

**ERFASSUNG UND BEWERTUNG VON
MIKROBIELLEN VOLATILEN
ORGANISCHEN SUBSTANZEN (MVOC)
IN SCHIMMELPILZFREIEN INNENRÄUMEN
IM RAHMEN DER GIESSENER INNENRAUMALLERGEN
STUDIE (GINA-STUDIE)**

INAUGURALDISSERTATION
zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
des Fachbereichs Medizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von Simone Schenke
aus Duderstadt

Gießen 2009

Aus dem Medizinischen Zentrum für Ökologie
Institut für Hygiene und Umweltmedizin
Direktor: Prof. Dr. T. Eikmann
des Universitätsklinikums Gießen und Marburg GmbH
Standort Gießen

Betreuer: Fr. Prof. Dr. C. Herr
Prof. Dr. T. Eikmann

1. Gutachter: Frau Prof. Dr. C. Herr
2. Gutachter: Herr Prof. Dr. P. Mayser

Tag der Disputation: 26.01.2010

Inhalt

1. EINLEITUNG	8
1.1 HINTERGRUND.....	8
1.2 STUDIENVORSTELLUNG UND ZIELE	9
1.3 ERGÄNZENDER SCHWERPUNKT: TOXIKOLOGIE DER MVOC	12
2. HERKUNFT, BESCHREIBUNG UND TOXIKOLOGIE DER MVOC	13
2.1 SCHIMMELPILZE	13
2.1.1 URSACHEN DES SCHIMMELPILZWACHSTUMS	13
2.1.2 HÄUFIGE SCHIMMELPILZGATTUNGEN	15
2.1.3 SCHIMMELPILZE ALS KRANKHEITSAUSLÖSER.....	16
2.2 FLÜCHTIGE SEKUNDÄRMETABOLITE DER SCHIMMELPILZE (MVOC).....	18
2.2.1 BILDUNG UND CHEMISCHE KLASSIFIKATION DER MVOC	18
2.2.2 QUELLEN FÜR MVOC.....	21
2.2.3 GRENZEN UND MÖGLICHKEITEN DER MVOC-MESSUNG	23
2.2.4 TOXIKOLOGIE DER MVOC	26
3. MATERIAL UND METHODEN	36
3.1 LABORVERSUCHE	36
3.1.1 PRINZIPIEN VON GASCHROMATOGRAPHIE UND MASSENSPEKTROMETRIE	36
3.1.2 CHEMIKALIEN	38
3.1.3 ANALYTISCHE GERÄTEPARAMETER.....	38
3.1.4 QUALITATIVE ERFASSUNG DER STANDARDSUBSTANZEN	39
3.1.5 QUANTITATIVE ERFASSUNG DER STANDARDSUBSTANZEN	40
3.2 FELDVERSUCHE	40
3.2.1 PROBANDENAUSWAHL UND MESSORTE	40
3.2.2 WOHNUNGSBEGEHUNG	40
3.2.3 PROBENNAHMEPROTOKOLL	41
3.2.4 MVOC MESSUNG	41
3.2.5 SCHIMMELPILZMESSUNG	42
3.2.6 EINFLUSSFAKTOREN DER MVOC-BILDUNG	42
3.3 STATISTISCHE AUSWERTUNG.....	43
4. ERGEBNISSE	44
4.1 LABORERGEBNISSE	44
4.1.1 QUALITATIVE ERFASSUNG DER MVOC-STANDARDS	44
4.1.2 QUANTITATIVE BESTIMMUNG DER MVOC	45
4.2 ERGEBNISSE DER FELDVERSUCHE	50
4.2.1 UMGEBUNGSANALYSE.....	50
5. DISKUSSION	66
5.1 BESTIMMUNGSMETHODE.....	66
5.2 FELDVERSUCHE.....	68
6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	78

6.1 ZUSAMMENFASSUNG AUF DEUTSCH	78
6.2 SUMMARY	81
<u>7. ANHANG</u>	<u>83</u>
7.1 FRAGEBÖGEN	83
7.1.1 BEGEHUNGSPROTOKOLL	83
7.1.2 ANHANG ZUM BEGEHUNGSPROTOKOLL	88
7.1.3 PROBENNAHMEPROTOKOLL	90
7.2 FLÄCHENBERECHNUNG DER MVOC	92
7.3 MVOC-ERGEBNISSE (AACHEN).....	101
7.4 TOXIKOLOGISCHE DATEN	102
<u>8. LITERATURVERZEICHNIS</u>	<u>111</u>
<u>ERKLÄRUNG</u>	<u>126</u>
<u>DANKSAGUNG</u>	<u>127</u>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ursachen von überhöhter Feuchtigkeit in Innenräumen	14
Abbildung 2: Entstehung einiger MVOC	19
Abbildung 3: Einflussfaktoren auf die MVOC-Bildung	22
Abbildung 4: Reizkonzentrationen (RD50-Werte), Geruchsschwellenwerte und gemessene Raumluftkonzentrationen in mg/m ³ ausgewählter MVOC	34
Abbildung 5: Darstellung des Massenspektrogrammes von 3-Octanon	37
Abbildung 6: Eichgerade von 2-Pentanol	47
Abbildung 7: Baumaterial der Häuser	51
Abbildung 8: Isoliermaßnahmen	51
Abbildung 9: Art der Kinderzimmerfenster	52
Abbildung 10: Bodenbelag im Kinderzimmer	52
Abbildung 11: Einrichtung des Kinderzimmers	53
Abbildung 12: Art der Wäschetrocknung	53
Abbildung 13: Passive Luftbefeuchtung	54
Abbildung 14: Feuchtequellen in der Wohnung	54
Abbildung 15: Lüftungsverhalten im Sommer	55
Abbildung 16: Raucherstatus der Wohnung	55
Abbildung 17: Wahrgenommenes Schimmelpilzwachstum	56
Abbildung 18: Gesamtschimmelpilzkonzentration in KBE/m ³ in 18 Innenräumen	57
Abbildung 19: Total-MVOC in ng/m ³ in 18 Kinderzimmern am 1. Messzeitpunkt	58
Abbildung 20: Darstellung der Konzentrationen der MVOC-Einzelsubstanzen in 18 Räumen	59
Abbildung 21: MVOC-Konzentrationen in Abhängigkeit zur Art der Wäschetrocknung	64
Abbildung 22: MVOC-Konzentrationen in Abhängigkeit zu beobachtetem Schimmel	64
Abbildung 23: MVOC-Konzentrationen in Korrelation zur Luftfeuchtigkeit im Kinderzimmer	65
Abbildung 24: MVOC-Konzentrationen in Abhängigkeit zur Gesamtsporenzahl im Kinderzimmer	65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beschreibung studienrelevanter Schimmelpilzgattungen	15
Tabelle 2: MVOC-Hauptindikatoren	21
Tabelle 3: Sekundärquellen für MVOC	23
Tabelle 4: Vergleich der Bestimmungsgrenzen bei verschiedenen MVOC-Messmethoden	26
Tabelle 5: Geruchsschwellenwerte und Geruchsnoten einiger MVOC	31
Tabelle 6: Darstellung der stoffspezifischen Retentionszeit und des MS-Musters	45
Tabelle 7: Kalibrierung und Verfahrenskennndaten von 2-Pentanol	47
Tabelle 8: Verfahrenskennndaten der MVOC	48
Tabelle 9: Berechnung der Nachweis-(NG), Erfassungs- (EG)- und Bestimmungsgrenze (BG) der MVOC	49
Tabelle 10: Summenkonzentration der Furane	60
Tabelle 11: MVOC-Konzentrationen, deskriptive Verteilung und Einflussparameter in 18 Räumen	61
Tabelle 12: Statistisches Testverfahren und p-Werte aller getesteten Parameter	63
Tabelle 13: Vergleich der Bestimmungsgrenzen verschiedener MVOC-Messmethoden	67
Tabelle 14: Bewertungsschema von MVOC-Proben	70
Tabelle 15: Einordnung der GINA MVOC-Werte in das Bewertungsschema nach Keller, UBA und Lorenz	70
Tabelle 16: Literaturangaben zu MVOC-Messungen in Innenräumen	74

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
Σ	Summe
μg	Mikrogramm
α	Signifikanzniveau
Abb.	Abbildung
AK	Aktivkohle
a_w	Wasseraktivität
BG	Bestimmungsgrenze
bzgl.	Bezüglich
bzw.	Beziehungsweise
ca.	circa
CCS	common chemical sense
d.h.	das heißt
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGAUM	Deutsche Gesellschaft für Arbeits- und Umweltmedizin
DIN	Deutsche Industrienorm
DMSO	Dimethylsulfoxid
EAA	exogen allergische Alveolitis
EG	Erfassungsgrenze
EnEG	Energie Einsparungsgesetz
EnEV	Energie Einsparverordnung
et al.	und andere
GC	Gaschromatographie
GHU	Gesellschaft für Hygiene und Umweltmedizin
GINA	Gießener Innenraumallergen Studie
HIV	human immunodeficiency virus
IgE	Immunglobulin E
IgG	Immunglobulin G
IL	Interleukin
ISEM	International Society of environmental Medicine
JLU	Justus-Liebig-Universität
KBE	Koloniebildende Einheiten
l	Liter
LF	Luftfeuchtigkeit
LGA	Landesgesundheitsamt
m	Masse
m^3	Kubikmeter
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
MAX	Maximum
mg	Milligramm
MIN	Minimum
Min	Minute
ml	Milliliter
mm	Millimeter

MS	Massenspektrometrie
MVOC	microbial volatile organic compounds
MW	Mittelwert
N.	Nervus, Nerv
NG	Nachweisgrenze
ng	Nanogramm
o.g.	oben genannten
OEL	Occupational exposure level
ÖGA	Österreichische Gesellschaft für Arbeitsmedizin
p	Maß der statistischen Wahrscheinlichkeit
ppm	Parts per million
r	Korrelationskoeffizient
R ²	Bestimmtheitsmaß
RD	respiratory decrease
rel.	Relative
RIL	Recommended indoor level
R _t	Retentionszeit
s.	Siehe
spp.	Spezies
Tab.	Tabelle
TD	Thermodesorption
TLV	Threshold limit value
TNF	Tumornekrosefaktor
u.a.	unter anderem
UBA	Umweltbundesamt
v.a.	vor allem
VOC	volatile organic compounds
WHO	World Health Organisation
z.B.	zum Beispiel

1. Einleitung

1.1 Hintergrund

Nahezu 90% seines Lebens hält sich der Mensch in Industriestaaten in geschlossenen Räumen auf [Nilsson et al 2004]. Diese Tatsache verdeutlicht, warum die Innenraumluftqualität für die Gesundheit des Menschen einen hohen Stellenwert besitzt. Auf Grund vieler verschiedener Faktoren wird in der heutigen Zeit die Luftqualität und, als Folge davon, auch das menschliche Befinden beeinträchtigt. Diese Faktoren lassen sich in drei Kategorien unterteilen. Zur ersten Kategorie gehören physikalische Faktoren wie u.a. die Luftwechselrate, die Luftfeuchtigkeit, elektromagnetische Felder und Lärm. Zur zweiten Gruppe, den biologischen Faktoren, zählen neben Schimmelpilzen auch Hausstaubmilben, Bakterien und Haustiere, insbesondere Katzen. Die dritte Kategorie umfasst die chemischen Faktoren mit flüchtigen organischen Verbindungen (VOC, volatile organic compounds), Verbrennungsprodukten einschließlich Auto-Abgasen, Passivrauchen sowie Reizgasen und Fasern [Sagunski 1997, Keller und Groh 1998]. Seit einigen Jahren gewinnen Schimmelpilze und feuchte Räume in Bezug auf die Innenraumluftqualität und die gesundheitlichen Auswirkungen für die Bewohner immer mehr an Bedeutung [Senkpiel et al. 1996, Andriessen et al. 1998, Garrett et al. 1998, Wan und Li 1999, Koch et al. 2000, Ross et al. 2000, Kilpeläinen et al. 2001, Dharmage et al. 2002, Meklin et al. 2002, Bornehag 2004]. Schimmelpilze sind, was ihre Wachstumsbedingungen betrifft, relativ anspruchslos. Ein feuchtwarmes Klima und reichhaltige organische Substrate ermöglichen den meisten Schimmelpilzen ein intensives Wachstum. Die Bewohner befallener Wohnungen erkennen einen Schimmelpilzbefall entweder durch die schwarzen „Stockflecken“, die den Myzelien oder den Sporen der Pilze entsprechen, oder sie nehmen, meist schon bevor der Schimmelpilz sichtbar wird, einen erdigen, muffig-modrigen Geruch wahr. Dieser entsteht durch die Emission von flüchtigen Sekundärmetaboliten (Stoffwechselprodukten) der Schimmelpilze (**microbial volatile organic compounds, MVOC**). Diese MVOC werden als Indikatoren für einen verdeckten Schimmelpilzbefall betrachtet, da sie in der Raumluft nachgewiesen werden können, ehe der Schimmel sichtbar wird [Böck et al. 1998, Keller et al. 1998, Böck 2001, Keller 2002 a]. Die gesundheitlichen Auswirkungen auf den Menschen, die von den

in Innenräumen meist relativ niedrigen MVOC-Konzentrationen ausgehen, sind auf Grund mangelnder epidemiologischer und toxikologischer Daten nicht exakt festzulegen.

Inwieweit die MVOC in Zusammenhang zu einem bestimmten Raumnutzungsverhalten und baulichen Gegebenheiten der untersuchten Räume stehen, ist nicht ausreichend geklärt. Weiterhin existieren nur wenige Studien in schimmelpilzfreien Innenräumen, sodass Referenzwerte angeben bzw. ein schimmelpilzunabhängiges Referenzspektrum festzulegen nicht unproblematisch ist [Keller et al. 2004, 2006 und 2007, Schleibinger et al. 2008]

1.2 Studienvorstellung und Ziele

Der folgende Abschnitt beschreibt die Entstehung, den Ablauf und die Ziele der „Gießener Innenraumallergen Studie“ (im Folgenden **GINA**-Studie abgekürzt), die am Institut für Hygiene und Umweltmedizin des Universitätsklinikums Gießen und Marburg vom Sommer 2002 bis Sommer 2003 durchgeführt wurde. Die **GINA**-Studie erfolgte in Zusammenarbeit mit der Klinik für Kinder- und Jugendmedizin, insbesondere der pneumologischen Ambulanz unter damaliger Leitung von Herrn Prof. H. Lindemann.

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit dem Teilbereich der MVOC aus der o.g. Studie. Die übrigen Schwerpunkte wurden in zwei weiteren Promotionsvorhaben ausführlich erarbeitet.

In der wissenschaftlichen Literatur sind einige Studien sowohl zur Innenraumluftqualität als auch zu deren möglichen gesundheitlichen Auswirkungen auf den Menschen zu finden [Brunekreef et al. 1992, Brunekreef et al. 1994, Kauffman et al. 1994, Senkpiel et al. 1996, Andriessen et al. 1998, Garrett et al. 1998, Wan und Li 1998, Koch et al. 2000, Ross et al. 2000, Kilpeläinen et al. 2001, Dharmage et al. 2002, Meklin et al. 2002, Reinikainen und Jaakkola 2003, Bornehag et al. 2004]. Wegen des großen Aufwandes befassen sich jedoch die meisten Studien entweder ausschließlich mit der Bestimmung der biologischen und chemischen Parameter im Labor oder im Feldversuch [Larsen und Frisvad 1994, Fischer et al. 1999, Fiedler und Schütz 2001, Schleibinger et al. 2001] oder mit der Befragung von Bewohnern feuchter oder schimmelpilzbelasteter Wohnungen

hinsichtlich ihrer Beschwerden, ohne Messungen durchzuführen [Wan und Li 1999, Engvall 2002].

In der **GINA**-Studie wurden zum einen gesundheitlich relevante Innenraumluftparameter (Schimmelpilzsporenkonzentration, MVOC, Milbenantigen und Katzenantigen) bestimmt. Zum anderen wurden Kinder mit chronischen Atemwegserkrankungen (Asthma und rezidivierende Bronchialinfekte) und ihre Eltern ausführlich befragt.

Aufbau der GINA-Studie

1. Planungsphase

Die Vorbereitungen begannen im Winter 2000.

Die **GINA**-Studie sollte Informationen darüber geben, welche biologischen und chemischen Agenzien in der Innenraumluft von „normalen“ (ohne sichtbares Schimmelpilzwachstum) Wohnungen vorkommen, und ob diese Agenzien gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen, insbesondere auf Kinder mit chronischen Atemwegserkrankungen, haben können.

Zu den biologischen Agenzien zählten neben den Schimmelpilzsporen auch Antigene von Milben und Katzen im Matratzenstaub des Kinderbettes. Die von Schimmelpilzen gebildeten Stoffwechselprodukte (MVOC) gehörten zur Gruppe der chemischen Agenzien. In der **GINA**-Studie sollten, im Unterschied zu anderen MVOC-Innenraumstudien (anlassbezogene Messungen, Untersuchungsablauf gemäß der VDI-Richtlinie 4300-6), MVOC-Werte in schimmelpilzfreien Wohnungen erfasst werden. Zudem sollten neben den Schimmelpilzen als Primärquelle auch der Einfluss von Sekundärquellen auf die MVOC-Konzentrationen untersucht werden. Im Sommer 2001 wurden die für die Untersuchung erforderlichen Mess- und Befragungsinstrumente zusammengestellt und im Herbst 2001 Familien, die sich mit ihren Kindern im Rahmen einer jährlichen Routineuntersuchung in der pneumologischen Ambulanz der Kinderklinik Gießen vorstellten, um ihre Teilnahme an der Studie gebeten.

2. Durchführungsphase

Die Durchführungsphase der **GINA**-Studie begann im Mai 2002 mit der Wohnungsbegehung. Diese wurde von der Leiterin des Umweltlabors des Institutes

für Hygiene und Umweltmedizin in Gießen und einem der drei an der **GINA**-Studie arbeitenden Doktoranden durchgeführt. Es wurde zusammen mit den Bewohnern ein Begehungsprotokoll ausgefüllt, der Ablauf der Studie wurde umfassend besprochen und die schriftliche Einverständniserklärung eingeholt. Die Bewohner wurden darauf hingewiesen, dass sie ihren üblichen täglichen Ablauf weitestgehend beibehalten sollten. Bis zwei Tage vor der Messung durften die Kinderzimmer noch gereinigt werden. Am Abend vor der Messung sollten die Fenster entweder geschlossen bleiben oder gekippt stehen, die Türen zum Wohnbereich sollten während der ganzen Nacht geschlossen bleiben. Am Morgen des Messtages sollten sowohl die Fenster als auch die Türen vom Kinderzimmer geschlossen werden und bis nach der Messung geschlossen bleiben.

Die erste Messung fand im Juli 2002 statt. Der im Folgenden kurz beschriebene Ablauf wurde auch bei allen weiteren Messungen streng eingehalten. Zuerst wurden die MVOC-Proben im Kinderzimmer genommen, da der zeitliche Aufwand mit vier Stunden bei dieser Messung besonders groß war. Danach folgte die Messung der Schimmelpilzsporen in der Innenraumluft des Kinderzimmers. Im Anschluss daran erfolgte die Staubsammlung von der Matratze des Kinderbettes. Danach wurde das Kinderzimmer verlassen und die Schimmelpilzsporenmessung in der Außenluft vor dem Kinderzimmerfenster durchgeführt. Zu jeder durchgeführten Probenahme wurde das entsprechende Protokoll mit allen notwendigen Daten (Probandennummer, Probennummer, Temperatur und Luftfeuchtigkeit) ausgefüllt. Nach Beendigung aller Messungen fand ein Gespräch mit den Eltern und mit den Kindern statt, in welchem noch offene Fragen aus dem Fragebogen beantwortet werden konnten. Die Kinder aus der Gruppe der 4-7-jährigen konnten ihren Fragebogen im Interview beantworten.

