

BEWERTUNG DER INNENRAUMLUFT

**FLÜCHTIGE ORGANISCHE
VERBINDUNGEN – VOC**

SUMMENPARAMETER

INHALTSANGABE:

1	Beschreibung Summenparameter VOC, TVOC	3
2	Messstrategie, Analytik und Untersuchungsbericht.....	4
2.1	Allgemeines	4
2.2	Messstrategie und Probenahme	4
2.3	Analytik und Berechnung des Summenparameters für VOC	5
2.4	Untersuchungsbericht	9
3	Toxikologie	10
3.1	Wirkungen von VOC-Gemischen	10
3.1.1	Allgemeines	10
3.1.2	Kontrollierte Wirkungsstudien	10
3.1.3	Bei Felduntersuchungen beobachtete Wirkungen	12
3.2	Ableitung von Orientierungswerten	13
4	Beurteilung von Summenkonzentrationen	15
5	Literatur	18

1 BESCHREIBUNG SUMMENPARAMETER VOC, TVOC

Der Summenparameter für flüchtige organische Verbindungen (VOC = volatile organic compounds) eignet sich für unterschiedliche Regelungsbereiche, vor allem als allgemeiner Indikator für die Gesamtmenge der in einem Innenraum vorhandenen flüchtigen organischen Verbindungen. Die wesentliche Bedeutung des Summenparameters liegt darin, dass durch ihn die durchschnittliche (und offensichtlich erreichbare) Konzentration definiert wird, deren Überschreitung einen Hinweis auf das Vorhandensein von Quellen im Innenraum gibt. Er eignet sich neben der Funktion als Orientierungsmarke für andere Regelungsbereiche, so z.B. für die Begrenzung von Emissionen aus Bauprodukten als allgemeine Maßzahl für die Gesamtmenge der abgegebenen Stoffe.

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 festgelegt werden, nach welchen Kriterien ein Stoff als VOC bezeichnet werden soll. In der Regel wird auf die Definitionen der ECA (1997) (organische Verbindungen, die im analytischen Fenster im Elutionsbereich zwischen C_6 = n-Hexan und C_{16} = n-Hexadecan detektierbar sind) oder auf die Definition der WHO (1998) (Substanzen mit einem Siedepunkt von 50 - 100 bis 240 – 260 °C) zurückgegriffen. Obige Definitionen geben jedoch keine Auskunft darüber, wie nach beendeter Analyse aus den Ergebnissen ein Summenwert für VOC zu bilden ist. Auch in der Literatur finden sich daher unterschiedliche Angaben zur Ermittlung einer Summen-Konzentration. Häufig verwendete Bezeichnungen für den Summenparameter sind Summe-VOC, TVOC (Total Volatile Organic Compounds) oder Gesamt-VOC.

Es ist zu berücksichtigen, dass für den Nachweis von bestimmten reaktiven Verbindungen und Sekundärprodukten eine zum Teil über Routinemethoden hinausgehende, spezielle Analytik notwendig ist. Manche Substanzen können mit den derzeit in Verwendung stehenden Methoden überhaupt noch nicht oder nur im Rahmen experimenteller Untersuchungen gemessen werden (Salthammer 2000, Wolkoff 2004).

In der Praxis wird eine der folgenden in der Literatur beschriebenen Vorgehensweisen (vgl. Mølhav & Nielsen 1992) zur Bestimmung des VOC-Gehaltes gewählt werden:

- Anreicherung der organischen Verbindungen an einem Sorbens oder mehreren festen Sorbentien mit anschließender gaschromatographischer Auftrennung der Einzelsubstanzen, Detektion und Errechnen der Summenkonzentration.
- Ablesung des Signals von einem direkt anzeigenden Gerät, das dann als Summenwert 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 gegebenenfalls vorhandenen VVOC (very volatile organic compounds) und SVOC (semivolatile organic compounds) erfasst werden. Das Ansprechverhalten der Detektoren auf die Einzelverbindungen kann zum Teil erhebliche Sensitivitätsunterschiede aufweisen. Die Detektoren werden bei dieser Form der Analytik dennoch in der Regel nur mit einer Verbindung kalibriert.

2 MESSSTRATEGIE, ANALYTIK UND UNTERSUCHUNGSBERICHT

2.1 ALLGEMEINES

Hilfreich zur Durchführung der Analytik und Berechnung des Summenparameters sind die Ausführungen in ECA (1997), Mølhavé et al. (1997) und Seifert (1999), die sich auf die Methode der Thermodesorption beziehen, jedoch sinngemäß auch auf andere analytische Vorgehensweisen umgelegt werden können.

Auf Grund der Verschiedenheit der in der Praxis anzutreffenden Gegebenheiten, welche eine Anpassung des messtechnischen Vorgehens an die jeweiligen Erfordernisse nötig machen, wurde von der Angabe eines einzelnen Referenzverfahrens abgesehen. Vielmehr gibt es mehrere prinzipiell taugliche Verfahren, die je nach konkreter Fragestellung anzuwenden sind.

