: Stickstoffdioxid.** Bundesgesundhbl 41: 9–12
- Sagunski H (1998) **Richtwerte für die Innenraumluft: Styrol.** Bundesgesundhbl 41: 392–398
- Weltgesundheitsorganisation (WHO) (1998) **Indoor air quality: organic pollutants.** EURO Reports and Studies No. 111, Copenhagen
- Mølhav L, Nielsen GD (1992) **Interpretation and limitations of the concept, Total Volatile Organic Compounds (TVOC) as an indicator of human responses to exposures of volatile organic compounds (VOC) in indoor air.** Indoor Air 2: 65–77
- Rothweiler H, Wäger P, Schlatter C (1990) **Volatile organic compounds and very volatile organic compounds in new and freshly renovated buildings.** Proc. INDOOR AIR '90, Toronto, 29 July–3 Aug. 1990, vol 2, pp 747–752
- Hodgson AT (1995) **A review and a limited comparison of methods for measuring total volatile organic compounds in indoor air.** Indoor Air 5: 247–257
- Krause C, Chutsch M, Henke M, Huber M, Kliem C, Leiske M, Mailahn W, Schulz C, Schwarz E, Seifert B, Ullrich D (1991) **Umwelt-Survey. Band IIIc. Wohn-Innenraum: Raumluft.** WaBoLu-Hefte 4/1991, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, Berlin
- Bundesgesundheitsamt (1993) **Bewertung der Luftqualität in Innenräumen.** Bundesgesundhbl 36: 117–118
- Maroni M, Seifert B, Lindvall T (eds) (1995) **Indoor Air Quality. A comprehensive reference book.** Elsevier, Amsterdam Lausanne New York, 1049 pp, ISBN 0-444-81642-9
- Sagunski H (1996) **Komplexe Umweltwirkungen. Teil 7: Kleingewerbe und industrielle Anlagen.** In: Beyer A, Eis D (Hrsg) **Praktische Umweltmedizin. Sektion 09: Umweltbelastungen und ihre Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit.** Springer Loseblatt Systeme, Springer, Berlin, 1996
- Seifert B, Mailahn W, Schulz C, Ullrich D (1989) **Seasonal variation of concentrations of volatile organic compounds in selected German homes.** Environ Internat 15: 397–408
- Kerr G (1992) **Chemical emissions during recarpeting of a Canadian office building.** Proc. 5th Intern. J. Cartier Conf., Montreal, 7–9 Oct. 1992, pp 147–156
- Mølhav L, Bach B, Pedersen OF (1986) **Human reactions to low concentrations of volatile organic compounds.** Environ Internat 12: 167–175
- Otto DA, Hudnell HK, House DE, Mølhav L, Counts W (1992) **Exposure of humans to a volatile organic mixture. I. Behavioral assessment.** Arch Environ Health 47: 23–30
- Hudnell HK, Otto DA, House DE, Mølhav L (1992) **Exposure of humans to a volatile organic mixture. II. Sensory.** Arch Environ Health 47: 31–38
- Koren HS, Graham DE, Devlin RB (1992) **Exposure of humans to a volatile organic mixture. III. Inflammatory response.** Arch Environ Health 47: 39–44
- Seifert B (1991) **Das „sick building“-Syndrom.** Öff Gesundheitswesen 53: 376–382
- Kjærgaard SK, Mølhav L, Pedersen OF (1991) **Human reactions to a mixture of indoor air volatile organic compounds.** Atmos Environ 25A: 1417–1426
- Kjærgaard SK, Rasmussen TR, Mølhav L, Pedersen OF (1995) **An experimental comparison of indoor air VOC effects on hayfever- and healthy subjects.** Proc. Healthy Buildings '95, Milan, 10–14 Sept. 1995, vol 1, pp 567–572
- Mølhav L, Grønkjær Jensen J, Larsen S (1991) **Subjective reactions to volatile organic compounds as air pollutants.** Atmos Environ 25A: 1283–1293
- Berglund B, Johannsson I, Lindvall T, Lundin L (1989) **Air quality and symptoms in a sick building with return air ventilation system.** In: Kulic E, et al. (eds) Proc. Clima 2000, vol 3, 13–18, Amersfort/The Netherlands: REHVA
- Norbäck D, Torgén M, Edling C (1990) **Volatile organic compounds, respirable dust, and personal factors related to prevalence and incidence of sick building syndrome in primary schools.** Brit J Ind Med 47: 733–741
- Hodgson MJ, Frohlinger J, Permar E, Tidwell C, Traven ND, Olenchock SA, Karpf M (1991) **Symptoms and microenvironmental measures in non-problem buildings.** J Occup Med 33: 527–533