Die zweite bis fünfte Messung fand im August 2002, November 2002, Februar 2003 und Mai 2003 statt.

3. Auswertungsphase

Mit dem Ende der letzten Messung begann im Juni 2003 die Auswertungsphase der Studie. Ergebnisse der **GINA**-Studie wurden bereits auf verschiedenen wissenschaftlichen Veranstaltungen präsentiert (s. Kap. 5.2).

Innerhalb dieser Dissertation wird im ersten Teil die Erarbeitung und Bewertung der Elutionsmethode zur Bestimmung der MVOC beschrieben. Im zweiten Teil wird die Rolle der MVOC im Innenraum bezogen auf Hauseigenschaften und das Raumnutzungsverhalten der Bewohner analysiert. Der dritte Teil der Dissertation befasst sich mit der Toxikologie der MVOC.

Alle Ergebnisse zu den MVOC beziehen sich auf den ersten Messzeitpunkt der **GINA**-Studie im Juni 2002.

1.3 Ergänzender Schwerpunkt: Toxikologie der MVOC

Die Frage nach der gesundheitlichen Relevanz von MVOC wird in der letzten Zeit immer häufiger diskutiert [Dewey et al. 1995, Herr et al. 1999, Böck 2001]. Auf Grund der wenigen Informationen über die MVOC bezogen auf ihre toxischen Wirkungen, ist deren umweltmedizinische Relevanz nur schwer abschätzbar [Herr und Harpel 2001]. Trotzdem werden die MVOC als mögliche Ursache unspezifischer Beschwerden wie Kopfschmerzen, Übelkeit, Konzentrationsschwäche sowie Ein- und Durchschlafstörungen vermutet. Ebenso werden sie als Auslöser von Schleimhautreizungen der oberen Atemwege und der Augen betrachtet [Herr und Harpel 2001, Keller 2002]. Zudem kann eine starke oder lang anhaltende Geruchsbelästigung, wie sie sehr oft beispielsweise von Anwohnern von Kompostierungsanlagen angegeben wird, mit psychosomatischen Störungen einhergehen [Schuschke 1996].

In Kapitel 2.2.4 und in Kapitel 7.4 wird ein Überblick über den Wissensstand zur Toxikologie der MVOC gegeben.

Auf Grund der Fülle der gesammelten Informationen, erlaubt die **GINA**-Studie weitere Schwerpunkte zu untersuchen, welche im Rahmen anderer Promotionsvorhaben ausgewertet werden:

1. Schwerpunkt Antigene von Milbe bzw. Katze: Rolle als Confounder, Zusammenhänge von Art der Matratze und ihrem Alter, Beschwerden der Bewohner bezüglich Allergie.

2. Schwerpunkt Schimmelpilze: Saisonale und regionale Verteilung, Hintergrundwerte, Beschwerden der Bewohner hinsichtlich Allergie und Atemwegserkrankung.

2. Herkunft, Beschreibung und Toxikologie der MVOC

2.1 Schimmelpilze

Schimmelpilze spielen durch ihre Beteiligung an der Zersetzung von organischem Material eine entscheidende Rolle im natürlichen Kohlenstoffkreislauf. Während dieser Zersetzungs Vorgänge und auch während ihrer Wachstumsphasen können Schimmelpilze eine Vielzahl von flüchtigen organischen Verbindungen bilden. Für diese Verbindungen wurde der Begriff MVOC geprägt [Innenraumlufthygienekommission; Schimmelpilz-Leitfaden 2002].

2.1.1 Ursachen des Schimmelpilzwachstums

Schimmelpilze sind, die Wachstumsbedingungen betreffend, relativ anspruchslos. Sie benötigen lediglich ein feuchtwarmes Klima, organisches Substrat als Nährstofflieferant, Wärme und ein neutrales bis leicht-saures pH-Millieu [Keller et al.1998, Böck 2001, Trautmann 2003]. Die nachfolgenden Erläuterungen zeigen die Probleme in Innenräumen auf, die zu Schimmelpilzbefall führen können.

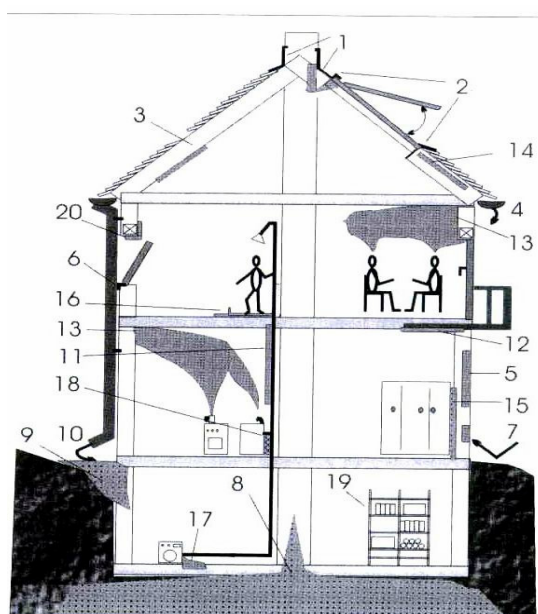
Vor etwa 30 Jahren (Juli 1976) wurde ein Gesetz der damaligen Bundesregierung verabschiedet, welches zum Zweck der Energieeinsparung erlassen wurde: das Energieeinsparungsgesetz [EnEG 1976]. Während der darauf folgenden Jahre wurde das Gesetz mehrfach überarbeitet. Als aktuelle Vorlage der Bundesregierung zur Energieeinsparung dient seit 2002 die Energieeinsparverordnung, die aus der Fusion der Wärmeschutzverordnung und der Heizungsanlagen-Verordnung entstand. Kernaussage aller genannten Gesetze und Verordnungen ist die Forderung nach einer hohen Wärmedämmung und Dichtigkeit von Gebäuden, um Energie zu sparen und die CO₂-Emissionen zu senken [EnEG 1976, Wärmeschutzverordnung 1994, Energieeinsparverordnung (EnEV) 2002].

Dichtigkeit und vollständige Dämmung von Gebäuden bewirken aber auch, dass die relative Luftfeuchtigkeit in Innenräumen ansteigt, da der so genannte natürliche Luftwechsel entfällt [Keller und Groh 1998, Sönnichsen und Keller 1998]. Nur die

aktive Belüftung der Innenräume durch die Bewohner kann demnach eine hygienisch akzeptable Luftqualität gewährleisten und die durch alltägliche Nutzung anfallende Feuchtigkeit nach außen transportieren. Tatsächlich werden die Innenräume meist nicht genug belüftet, d.h. ein ausreichender Luftwechsel zur Reduktion überschüssiger Feuchtigkeit erfolgt nicht [Keller und Groh 1998, Keller 2002 a].

Unzureichende Belüftung gilt als eine der Hauptursachen von Schimmelpilzbildung [Keller und Groh 1998, BBI Lassl 2000]. Hinzu kommt eine überhöhte Feuchtigkeit der Innenräume, besonders der Wände, auf Grund baulicher Mängel und dem Fehlverhalten der Bewohner (s. Abb. 1). Zu den baulichen Mängeln zählen (baubedingte) Wasserschäden (beispielsweise durch defekte Rinnen und Drainageleitungen), ungenügende Bauaustrocknung, mangelnde Dampfdiffusion von Baustoffen oder Kondenswasserbildung durch fehlende Dämmung der Außenwände [Meier 2002, Trautmann 2003].

Das Wachstum der Schimmelpilze auf einem Untergrund bzw. Substrat und ihre Fähigkeit zur Sporen- und Mykotoxinbildung hängen jedoch weniger vom absoluten Feuchtigkeitsgehalt des Substrates ab, sondern vom Gehalt an frei verfügbarem Wasser, welcher über den a_w -Wert (Wasseraktivität) definiert wird [Innenraumlufthygienekommission; Schimmelpilz-Leitfaden 2002, Lorenz 2005].



1. Anschlussfolien am Schornstein
2. Anschlussfolien am Dachfenster
3. Leckagen
4. Regenrinnen
5. Dichte Verputzung
6. Intakte Gesims- und Fensterbleche
7. Spritzwasser
- 8./9. Ausreichende vertikale und horizontale Abdichtung
10. Regenwasser
11. Kaltwasserleitungen
12. Stahlträger (Wärmebrücken)
13. Xel Bereich (Wärmebrücke)
14. Auskondensation an Dämmschicht
15. Auskondensation hinter Mobilier
16. Mangelnde Fußbodenabdichtung
17. Leckagen, Havarien
18. Haarrisse in Wasserleitungen
19. Lagerung von Gegenständen
20. Abgekühlter Fenstersturz

Abbildung 1: Ursachen von überhöhter Feuchtigkeit in Innenräumen

Quelle: Trautmann 2003

Für die meisten Schimmelpilze liegt der minimale a_w -Wert bei 0,80-0,85, der optimale Bereich bei 0,95-0,98 (z.B. *Aspergillus* spp. und *Penicillium* spp.) [Mücke und Lemmen 1999]. Ein weiterer wichtiger Faktor, den Schimmelpilze zum optimalen Wachstum benötigen, ist Wärme. Die Schimmelpilze werden je nach bevorzugtem Temperaturbereich wie folgt eingeteilt:

Mesophile Schimmelpilze: Bereich von 0-40 °C, Optimum 25-35 °C

Thermotolerante Schimmelpilze: Bereich 0-50 °C, Optimum 30-40 °C

Thermophile Schimmelpilze: Bereich 20-60 °C, Optimum 35-55 °C [Mücke und Lemmen 1999].

2.1.2 Häufige Schimmelpilzgattungen

Es werden im folgenden Abschnitt aus dem großen Spektrum der Schimmelpilze nur diejenigen vorgestellt, die für die **GINA**-Studie vornehmlich von Bedeutung waren, da sie im Innenraum am häufigsten gefunden werden und als Allergene eine wesentliche Rolle spielen (s. Tab. 1) [Larsen 1994, Seidl et al. 2005].

Tabelle 1: Beschreibung studienrelevanter Schimmelpilzgattungen

Name	Klasse (Familie) ¹	Morphologie ^{1,2}	Vorkommen ^{1,2}	Wichtigste Sekundärmetaboliten ^{4,5,6}	Besondere Merkmale und Bedeutung ^{3,2}
<i>Aspergillus</i> spp.	Deuteromycota	Septierte Hyphen mit Y-förmigen Verzweigungen; Konidien blaugrün bis schwarz gefärbt;	ca. 150 Arten bekannt; ubiquitärer Bewohner des Erdbodens; hauptsächlich warme Klimazonen	3-Methyl-1-butanol, 1-Okten-3-ol, 3-Okтанон, R-(+)-Limonen, 3-Okтанол, 2-Methyl-1-propanol, 2-Heptanon	Mykotoxinproduktion mancher sp.; Infektionen (BPA); Allergieauslöser (Asp f I-Major-Allergen)
<i>Penicillium</i> spp.	Deuteromycota	Wenig/nicht pigmentierte Hyphen; Konidien grün gefärbt	ubiquitärer Bodenbewohner der kühlen und gemäßigten Klimazonen; Lebensmittelverderber	2-Ethylfuran, 3-Methyl-1-butanol, 1-Okten-3-ol, R-(+)-Limonen, Geosmin, Dimethyldisulfid, 2-Methyl-1-propanol, 3-Okтанон,	Mykotoxinproduktion mancher sp.; Antibiotika; Allergieauslöser; selten Mykosen
<i>Cladosporium</i> spp.	Deuteromycota (Schwärzepilze)	Dunkel-samtige Konidien	häufigster Vertreter in der europäischen Luftflora, weltweites Vorkommen auf organischem Material	2-Methyl-1-propanol, 3-Methyl-1-butanol, Dimethyldisulfid, 1-Okten-3-ol, 2-Methyl-1-butanol	Allergieauslöser (Cl a h I-Major-Allergen) allerdings seltener als <i>Alternaria</i>
<i>Alternaria</i> spp.	Deuteromycota	Hyphen braunschwarz;	ca. 40 bekannte Arten; feuchtigkeitsliebend Lebensmittelverderber (Faulstellen an Obst und Gemüse)	2-Methyl-1-propanol, 3-Methyl-1-butanol, 2-Methyl-1-butanol, 1-Okten-3-ol, 3-Okтанон	Allergieauslöser (Alt a I-Major-Allergen)
<i>Rhizopus</i> spp./ <i>Mucor</i> spp.	Mucorales (Köpfchenschimmel)	Hyphen dickwandig und nicht septiert; Myzel hochwachsend, weiß bis braun, wollig	ubiquitär, häufig auf zerfallendem, organischem Pflanzenmaterial		Typische Opportunisten, die bei immungeschwächten Menschen Mykosen verursachen können, hohe Affinität zu Gefäßen; Thrombenbildung

Quelle: Mücke und Lemmen 1999¹; Kayser 1998²; Larsen 1994³; Fischer et al. 1999⁴, Fiedler und Schütz 2001⁵, Böck et al. 1998⁶

2.1.3 Schimmelpilze als Krankheitsauslöser

Schimmelpilze können durch ihre allergisierenden und toxischen Eigenschaften gesundheitsschädlich auf den Menschen wirken [Dewey et al.1995, Keller 2000].

In der Regel geht von den ubiquitär vorkommenden Schimmelpilzen für den gesunden und immunkompetenten Menschen keine Gefahr aus. Ist aber das Abwehrsystem z.B. durch HIV-Infektion, Autoimmunerkrankungen, Diabetes mellitus, Lungenerkrankungen, Malignome oder nach Organtransplantationen geschwächt, können Schimmelpilze eine Gesundheitsgefahr darstellen. Gleiches gilt, wenn die Konzentration von Pilzbestandteilen in der den Menschen umgebenden Luft z.B. in der Abfall- und Getreidewirtschaft stark erhöht ist [Mücke und Lemmen 1999].

Man unterscheidet allergische Reaktionen, Mykosen (Infektionen) und Mykotoxikosen (Vergiftungen). Ob und inwieweit auch MVOC Krankheitserscheinungen beim Menschen hervorrufen, kann zurzeit noch nicht eindeutig belegt werden. Allerdings geben Bewohner, die in schimmelpilzbelasteten Wohnungen leben, sehr häufig unspezifische Symptome wie Kopfschmerzen, Abgeschlagenheit, Müdigkeit sowie Schleimhautreizungen an. Möglicherweise besteht hier ein Zusammenhang zwischen diesen Beschwerden und den von Schimmelpilzen abgegebenen flüchtigen Substanzen [Böck 2001]. Auf die Toxikologie der MVOC wird im Kapitel 2.2.4 ausführlich eingegangen.

Allergien

Die von Schimmelpilzen gebildeten Allergene sind entweder ein Bestandteil der Zellwand der Pilze oder werden von ihnen als Sekretionsprodukte abgegeben. Biochemisch gesehen sind es wasserlösliche Glykoproteine, von denen einige Enzymcharakter aufweisen [Sagunski 1997, Engelhart 2002]. Schimmelpilze können allergische Reaktionen vom Typ I, Typ III und auch die Kombinationsform (Typ I und Typ III) nach Coombs und Gell auslösen. Die Typ I-Allergie ist typischerweise IgE vermittelt und löst Erkrankungen wie Heuschnupfen und Asthma bronchiale allergischer Genese aus. Typ III-Reaktionen sind demgegenüber IgG vermittelt. Ein wichtiges Krankheitsbild ist die „Exogen Allergische Alveolitis“ **EAA** (Farmerlunge, Hypersensitivitätspneumonie) [Herr et al. 1999, Behrendt und Lemmen 2004]. Die allergene Wirkung von Schimmelpilzen ist allerdings von bestimmten Faktoren abhängig. Dazu zählen die genetische Disposition des Menschen, der Zustand, d.h.

die Membranfunktion der jeweiligen Haut und Schleimhaut, die Allergendosis pro Fläche und das allergene Potential der Schimmelpilzart [Gabrio et al. 2002].

Mykosen (Infektionen mit Schimmelpilzen)

Von den ca. 250000 bekannten Pilzarten spielen bei der Entstehung menschlicher Pilzinfektionen nur etwa 100 Pilzarten eine Rolle. Damit eine Infektion entstehen kann, muss der menschliche Organismus zunächst in Kontakt mit dem Erreger kommen. Die Art und die Dauer des Kontaktes (Infektionsweg und Expositionsgrad) entscheiden dann über den Schweregrad der Erkrankung [Quadripur 1996]. Je nach Infektionsweg unterteilt man die Mykosen in diejenigen, die durch Inhalation entstehen (z.B. Aspergillosen und Mucormykosen) und diejenigen, die durch eine externe Infektion verursacht werden (z.B. Onychomykosen, Otomykose und Chromomykose) [Mücke, Lemmen 1999]. Mykosen spielen v.a. eine Rolle bei immungeschwächten Menschen [Sagunski 1997, Gabrio et al. 2002, Behrendt und Lemmen 2004].

Mykotoxikosen

Als Mykotoxine bezeichnet man giftige Stoffwechselprodukte von imperfekten Pilzen und Ascomyceten, zu denen u.a. die *Penicillium* spp. *Aspergillus* spp. und *Cladosporium* spp. zählen. Die Bildung von Mykotoxinen wird neben dem Nährstoffangebot auch durch physikalische Faktoren (Temperatur, Substratwassergehalt, Feuchtigkeit und pH-Wert etc.) beeinflusst. Jeder Pilzstamm benötigt individuelle Bedingungen für die Bildung von Mykotoxinen. Diese Bedingungen müssen nicht unbedingt mit den optimalen Wachstumsbedingungen übereinstimmen [Mücke und Lemmen 1999]. Das toxische Wirkungsspektrum von Mykotoxinen erstreckt sich von Hautreizungen über schwere Organschädigungen bis zur Kanzerogenese.

Zu den wichtigsten Vertretern gehören die Trichothecene, insbesondere das von Fusarien gebildete T-2-Toxin, das die „alimentäre toxische Aleuki“ auslöst und das von einigen Penicilliengattungen gebildete Ochratoxin A, welches für die „Balkan-Nephropathie“ verantwortlich ist [Mücke und Lemmen 1999, Sagunski 1997]. Weiterhin wird ein möglicher Zusammenhang zwischen Aflatoxin B1 und dem Auftreten eines primären Leberkarzinoms, welches bevorzugt in Afrika und Südostasien vorkommt, diskutiert [Kayser 1998, Mücke und Lemmen 1999].

Außerdem werden den Mykotoxinen immunsuppressive Eigenschaften zugeschrieben, wie die Induktion der Apoptose in Zellen lymphoider Organe und eine Reduktion der Zytokinfreisetzung [Herbarth et al. 2002].

Eine weitere toxische Wirkung, die von Schimmelpilzen ausgeht, ist eine immuntoxische Wirkung durch Zellwandbestandteile wie das beta-1,3-Glucan. Glucane besitzen eine entzündungsfördernde Wirkung auf Haut und Schleimhaut [Sagunski 1997, Herr et al. 1999, Gabrio et al. 2002].