2.2 MESSSTRATEGIE UND PROBEHAHME

Es wird auf die Ausführungen im Kapitel Analytik im „Allgemeiner Teil“ sowie im „Allgemeiner Teil – VOC“ der Richtlinie verwiesen.

Die Probenahme erfolgt durch Anreicherung der organischen Verbindungen an einem oder mehreren festen Sorbentien. In der Regel wird die Adsorption an Tenax-TA in Verbindung mit Thermodesorption bzw. die Adsorption an spezielle Aktivkohle in Verbindung mit Lösungsmitteldesorption eingesetzt. Auf die Vor- und Nachteile der einzelnen Methoden wird im Kapitel 3.1 „Allgemeiner Teil – VOC“ der Richtlinie eingegangen. Die Probenahmedauer soll so gewählt werden, dass der Nachweis von $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ Toluol in der Raumluft sicher möglich ist.

Ein direkt anzeigendes Gerät sollte nur dann eingesetzt werden, wenn zuvor die Stabilität der Korrelation mit einer gaschromatographischen Methode nachgewiesen

wurde. Dabei ist zu beachten, dass in Innenräumen sehr unterschiedliche VOC-Profile auftreten können.

Es muss allerdings beachtet werden, dass schon allein die Verwendung unterschiedlicher Sorbentien für die Probenahme im Ergebnis des Summenparameters Unterschiede um einen Faktor 2 bedingen kann, selbst wenn für die Quantifizierung der Einzelsubstanzen ausschließlich gaschromatographische Methoden eingesetzt werden (Seifert 1999). Weiters ist zu beachten, dass die Wiederfindungsrate von Sorbens zu Sorbens starke Unterschiede aufweisen kann. Manche Verbindungen können von bestimmten Sorbentien überhaupt nicht desorbiert werden (abhängig vom gewählten Lösungsmittel). In diesen Fällen wird mitunter mit Parallelprobenahme und Desorption mittels unterschiedlicher Lösungsmittel gearbeitet (z.B. für das Sorbens Aktivkohle: CS₂ und Methanol/Dichlormethangemisch).

2.3 ANALYTIK UND BERECHNUNG DES SUMMENPARAMETERS FÜR VOC

Es wird auf die Ausführungen im Kapitel Analytik im „Allgemeiner Teil“ sowie im „Allgemeiner Teil – VOC“ der Richtlinie verwiesen.

Die Analyse der Proben wird im Labor unter Anwendung eines gaschromatographischen Analysenverfahrens vorgenommen.

Für die Bestimmung der Summenparameter wird die Gesamtfläche aller aus der Probe stammenden Substanzpeaks, die über der Basislinie liegen, ermittelt. Peaks mit einem Signal/Rausch-Verhältnis < 5 sind vernachlässigbar. Der Verlauf der Basislinie muss durch geeignete Kontrollanalysen bekannt sein. Die Integrationsparameter für die Berechnung der einzelnen Peakflächen sollen so gewählt werden, dass mit der kleinsten Peakfläche eine Konzentration von 5 µg/m³ Toluol in der Raumluft noch sicher erfasst wird.

Der Summenparameter VOC wird unter Bezug auf die ECA-Definition für die VOC (n-Hexan bis n-Hexadecan) hauptsächlich auf drei Arten bestimmt:

- Es wird nach gaschromatographischer Trennung ohne Berücksichtigung der Konzentrationen der Einzelsubstanzen die entsprechende Fläche unter dem Chromatogramm betrachtet. Mit Hilfe des Ansprechfaktors einer Referenzverbindung (z.B. Toluol) wird daraus die Konzentration des Summenparameters errechnet. Die Detektion erfolgt mittels FID oder mittels Massenspektrometer. Dieses Verfahren stellt die einfachste und kostengünstigste Methode der Summenbildung dar. Eine Fehlerquelle bei dieser Methode ist das unterschiedliche Ansprechverhalten der Einzelsubstanzen im Detektor, der mit nur einer Verbindung kalibriert wird.

- Es werden nach gaschromatographischer Trennung die Konzentrationen der einzelnen in diesem Bereich identifizierten Verbindungen unter Verwendung des jeweils für sie gültigen Ansprechfaktors mittels externer Standards ermittelt und aufsummiert. Die aufsummierten Konzentrationen stellen den Zahlenwert für den Summenparameter dar. Die nicht identifizierten Verbindungen werden bei der Summenbildung nicht berücksichtigt. Je nach Anteil von nicht identifizierten Verbindungen kann es bei diesem Verfahren zu erheblichen Minderbefunden kommen. In der Regel wird die Identifikation der Einzelverbindungen mittels Massenspektrometer durchgeführt.
- Es werden nach gaschromatographischer Trennung die Konzentrationen der einzelnen in diesem Bereich identifizierten Verbindungen unter Verwendung des jeweils für sie gültigen Ansprechfaktors mittels externer Standards ermittelt und aufsummiert. Weiters wird die Fläche der noch nicht quantifizierten Verbindungen betrachtet. Mit Hilfe des Ansprechfaktors einer Referenzverbindung (in der Regel Toluol) wird die der Referenzverbindung äquivalente Konzentration der noch nicht quantifizierten Verbindungen errechnet. Die Summe der Konzentrationen beider Gruppen stellt den Zahlenwert für den Summenparameter dar.