- Hodgson MJ, Muldoon S, Collopy P, Olesen B (1992) **Sick building symptoms, work stress, and environmental measures.** Proc. IAQ '92 47–56, Atlanta, Ga., USA: ASHRAE
- Skov P, Valbjørn O, DISG (1990) **The Danish Town Hall Study. A one-year follow-up.** In: Walkinshaw DS (ed) Proc. INDOOR AIR '90, 5th Internat. Conf. Indoor Air Quality and Climate, 29 July–3 August 1990, Toronto, vol 1, pp 787–791
- Nagda N, Koontz MD, Albrecht RJ (1991) **Effect of ventilation rate in a healthy building.** Proc. IAQ '91, 101–107, Atlanta, Ga., USA: ASHRAE
- De Bortoli M, Knöppel H, Peil A, Pecchio E, Schlitt H, De Wilde H (1990) **Investigation on the contribution of volatile organic compounds to air quality complaints in office buildings of the European Parliament.** In: Walkinshaw DS (ed) Proc. INDOOR AIR '90, 5th Internat. Conf. Indoor Air Quality and Climate, 29 July–3 August 1990, Toronto, vol 2, pp 695–700
- Sverdrup C, Andersson K, Andersson S (1990) **A comparative study of indoor climate and human health in 74 day care centers in Mal-mö, Sweden.** In: Walkinshaw DS (ed) Proc. INDOOR AIR '90, 5th Internat. Conf. Indoor Air Quality and Climate, 29 July–3 August 1990, Toronto, vol 1, pp 651–655
- Nelson CJ, Clayton CA, Wallace LA, Highsmith VR, Kollander M, Bascom R, Leaderer BP (1991) **Relationships of employees' self-reported health symptoms with direct indoor air quality measurements.** Proc. IAQ '91, 22–32, Atlanta, Ga., USA: ASHRAE
- Stridh G, Fredriksson R, Jansson L, Robertson S, Viklund L (1993) **Levels of volatile organic compounds (VOC) and formaldehyde in the Swedish housing stock.** Proc. INDOOR AIR '93, 6th Internat. Conf. Indoor Air Quality and Climate, 4–8 July 1993, Helsinki, vol 2, pp 159–163
- Sundell J, Andersson B, Andersson K, Lindvall T (1993) **Volatile organic compounds in ventilating air in buildings at different sampling points in the building and their relationship with the prevalence of occupant symptoms.** Indoor Air 3: 82–93
- Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung (1989) **TRGS 403 – Bewertung von Stoffgemischen in der Luft am Arbeitsplatz.** BArbBl. 10/1989, S 71–72
- Weschler CJ, Shields HC (1997) **Potential reactions among indoor pollutants.** Atmos Environ 31: 3487–3495
- Weschler CJ, Shields HC (1997) **Measurements of the Hydroxyl Radical in a Manipulated but Realistic Indoor Environment.** Environ Sci Technol 31: 3719–3722
- Deutsche Forschungsgemeinschaft (1998) **MAK- und BAT-Werte-Liste 1998.** Mitt. 34 der Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe. Wiley, Weinheim
- Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung (1997) **TRGS 901 – Begründungen und Erläuterungen zu Grenzwerten in der Luft am Arbeitsplatz, Teil II Nr. 72 Luftgrenzwerte für komplexe kohlenwasserstoffhaltige Gemische, Teil 2 Luftgrenzwerte für Kohlenwasserstoff-Gemische (in der Regel Verwendung als Lösemittel).** BArbBl. 4/1997, S 45–47
- Seifert B (1990) **Regulating indoor air.** Proc. INDOOR AIR '90, Toronto, 29 July–3 Aug. 1990, vol 5, pp 35–49
- Mølhav L (1991) **Volatile Organic Compounds, Indoor Air Quality and Health.** Indoor Air 1: 357–376
- Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN **VDI-Richtlinie 4300 – Messen von Innenraumluftverunreinigungen,** Blatt 1: Allgemeine Aspekte der Meßstrategie (Dez. 1995); Blatt 2: Meßstrategie für polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH), polychlorierte Dibenzo-p-dioxine (PCDD), polychlorierte Dibenzofurane (PCDF) und polychlorierte Biphenyle (PCB) (Dez. 1997); Blatt 3: Meßstrategie für Formaldehyd (Dez. 1997); Blatt 4: Meßstrategie für Pentachlorphenol (PCP) und  $\gamma$ -Hexachlorcyclohexan (Lindan) in der Innenraumluft (Aug. 1997); Blatt 5: Meßstrategie für Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) (Entwurf April 1998); Blatt 6: Meßstrategie für flüchtige organische Verbindungen (VOC) (in Vorb.)