2.2 Flüchtige Sekundärmetabolite der Schimmelpilze (MVOC)

2.2.1 Bildung und chemische Klassifikation der MVOC

Flüchtige organische Substanzen mikrobieller Herkunft, MVOC, entstehen beim Abbau komplexer organischer Verbindungen durch Schimmelpilze [Wessen und Schoeps 1996]. Man findet diese organischen Verbindungen zahlreich in Häusern und Wohnungen. Dazu zählen u.a. Holz, Spanplatten, Papier, Pappe, Gipskarton, Tapeten und Tapetenkleister, Kunststoffe, Teppichböden und Leder. Zusätzlich können Baustoffe wie Zement und Beton Nährstoffe für Schimmelpilze beinhalten. Auch Materialien, die selbst keine Nährstoffe abgeben, können als Nährstofflieferant dienen, wenn sich organische Partikel aus der Luft auf ihnen abgesetzt haben [Innenraumlufthygienekommission; Schimmelpilz-Leitfaden 2002]. Werden diese organischen Materialien durch Schimmelpilze metabolisch umgewandelt, entstehen eine Reihe, zu den MVOC zählenden, flüchtigen Substanzen (s. Abb. 2, fett gedruckt: typische MVOC) [Sagunski 1997, Innenraumlufthygienekommission; Schimmelpilz-Leitfaden 2002].

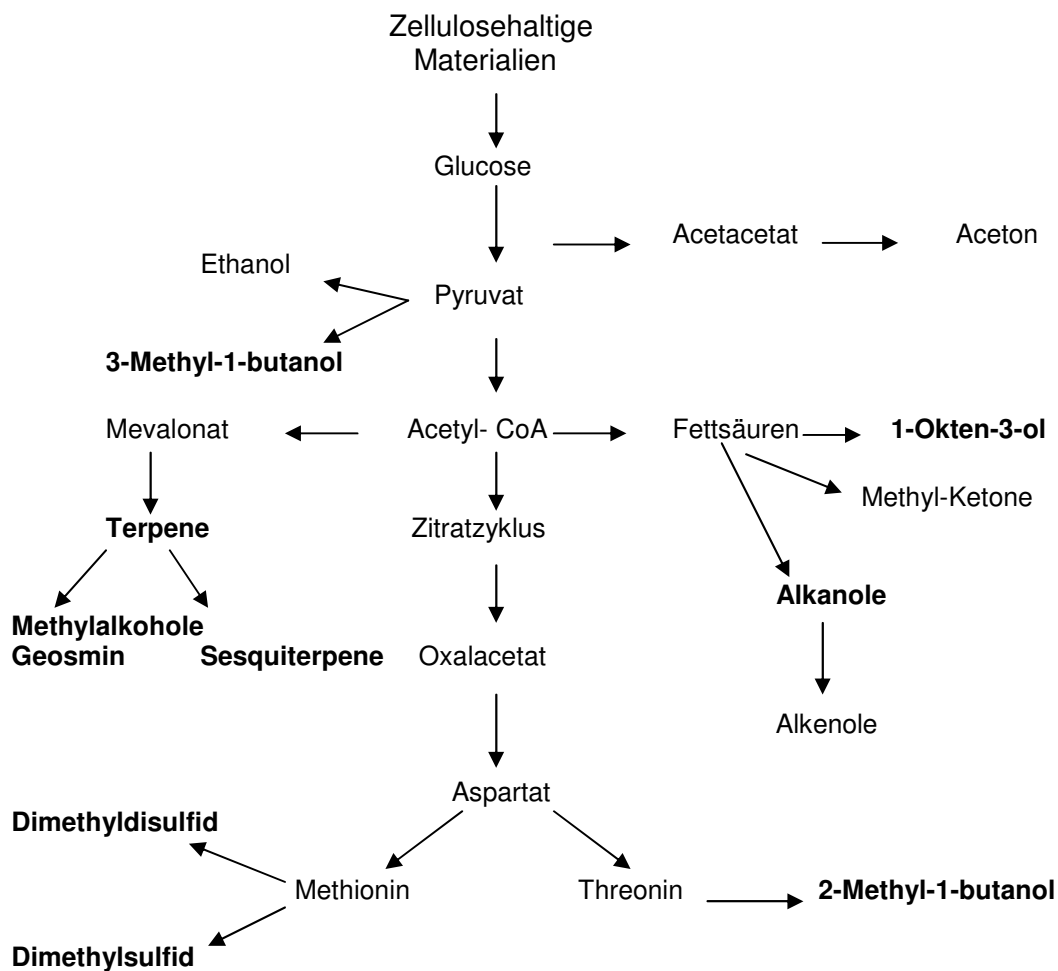


Abbildung 2: Entstehung einiger MVOC

Quelle: Fiedler und Schütz 2001

Chemisch gesehen können die MVOC verschiedenen Stoffklassen zugeordnet werden, u.a. zu Alkoholen, Aldehyden, Ketonen, Aromaten, Terpenen, Ester, Ether und schwefelhaltigen Verbindungen [Barre et al. 1998, Sönnichsen und Keller 1998, Fischer et al. 1999, Innenraumlufthygienekommission; Schimmelpilz-Leitfaden 2002].

Fischer et al. [1999] untersuchten eine Kompostierungsanlage auf ihre Schimmelpilzbelastung. Die aus der Luft isolierten Arten, zu denen u.a. *Aspergillus* spp. und *Penicillium* spp. zählten, wurden auf Nährmedien kultiviert. Anschließend wurde ein geschlossenes System erzeugt und die Luft oberhalb der Schimmelpilzkulturen auf ein Tenax[®]-röhrchen adsorbiert, um die gebildeten MVOC zu analysieren. Dabei konnten mehr als 100 Stoffen nachgewiesen werden. Einige

Stoffe wurden von fast allen Schimmelpilzarten gebildet, andere wiederum nur von sehr wenigen Arten.

Schleibinger et al. [2001] untersuchten die MVOC-Bildung im Labor und in Feldversuchen. Bei den Laborversuchen wurde insbesondere die Abhängigkeit der MVOC-Bildung vom Substrat (5 verschiedene Baumaterialien) untersucht. Dabei konnten die speziell ausgewählten MVOC je nach Substrat entweder überhaupt nicht gemessen werden oder wurden in unterschiedlich großen Konzentrationen gefunden.

Fiedler und Schütz [2001] versuchten weitere Faktoren zu finden, die die MVOC-Bildung beeinflussen. Sie untersuchten *Aspergillus* spp., *Trichoderma* spp., sowie *Penicillium expansum* und *Cladosporium herbarum*. Als Nährmedien dienten verschiedene Agar- und Holzarten. Es zeigte sich, dass die Bildung von MVOC einerseits sehr stark vom Substrat, zusätzlich aber auch vom Alter der Pilzkultur abhing. Am Beispiel der Schimmelspezies *Penicillium expansum*, die über einen Zeitraum von 52 Tagen beobachtet wurde, konnte eine Abhängigkeit des MVOC-Spektrums zum Alter der Pilzkultur beschrieben werden. So bildete die junge Pilzkultur von *Penicillium expansum* vorwiegend Geosmin und Furane, ältere Pilzkulturen hingegen emittierten aliphatische Ether und Schwefelverbindungen.

Die Produktion bestimmter MVOC erlaubt also erste Rückschlüsse auf die Schimmelpilzarten und auf die Wachstumsphase, in der sich die Pilze befinden [Sönnichsen und Keller 1998, Fiedler und Schütz 2001]. Dabei muss grundsätzlich beachtet werden, dass die MVOC-Produktion der verschiedenen Schimmelpilzarten von Faktoren wie u.a. Temperatur, Substrat und Wassergehalt des Substrates abhängt [Böck 2001, Fiedler und Schütz 2001].

Die MVOC-Substanzen werden zur Bewertung von MVOC-Proben aus Innenräumen in Haupt- und Nebenindikatoren eingeteilt. Diese Zuordnung wird seit einigen Jahren kontrovers diskutiert. Auf Grund verschiedener Studien liegen unterschiedliche Einordnungen in Haupt- und Nebenindikatoren vor [Lorenz 2001, Innenraumlufthygienekommission; Schimmelpilz-Leitfaden 2002, Keller 2004]. In Tabelle 2 finden sich die zurzeit aktuellen Hauptindikatoren. Die Alkohole 1-Butanol und 2-Methyl-1-propanol sind nur als Nebenindikatoren zu behandeln, da für beide Stoffe andere Quellen gut bekannt sind [Dewey et al. 1995]. Ebenso werden 2-Methyl-1-butanol, 3-Methyl-1-butanol, 3-Oktanol, 3-Oktanon, 1-Dekanol und 2-Heptanon den Nebenindikatoren zugeordnet [Keller 2004].

Tabelle 2: MVOC-Hauptindikatoren

Keller	Hauptindikatoren Innenraumlufthygiene- kommission	Lorenz
Dimethylsulfid Dimethyldisulfid DMSO 2-Methylfuran 3-Methylfuran 1-Okten-3-ol 2-Pentanol 3-Oktanon 2-Methylisoborneol	Dimethyldisulfid 3-Methylfuran 1-Okten-3-ol 3-Oktanon	Dimethyldisulfid 3-Methylfuran 1-Okten-3-ol

Quelle: Keller et al. 2004

2.2.2 Quellen für MVOC

Neben den Schimmelpilzen als Primärquelle können auch flüchtige Substanzen von Pflanzen, Einrichtungsgegenständen und Baumaterialien abgegeben werden, die ebenfalls zu den MVOC zählen. Sie werden allerdings dann als VOC (volatile organic compounds) bezeichnet und der Entstehungsort als so genannte Sekundärquelle für MVOC. So beinhalten beispielsweise Biofarben Terpene wie Limonen oder Pinen. In Klebstoffen sind häufig Ketone enthalten. Reinigungs- und Desinfektionsmittel bestehen in der Regel aus Alkoholen [Biomess 2001]. Eine wichtige Sekundärquelle für die Verbindungen 2-Methylfuran und 3-Methylfuran ist der Zigarettenrauch [Laußmann et al. 2002, Schleibinger 2004 a und 2008]. Die Abbildung 3 gibt einen Überblick über die komplexen Zusammenhänge bei der Entstehung von MVOC. Die mittlere Achse „Feuchtigkeit-Schimmelpilzbildung-MVOC“ zeigt den Weg der MVOC-Bildung durch die Primärquelle. Jeder der auf diese Achse eingreifenden Parameter trägt entweder direkt oder indirekt zur MVOC-Bildung bei.

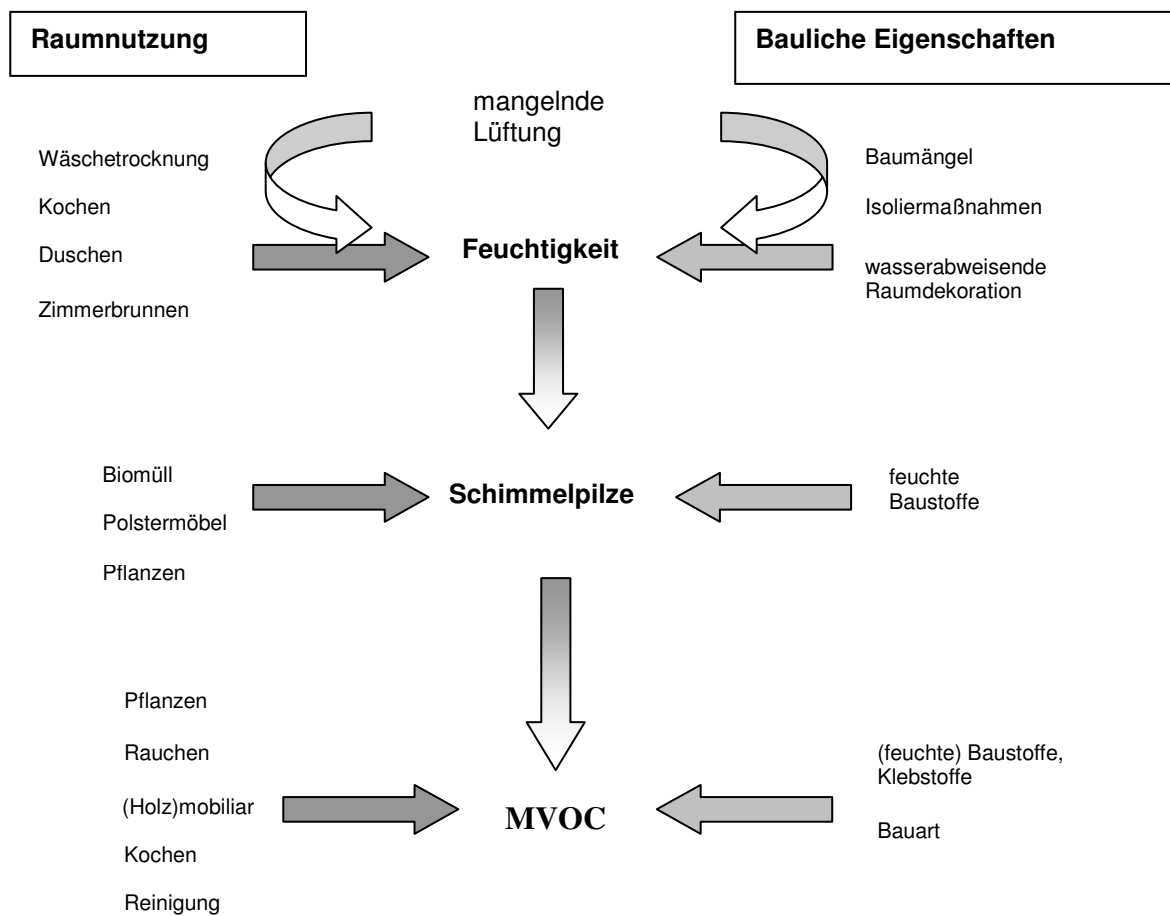


Abbildung 3: Einflussfaktoren auf die MVOC-Bildung

Da diese VOC heute in nahezu jeder Wohnung gemessen werden können, ist eine genaue Differenzierung von VOC und MVOC erforderlich, um sicher auf eine Schimmelpilzquelle als Verursacher erhöhter MVOC-Werte schließen zu können. In Tabelle 3 ist ein Überblick über mögliche MVOC-Sekundärquellen im Innenraum dargestellt, die bei der Bewertung von Innenraumlufthproben immer bedacht werden sollten [Keller 2002].

Tabelle 3: Sekundärquellen für MVOC

MVOC	Quelle	Publikation
1-Butanol	Apfel, Parfüm, Klebstoffe	1,5
2-Methyl-1-propanol	Kamille, Farben, Lacke, Riechstoffe, Lösungsmittel	1,2
2-Pentanol	Apfel, Farben, Lacke, Lösungsmittel	1,2
3-Methyl-1-butanol	Kamille, Hibiskus, Lacke, Lösungsmittel, Backen	1,2,8
2-Methyl-1-butanol	Lacke, Lösungsmittel	2
1-Okten-3-ol	Minze, Oregano, Thymian, Lavendel, Melisse, Seefisch	1,2
2-Okten-1-ol	Apfel, Cognac, Rum, schwarzer Tee, Pilze	1
3-Oktanol	Minze, Oregano, Thymian, Lavendel	1
1-Dekanol	Cremebestandteil, Salbenbestandteil, Parfüm	2
2-Butanon	Pfeffer, Tomate, Lösungsmittel, Klebstoffe, Reinigungsmittel	1,3,4
2-Hexanon	Pfeffer, Lösungsmittel, Harze, Öle, Farben	1, 4
2-Heptanon	Pfeffer, Sauerkirsche, Butterfett, Lacke, Lösungsmittel	1,2
Ethylisobutyrat	Ananas, Apfel, Spearminze	1
Isobutylacetat	Ananas, Apfel, Melone, Rosmarin, Kakao	1
Dimethylsulfid	Kohlrabi, Zwiebeln, Knoblauch, Kartoffeln, Porree gekocht, Schnittlauch	1,2
Dimethyldisulfid	Kohlrabi, Zwiebeln, Knoblauch, Aromastoffe (Bier, Kaffee, Kohl)	1,2
Dimethylsulfoxid	Pfefferminze, Spearminze, Beschichtungsstoffe	1,2
2-/3-Methylfuran	Zigarettenrauch	6,7
2-Methyl-isoborneol	Weihrauchpflanze, Salbei, Rosmarin, Pinien, Kaffeearoma	1,2
Beta-Farnesen	Orange, Weihrauchpflanze, Apfel, Kamille	1
Terpene (Limonen, Pinen)	Biofarben, Duftöle (Fichtennadelöl, Terpentinöl u.a.), Biokleber, Zitrusfrüchte, Holzlasuren	3

Abgeleitet nach Duke 2002¹, Keller 2001/2², DFG 2003a/b³, NIEHS 2002⁴, IPCS (EHC) 2002⁵, Schleibinger et al. 2004 a⁶, Laußmann et al. 2002⁷, Lorenz und Mehrer 2004⁸

Ein wichtiges Unterscheidungskriterium ist v.a. die Konzentration der gemessenen Substanzen in Innenräumen. MVOC werden im Bereich von ng/m³ bis ca. 10 µg/m³ gefunden. Im Gegensatz dazu werden die VOC meist in Konzentrationsbereichen von mg/m³ gemessen [Keller 2002, DFG 1972-2003].

2.2.3 Grenzen und Möglichkeiten der MVOC-Messung

Bei Verdacht auf Schimmelpilzbefall wird üblicherweise eine Messung von Schimmelpilzsporen in der Raumluft im Vergleich zur Außenluft durchgeführt.

Die Sporenbestimmung hängt jedoch von verschiedenen Umwelteinflüssen ab. So hat die Jahreszeit einen erheblichen Einfluss auf die Messwerte, ebenso wie die

Sporulationsphase der Pilze und auch die Innenraumbedingungen [Dewey et al 1995, Kerkmann 2002]. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Pilzsporenkonzentration in der Innenraumluft meist erst erhöht ist, wenn das Schimmelpilzwachstum bereits fortgeschritten, bzw. sichtbar an offenen Oberflächen ist [Keller et al. 1998, Lorenz und Mehrer 2004]. Allerdings zeigten sich auch in solchen eindeutigen Fällen bereits negative Befunde in der Luftkeimmessung, weshalb nach einer Alternativmethode bzw. zusätzlichen Methode zur Schimmelpilzdetektion gesucht wurde [Lorenz und Mehrer 2004, Lorenz 2005].

Gerade bei negativen Befunden der Luftkeimmessung und vorhandenen Beschwerden der Bewohner scheint der große Vorteil bei der MVOC-Messung zu liegen, denn die Stoffwechselprodukte der Schimmelpilze können schon bei verdecktem, also noch nicht sichtbarem Pilzbefall in der Raumluft nachgewiesen werden. Die MVOC gelten demnach als Indikatoren für einen verdeckten Schimmelpilzbefall [Keller et al 1998, Keller 2000, Böck 2001, Innenraumlufthygienekommission; Schimmelpilz-Leitfaden 2002, Keller 2004, Lorenz und Mehrer 2004].