Eine Alternative zur Wahl einer einzigen Referenzverbindung für alle nicht über externe Standards quantifizierbaren Substanzen ist die Quantifizierung von Gruppen ähnlicher Verbindungen über einen Repräsentanten für die Gruppe (z.B. alle aliphatischen und isoaliphatischen Verbindungen werden über n-Decan berechnet).

Es wird mitunter gefordert, dass der Prozentsatz der nicht identifizierbaren Verbindungen unter einem bestimmten Wert bleibt (ECA 1997, Seifert 1999). Um der Gefahr der Über- oder Unterbewertung der Konzentrationen der Einzelsubstanzen vorzubeugen, empfiehlt es sich, den Anteil nicht identifizierter Stoffe an der Gesamtkonzentration soweit als möglich zu reduzieren. In jedem Fall ist jedoch eine Zuordnung in Stoffklassen und eine weitest gehende Identifizierung anzustreben. In der Regel wird die Identifikation der Einzelverbindungen mittels Massenspektrometer durchgeführt. Kann eine Substanz nicht eindeutig identifiziert werden, ist auch die Nennung einer Vermutung oder ein Hinweis auf die Substanzklasse möglich, soweit geeignete Anhaltspunkte (z. B. typische Massenfragmente) entsprechende Rückschlüsse zulassen.

Der Summenparameter für VOC kann unterschiedliche Bezeichnungen wie TVOC (Total Volatile Organic Compounds), Summe VOC oder Gesamt VOC tragen. Der Begriff TVOC wird zwar noch immer unterschiedlich angewendet, es hat sich jedoch eine Definition zur Berechnung dieses Parameters durchgesetzt, die in ECA (1997) beschrieben und von Seifert (1999) übernommen wurde (siehe auch Tabelle 1). Er

folgt in seiner Berechnung der unter Punkt c) vorgestellten Vorgangsweise. Darüber hinaus werden weitere detaillierte Vorgaben genannt (ECA 1997).

Je nach eingesetzter Analyse- oder Berechnungsmethode der Ergebnisse können sich für den Summenparameter VOC stark unterschiedliche Werte ergeben (Hodgson 1995). Die Vorgangsweise, die sich der tatsächlichen Konzentration bei einem geringen Anteil nicht identifizierter Verbindungen am besten annähert, ist die oben unter c) beschriebene Methode der Berechnung des Summenparameters. Dies ist allerdings auch die aufwendigste Vorgangsweise.

Aus bestimmten Fragestellungen heraus ergibt sich in manchen Fällen die Wahl einer anderen Auswert- und Berechnungsmethode als oben angeführt (z.B. bei Vergleichen mit früher durchgeführten Messungen, Verlaufsberechnungen eines definierten Gemisches usw.).

Ergänzend sei darauf verwiesen, dass bei keinem VOC-Summenwert alle in der Raumluft vorhandenen organischen Verbindungen erfasst werden. Eine Reihe von Substanzen sind mit den zur Zeit für die gaschromatographische Bestimmung von VOC in der Luft üblichen Verfahren nur bedingt analysierbar. Diese Verbindungen können unter Verwendung spezifischer Verfahren gesondert bestimmt werden.

Zur Berechnung des Summenparameters von Untergruppen der VOC (z.B. Summe Aromaten) werden die Konzentrationen der einzelnen identifizierten Verbindungen der Untergruppe unter Verwendung des jeweils für sie gültigen Ansprechfaktors mittels externer Standards ermittelt und aufsummiert. Weiters wird die Fläche der noch nicht quantifizierten Verbindungen der Untergruppe betrachtet. Mit Hilfe des Ansprechfaktors einer Referenzverbindung (im Falle der Summe Aromaten z.B. Toluol) wird die Konzentration der noch nicht quantifizierten Verbindungen errechnet. Die Summe der Konzentrationen beider Gruppen stellt den Zahlenwert für den Summenparameter der Untergruppe dar.