### Anhang

#### Vorgehensweise zur gaschromatographischen Ermittlung von TVOC-Konzentrationen

Die Ergebnisse einer mit gaschromatographischer Trennung der VOC durchgeführten Messung werden am vollständigsten in Form der Konzentrationen der einzelnen Verbindungen angegeben. Da davon auszugehen ist, daß nicht alle der im Chromatogramm getrennten Verbindungen identifiziert und quantifiziert werden können, soll die TVOC-Konzentration wie folgt ermittelt werden (vgl. [1]):

- ▶ Arbeit mit Tenax TA als Adsorptionsmittel und thermischer Desorption.
- ▶ Zur Trennung wird eine desaktivierte unpolare Säule benutzt, mit der für Toluol und 2-Butoxyethanol eine Nachweisgrenze von 0,5 bzw. 2,5 µg/m<sup>3</sup> erreicht wird.

#### Hinweis

Zur schnellen Messung von VOC-Konzentration werden in der Praxis auch Geräte eingesetzt, die ohne eine gaschromatographische Trennung der einzelnen Verbindungen arbeiten. Dabei werden neben den VOC teilweise auch die in der Raumluft vorhandenen VVOC und SVOC erfaßt. Derartige Geräte arbeiten mit verschiedenen Detektoren, z.B. mit einem Flammenionisationsdetektor (FID), einem Photoionisationsdetektor (PID) oder einem photoakustischen Sensor (PAS). Obwohl die einzelnen Verbindungen ein teilweise extrem unterschiedliches Ansprechverhalten im Detektor zeigen, wird im allgemeinen nur mit einer Verbindung kalibriert. Die von Hodgson [12] mitgeteilten Versuchsergebnisse zeigen, daß die mit einem solchen Gerät erhaltenen Meßwerte deutlich von den mit klassischen Trennverfahren erhaltenen abweichen können. So ergaben sich z.B. bei Verwendung eines PAS als Detektor Unterschiede um Faktoren bis zu 4–5, wobei die höheren Werte mit dem PAS gemessen wurden.

Aus diesem Grunde sollten solche Geräte nicht für die Ermittlung von TVOC-Konzentrationen eingesetzt werden, wenn diese anschließend mit dem TVOC-Wert verglichen werden sollen. Die mit den Geräten erhaltenen Ergebnisse können nur im Sinne einer groben Übersichtsanalyse verwendet werden und sollten zur Vermeidung von Fehlinterpretationen entsprechend gekennzeichnet sein, so z.B. als TVOC-FID, TVOCPID oder TVOCPAS, und nur in Verbindung mit der Art der Kalibrierung des Gerätes angegeben werden.