Kontrovers hierzu zeigte Schleibinger et al. [2004 a] in einer Untersuchung, dass die MVOC möglicherweise nicht als geeignete Indikatoren zur Früherkennung von Schimmelpilzbefall herangezogen werden können, da ein statistisch eindeutiger Zusammenhang zwischen den gebildeten MVOC und einem Schimmelpilzbefall nicht dargestellt werden konnte. Andere Einflussfaktoren (Feuchtigkeit) bzw. Quellen (Zigarettenrauch) für MVOC hingegen korrelierten signifikant mit erhöhten MVOC-Konzentrationen. Ebenso beschrieben Reinhardt-Benitez und Mergner [2002], dass von ihnen durch MVOC-Messungen erhobene Befunde zu widersprüchlichen Ergebnissen führten. So konnte beispielsweise trotz deutlich erhöhter Raumluftwerte für untersuchte Hauptindikatoren kein Feuchteschaden mit mikrobiellem Befall diagnostiziert werden.

Beim Vergleich der beiden unterschiedlichen Untersuchungsverfahren liegen die Vorteile bzgl. der Durchführung und den Kosten bei der Pilzsporenmessung, da insbesondere der Materialaufwand hier geringer ausfällt. Zudem erfordert die Bewertung der MVOC-Proben sehr viel Erfahrung und Kenntnisse, insbesondere über mögliche Sekundärquellen.

Zum Nachweis von MVOC werden zurzeit zwei analytische Verfahren angewendet. Bei der Aktivkohle-Elutionsmethode (AK) wird die zu untersuchende Raumluft in ein

mit Aktivkohle gefülltes Röhrchen gesaugt. Die so adsorbierten MVOC werden im Labor mit Hilfe eines Lösungsmittels von der Aktivkohle in Lösung gebracht (eluiert) und dann über ein System von Gaschromatograph (GC) und Massenspektrometer (MS) detektiert und ausgewertet. Bei dieser Methode ist ein großes Probenahmenvolumen bis zu mehreren hundert Litern zur Aufkonzentration erforderlich, um die niedrigen Nachweisgrenzen zu erreichen. Dies geschieht durch sehr lange Probennahmedauer. Vorteil bei dieser Methode ist die einfache Handhabung für den Analytiker und die Möglichkeit der Durchführung von Mehrfachanalysen der Proben [Ström et al. 1994, Institut Fresenius 2004, Keller 2002].

Mit der zweiten Methode, der Thermodesorptionsmethode (TD), wird die Luftprobe in ein Röhrchen gesaugt, welches Tenax[®] als Adsorbens enthält. Die Probenaufbereitung (Elution) entfällt, die gesamte Probe kann mit Hilfe der thermischen Desorption direkt in das GC-MS-System gegeben werden. Diese Methode benötigt im Vergleich zur Elutionsmethode ein wesentlich geringeres Luftvolumen [Keller 2002, Müller et al. 2003]. Hinsichtlich der Nachweis- und Bestimmungsgrenzen liegen bei beiden Methoden sehr verschiedene Angaben vor (s. Tab. 4).

In einer Studie von Fischer et al [2005] wurde untersucht, inwieweit die beiden Methoden zur MVOC-Bestimmung vergleichbare Ergebnisse liefern. So wurden reale Proben aus Innenräumen in vier verschiedenen Laboratorien mit den beiden Methoden parallel ausgewertet. Zusätzlich wurden mit Prüfgas beaufschlagte MVOC-Proben untersucht und die nachgewiesenen Konzentrationen der MVOC miteinander verglichen. Die Ergebnisse zeigten, dass mit den unterschiedlichen Methoden stark abweichende MVOC-Messwerte erhalten wurden.

Tabelle 4: Vergleich der Bestimmungsgrenzen bei verschiedenen MVOC-Messmethoden

	Bestimmungsgrenzen (ng/m ³)		
	Fischer (TD)	Keller (TD)	Institut Fresenius (AK)
Dimethylsulfid	100	4	
2-Methylfuran	100	29	
3-Methyl-1-butanol	100	29	217
2-Methyl-1-butanol	100	27	200
Dimethyldisulfid	100	11	317
Dimethylsulfoxid		12	
Dimethyltrisulfid			
2-Heptanon	100	16	250
1-Okten-3-ol	100	8	217
3-Oktanon	100	26	183
2-Ethylfuran			
R-(+)-Limonen			
α-Pinen			
2-Pentylfuran	100		
3-Oktanol	100	13	183
endo-Borneol	100	19	
Geosmin	100		
2-Okten-1-ol			
2-Isopropyl-methoxypyrazin			
3-Methylfuran		16	483
2-Methylpropanol		27	200
2-Pentanol		27	217
2-Hexanon			217
1-Dekanol		36	300

Quelle: Fischer 2004, Keller 2002, Institut Fresenius 2004

2.2.4 Toxikologie der MVOC

Von Bewohnern feuchter und verschimmelter Wohnungen werden oft unspezifische Symptome wie Kopfschmerzen und Müdigkeit, aber auch Schleimhautreizungen der Augen und Nase sowie asthmatische Beschwerden angegeben. Als mögliche Ursache hierfür werden die MVOC diskutiert [Böck 2001, Herr und Harpel 2001].

Zur Toxizität der MVOC stehen bislang nur sehr wenig Daten zur Verfügung. Für einige MVOC existieren MAK-Werte und Untersuchungsergebnisse an exponierten Probanden.

2.2.4.1 *In vitro*-Studien zur Zytotoxizität, Mutagenität und Freisetzung von Entzündungsmediatoren

Seidel und Plappert [1999] testeten *in vitro* 1-Okten-3-ol und 3-Methyl-1-butanol auf ihre Genotoxizität im Comet-Assay mit humanen Blutzellen. Dabei fiel 1-Okten-3-ol als genotoxisch auf. Zusätzlich wurde die Zytotoxizität in V79-Zellen aus Hamsterlungen für beide Stoffe bestimmt. Dabei war 1-Okten-3-ol ab 100 µg/ml zellschädigend, absolut zytotoxisch wirkte diese Substanz ab einer Konzentration von 300 µg/ml. 3-Methyl-1-butanol reagierte ab 700 µg/ml absolut zytotoxisch.

Weiterhin untersuchten Kreja und Seidel [2001] *in vitro* einzelne ausgewählte flüchtige Substanzen. Die Zytotoxizität wurde im Kolonie-, MTT- und MB-Assay mit A549-Zellen bestimmt. Die Untersuchungen zur Mutagenität testeten DNA-Schäden im Comet-Assay mit A549-Zellen. Die Klastogenität wurde mit Hilfe des Mikronukleolus-Tests in V79-Zellen ermittelt. Die Entstehung von Genmutationen wurde im HPRT-Test mit V79-Zellen geprüft. Zu den eingesetzten MVOC zählten die Alkohole 1-Dekanol, 1-Okten-3-ol, 3-Oktanol und 2/3-Methyl-1-butanol, weiterhin die Ketone 3-Oktanon, 2-Hexanon und 2-Pentanon und die Schwefelverbindung Dimethylsulfoxid (DMSO). Bei den Versuchen konnte für keine der untersuchten Stoffe eine genotoxische und mutagene Wirkung festgestellt werden; auch nicht für das 1999 im Comet-Assay positiv getestete 1-Okten-3-ol. Die zellschädigende Wirkung war für alle MVOC geringer als die der eingesetzten Kontrollsubstanzen (MMS als alkylierende Substanz, Formaldehyd und das Mykotoxin Gliotoxin). Als einzige Substanz konnte für 1-Dekanol eine zytotoxische Wirkung nachgewiesen werden, die ungefähr im Bereich von MMS und Formaldehyd lag. Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass die *in vitro*-Versuche keine Hinweise für ein genotoxisches Potential der untersuchten MVOC ergaben. In Bezug auf die Zytotoxizität erwies sich die Substanz 1-Dekanol als relativ zytotoxisch. Zwei weitere Studien von Kreja und Seidel [2002 a, b] kamen zu dem Ergebnis, dass von MVOC keine mutagenen und klastogenen Effekte ausgehen. Lediglich für 1-Dekanol konnte eine 10fach höhere Zytotoxizität im Vergleich zu den anderen untersuchten MVOC nachgewiesen werden. Zudem waren alle untersuchten MVOC 1000fach weniger toxisch als Gliotoxin.

Eine Möglichkeit des Körpers, auf luftgetragene Chemikalien zu reagieren, ist eine Entzündungsreaktion. Hierbei werden akute und subakute Entzündungsreaktionen unterschieden, wobei die akute Reaktion die relevantere für eine VOC/MVOC-

Exposition zu sein scheint. Es kommt meistens zuerst zur Gefäßdilatation und einer Ausschüttung von Entzündungsmediatoren, zu denen Histamin, Kinine und Interleukine zählen [Mølhave 1991].

Kreja und Seidel [2001] untersuchten *in vitro* die Freisetzung von Entzündungsmediatoren (IL-1a, IL-6, IL-8, TNF- α) aus Lungenepithelzellen (A549-Zellen) nach einer MVOC-Exposition. Die eingesetzten MVOC (s. o.) waren dosisabhängig imstande, die IL-8 Produktion in den Epithelzellen zu induzieren. Die Fähigkeit zur Induktion von IL-6 fiel für die MVOC sehr gering aus. Die Bildung von IL-1a und TNF- α konnte nicht induziert werden.

Lorenz und Mehrer [2004] beschrieben, dass Menschen, die in Gebäuden mit mikrobiellen Schäden leben häufig über Atemwegserkrankungen, Hautreaktionen, Kopf- und Gelenkschmerzen sowie Infektanfälligkeit berichten. Die hierfür verantwortliche Schwächung des Immunsystems könne möglicherweise Folge einer Störung der Chemotaxis der Abwehrcellen (gezielte Bewegung der Immunzellen zu den in den Körper eingedrungenen Bakterien) durch die MVOC sein. Untersuchungen von Reiling et al. [2005] zeigten, dass die Abwehrcellen bei hohen MVOC-Konzentrationen in der unmittelbaren Umgebung orientierungslos werden und die Chemotaxis durch die MVOC gehemmt wird.

Weiterhin sei vorstellbar, dass die eingeatmeten MVOC selbst als Signal- oder Lockstoffe für Abwehrcellen wirken und es zu einer lokalen Anreicherung von Immunzellen beispielsweise in den Atemwegen kommt. Die Folge davon könnte eine lokale Entzündung sein, die sich in Form von Bronchitis oder Husten äußern könnte [Lorenz und Mehrer 2004].

2.2.4.2 *In vivo*-Untersuchungen zur sensory irritating potency

Der Begriff „sensory irritation“ steht für eine Reizung der oberen Atemwege. Vermittelt wird diese Reizung vor allem über Nervenfasern des fünften Hirnnerven (N. trigeminus), die sich u.a. in der Gesichtshaut und den Schleimhäuten der Augen, der Nase und des Mundes befinden. Man bezeichnet diese Art von Wahrnehmung als „common chemical sense“ (CCS) oder „Chemästhesie“ [Mølhave 1991, Hansen und Nielsen 1994, Cometto-Muniz 1997, Hempel-Jørgensen et al. 1999].

Der Körper reagiert auf zwei Arten auf eine Reizung des CCS durch Chemikalien. Die erste Reaktion äußert sich in Form eines Eindruckes bzw. einer Wahrnehmung wie „reizen“, „brennen“ oder „stechen“, die zweite Reaktion sind Schutzreflexe des Körpers, zu denen u.a. eine verstärkte Sekretion der Schleimhäute (Nasenlaufen, Augentränen), eine Veränderung der Atemfrequenz und Husten gehören [Mølhave 1991].

Neben der Reizung der oberen Atemwege ist es in Tierversuchen auch möglich, die „pulmonary irritation“, also die Reizung der tiefen Atemwege zu bestimmen. Wird z.B. einer Maus eine zu untersuchende Chemikalie über eine Trachealkanüle appliziert, so werden die oberen Atemwege umgangen, also auch der CCS. Die Reize werden nun über die Nervenfasern des zehnten Hirnnerven (N. vagus) vermittelt. Ein typisches Symptom bei dieser Form der Reizung ist die Dyspnoe [Hansen und Nielsen 1994].

Sowohl die Irritation der oberen als auch die der tiefen Atemwege geht in Versuchen mit Mäusen mit einer Senkung der Atemfrequenz („respiratory decrease“) des Tieres einher. Bei der Reizung der oberen Atemwege erfolgt die Senkung der Atemfrequenz durch eine charakteristische Atempause vor der Expiration ohne Beeinflussung des Atemzugvolumens. Im Gegensatz dazu liegt die Atempause bei der Reizung der tiefen Atemwege zwischen Ende der Expiration und Beginn der Inspiration, ähnlich wie bei der Reaktion auf die Erstickungsgase Kohlenmonoxid und Blausäure und bei den meisten Anästhetika. Das Atemzugvolumen sinkt bei dieser Form der Atemwegsreizung ab [Hansen und Nielsen 1994].

Die Konzentration einer Substanz, die eine Senkung der Atemfrequenz einer Maus um 50 % hervorruft, bezeichnet man als RD₅₀-Wert (respiratory decrease). Der im Tierversuch ermittelte RD₅₀-Wert korreliert mit dem Reizeindruck beim Menschen und kann somit als Maß für die „sensory irritation potency“ - die Reizkonzentration - angenommen werden [Hansen und Nielsen 1994, Alarie 1996]. Der RD₅₀-Wert wird üblicherweise entweder in mg/m³ oder in ppm (parts per million) angegeben. Beispielsweise liegt der RD₅₀-Wert für 2-Hexanon bei 4163 mg/m³ [Pasanen et al. 1998]. Weitere Beispiele für RD₅₀-Werte mit den entsprechenden Literaturangaben können der toxikologischen Tabelle im Anhang (Kapitel 7) entnommen werden.

Vergleichbar mit den Geruchseindrücken spielt bei den Reizkonzentrationen die Mischung der MVOC eine große Rolle. Korpi et al. [1999] untersuchten die Reizkonzentrationen von Einzelsubstanzen und einer Mischung aus fünf MVOC. Sie

stellten fest, dass geringere Konzentrationen der Einzelsubstanzen in der Mischung zum Erreichen der Reizkonzentration ausreichten verglichen mit der Reizkonzentration der reinen Einzelsubstanzen. Beispielsweise ermittelten sie einen RD₅₀-Wert für 1-Okten-3-ol von 182 mg/m³, in der Mischung lag die Konzentration bei Erreichen des RD₅₀-Wertes aber nur bei 47 mg/m³.

Mit Hilfe des RD₅₀-Wertes haben Pasanen et al. (1998) zwei Orientierungswerte für Innenraumluftbelastung mit Chemikalien berechnet. Der RIL-Wert (**r**ecommended **i**ndoor **a**ir **l**evel) berechnet sich über die Formel:

$$\text{RIL} = \text{RD}_{50}\text{-Wert}/1333$$

Der OEL-Wert (**o**ccupational **e**xposure **l**evel), bzw. TLV-Wert (**t**hreshold **l**imit **v**alues) wird mit folgender Formel berechnet:

$$\text{OEL} = \text{RD}_{50}\text{-Wert} \times 0,03$$

Er bezieht sich auf eine Zeit von 8 Stunden/Tag für 5 Tage/Woche und entspricht damit dem deutschen MAK-Wert [Hansen und Nielsen 1994, Pasanen et al. 1998]. Berechnete Werte sind ebenfalls dem Kapitel 7 zu entnehmen.

2.2.4.3 Geruchsbelästigung

Die ca. 10⁷ geruchsempfindlichen Sinneszellen des Menschen liegen in der Regio olfactoria in der oberen Nasenmuschel. Damit ein bestimmter Geruch wahrgenommen oder erkannt werden kann, müssen die Duftstoffe mit der Luft in diese Region gelangen und in der dort vorhandenen Schleimschicht gelöst werden. Die gelösten Duftstoffe besetzen bestimmte Rezeptortypen, deren Anzahl auf mehrere tausend geschätzt wird. Jede durch einen Duftstoff gereizte Rezeptorpopulation vermittelt im Gehirn eine bestimmte Geruchswahrnehmung. Wird ein Geruch sehr schwach wahrgenommen, kann aber keinem bestimmten Stoff zugeordnet werden, so spricht man von der „Wahrnehmungsschwelle“ oder „Absolutschwelle“. Wenn aber ein wahrgenommener Geruch einem bestimmten Duftstoff zugeordnet werden kann, nennt man diesen Schwellenwert „Erkennungsschwelle“. Die beiden Schwellenwerte sind von der Umgebungstemperatur und der Luftfeuchtigkeit abhängig und sind stoffspezifische Größen [Silbernagl und Despopoulos 1991].

Stoffe, die unter den Oberbegriffen VOC bzw. MVOC zusammengefasst werden, haben auf Grund ihrer chemischen Struktur und Eigenschaften oft sehr charakteristische Geruchsnoten. In Tabelle 5 sind die Geruchsschwellenwerte sowie die Geruchsnote einiger MVOC aufgeführt.

Das alleinige Auftreten des charakteristischen Schimmelgeruches kann nicht als quantitative Messgröße herangezogen werden, da die Geruchsintensität und die vorhandene Biomasse der Schimmelpilze nicht zwangsläufig miteinander korrelieren. Weiterhin sind bei der Wahrnehmung eines bestimmten Geruches nicht die Gesamtkonzentration der MVOC oder bestimmte Einzelsubstanzen von Bedeutung, sondern die Mischung bestimmter MVOC. So wird der erdige Geruch von Geosmin in der Mischung häufig von anderen Substanzen maskiert, und es entsteht ein völlig neuer Geruchseindruck [Böck et al.1998, Keller 2002].

Tabelle 5: Geruchsschwellenwerte und Geruchsnoten einiger MVOC

MVOC	Geruchsschwelle µg/m ³ bzw. ppm	Geruchsnote
Dimethylsulfid	2,5 ¹ , 2 ⁶	verfault ¹
Dimethyldisulfid	0,1 ^{1,6}	unangenehm ¹
Dimethyltrisulfid	6 ¹	faulig ¹
2-Methyl-1-propanol	3300 ¹ , 3 ⁶	süß ¹ , weinartig ¹ , muffig ⁶
2-Methyl-1-butanol	45 ^{1,6}	sauer ^{1,6} , scharf ¹
3-Methyl-1-butanol	30 ^{1,6} , 0,07 ²	fuselölartig ¹
2-Hexanon	708 ¹	medizinisch ¹ , scharf ¹
2-Heptanon	94 ^{1,6} , 0,1 ⁴ ppm	pikant ¹ , würzig ¹
3-Okтанон	324 ¹	fruchtig ¹ , würzig ¹
1-Okten-3-ol	10 ² bzw. 16 ^{1,6}	pilzig ¹ , herb ¹
Geosmin	7,6 ¹ , 0,1 ⁶	erdig ¹
2-Methyl-isoborneol	0,007 ¹	erdig ¹
Limonen	2450 ¹ , 12000 ³	zitrusartig ¹ , minzig ¹
1-Butanol	11000 ³	
2-Pentanон	316 ⁴ ppm	
2-Butanon	5-8 ⁵ ppm	süßlich ⁵ , scharf ⁵
Pinen	23000 ³	

Abgeleitet nach Böck 2001¹, Seidel und Plappert 1999², Mølhavе et al. 2000³, Cometto-Muniz 1997⁴, ATSDR 2002⁵, Keller 2002⁶

In Innenräumen wird ein Schimmelpilzbefall von den Bewohnern in der Regel entweder durch schon sichtbares Myzelwachstum (Stockflecken) oder den charakteristischen Schimmelgeruch (muffig, modrig, verfault) wahrgenommen, der durch in die Luft abgegebene MVOC entsteht [Böck et al. 1998, Böck 2001]. Geruch kann, wenn er von exponierten Personen über einen längeren Zeitraum als belästigend empfunden wird, ein so genanntes Belästigungssyndrom hervorrufen. Dieses umfasst u.a. Gereiztheit, allgemeines Unbehagen und Niedergeschlagenheit, kann aber auch mit somatischen und psychosomatischen Komponenten einhergehen [Schuschke 1996, Steinheider 1999].