Tabelle 1: Verbindungen, die zur Bestimmung von TVOC mindestens einzeln zu quantifizieren sind (nach ECA 1997, Seifert 1999)

Aromatische Kohlenwasserstoffe	Alkohole, Ketone, Ester
Benzol	2-Propanol
Toluol	1-Butanol
Ethylbenzol	2-Ethyl-Hexanol
m/p-Xylol	2-Methoxyethanol
o-Xylol	2-Ethoxyethanol
n-Propylbenzol	2-Butoxyethanol
1,2,4-Trimethylbenzol	1-Metoxy-2-propanol
1,3,5-Trimethylbenzol	2-Butoxyethoxyethanol
2-Ethyltoluol	Methylethylketon (MEK)
Styrol	Methylisobutylketon (MIBK)
Naphthalin	Cyclohexanon
4-Phenylcyclohexen	Acetophenon
Aliphatische und Cycloaliphatische Kohlenwasserstoffe	TXIB (2,2,4-trimethyl-1,3-pentandiol-diisobutyrat)
n-Hexan	Butylacetat
n-Heptan	Isopropylacetat
n-Oktan	2-Ethoxyethylacetat
n-Nonan	Ethylacetat
n-Decan	Terpenkohlenwasserstoffe
n-Undecan	Δ^3 -Caren
n-Dodekan	α -Pinen
n-Tridekan	β -Pinen
n-Tetradekan	Limonen
n-Pentadekan	Aldehyde
n-Hexadekan	Butanal
2-Methylpentan	Pentanal
3-Methylpentan	Hexanal
1-Octen	Nonanal
1-Decen	Benzaldehyd
Methylcyclopentan	Säuren
Cyclohexan	Hexansäure
Methylcyclohexan	Andere
Chlorierte Kohlenwasserstoffe	2-Pentylfuran
Trichlorethen	Tetrahydrofuran
Tetrachlorethen	
1,1,1-Trichlorethan	
1,4-Dichlorbenzol	

2.4 UNTERSUCHUNGSBERICHT

Es wird auf die Ausführungen im Kapitel Analytik im „Allgemeiner Teil“ sowie im „Allgemeiner Teil – VOC“ der Richtlinie verwiesen.

Da sowohl für den Begriff „VOC“ als auch für die Berechnung des Summenparameters-VOC eine Reihe von Definitionen existieren, ist die dem Mess- und Analyseverfahren zugrundeliegende Operationalisierung des Begriffs VOC und die Rechenvorschrift detailliert im Untersuchungsbericht anzugeben.

3 TOXIKOLOGIE

3.1 WIRKUNGEN VON VOC-GEMISCHEN ¹

3.1.1 Allgemeines

Auswirkungen einzelner VOC auf die Gesundheit und das Wohlbefinden des Menschen umfassen ein weites Spektrum, das von sensorischen Wahrnehmungen (Gerüche, Reizerscheinungen) 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 vollständig entziehen.

3.1.2 Kontrollierte Wirkungsstudien

Anfang der 80er Jahre wurden von Mølhav et al. (1986) Probanden in großen Versuchskammern unter kontrollierten Bedingungen gegenüber verschiedenen Gesamtkonzentrationen einer Mischung 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 VOC-Gemisch wurde bei den Versuchen in einer Gesamtkonzentration von 5 und 25 mg/m³ eingesetzt. Zusätzlich wurde eine Versuchsserie mit 0,7 mg/m³ durchgeführt. Bei allen Versuchen wurden die Probanden über 2,75 Stunden hinweg exponiert, Temperatur und relative Feuchte lagen bei 23°C bzw. 23 %. 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.

¹ Das vorliegende Kapitel folgt weitgehend den Ausführungen von Seifert (1999)

Die Versuche von Mølhavet al. wurden in den USA wiederholt, um die Befunde zu überprüfen (Otto et al. 1992, Hudnell et al. 1992, Koren et al. 1992). Dabei wurde mit dem gleichen VOC-Gemisch gearbeitet – allerdings nur bei einer Summenkonzentration von 25 mg/m^3 – 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. Seifert 1991).

Gegenüber den Kontrollversuchen änderte sich unter Expositionsbedingungen die Testleistung nicht, die Probanden klagten aber vor allem über stärkere Ermüdung. Kopfschmerzen sowie 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 (Koren et al. 1992), wurde auch die Zahl der neutrophilen Granulozyten in der Nasenspülflüssigkeit 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 Granulozyten in der Nasenspülflüssigkeit hatten, stieg die Zellzahl unmittelbar nach der Exposition etwa auf das Fünffache, nach 18 h etwa auf das 20-fache an.

Die Unterschiede in den Reaktionen von 21 Gesunden und 14 Personen, welche unter SBS-Symptomen litten, wurden mit dem gleichen VOC-Gemisch bei einer Gesamtkonzentration von 25 mg/m^3 untersucht (Kjærgaard et al. 1991). 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. (1995) die Reaktion von 18 Patienten mit Heuschnupfen und 18 Kontrollen bei 20 mg/m^3 und einer Expositionsdauer von fünf Stunden. Die Heuschnupfen-Probanden berichteten über stärkere Effekte (u.a. verstärktes Auftreten von Reizwirkungen und Kopfschmerzen). Objektiv konnten durch Messungen u.a. verstärkte Effekte am Auge festgestellt werden.

Mølhavet al. (1991) 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/m³, exponiert wurde über 50 Minuten.