- ▶ Es werden die im Chromatogramm zwischen n-Hexan und n-Hexadecan auftretenden Verbindungen betrachtet.

- ▶ Unter Verwendung der jeweiligen Responsefaktoren werden mind. die in Tabelle 5 angegebenen VOC quantifiziert. Falls die Verbindungen mit den 10 höchsten Peaks im Gaschromatogramm sich nicht darunter befinden, so sind diese ebenfalls zu quantifizieren. Es wird die Summe der identifizierten Verbindungen berechnet ( $S_{id}$ ) und in mg/m<sup>3</sup> angegeben.
- ▶ Durch den Ansprechfaktors für Toluol wird die als  $S_{un}$  (mg/m<sup>3</sup>) bezeichnete Konzentration der nicht individuell identifizierten („unidentified“) VOC ermittelt.
- ▶ Die Summe  $S_{id}+S_{un}$  wird als TVOC-Konzentration angegeben.
- ▶ Damit die Angabe einer TVOC-Konzentration sinnvoll ist, soll  $S_{id}$  zwei Drittel der Summe  $S_{id}+S_{un}$  ausmachen. Diese Bedingung kann entfallen, wenn die Summe unter 1 mg/m<sup>3</sup> liegt.

Tabelle 5

#### Liste der zur Ermittlung der TVOC-Konzentration mindestens einzeln zu quantifizierenden Verbindungen

Verbindungsklasse	Einzeln zu quantifizierende Verbindungen
Aromatische Kohlenwasserstoffe	Benzol, Toluol, Ethylbenzol, m/p-Xylol, o-Xylol, n-Propylbenzol, 1,2,4-Trimethyl-benzol, 1,3,5-Trimethylbenzol, 2-Ethyltoluol, Styrol, Naphthalin, 4-Phenylcyclohexen
Aliphatische Kohlenwasserstoffe	n-Hexan, n-Heptan, n-Octan, n-Nonan, n-Decan, n-Undecan, n-Dodecan, n-Tridecan, n-Tetradecan, n-Pentadecan, n-Hexadecan, 2-Methylpentan, 3-Methylpentan, 1-Octen, 1-Decen
Cycloalkane	Methylcyclopentan, Cyclohexan, Methylcyclohexan
Terpene	3-Caren, alpha-Pinen, beta-Pinen, Limonen
Alkohole	2-Propanol, 1-Butanol, 2-Ethyl-1-hexanol
Glykole/Glykoether	2-Methoxyethanol, 2-Ethoxyethanol, 2-Butoxyethanol, 1-Methoxy-2-propanol, 2-Butoxyethoxyethanol
Aldehyde	Butanal, Pentanal, Hexanal, Nonanal, Benzaldehyd
Ketone	Methylethylketon, Methylisobutylketon, Cyclohexanon, Acetophenon
Chlorkohlenwasserstoffe	Trichlorethen, Tetrachlorethen, 1,1,1-Trichlorethan, 1,4-Dichlorobenzol
Ester	Ethylacetat, Butylacetat, Isopropylacetat, 2-Ethoxyethylacetat, TXIB (Texanolisobutytrat)
Säuren	Hexansäure
Andere	2-Pentylfuran, Tetrahydrofuran

Es sei ergänzend darauf verwiesen, daß in einem solchermaßen ermittelten TVOC-Konzentrationswert nicht alle in der Raumluft befindlichen VOC erfaßt sind. Insbesondere niedermolekulare Aldehyde, Amine und stark polare VOC sind mit den zur Zeit für die gaschromatographische Bestimmung von VOC in Luft üblichen Verfahren nur bedingt analysierbar und müssen unter Verwendung geeigneter Verfahren gesondert bestimmt werden.