Engvall et al. [2002] befragten in Stockholm ca. 3700 Bewohner von Mehrfamilienhäusern nach dem Auftreten von Symptomen an Auge, Nase und Haut, aber auch nach Kopfschmerzen und Müdigkeit. Gleichzeitig sollten die Bewohner angeben, ob Zeichen von Feuchtigkeit bzw. Wasserschäden oder aber von Gerüchen in ihrer Wohnung vorhanden waren. Die Kombination aus hoher Luftfeuchtigkeit und vorhandenen Gerüchen resultierte in einem erhöhten Auftreten aller erfragten Symptome. Aber auch für verschiedene einzelne Geruchsqualitäten ließ sich dieser Zusammenhang nachweisen.

Wan und Li [1999] zeigten in einer Befragung von 1237 Angestellten in einem Bürogebäude, dass Augenreizungen, Hautsymptome, Kopfschmerzen und Konzentrationsschwierigkeiten häufiger vorkommen, wenn entweder muffiger Geruch oder Schimmel am Arbeitsplatz wahrgenommen wurden.

2.2.4.4 Erfahrungen am Arbeitsplatz und MAK-Werte

Für einige MVOC liegen toxikologische Bewertungen durch die Senatskommission der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe vor. Als MAK-Wert (maximale Arbeitsplatz-Konzentration) bezeichnet man die Konzentration eines Stoffes (Gas, Dampf oder Schwebstoff in der Luft) am Arbeitsplatz, die „nach dem gegenwärtigen Stand der Kenntnis“ die Gesundheit eines Arbeitnehmers nicht beeinträchtigt und belästigt. Der MAK-Wert ist ein Durchschnittswert, der sich in der Regel auf eine Arbeitszeit von 8 Stunden am Tag und 5 Tage pro Woche bezieht (d.h. eine durchschnittliche Wochenarbeitszeit von 40 Stunden). Darüber hinaus werden die Kanzerogenität, die sensibilisierende Wirkung, die Möglichkeit zur systemischen Toxizität nach Hautresorption, eine

mögliche Gefährdung in der Schwangerschaft und die Keimzellmutagenität eines Arbeitsstoffes bewertet. Anhand dieser Kriterien wird der Stoff entsprechend eingestuft. Angegeben wird der MAK-Wert für Gase, Dämpfe und (flüchtige) Flüssigkeiten in ml/m^3 (ppm), für nicht flüchtige Stoffe in mg/m^3 [DFG, 1972-2003 a, b].

2-Butanon

Der MAK-Wert liegt für 2-Butanon bei 200 ppm (590 mg/m^3). Auf Grund langjähriger Beobachtungen, durchgeführter Studien und Befragungen, zeigten sich bei Exposition gegenüber Dämpfen mit Konzentrationen von 200-350 ppm deutliche Augen-, Nasen- und Rachenreizungen bei den exponierten Personen. Die Wirkung einer chronischen Exposition durch 2-Butanon auf Menschen ist sehr unterschiedlich. So wurden einerseits nach langer Exposition keine Effekte bei den Betroffenen bemerkt, andererseits litten Betroffene anderer Studien z. B. vermehrt an Polyneuritis [DFG, 1972-2003 a, b].

2-Hexanon

Der MAK-Wert ist auf 5 ppm (21 mg/m^3) festgelegt. 2-Hexanon ist mit „H“ (Gefahr der Hautresorption) markiert. Die Dämpfe von 2-Hexanon reizen konzentrationsabhängig die Schleimhäute, besonders die Konjunktiven. Chronische Aufnahme von 2-Hexanon kann zu einer peripheren Polyneuritis führen [DFG, 1972-2003 a, b].

1-Butanol

Für 1-Butanol liegt der MAK-Wert bei 100 ppm, das entspricht 300 mg/m^3 . Die Einordnung für die fruchtschädigende Wirkung erfolgt in Gruppe C, was bedeutet, dass eine fruchtschädigende Wirkung bei Einhaltung des MAK-Wertes nahezu ausgeschlossen werden kann. Bei der Untersuchung in 1-Butanol verarbeitenden Fabriken lagen die gemessenen Luftkonzentrationen im Bereich von 20-115 ml/m^3 . Bei den exponierten Arbeitern traten verschiedene Symptome im Bereich der Augen (vakuoläre Keratopathie) und der Schleimhäute auf. Ebenso wurde über Kopfschmerzen und Schwindel geklagt. Die vakuoläre Keratopathie ist eine charakteristische Entzündung der Hornhaut nach Exposition gegenüber 1-Butanol. Es liegen dabei symmetrisch verteilte Vakuolen im Kornealepithel vor, die sich

vermutlich durch die Penetration von 1-Butanol durch die Zellschichten bilden. Weiterhin wurde von Augenbrennen, Lidschwellung und Fremdkörpergefühl in den Augen berichtet. Die Symptome waren nach Arbeitsplatzkarenz vollständig reversibel. 1-Butanol durchdringt sehr schnell die Blut-Hirn-Schranke. [DFG, 1972-2003 a, b].

2.2.4.5 Zusammenfassende humantoxikologische Bewertung der MVOC

Anhand der oben beschriebenen Datenlage zu Arbeitsplatz- und Reizkonzentrationen zeigt sich die Schwierigkeit in der toxikologischen Bewertung gemessener MVOC-Konzentrationen im Innenraum, wenn diese im Bereich von einigen ng/m^3 bis $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nachgewiesen werden. Die beschriebenen gesundheitlichen Beeinträchtigungen wurden im Konzentrationsbereich von mg/m^3 beobachtet. Das entspricht dem mehr als 1000fachen (10^3 - 10^6 -fachen) der Konzentrationen, die laut Literatur in Räumen ohne, aber auch mit Schimmelpilzwachstum gefunden werden. Abbildung 4 verdeutlicht, dass zwischen den in Innenräumen gemessenen MVOC-Konzentrationen und den zugehörigen Reizkonzentrationen erhebliche Unterschiede bestehen.

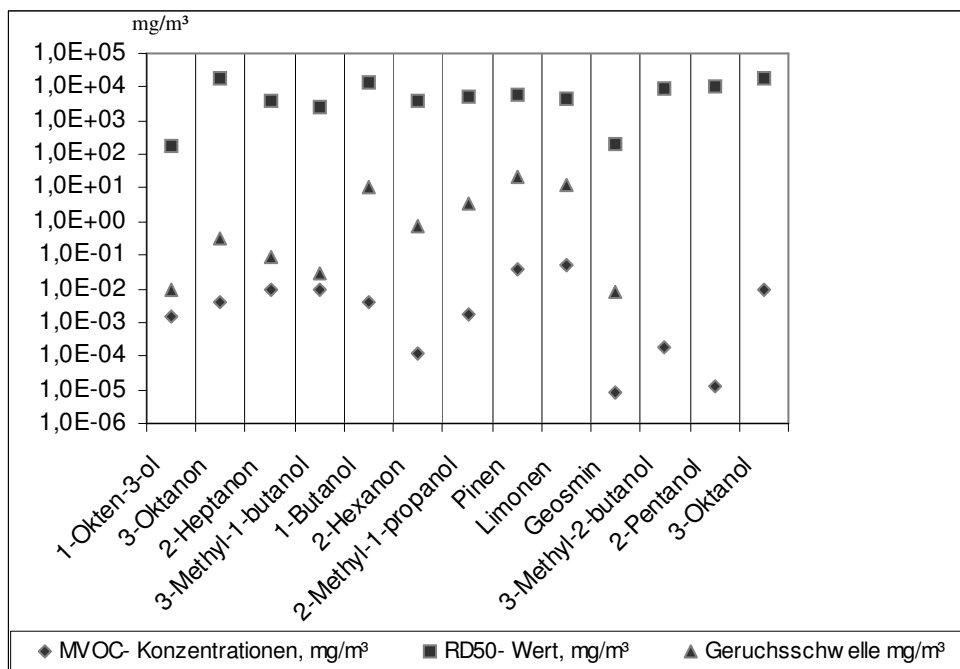


Abbildung 4: Reizkonzentrationen (RD50-Werte), Geruchsschwellenwerte und gemessene Raumluftkonzentrationen in mg/m^3 ausgewählter MVOC

Quelle: Schaper 1993, Ström et al. 1993, Dewey et al. 1995, Keller und Groh 1998, Pasanen et al. 1998, Korpi et al. 1999, Wolkoff et al. 2000, Böck 2001

Zur Bewertung der MVOC hinsichtlich der Genotoxizität und Zytotoxizität liegen nur sehr wenige Studien vor, die zudem unterschiedliche Ergebnisse zeigten. So wurde 1-Okten-3-ol in einer Versuchsreihe von Seidel und Plappert [1999] als genotoxisch und zytotoxisch eingestuft, in einer Untersuchung von Kreja und Seidel [2001] konnte für diese Substanz keine genotoxische Wirkung nachgewiesen werden. Als zytotoxisch wurde nur 1-Dekanol eingestuft. Es liegen zurzeit keine neuen Ergebnisse über die Fähigkeit der MVOC zur Interleukin-Induktion vor. Die in der Studie von Kreja und Seidel [2001] untersuchten MVOC waren dosisabhängig in der Lage, eine IL-8-Produktion in Epithelzellen zu induzieren. Einen exakten Überblick über die Toxikologie der MVOC bietet die ausführliche Tabelle im Anhang (Kapitel 7). Bei Bewertungen von gesundheitlichen Auswirkungen der MVOC sollten des Weiteren nicht nur die einzelnen Substanzen betrachtet werden, denn möglicherweise spielt die Zusammensetzung des MVOC-Gemisches sowohl in der Geruchswahrnehmung als auch bei der gesundheitsschädigenden Potenz eine entscheidende Rolle.

Es ist nicht eindeutig zu klären, ob die Beschwerden wie Kopfschmerzen und Reizungen der Atemwege wirklich durch die MVOC ausgelöst werden. Besonders deutlich zeigt dies ein Beispiel einer Schule in Nordrhein-Westfalen, in welcher sich Lehrer und Schüler über Atemwegsbeschwerden und Kopfschmerzen beschwerten. Hohe MVOC-Werte führten zu einer erfolgreichen Schimmelpilzfahndung. Nach der dann durchgeführten Sanierung, klagte keiner der vormals Betroffenen noch über die beschriebenen Symptome obwohl die MVOC-Konzentrationen zunächst noch anstiegen [Lorenz und Mehrer 2004].

3. Material und Methoden

3.1 Laborversuche

3.1.1 Prinzipien von Gaschromatographie und Massenspektrometrie

Zur Trennung und Identifizierung organischer Substanzgemische eignet sich z.B. die Gaschromatographie, (GC; Trennung) mit nachgeschaltetem Massenspektrometer, (MS; Identifizierung). Der Gaschromatograph beinhaltet im Wesentlichen eine dünne, mit einer polaren Substanz beschichtete Kapillare (Trennsäule), an deren Ende sich ein Detektor anschließt. Der Säule vorgeschaltet ist ein Probenaufgabesystem (Injektor), welches sowohl das Trägergas als auch die in einem Lösungsmittel gelösten Probensubstanzen, die im Injektor verdampft werden, auf die Säule leitet. Mit Hilfe des Trägergases durchläuft die Probe (Substanzgemisch) die Kapillare, wobei die Einzelsubstanzen auf Grund chemischer Wechselwirkungen mit der Säulenbeschichtung stoffspezifisch unterschiedlich lang in der Säule verweilen. Diese für jede Einzelsubstanz charakteristische Verweildauer bezeichnet man als Retentionszeit (R_t). Das inerte Trägergas reagiert nicht mit der Säulenbeschichtung.

Nach Verlassen der Trennsäule, werden die Einzelsubstanzen über ein Verbindungsstück in das MS eingeleitet und in der „Ionenfalle“ mit Elektronen beschossen, die durch ein angelegtes Spannungsfeld beschleunigt wurden. Dadurch kommt es zu einem Zerfall der Substanz in Ionenbruchstücke. Die einzelnen Ionen werden entsprechend ihrem Verhältnis Masse/Ladung in einem Magnetfeld getrennt (verschieden stark abgelenkt) und treffen dann auf einen Detektor. Es entstehen bestimmte Bruchstücke in der Mehrzahl (Target-Ion, Base-Peak), andere dagegen nur in kleinerer Menge (Qualifier-Ion). Jede Substanz zerfällt in charakteristische Bruchstücke (s. Abb. 5). Die Kombination aus der Retentionszeit und das o.g. charakteristische Verteilungsmuster der Bruchstücke (Massenspektrum) dienen der eindeutigen Identifizierung der in der Originalprobe (Substanzgemisch) enthaltenen Einzelsubstanzen.

Anhand verschiedener Parameter lässt sich das GC/MS-System auf die zu untersuchenden Substanzen optimieren. Dazu zählt u.a. die Variation des Temperaturprogramms des GC (Veränderung der Start- und Endtemperatur sowie der Steigerungsrate der Temperatur), des Lösungsmittels (z.B. Schwefelkohlenstoff

oder Dichlormethan) und der Elektronenmultiplierspannung in der Ionenfalle des MS (zur Beschleunigung der Elektronen).

In der Zeit von Januar 2001 bis Januar 2002 wurden im Labor die MVOC hinsichtlich ihrer Retentionszeit, des Massenspektrums und der optimalen Trennungsfähigkeit untersucht. Es wurden verschiedene Lösungsmittel (Schwefelkohlenstoff, Dichlormethan und ein Methanol/Propanol-Gemisch) getestet und das GC/MS-Analysensystem auf die bestmöglichen Ergebnisse optimiert.

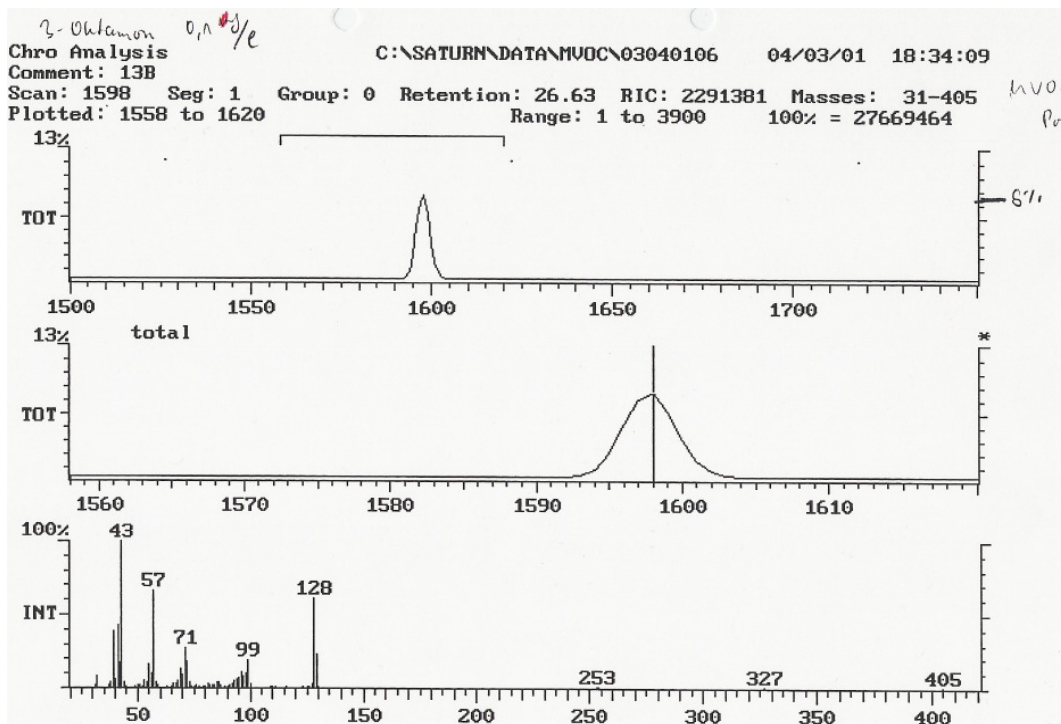


Abbildung 5: Darstellung des Massenspektrogrammes von 3-Octanon

Die Abbildung 5 zeigt in der ersten Reihe den Peak von 3-Octanon bei einer Konzentration von 100 mg/l. Das Areal unterhalb der eckigen Klammer ist in der zweiten Reihe vergrößert dargestellt, um die Retentionszeit des Stoffes zu bestimmen (hier: 26.63). Die untere Reihe zeigt das Massenspektrum des Stoffes an dem Punkt der Retentionszeitmessung an. Der Peak mit der größten Intensität (100%) wird als Base-Peak bezeichnet (hier: 43). Die übrigen Peaks, die zusätzlich zur Auswertung herangezogen werden, heißen Qualifier-Ions (hier: 57, 128, 71, 99). Die Intensität der Qualifier-Ions bezieht sich immer auf die des Base-Peak.

3.1.2 Chemikalien

Es wurden folgende Substanzen zur Herstellung von MVOC-Standardlösungen verwendet:

Alkohole:

1-Butanol 99,9% (Riedel de Haen, 30843); 1-Dekanol 99+%(Aldrich,23,9763);
1-Okten-3-ol 98% (Aldrich, 0-528-4); 2-Methyl-1-butanol 99+ % (Aldrich,13,305-1);
2-Methyl-1-propanol 99,5% (Aldrich, 29,482-9); 3-Methyl-1-butanol 98% (Aldrich,
M3,2658);3-Methyl-2-butanol 98% (Aldrich, 29,699-4); 2-Pentanol 98% (Aldrich,
P801-7); 3-Oktanol 99% (Aldrich, 21,840-5);Trans, trans-Farnesol 97%
(Lancaster,14348); Trans-2-Okten-1-ol 95% (Lancaster, 5905); Geosmin 98%
(Sigma, G5908); 2-Methyl-iso-borneol 98% (Sigma, M3933)

Ketone:

2-Butanon 99+ % (Acros, 14967-250); 2-Pentanon 98+ % (Acros, 12350-0050); 2-
Hexanon 98% (Aldrich, 10,300-4); 2-Heptanon 98% (Aldrich, 12,336-6);
3-Oktanon 98+ %(Aldrich, 13,691-3);

Furane:

2-Ethylfuran 98+ % (Lancaster, 5360); 2-n-Pentylfuran 98% (Lancaster, 7280);

Schwefelhaltige Verbindungen:

Methylsulfid 98% (Aldrich, M8,163-2); Methyldisulfid 98% (Aldrich, 52,801-3);
Methyltrisulfid 98+ % (Acros, 41503-0050); Methylsulfoxid 99,7%(Acros, 12779-
0500);

Sonstige:

2-Isopropyl-3-methoxy-pyrazin 97% (Aldrich, 24,313-2); (-)- α -Pinen 98% (Lancaster,
4759); Methyl-t-butylether 99% (Supelco, 4-8027);

R-(+)-Limonen 97% (Lancaster, 4733)

Lösungsmittel: Schwefelkohlenstoff (J.T.Baker, for determination of VOC);

3.1.3 Analytische Geräteparameter

Sowohl mit den Einzelsubstanzen, als auch mit verschiedenen Substanzgemischen wurde die für dieses GC/MS-System optimale Einstellung durch umfangreiche Vorversuche erarbeitet. Dabei wurden verschiedene Geräteparameter wie z.B. das

Temperaturprogramm (Haltezeit der Starttemperatur, Temperaturgradient und Endtemperatur) des Gaschromatographen und die Spannung im Massenspektrometer variiert, wie auch unterschiedliche Lösungsmittel getestet.