Geruchswahrnehmungen traten – offenbar als Folge von Adsorptions- und Desorptionseffekten an den Kammerwänden – auch bei den Nullluftexperimenten auf, jedoch wurde ab einer Konzentration von 3 mg/m³ eine deutliche Zunahme beobachtet. Dies erklärt sich wahrscheinlich durch die unterhalb von 3 mg/m³ liegenden Geruchsschwellen von p-Xylol und n-Butylacetat, die zusammen rund zwei Drittel des Gemisches ausmachten. Ab 8 mg/m³ wurde der Geruch als unangenehm empfunden und verstärkte Lüftung verlangt. Schleimhautreizungen, vor allem an Auge und Nase, traten ebenfalls ab 8 mg/m³ signifikant häufiger gegenüber dem Nullluftexperiment auf.

3.1.3 Bei Felduntersuchungen beobachtete Wirkungen

Bislang wurden 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 einen Summenparameter, ableitbar.

Während in einigen Studien positive Zusammenhänge zwischen Symptomen und den jeweiligen Gesamtkonzentrationen an VOC festgestellt wurden (Berglund et al. 1989; Norbäck et al. 1990; Hodgson et al. 1991, Hodgson et al. 1992), konnten solche Zusammenhänge in anderen Studien (Skov et al. 1990, Nagda et al. 1991, De Bortoli et al. 1990) nicht gefunden werden. In einigen Untersuchungen wurde sogar eine Verringerung der Symptommhäufigkeit mit zunehmender Konzentration beobachtet (Sverdrup et al. 1990, Nelson et al. 1991, Stridh et al. 1993, Sundell et al. 1993).

Wie bereits oben angedeutet, ist es unklar, ob (und gegebenenfalls in welchem Umfang) die Widersprüchlichkeit dieser Ergebnisse mit der unterschiedlichen Art der Ermittlung des Summenparameters VOC 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 VOC-Gesamtkonzentration zunimmt. Ebenso dürfte anzunehmen sein, dass die Effekte von Substanzgemischen unterschiedlicher

Zusammensetzung selbst bei gleicher VOC-Gesamtkonzentration unterschiedlich stark sind. Allerdings hat sich beim Vergleich verschiedener größerer Studien über das Vorkommen von VOC in der Innenraumluft gezeigt, dass sogar zwischen verschiedenen Ländern im Mittel eine recht große Ähnlichkeit im VOC-Grundmuster besteht (WHO 1998).

3.2 ABLEITUNG VON ORIENTIERUNGSWERTEN

Wegen der Variabilität der Zusammensetzung des VOC-Spektrums und der Vielfalt der Wirkungsendpunkte lassen sich keine einheitlichen und abgesicherten Dosis-Wirkungs-Beziehungen angeben. Wegen der Besonderheiten, die bei einem komplexen Substanzgemisch zu berücksichtigen sind, ist es auch nicht möglich, das in „Allgemeiner Teil“ der Richtlinie vorgestellte, für die Ableitung von Wirkungsbezogenen Innenraumrichtwerten (WIR) entwickelte Basisschema anzuwenden. Aufgrund der beschriebenen Einschränkungen der Aussagekraft eines VOC-Summenparameters werden **keine Richtwerte angegeben**. Summenparameter eignen sich daher nicht als alleiniges Kriterium für eine gesundheitliche Bewertung, sondern sind vielmehr als einer der **Indikatoren für die Gesamtsituation** anzusehen.

Die Angabe fließender Übergänge zwischen den Konzentrationsbereichen im folgenden Kapitel 4 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. Es ist daher keinesfalls sinnvoll, die Ergebnisse der Ermittlung von Summenparametern starr mit den angegebenen Wertebereichen zu vergleichen. Insbesondere ist es unzulässig, eine der Bereichsgrenzen streng als toxikologisch begründete Grenze zu betrachten, da die Höhe der gemessenen Gesamtkonzentration im günstigsten Fall nur eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit eines Zusammenhanges zwischen VOC-Exposition und geäußerten Beschwerden ermöglicht. Je höher die Gesamtkonzentration an VOC, desto höher ist diese Wahrscheinlichkeit. Es wird an dieser Stelle dringend darauf hingewiesen, dass eine Beurteilung der Gesamtsumme VOC alleine, ohne Kenntnis der Konzentration von Einzelsubstanzen wenig, in den meisten Fällen überhaupt nicht aussagekräftig ist. Außer für den Fall einer Verlaufsbeobachtung ist es immer notwendig, Art und Konzentration von Einzelverbindungen zu ermitteln, um so ein aus Einzelverbindungen möglicherweise resultierendes Gefährdungspotential abschätzen zu können. Kenntnisse über Einzelverbindungen und gegebenenfalls über Substanzprofile stellen die Voraussetzung für die Identifizierung und die folgende Sanierung bzw. Beseitigung von Quellen dar.

Es ist zu berücksichtigen, dass zahlreiche reaktive Verbindungen und Sekundärprodukte, die vermutlich zu einem nicht unbeträchtlichen Anteil Mitverursacher von auftretenden Beschwerden in Innenräumen sind, mit Standardmethoden nicht erfasst werden können bzw. überhaupt nicht detektierbar sind (Wolkoff 1997, Salthammer 2000, Wolkoff 2004). Diese Sekundärprodukte entstehen oft unter den Umgebungsbedingungen des Innenraumes durch die Reaktion der flüchtigen Ausgangssubstanzen mit dem Luftsauerstoff. Aufgrund der Vielfalt an möglichen Reaktionen können aus den Spektren der detektierten Stoffe keine sicheren Rückschlüsse auf Art und Menge nicht detektierter Verbindungen gezogen werden.

4 BEURTEILUNG VON SUMMENKONZENTRATIONEN

Aus den Anforderungen der Praxis werden im Folgenden zur Abschätzung von Innenraumluft-Konzentrationen (Konzentrationen im Sinne der TVOC-Definition, ECA 1999) Wertebereiche zur Orientierung angegeben. Diese Bereiche beruhen auf den in Abschnitt 3 angeführten Untersuchungen und Erfahrungen der Praxis, es handelt sich aber nicht um toxikologische Bewertungen und Ableitungen im Sinne des Basisschemas (siehe „Allgemeiner Teil“ der Richtlinie).

Es ist bei dieser Klassifizierung zu berücksichtigen, dass kanzerogene Stoffe, Stoffe mit niedrigem Geruchsschwellenwert und Stoffe, für welche Einzelstoffbewertungen vorliegen, einer gesonderten Betrachtung zu unterziehen sind.

Summenparameter eignen sich nicht als Kriterium für eine allfällige gesundheitliche Bewertung, sondern sind vielmehr als einer der Indikatoren für die Gesamtsituation anzusehen. Die Beurteilung der gemessenen Konzentration kann auch nach den Vorgangsweisen, die in „Allgemeiner Teil VOC“ der Richtlinie, Punkt 2.13 skizziert wurden, erfolgen. In jedem Fall darf die Möglichkeit, dass flüchtige organische Verbindungen von außen in den Raum eingetragen werden, nicht außer Acht gelassen werden.

Der Konzentrationsbereich **unter etwa 0,25 mg/m³** für die Summe-VOC kann unter Berücksichtigung der angeführten Einschränkungen als **niedrig** klassifiziert werden. Im langzeitigen Mittel ist bei Verwendung geeigneter Bauprodukte und Materialien der Innenausstattung in Innenräumen eine VOC-Gesamtkonzentration von 0,2 bis 0,3 mg/m³ erreichbar bzw. unterschreitbar.

Konzentrationen zwischen etwa 0,25 und 0,5 mg/m³ sind als durchschnittlich zu bezeichnen.

Konzentrationen zwischen etwa 0,5 und 1 mg/m³ sind geringfügig erhöht. Es ist hier schon zu vermuten, dass spezifische Quellen von VOC im untersuchten Raum vorhanden sind. Bei konsequenter Verwendung lösungsmittelfreier Baumaterialien und Materialien zur Innenausstattung wird auch unmittelbar nach Abschluss von baulichen Maßnahmen (Neubau, Renovierung) der Wert von 1 mg/m³ als Summe-VOC in der Regel unterschritten sein.

Konzentrationen zwischen etwa 1 und 3 mg/m³ sind als deutlich erhöht zu bezeichnen. Erfahrungsgemäß ist in den meisten dieser Fälle davon auszugehen, dass derartige Konzentrationen durch eine beschränkte Zahl von chemischen Stoffen verursacht werden und dass spezifische Quellen im Raum vorhanden sind.

Summenkonzentrationen an VOC über etwa 3 mg/m³ sind als stark erhöht anzusehen. Derartige Konzentrationen können unter anderem unmittelbar nach Abschluss von baulichen Maßnahmen auftreten, wenn lösungsmittelhaltige Materialien eingesetzt wurden. Auch hier ist davon auszugehen, dass derartige

Konzentrationen durch eine beschränkte Zahl von chemischen Stoffen verursacht werden und dass spezifische Quellen im Raum vorhanden sind.

Bei der Beurteilung des Zahlenwertes für den Summenparameter ist die verwendete Probenahmetechnik, die eingesetzte Analytik sowie die Berechnungsmethode für den Summenparameter zu berücksichtigen.

Es ist 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.