Gaschromatographie

Gerät: Varian star 3400 cx

Säule: Restek RTX- 502.2 Diphenyl/Dimethylpolysiloxan (Filmdicke 1,8 µm; Länge 60 m, Innendurchmesser:0,32 mm)

Autosampler: Varian 8200, Aufgabe splittlos, 1,2 µl in Sandwich-Technik

Injektortemperatur: 250 °C

Trärgas: Helium (Säulenfluss 1,8 ml/ min, Säulenvordruck 10 PSI)

Temperaturprogramm: - Starttemperatur.: 40 °C, Haltezeit:7 min
 - Temperaturgradient: 5 °C/min
 - Endtemperatur: 270 °C, Haltezeit:2 min

Gesamtlaufzeit: 58 min

Dieses Temperaturprogramm gewährleistet die bestmögliche Trennung der Einzelpeaks.

Massenspektrometrie

Gerät: Varian GC/MSMS Saturn 4D

Elektronenmultiplierspannung: 2780 Volt

Transfer-Line: 220 °C

Massenspektrometertemperatur: 180 °C

Scanbereich: 31-200 m/z

3.1.4 Qualitative Erfassung der Standardsubstanzen

Von den oben aufgeführten Einzelsubstanzen wurde jeweils eine Lösung mit einer Konzentration von etwa 100 mg/l hergestellt. Als Lösungsmittel diente Schwefelkohlenstoff (CS₂).

Mit Hilfe der GC/MS-Kopplung konnte sowohl die stoffspezifische Retentionszeit (R_t) bestimmt, wie auch das zugehörige Massenspektrum aufgenommen werden.

Mit den Massenspektren wurde eine Bibliothek im Analysenprogramm des Massenspektrometers eingerichtet, welche zusammen mit der Retentionszeit zur Identifizierung der MVOCs herangezogen wurde.

3.1.5 Quantitative Erfassung der Standardsubstanzen

Mit jeder Substanz wurde eine 10-Punkte-Kalibrierung durchgeführt. Jede Standardsubstanz wurde viermal auf dem stoffspezifischen Bruchstück, dem Base-Peak, integriert. Aus den vier integrierten Flächen (f1-f4) wurde der Mittelwert berechnet, dieser in Abhängigkeit zu den eingesetzten Eichkonzentrationen aufgetragen und über ein standardisiertes Berechnungsprogramm nach DIN 32645 die entsprechenden Verfahrenskenndaten errechnet [DIN 32645, 1994].

3.2 Feldversuche

3.2.1 Probandenauswahl und Messorte

Im Oktober 2001 erfolgte die Auswahl von 20 Probanden. Da die Studie auf Kinder mit Atemwegsbeschwerden ausgerichtet werden sollte, wurden Eltern, die sich in der pneumologischen Ambulanz der Kinderklinik des Universitätsklinikums Gießen zu regelmäßigen Kontrolluntersuchung vorstellten, über ihr Interesse an einer Studie zu Schimmelpilzen, deren Stoffwechselprodukten und Hausstaubmilben befragt. Sie wurden darüber informiert, dass die Studie über einen Zeitraum von einem Jahr laufen sollte, und dass während dieser Zeit regelmäßig Messungen der Schimmelpilzsporen, MVOC und Hausstaubmilbenkonzentration stattfinden sollten. Der Abstand zwischen den einzelnen Messungen wurde auf etwa 8-10 Wochen festgelegt. Bei bestehendem Interesse wurden die Personalien der interessierten Familien aufgenommen. Alle Familien wohnten in der Umgebung von Gießen.

3.2.2 Wohnungsbegehung

Die Wohnungsbegehung wurde im Juni 2002 von der Leiterin des Umweltlabors des Hygiene-Institutes und einem Doktoranden durchgeführt. Die Bewohner wurden über

die genaue Durchführung der Studie unterrichtet, und es wurde ein Termin für die erste Probennahme festgelegt.

Das zur Dokumentation der Wohnungsbegehung herangezogene Begehungsprotokoll stammt aus einer Studie des Landesgesundheitsamtes Baden-Württemberg [LGA 1998 s. Kap. 7.1.1].

Da für die Studie wichtige Informationen im Begehungsprotokoll fehlten, wurde ein Zusatzprotokoll entwickelt. Dieses erfasste u.a. weitere Quellen für Schimmelpilze, ob und wie Biomüll in der Wohnung gesammelt wurde, und wie lange sich der Müll in der Wohnung befand. Weiterhin konnte die Einrichtung des Kinderzimmers beschrieben werden, und wie deren Oberflächenbeschaffenheit war (z.B. lackiert, Biofarben, gebeizt usw.). In der Wohnung vorhandene Feuchtequellen (z.B. ein Zimmerbrunnen oder ein Aquarium) oder das Benutzen von ätherischen Ölen in Form von Duftlampen oder Kosmetikartikeln konnte vermerkt werden (s. Kap. 7.1.2).

3.2.3 Probennahmeprotokoll

Mit einem neu entwickelten Protokoll wurden bei jeder Messung alle Daten zur Probennahme (u.a. Probandennummer, Ort und Dauer der Probennahme) sowie die zum Zeitpunkt der Messung vorliegende Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Wetterlage erfasst. Zusätzlich konnten nachträgliche Veränderungen des Wohnraumes wie Renovierungen, ein neues Haustier, eine neue Matratze und neues Mobiliar im Detail festgehalten werden (s. Kap. 7.1.3).

3.2.4 MVOC Messung

Bei der ersten Messung der **GINA**-Studie fand die MVOC Probennahme für die oben beschriebene Elutionsmethode statt. Zusätzlich wurden zeitgleich zwei weitere MVOC-Proben zur Aufbereitung und Auswertung der anderen MVOC-Bestimmungsmethode (Thermodesorption) genommen. Diese zwei Proben wurden an das Institut für Hygiene und Umweltmedizin der RWTH Aachen geschickt und dort ausgewertet [Müller et al. 2003].

3.2.4.1 Aktive Probennahme der MVOC

Die zu untersuchende Raumluft im Kinderzimmer wurde mit einer batteriebetriebenen Pumpe (Aircheck Sampler Model 224 PCXR8, Fa. SKC) über einen Zeitraum von vier Stunden, bei einem Volumenstrom von 1000 ml/min auf ein Aktivkohleröhrchen (Anasorb 747 Cat.-No. 226-81-A, LOT 2342, Fa. SKC) gezogen. Damit betrug das gesamte Luftvolumen 240 Liter. Das Aktivkohleröhrchen wurde an einem Stativ in einer Höhe von ca. 1,5 m befestigt. Nach Beendigung der Messung wurde das Röhrchen mit den PP-Kappen verschlossen, in Aluminiumfolie verpackt und bis zur Untersuchung im Labor im Kühlraum des Instituts gelagert. Alle wichtigen Daten zur Messung (Raumtemperatur, Luftfeuchtigkeit, Dauer der Probennahme, Ort der Probennahme) wurden in das Probennahmeprotokoll eingetragen.

3.2.5 Schimmelpilzmessung

Die Schimmelpilzsporenprobe wurde in der Innenraumluft des Kinderzimmers und in der Außenluft mittels Impaktion (Impaktor FH2, Fa. Loreco GmbH) auf D(ichloran)-G(lycerin)-18-Agar gewonnen. Das gesaugte Luftvolumen betrug 150 Liter, die Messhöhe betrug ca. ein Meter. Der Ort der Probennahme im Kinderzimmer und außen wurde dokumentiert, um zu gewährleisten, dass die Proben bei den folgenden Messungen immer am gleichen Ort genommen wurden. Nach der Beprobung wurden die Agarplatten verschlossen und bis zum Versand nach Lübeck gekühlt bei 4 °C gelagert. Sowohl bei der Innenraummessung als auch bei der Außenluftbestimmung wurden die Klimaparameter Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Probennahmeprotokoll dokumentiert.

Die Auswertung erfolgte im Institut für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene in Lübeck. Es wurden sowohl die Gesamtkeimzahl (KBE/m³) als auch die Arten der Schimmelpilze und deren Konzentration (KBE/m³) bestimmt.

3.2.6 Einflussfaktoren der MVOC-Bildung

Aus der Abbildung 3 lassen sich verschiedene Einflussfaktoren auf die MVOC-Bildung entnehmen. Diese fallen sowohl in den Bereich der Hauseigenschaften als

auch des Raumnutzungsverhaltens. Die mittlere Säule zeigt den „natürlichen“ Weg zur MVOC-Bildung, nämlich über die Primärquelle Schimmelpilze. Diese wiederum hängen vom Parameter „Feuchtigkeit“ ab.

Somit sollte der Einfluss folgender qualitativer Parameter auf die Zielgröße MVOC untersucht werden: Baumaterial des Hauses, Isoliermaßnahmen am Haus, Art der Fenster im Kinderzimmer, Fußbodenbelag und Einrichtung des Kinderzimmers, Art der Wäschetrocknung in der Wohnung, Feuchtequellen in der Wohnung, Rauchverhalten der Bewohner, Luftbefeuchtung und Lüftungsverhalten durch die Bewohner.

Als quantitative Parameter wurden die Luftfeuchtigkeit im Kinderzimmer und die Gesamtschimmelpilzsporenkonzentration (abgekürzt als Schimmelpilzkonzentration) bestimmt.

3.3 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit Microsoft Excel Version 2000 und SPSS[®] (Superior Performing Software Systems, 2003) Version 11.0. Die MVOC-Werte wurden mit dem K/S-Test auf Normalverteilung untersucht. Unter der Annahme einer Normalverteilung für die quantitativen Parameter sollte für die ausgewählten qualitativen Parameter die statistische Testung auf Unterschiede bei $n=2$ Gruppen mit dem t-Test, bei $n>2$ Gruppen mit der einfachen Varianzanalyse erfolgen. Das Signifikanzniveau α wurde bei 0,05 festgelegt. Die festgelegten quantitativen Parameter „Schimmelpilzkonzentration“ und „Luftfeuchtigkeit“ wurden auf eine lineare Abhängigkeit zu den MVOC-Werten getestet. Diese Abhängigkeit wurde durch den Korrelationskoeffizient r beschrieben. Die grafische Darstellung der MVOC-Kalibriergeraden und die Berechnung der Verfahrenskenndaten erfolgten mit Excel 2000 auf dem Boden einer linearen Regressionsgerade mit R^2 als Bestimmtheitsmaß.

4. Ergebnisse

4.1 Laborergebnisse

In der Zeit von Januar 2001 bis Januar 2002 wurden im Labor die MVOC hinsichtlich ihrer Retentionszeit, des Massenspektrums und der optimalen Trennungsfähigkeit untersucht. Es wurden verschiedene Lösungsmittel (Schwefelkohlenstoff, Dichlormethan und ein Methanol/Propanol-Gemisch) getestet und das GC/MS-Analysensystem auf die bestmöglichen Ergebnisse optimiert. Des Weiteren erfolgten für die verschiedenen MVOC 10-Punktkalibrierungen mit der Darstellung der Kalibriergeraden und der Berechnung der Kenndaten.

4.1.1 Qualitative Erfassung der MVOC-Standards

Für jede MVOC-Standardsubstanz wurden neben der Retentionszeit auch der Base-Peak und die Qualifier-Ions bestimmt. Die Tabelle 6 zeigt eine Zusammenstellung dieser Analysenergebnisse.

Tabelle 6: Darstellung der stoffspezifischen Retentionszeit und des MS-Musters

Stoff	Molmasse (g/mol)	R _t	Base-Peak	Qualifier-Ion
(-)- α -Pinen	136	27,15	91	93 136
(R)-(+)-Limonen	136	31,33	93	67 135
1-Butanol	74	14,71	57	86
1-Okten-3-ol	128	29,03	57	69 110
2-Butanon	72	11,53	73	57
2-Ethylfuran	96	16,36	81	96 53
2-Heptanon	114	25,8	43	58 114
2-Hexanon	100	21,31	43	58 99
2-Isopropyl-methoxypyrazin	152	34,43	137	153 124
2-Methyl-1-butanol	88	18,28	56	41 70
2-Methyl-1-propanol	74	12,68	56	57 73
2-Methyl-iso-borneol	168	38,63	95	43 67
2-n-Pentylfuran	138	29,71	81	137
2-Okten-1-ol	128	32,73	57	41 69 110
2-Pentanol	88	16,21	45	71 55
2-Pentanon	86	16,31	43	86
3-Methyl-1-butanol	88	17,95	55	41 70
3-Methyl-2-butanol	88	15,33	45	71 55
3-Okтанol	130	29,58	83	71 55 130
3-Okтанon	128	29,7	43	57 128 71
Dekanol	158	39,58	41	55 69 83
Farnesol	222	53,71	121	137 95 81
Geosmin	184	46,6	112	97 126 83
Methyldisulfid	94	19,69	45	94
Methylsulfid	62	9,15	62	45 47
Methylsulfoxid	78	26,13	78	63 45
Methyl-t-butylether	88	9,41	73	89
Methyltrisulfid	126	31,23	126	45

4.1.2 Quantitative Bestimmung der MVOC

Die Berechnung der Verfahrenskenndaten und der Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenzen erfolgte nach der DIN 32645.

4.1.2.1 Kalibriergeraden und Verfahrenskenndaten

Die Darstellung der Kalibrierung der MVOC erfolgte als Gerade nach der allgemeinen Geradengleichung $y=mx+b$. Die Fläche unter jedem Chromatogramm der Einzelsubstanz wurde 4-mal integriert und der Mittelwert der Fläche (y) gegen die Konzentration der jeweiligen Substanz (x) aufgetragen (s. Abb. 6). Zu den zusätzlich berechneten Verfahrenskenndaten zählten:

1. Steigung, **m** (Maß für die Empfindlichkeit):

$$m = \frac{\sum [(x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})]}{\sum (x_i - \bar{x})}$$

2. Y-Achsenabschnitt, **b**:

$$b = \bar{y} - m\bar{x}, \text{ mit } \bar{x} = 1/N * \sum x_i \text{ und } \bar{y} = 1/N * \sum y_i$$

3. Reststandardabweichung **S_y** (Streuung der Messwerte um Regressionsgerade):

$$S_y = \left[\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{N-2} \right]^{1/2}, \text{ mit } \bar{y} = b + mx$$

4. Verfahrensstandardabweichung, **S_{xo}** (Präzision eines Analyseverfahrens):

$$S_{x_o} = S_y / b$$

5. Verfahrensvariationskoeffizient, **V_{xo}** (relative Verfahrensstandardabweichung):

$$V_{x_o} = (S_{x_o} / \xi) * 100, \text{ mit } \xi = \text{mittlere Eichkonzentration}$$

Die Kalibrierung wird am Beispiel des 2-Pentanolis exemplarisch dargestellt (s. Abb. 6 und Tab. 7). Die Verfahrenskenndaten der übrigen MVOC sind der Tabelle 8 zu entnehmen.

Tabelle 7: Kalibrierung und Verfahrenskenndaten von 2-Pentanol

Messdaten			Funktion 1.Grades		
Nr.	X – Werte	Y - Werte	Verfahrenskenndaten		
1	30,3	418	Steigung	[m]	9,14236
2	60,5	520	Y - Achsenschnittp.	[b]	-171,329
3	121,0	942	Reststandard -		
4	242,0	1.611	Abweichung	[Sy]	280,5744
5	363,0	3.102	Verfahrensstandard-		
6	484,0	3.889	Abweichung	[Sxo]	30,6895
7	605,0	5.297	Verfahrensvariations-		
8	726,0	6.857	Koeffizient	[Vxo]	6,90%
9	847,0	7.731			
10	968,0	8.573	Y = mX + b		
	Einheit [X]	Einheit [Y]			
	µg / l	E			
	Mittelwert [X]	Mittelwert [Y]			
	444,675	3894,050			

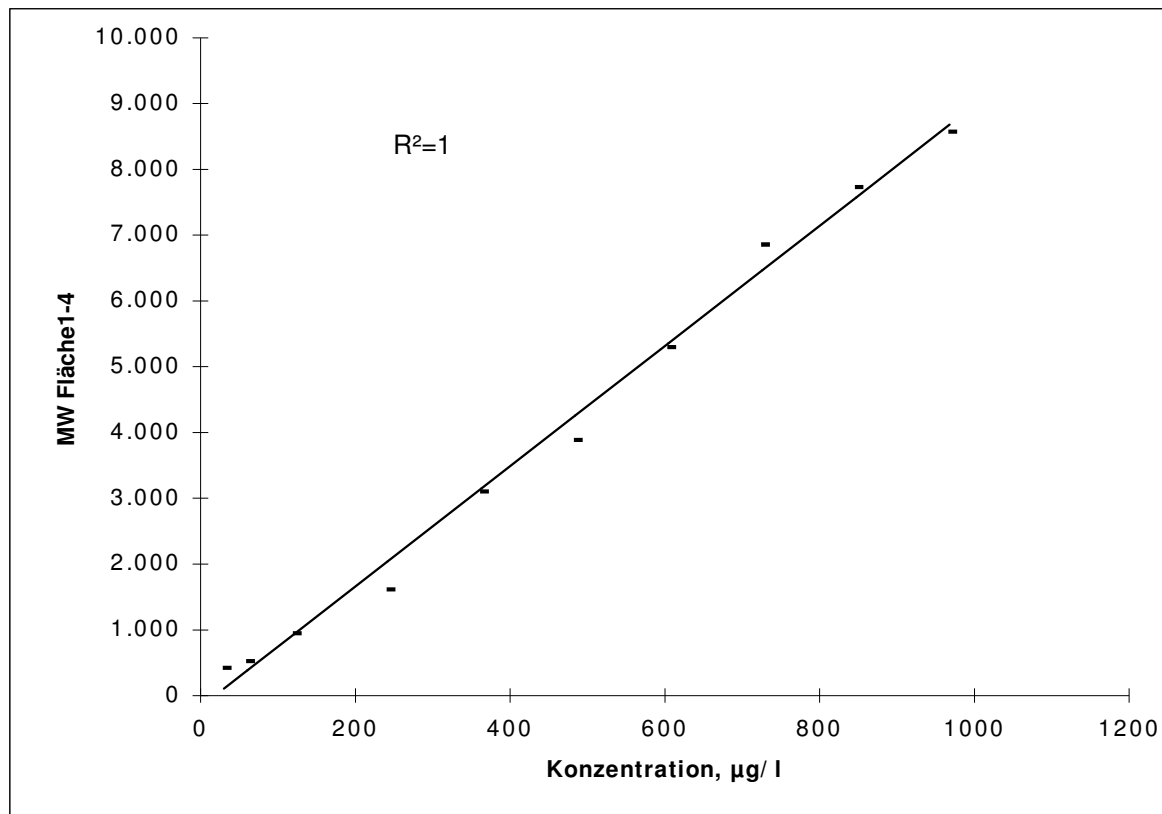


Abbildung 6: Eichgerade von 2-Pentanol

Tabelle 8: Verfahrenskennndaten der MVOC

Stoff	Konzentration von-bis (µg/l)	m	B	Sy	Sxo	Vxo
3-Methyl-2-butanol	34,3-1096	9,7	-395,5	350,0	36,0	7,1
2-Pentanon	28,8-920	7,9	1020,9	591,3	74,4	16,5
2-Pentanol	30,3-968	9,1	-171,3	280,6	30,7	6,9
2-Ethylfuran	31,5-1008	13,0	-87,6	454,4	35,0	7,6
2-Methyl-1-butanol	135-4320	3,1	-255,9	490,2	156,7	7,9
3-Methyl-1-butanol	138,5-4432	4,0	-571,6	643,0	162,0	8,0
Methyldisulfid	42,8-1368	11,6	-259,5	447,9	38,5	6,1
2-Heptanon	31,8-1016	13,9	-267,6	444,3	31,9	6,8
α-Pinen	32,8-1048	11,4	-286,9	255,6	22,5	4,7
1-Okten-3-ol	31,8-1016	7,5	-265,1	259,9	34,8	7,5
3-Oktanol	54,3-1736	7,0	-411,1	387,7	55,8	7,0
3-Oktanon	57,8-1848	7,9	-316,8	405,4	51,3	6,1
2-Pentylfuran	31,8-1016	18,9	-515,3	465,5	24,6	5,3
Methyltrisulfid	43-1376	10,0	-304,6	573,3	57,3	9,1
R-(+)-Limonen	34-1088	10,4	-188,4	384,4	37,0	7,4
2-Okten-1-ol	195,8-6264	1,6	-537,8	457,1	284,2	9,9
2-Isopropyl-methoxy-pyrazin	31-992	17,5	-393,5	547,5	31,3	6,9

4.1.2.2 Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenzen

Die Ermittlung der Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenzen erfolgte nach Vorgabe der DIN 32645. Die berechneten Werte der sind der Tabelle 9 zu entnehmen. Die Konzentrationsangaben in µg/l beziehen sich auf das Elutionsmittel, die beiden hinteren Spalten stellen die Konzentrationen in der Luft in ng/m³ bezogen auf ein Probeluftvolumen von 240 Liter dar.