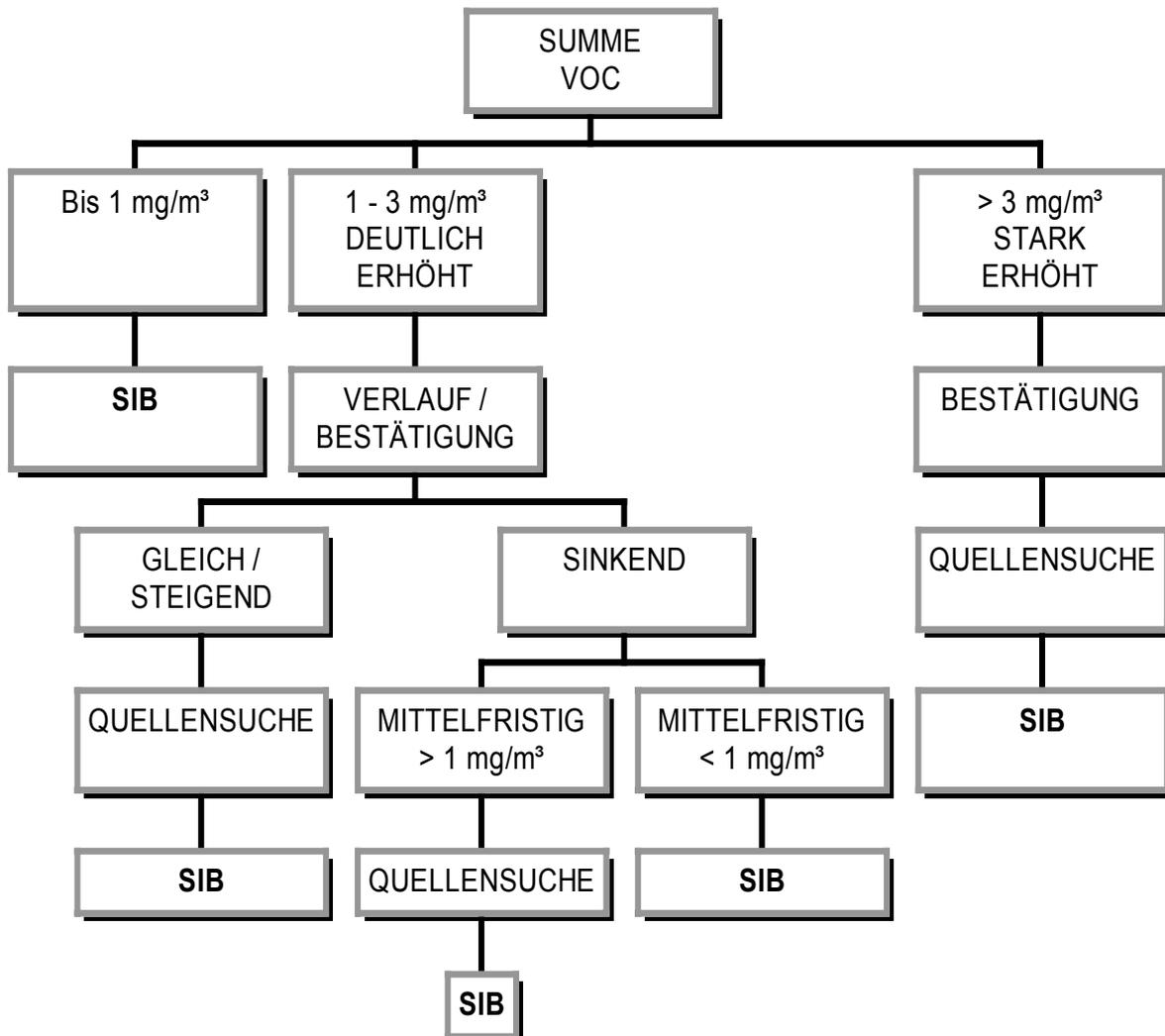
Tabelle 2: Beurteilung von Summenkonzentrationen, Zusammenfassung ²

Beurteilung der Summenkonzentration	Konzentrationsbereiche in mg/m ³	Bemerkungen
Niedrig	< 0,25	Im langzeitigen Mittel bei Verwendung geeigneter Materialien in Innenräumen erreichbar
Durchschnittlich	0,25 - 0,5	
Geringfügig erhöht	0,5 - 1	Vermutlich spezifische Quellen von VOC im Raum vorhanden. Unmittelbar nach Abschluss von baulichen Maßnahmen sind Konzentrationen in diesem Bereich zu erwarten, wenn lösungsmittelfreie Materialien eingesetzt wurden
Deutlich erhöht	1 - 3	Vermutlich von beschränkter Zahl von chemischen Stoffen verursacht und spezifische Quellen im Raum vorhanden
Stark erhöht	> 3	Unmittelbar nach Abschluss von baulichen Maßnahmen sind Konzentrationen in diesem Bereich zu erwarten, wenn lösungsmittelhaltige Materialien eingesetzt wurden

² Gilt für Konzentrationen im Sinne der TVOC-Definition, ECA 1999

Abbildung 1 zeigt die Vorgangsweise bei der Bewertung von VOC-Gemischen. In allen Fällen läuft die Beurteilung auf eine situativ – integrative Bewertung (SIB) hinaus, der bestimmte Schritte wie zum Beispiel die Ermittlung des Konzentrationsverlaufes oder eine Quellsuche vorgeschaltet werden können (siehe Kap. 6 „Allgemeiner Teil“ der Richtlinie).

Abbildung 1: Vorgangsweise bei der Beurteilung von Summenkonzentrationen für VOC



SIB: situativ – integrative Bewertung; siehe Kap. 6 „Allgemeiner Teil“ der Richtlinie

5 LITERATUR

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, Amersfort/The Netherlands: REHVA: 13-18

De Bortoli M, Knöppel H, Peil A, Pecchino 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. Proc. INDOOR AIR '90, 5th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate. 29 July - 3 August 1990, Toronto, Vol. 1: 695-700

ECA (1997): Total Volatile Organic Compounds (TVOC) in Indoor Air Quality Investigations, ECA-Report No 19

Hudnell HK, Otto DA, House DE, Mølhave L (1992): Exposure of humans to a volatile organic mixture. II. Sensory. Arch Environ Health 47: 31-38

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, Atlanta, Ga., USA. ASHRAE: 47-56

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

Kjærgaard SK, Mølhave L, Pedersen OF (1991): Human reactions to a mixture of indoor air volatile organic compounds. Atmos Environ 25A: 1417-1426

Kjærgaard SK, Rasmussen TR, Mølhave L, Pedersen OF (1995): An experimental comparison of indoor air VOC effects on hayfever- and healthy subjects. Proc. Healthy Buildings '95, Milano, 10 - 14 Sept. 1995, Vol 1: 567-572

Koren HS, Graham DE, Devlin RB (1992): Exposure of humans to a volatile organic mixture. Inflammatory response, Arch. Environ. Health 47: 39-44

Mølhave L, Bach B, Pedersen OF (1986): Human reactions to low concentrations of volatile organic compounds. Environ Internat 12: 167-175

Mølhave L, Grønkjær Jensen J, Larsen S (1991): Subjective reactions to volatile organic compounds as air pollutants. Atmos Environ 25A: 1283-1293

Mølhave L, Nielsen GD (1992): Interpretation and limitation 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

- Mølhave L, Clausen G, Berglund B, De Ceaurriz J., Kettrup A, Lindvall T, Maroni M, Pickering AC, Risse U, Rothweiler H, Seifert B, Younes M (1997): Total Volatile Organic Compounds (TVOC) in Indoor Air Quality Investigations. *Indoor Air* Vol. 7, No. 4: 225-240
- Nagda N, Koontz MD, Albrecht RJ (1991): Effect of ventilation rate in a healthy building. *Proc. IAQ '91, Atlanta, Ga., USA. ASHRAE*: 101-107
- Nelson CJ, Clayton CA, Wallace LA, Highsmith VR, Kollander M, Bascom R, Leader BP (1991): Relationships of employees' self-reported health symptoms with direct indoor air quality measurements. *Proc. IAQ '91, Atlanta, Ga., USA. ASHRAE*: 101-107
- Norbäck D, Torgen 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
- Otto DA, Hudnell HK, House DE, Mølhave L; Counts W (1992): Exposure of humans to a volatile organic mixture. I. Behavioral assessment. *Arch Environ Health* 47: 23-30
- Salthammer T (2000): Verunreinigung der Innenraumlufte durch reaktive Substanzen – Nachweis und Bedeutung von Sekundärprodukten. Teil III-6.4.2 des Handbuch für Bioklimatologie und Lufthygiene, 4. Erg.Lfg. 12/2000
- Seifert B (1991) Das „sick building“-Syndrom. *Öff. Gesundheitswesen* 53: 376-382
- Seifert B (1999): Richtwerte für die Innenraumlufte – Die Beurteilung der Innenraumluftequalität mit Hilfe der Summe der flüchtigen organischen Verbindungen (TVOC-Wert). *Bundesgesundheitsblatt-Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz* 3-99: 270-278
- Skov P, Valbjørn O, DISG (1990): The Danish Town Hall Study. A one-year follow-up. *Proc. INDOOR AIR '90, 5th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate.* 29 July - 3 August 1990, Toronto, Vol. 1: 787-791
- Stridh G, Fredriksson R, Jansson L, Robertson S, Viklund L (1993): Levels of volatile organic compounds (VOC) and formaldehyd in the Swedish housing stock. *Proc. INDOOR AIR '93, 6th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate.* 4 - 8 July 1993, Helsinki, Vol. 2: 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
- Sverdrup C, Andersson K, Andersson S (1990): A comparative study of indoor climate and human health in 74 day care centers in Malmö, Sweden. *Proc. INDOOR*

AIR '90, 5th Internat. Conf. on Indoor Air Quality and Climate. 29 July - 3 August 1990, Toronto, Vol. 1: 651-655

WHO (1998): Indoor Air Quality: organic pollutants. Euro Reports and Studies No. 111. Copenhagen: World Health Organisation, Regional Office for Europe

Wolkoff P, Clausen PA, Jensen B, Nielsen GD, Wilkins CK (1997): Are we measuring the relevant indoor pollutants?, Indoor Air 7: 92-106

Wolkoff P (2004): Are we measuring the right indoor things? In: Österr. Institut für Baubiologie und -ökologie (Hrsg.): Gesunde Raumluf. Schadstoffe in Innenräumen – Prävention und Sanierung. Internationaler Kongress, Messezentrum Wien Neu, 12.-13.02.2004. IBO-Verlag, Wien: 31-36