Tabelle 9: Berechnung der Nachweis-(NG), Erfassungs- (EG)- und Bestimmungsgrenze (BG) der MVOC

Substanz	NG µg/l Elutionsmittel	EG µg/l Elutionsmittel	BG µg/l Elutionsmittel	Luftvolumen L	NG ng/m ³ Luft	BG ng/m ³ Luft
2-Pentanol	52	104	127	240	217	529
3-Methyl-2-butanol	61	122	149	240	254	621
2-Pentanon	127	254	251	240	529	1046
2-Ethylfuran	59	118	143	240	246	596
2-Methyl-1-butanol	265	530	633	240	1104	2638
3-Methyl-1-butanol	274	548	653	240	1142	2721
Dimethyldisulfid	65	130	164	240	271	683
2-Heptanon	54	108	133	240	225	554
α-Pinen	38	76	100	240	158	417
1-Okten-3-ol	59	118	142	240	246	592
3-Oktanol	94	189	231	240	392	963
3-Oktanon	87	174	218	240	363	908
2-Pentylfuran	42	83	107	240	175	446
Dimethyltrisulfid	56	113	145	240	233	604
R-(+)-Limonen	63	125	151	240	263	629
2-Okten-1-ol	481	961	1089	240	2004	4538
2-Isopropyl-methoxy-pyrazin	53	106	130	240	221	542

4.1.2.3 Nicht bestimmbare MVOC

Folgende MVOC konnten nicht quantifiziert werden: 1-Butanol, 2-Butanon, 2-Hexanon, 2-Methyl-1-propanol, 2-Methyl-isoborneol, 1-Dekanol, Farnesol, Geosmin, Methylsulfid, Methylsulfoxid und Methyl-t-butylether.

Dabei befanden sich die Peaks von Methyl-t-butylether, Methylsulfid, 1-Butanol, 2-Butanon und 2-Methyl-1-propanol innerhalb bzw. in dem absteigenden Anteil der Kurve des Lösungsmittelpeaks und waren auch nach Optimierungsversuchen durch Variation verschiedener Analyseparameter nicht eindeutig zu quantifizieren. Methylsulfoxid und 2-Hexanon zeigten in allen Konzentrationsbereichen einen breitbasigen Peak. Die Peaks von 2-Methyl-isoborneol, Farnesol, 1-Dekanol und Geosmin waren nur in Konzentrationen im Bereich von mg/m³ gut integrierbar. Da dieser Konzentrationsbereich weit über den angestrebten Werten im ng-Bereich lag, wurden diese Verbindungen bei den nachfolgenden Berechnungen nicht berücksichtigt.

4.2 Ergebnisse der Feldversuche

Im Februar 2002 bekundeten nach einer nochmaligen Befragung 13 der 20 ehemals ausgewählten Familien ihr Interesse. Zusätzlich konnten fünf weitere Familien, deren Kinder ebenfalls im Uniklinikum Gießen in Behandlung waren, für die Studie gewonnen werden. Eine Familie erkundigte sich telefonisch über eine Teilnahme an der Studie. Diese Familie wurde ebenfalls in das Kollektiv aufgenommen, sodass 19 Familien an der ersten und zweiten Messung teilnahmen. Eine Familie schied nach der zweiten Messung aus. Die Daten dieser Familie wurden nicht berücksichtigt. Die Daten der **GINA**-Studie beziehen sich daher auf 18 Familien. Die Wohn- bzw. Messorte lagen bei 9 Familien in der unmittelbaren Umgebung von Gießen bzw. in Gießen direkt. Zwei Familien wohnten südlich von Gießen im Raum Bad Nauheim, die übrigen 7 Familien wohnten nördlich von Gießen im Raum Marburg.

4.2.1 Umgebungsanalyse

4.2.1.1 Wohnungsbeschreibung

Die in diesem Kapitel betrachteten Parameter stellen mögliche Einflussfaktoren auf die MVOC-Bildung dar. Entsprechend der Abbildung 3 wurden die Faktoren in die Kategorien Hauseigenschaften und Raumnutzungsverhalten unterteilt. Aus dem Begehungsprotokoll stammen für die Kategorie der Hauseigenschaften die Fragen zum Baumaterial des Hauses, den Isoliermaßnahmen, der Art der Kinderzimmerfenster und dem Bodenbelag im Kinderzimmer. In der Kategorie des Raumnutzungsverhaltens entstammen dem Begehungsprotokoll die Fragen zur Wäschetrocknung, zum Luftbefeuchter, zum Lüftungsverhalten und die Frage nach sichtbarem Schimmel. Die Einteilung in die Gruppen bei der Einrichtung im Kinderzimmer erfolgte subjektiv nach der Begutachtung. Unter dem Punkt „Feuchtequellen“ wurden nach der Wohnungsbegehung Einrichtungsgegenstände wie beispielsweise ein Aquarium, ein Zimmerbrunnen und eine große Anzahl von Pflanzen in der Wohnung zusammengefasst. Alle Familien wurden zu ihrem Rauchverhalten befragt. Als Raucherwohnung wurden neben den eindeutigen Fällen

auch solche Wohnungen bezeichnet, in denen nicht regelmäßig geraucht wurde oder die Bewohner zum Rauchen an ein Fenster in der Wohnung gingen.

Hauseigenschaften

„Baumaterial des Hauses ?“

13 (72%) der 18 Häuser waren reine Steinbauten (Ziegel, Hohlblock und Bimsstein), während 5 Häuser (28%) zusätzlich Baumaterialien wie Holz und Lehm enthielten.

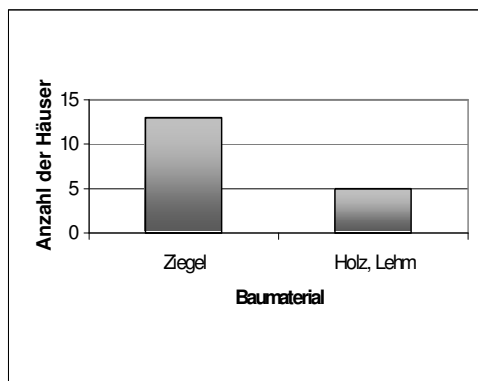


Abbildung 7: Baumaterial der Häuser

„Wie sind die Außenmauern bzw. das Dach des Hauses isoliert?“

Isoliermaßnahmen wurden bei 6 (33%) sowohl an den Wänden als auch am Dach durchgeführt. 5 (28%) Häuser wiesen keine Isolierungen auf.

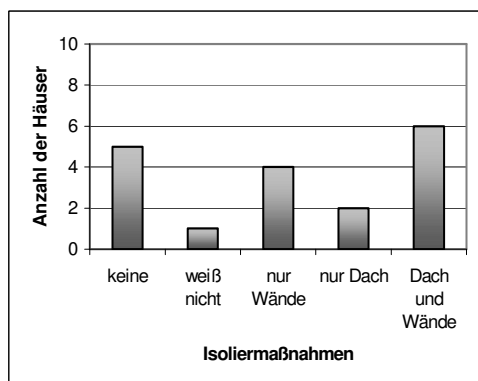


Abbildung 8: Isoliermaßnahmen

„Art der Fenster im Schlafzimmer des Kindes?“

Die Kinderzimmerfenster bestanden bei 13 (72%) Häusern aus Thermopen-/Isolierverglasung und bei 5 (28%) aus Kastendoppelfenstern.

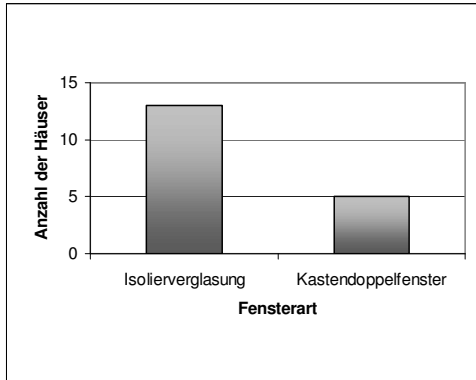


Abbildung 9: Art der Kinderzimmerfenster

„Womit ist der Fußboden des Schlafzimmers des Kindes belegt?“

Als Fußbodenbelag im Kinderzimmer dienten in 2 (11%) Fällen Fliesen und in 6 (33%) Fällen ein Teppichboden. In 10 (56%) Zimmern fanden sich Kombinationen aus losen Teppichen und Kunststoff- bzw. Holzfußboden.

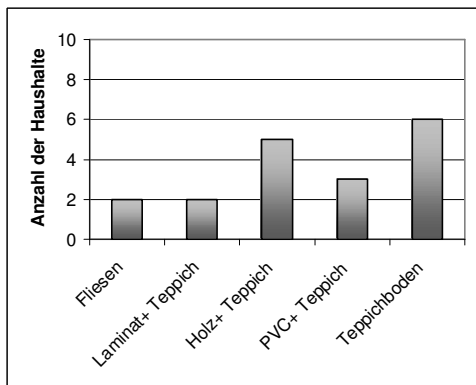


Abbildung 10: Bodenbelag im Kinderzimmer

„Einrichtung des Kinderzimmers ?“

Eine Holzverkleidung der Wände bzw. freiliegende Dachbalken wiesen 6 (33%) der Kinderzimmer auf. Die Einrichtung bestand in je 9 (50%) Zimmern aus überwiegend Holz bzw. kunststoffüberzogenem Sperrholz oder nur Kunststoffmöbeln.

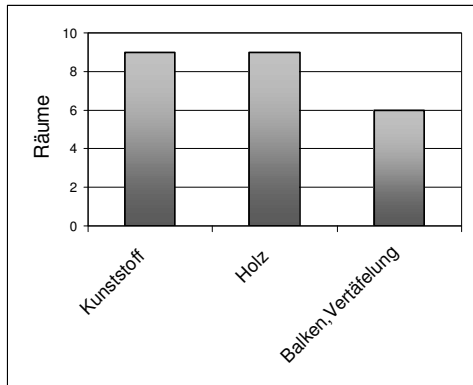


Abbildung 11: Einrichtung des Kinderzimmers

Raumnutzungsverhalten

„Wo wird die Wäsche überwiegend getrocknet?“

5 (28%) Familien gaben an, ihre Wäsche außerhalb der Wohnung zu trocknen (Keller oder draußen). In 7 (38%) Familien wurde ein Wäschetrockner, der über ein Abluftrohr nach draußen verfügte, in der Wohnung verwendet, während in 3 (17%) Wohnungen ein Kondentrockner (Wäschetrockner ohne Abluftrohr nach draußen) verwendet wurde. 3 (17%) Familien trockneten ihre Wäsche in der Wohnung auf Wäscheständern.

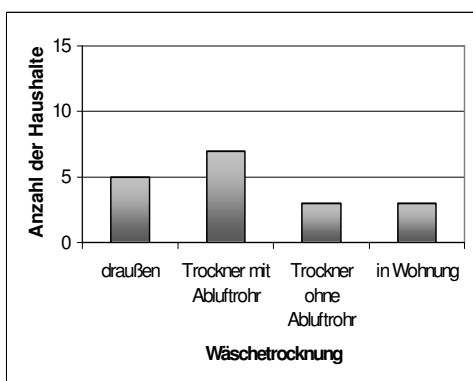


Abbildung 12: Art der Wäschetrocknung

„Wird ein passiver Luftbefeuchter (mit Wasser gefüllte Gefäße) verwendet?“

Das Benutzen von passiven Luftbefeuchtern wurde von 4 (22%) Familien angegeben.

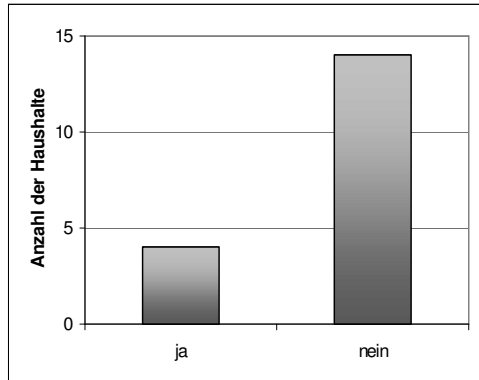


Abbildung 13: Passive Luftbefeuchtung

Feuchtequellen in Wohnung

Unter dem Punkt „Feuchtequellen“ wurden Einrichtungsgegenstände wie beispielsweise ein Aquarium oder ein Zimmerbrunnen und eine große Anzahl von Pflanzen subsumiert. Somit waren in 7 (39%) Familien Feuchtequellen vorhanden.

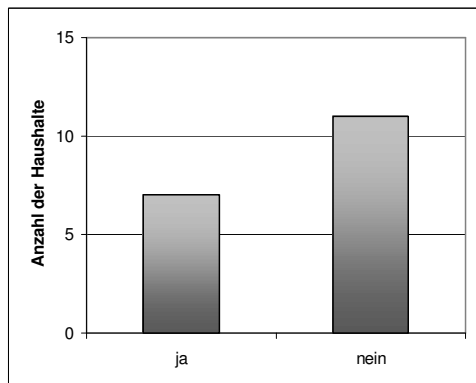


Abbildung 14: Feuchtequellen in der Wohnung

„Wie lüften Sie Ihre Wohnung im Sommer?“

Das Lüftungsverhalten wurde kategorisiert. Die Antwortmöglichkeiten „selten, nie“, „einmal täglich für kurze Zeit gut durchlüften“, „Fenster ständig gekippt“ und „kein Fenster“ wurden als schlechtes Lüftungsverhalten eingruppiert. Zu der Gruppe mit gutem Lüftungsverhalten zählten die Antworten „mehrmals täglich für kurze Zeit gut durchlüften“ und „über mehrere Stunden das Fenster ganz öffnen“. Insgesamt zeigten 8 (44%) Familien ein schlechtes und 10 (56%) ein gutes Lüftungsverhalten.

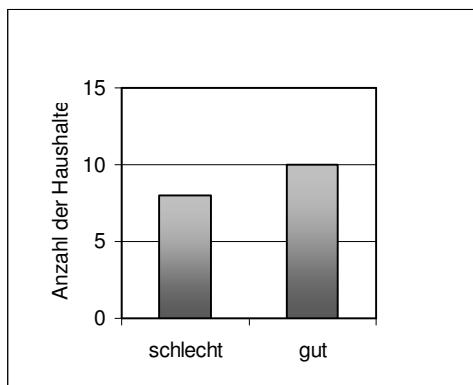


Abbildung 15: Lüftungsverhalten im Sommer

„Wird oder wurde in Ihrer Wohnung geraucht (auch an geöffneten Fenstern)?“

11 (61%) Wohnungen wurden als Raucherwohnung eingestuft und in 7 (39%) wurde nie geraucht.

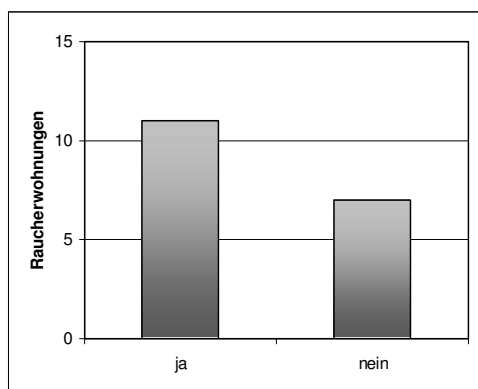


Abbildung 16: Raucherstatus der Wohnung

„Haben Sie in Ihrer jetzigen Wohnung jemals Schimmel oder Feuchtigkeitsflecken beobachtet (außer auf Lebensmitteln)?“

Jeweils in 9 (50%) Wohnungen wurde schon einmal Schimmelpilzwachstum wahrgenommen. In 6 der 9 Fälle befand sich diese Schimmelpilzquelle im Badezimmer in Form von Fugenschimmel. Bei den übrigen Familien wurde der Schimmel im Keller und in einem Fall im elterlichen Schlafzimmer entdeckt. Jedoch wurde in keinem Fall im Kinderzimmer Schimmelpilzwachstum bemerkt.

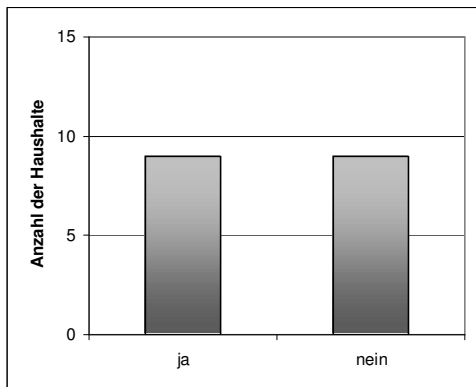


Abbildung 17: Wahrgenommenes Schimmelpilzwachstum

4.2.2 Schimmelpilze

Die Ergebnisse der Schimmelpilzsporenmessungen (Sporenkonzentration in Kolonie bildende Einheiten pro Kubikmeter Luft, KBE/m³) sind in Abbildung 18 dargestellt. Es wurden *Aspergillus* spp., *Cladosporium* spp., *Penicillium* spp., *Fusarium* spp., *Rhizopus* spp., *Mucor* spp., *Alternaria* spp. und *Aureobasidium pullulans* nachgewiesen. Die Summe aller in einem Innenraum gefundenen Schimmelpilze wurde als Gesamtschimmelpilzsporenkonzentration bzw. Gesamtkeimzahl in KBE/m³ bezeichnet. Der kleinste Wert wurde in Raum 8 (7 KBE/m³), der größte Wert in Raum 9 (2068 KBE/m³) nachgewiesen. Der Median lag bei 637 KBE/m³, der Mittelwert bei 691 KBE/m³.

Auf eine genaue Differenzierung der Schimmelpilzgattungen in jedem Innenraum wurde in dieser Promotionsarbeit verzichtet.

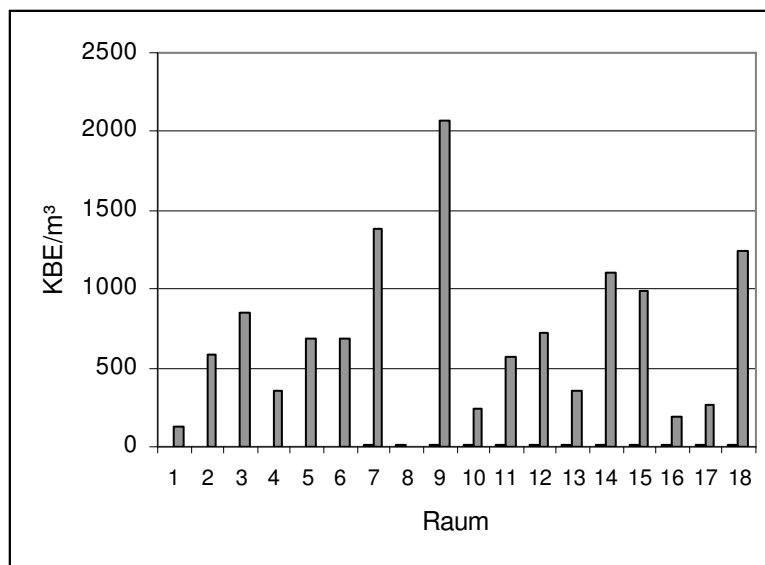


Abbildung 18: Gesamtschimmelpilzkonzentration in KBE/m³ in 18 Innenräumen

4.2.3 Ergebnisse der MVOC-Messung

Dargestellt sind die Ergebnisse der MVOC-Messung nach Auswertung mit Thermodesorption, durchgeführt am Institut für Hygiene und Umweltmedizin der RWTH Aachen (s. Anhang). Bei einer Nachweisgrenze von 100 ng/m³ konnten in keiner Probe Dimethylsulfid, 1-Okten-3-ol, 3-Oktanon, 3-Oktanol, endo-Borneol und Geosmin nachgewiesen werden.

Zur Bewertung werden sowohl die Summe aller gemessenen MVOC (Total-MVOC, MVOC-Summenkonzentrationen) in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Luft bzw. ng/m^3 Luft, (s. Abb. 19) als auch die Konzentrationen der einzelnen Verbindungen betrachtet (s. Abb. 20).

Die geringste Total-MVOC-Konzentration wurde mit $2703 \text{ ng}/\text{m}^3$ in Raum 7, die höchste in Raum 17 mit $19157 \text{ ng}/\text{m}^3$ gemessen. Der Mittelwert der Summenkonzentrationen von allen 18 Kinderzimmern lag bei $7563 \text{ ng}/\text{m}^3$, der Median lag bei $6493 \text{ ng}/\text{m}^3$. Die dominierenden Einzelsubstanzen waren 2-Pentylfuran (Mittelwert von 18 Zimmern: $1923 \text{ ng}/\text{m}^3$) und 2-Heptanon (Mittelwert von 18 Zimmern: $1894 \text{ ng}/\text{m}^3$).

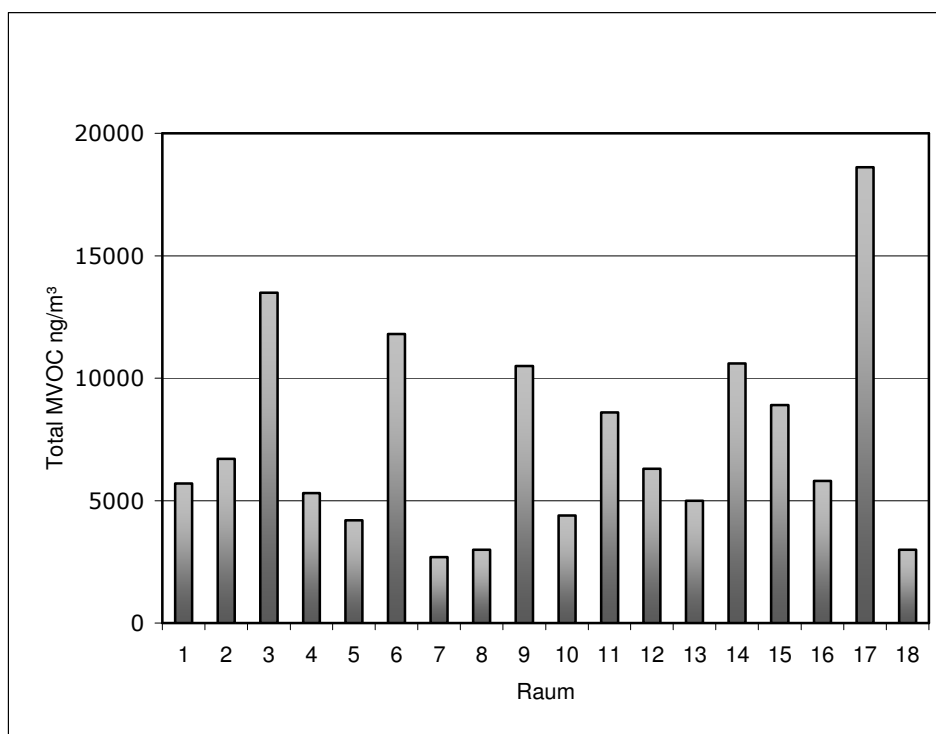


Abbildung 19: Total-MVOC in ng/m^3 in 18 Kinderzimmern am 1. Messzeitpunkt

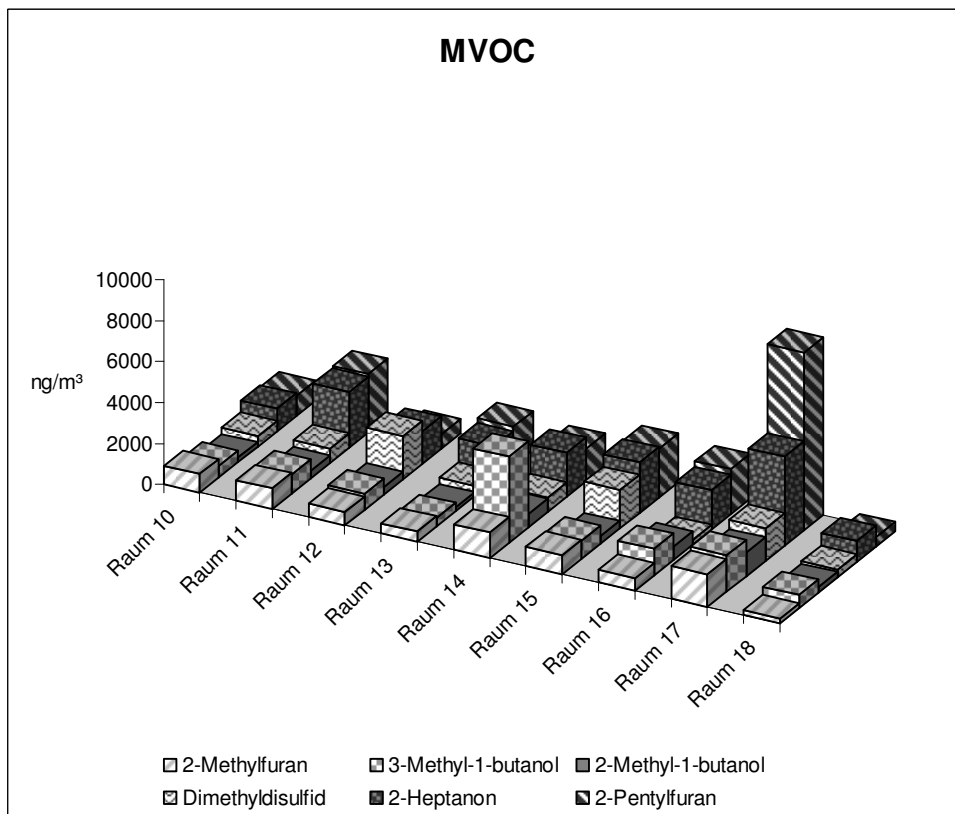
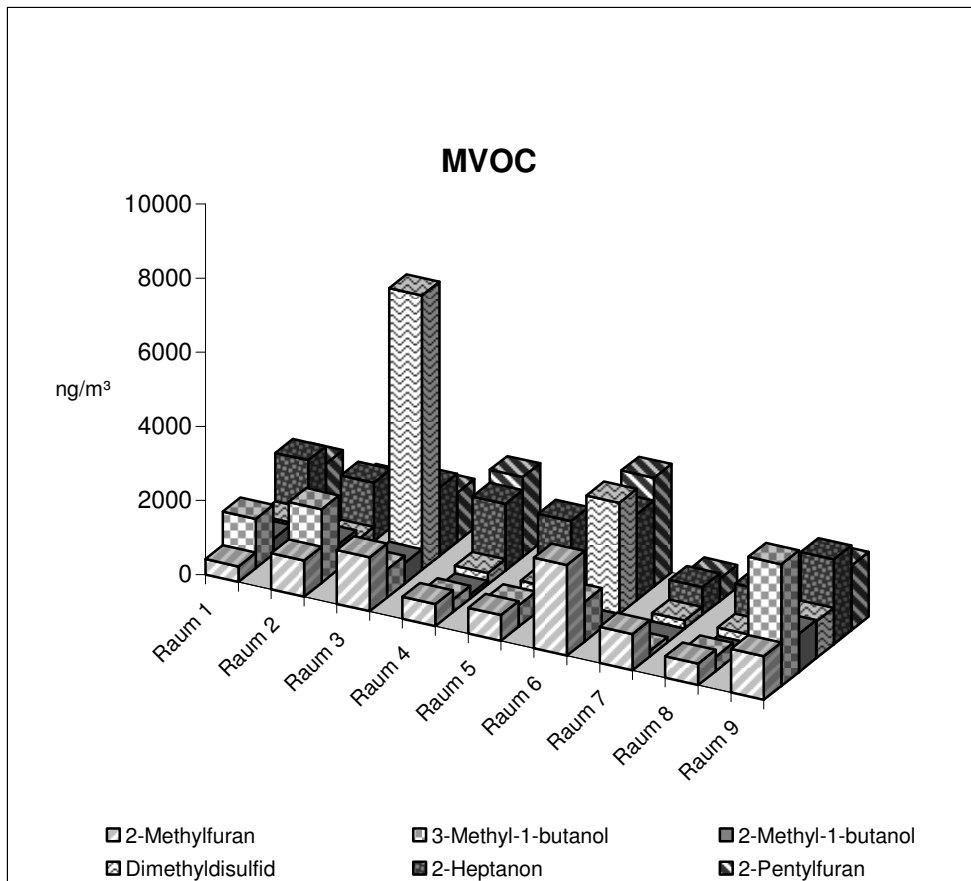


Abbildung 20: Darstellung der Konzentrationen der MVOC-Einzelsubstanzen in 18 Räumen

Da als Sekundärquelle für Furane der Zigarettenrauch diskutiert wird, werden die Furane gesondert betrachtet (s. Tab. 10).

Tabelle 11 stellt eine umfangreiche Zusammenstellung aller MVOC-Konzentrationen in den einzelnen Kinderzimmern dar. Zusätzlich ist der Summenwert, der Median, der Mittelwert (MW) und der Minimal (Min)- bzw. Maximalwert (Max) für jedes Kinderzimmer angegeben. Diese Werte wurden auch für die Summe aller Zimmer in Bezug auf die Einzelsubstanz bestimmt. Ferner lässt sich der Tabelle die relative Luftfeuchtigkeit (rLF) im Kinderzimmer zum Messzeitpunkt, der Raucherstatus der Wohnung und das Lüftungsverhalten der Bewohner entnehmen.

Tabelle 10: Summenkonzentration der Furane

	2-Methylfuran (ng/m ³)	2-Pentylfuran (ng/m ³)	ΣFurane (ng/m ³)
Raum 1	419	1.313	1732
Raum 2	976	1.136	2112
Raum 3	1.460	1.326	2786
Raum 4	598	2.148	2746
Raum 5	698	881	1579
Raum 6	2.451	2.925	5376
Raum 7	978	604	1582
Raum 8	579	772	1351
Raum 9	1.174	1.753	2927
Raum 10	910	996	1906
Raum 11	1.017	2.851	3868
Raum 12	662	727	1389
Raum 13	490	1.890	2380
Raum 14	1.245	1.591	2836
Raum 15	940	2.370	3310
Raum 16	606	2.185	2791
Raum 17	1.601	8.680	10281
Raum 18	246	465	711

Tabelle 11: MVOC-Konzentrationen, deskriptive Verteilung und Einflussparameter in 18 Räumen

	2-Methylfuran (ng/m³)	3-Methyl-1-butanol (ng/m³)	2-Methyl-1-butanol (ng/m³)	Dimethylsulfid (ng/m³)	2-Heptanon (ng/m³)	2-Pentylfuran (ng/m³)	Summe	Median	MW	Min	Max	rLF %	Schimmelpilzkonz. innen (KBE/m³)	Raucherwohnung	Lüftungsverhalten
Raum 1	419	1.328	409	481	1.789	1.313	5.739	897	957	409	1789	73	127	ja	schlecht
Raum 2	976	1.982	668	383	1.574	1.136	6.719	1056	1120	383	1982	62	587	nein	schlecht
Raum 3	1.460	759	558	7.405	1.842	1.326	13.350	1393	2225	558	7405	70	847	ja	gut
Raum 4	598	347	109	313	1.798	2.148	5.313	472,5	886	109	2148	65	354	ja	gut
Raum 5	698	588	0	310	1.736	881	4.213	643	702	0	1736	43	687	nein	gut
Raum 6	2.451	1.075	0	3.001	2.309	2.925	11.761	2380	1960	0	3001	69	687	nein	schlecht
Raum 7	978	149	0	220	752	604	2.703	412	451	0	978	66	1387	ja	schlecht
Raum 8	579	388	0	231	1.044	772	3.014	483,5	502	0	1044	70	7	nein	gut
Raum 9	1.174	3.289	1.030	992	2.297	1.753	10.535	1463,5	1756	992	3289	69	2068	ja	schlecht
Raum 10	910	574	222	532	1.117	996	4.351	742	725	222	1117	57	246	ja	gut
Raum 11	1.017	937	387	714	2.741	2.851	8.647	977	1441	387	2851	53	574	ja	gut
Raum 12	662	799	381	2.113	1.584	727	6.266	763	1044	381	2113	60	720	ja	schlecht
Raum 13	490	399	172	471	1.643	1.890	5.065	480,5	844	172	1890	60	360	ja	schlecht
Raum 14	1.245	4.205	656	717	2.137	1.591	10.551	1418	1759	656	4205	65	1107	nein	gut
Raum 15	940	892	359	1.872	2.462	2.370	8.895	1406	1483	359	2462	70	994	nein	gut
Raum 16	606	1.289	657	212	1.918	2.185	6.867	973	1145	212	2185	67	187	ja	gut
Raum 17	1.601	1.778	1.163	1.594	4.341	8.680	19.157	1689,5	3193	1163	8680	67	267	nein	gut
Raum 18	246	628	273	373	1.009	465	2.994	419	499	246	1009	52	1241	ja	schlecht
MIN	246	149	0	212	752	465									
MAX	2451	4205	1163	7405	4341	8680									
MEDIAN	925	845,5	370	506,5	1793,5	1458,5									
MW	947	1189	391	1219	1894	1923									

4.2.4 MVOC und abhängige Parameter

Durch den K-S-Test konnte eine Normalverteilung der MVOC-Konzentrationen, der Werte für die Luftfeuchtigkeit und der Schimmelpilzkonzentration nachgewiesen werden.

Die Zusammenhänge der MVOC-Konzentrationen zu den untersuchten Variablen wurden durch statistische Tests überprüft. Durch den t-Test wurden folgende p-Werte berechnet: Baumaterial ($p=0,99$), Fensterart ($p=0,48$), Einrichtung ($p=0,44$), Luftbefeuchter ($p=0,79$), Lüftungsverhalten ($p=0,38$), Schimmel beobachtet ($p=0,065$), Feuchtequellen ($p=0,55$), Raucherstatus ($p=0,25$) und Furane/Rauchverhalten ($p=0,24$). Die Berechnung für die Abhängigkeiten bei mehr als zwei Gruppen erfolgte mit der einfachen Varianzanalyse (ANOVA). Folgende p-Werte wurden berechnet: Isoliermaßnahmen ($p=0,28$), Fußboden ($p=0,82$) und Wäschetrocknung ($p=0,047$). Die lineare Regression zwischen MVOC und Feuchtigkeit ergab für $r=0,36/ p=0,14$ und die für MVOC und Konzentration der Schimmelpilzsporen $r=0,01/ p=0,99$ (s. Tab. 12).

Mit Ausnahme der Art der Wäschetrocknung in der Wohnung, konnten keine signifikanten Zusammenhänge zwischen den MVOC-Konzentrationen und Hauseigenschaften oder dem Raumnutzungsverhalten nachgewiesen werden (s. Abb. 21). Der Zusammenhang zwischen Raucher- bzw. Nichtraucherwohnung und der Furankonzentration war ebenfalls statistisch nicht signifikant. Bei der Frage nach beobachtetem Schimmel zeigte sich ein positiver Trend (s. Abb. 22). Obwohl auch die Luftfeuchtigkeit rechnerisch keine signifikanten Zusammenhänge zu den MVOC-Konzentrationen zeigte, ließ sich jedoch der Trend erkennen, dass eine hohe Luftfeuchtigkeit im Raum mit hohen MVOC-Konzentrationen einhergeht (s. Abb. 23).

Tabelle 12: Statistisches Testverfahren und p-Werte aller getesteten Parameter

Parameter	n	Σ MVOC (ng/m ³) Mittelwert	Testverfahren	p
Steinbauten	13	7500	t-Test	0,99
Holz,Lehmbauten	5	7500		
keine Isoliermaßnahmen	5	5000	ANOVA	0,28
Isoliermaßnahmen	13	6400/10700/8200		
Thermopen- verglasung	13	6900	t-Test	0,48
Kastendoppel- fenster	5	9000		
Fliesenfuß- boden	2	10600	ANOVA	0,82
Teppichfußboden	6	6800		
Kombination	10	8400/6800		
Holzmobiliar	9	8300	t-Test	0,44
Kunststoffmobiliar	9	6700		
Wäschetrocknung draußen	5	300	ANOVA	0,047
Wäschetrocknung in Wohnung	3	570		
Kondentrockner	3	11200		
Abluftrockner	7	200		
Passiver Luftbefeuchter	4	8300	t-Test	0,79
Kein passiver Luftbefeuchter	14	7200		
Feuchtequellen vorhanden	7	8400	t-Test	0,55
Keine Feuchte- quellen	11	6900		
Gutes Lüftungsverhalten	10	6400	t-Test	0,38
Schlechtes Lüftungsverhalten	8	7800		
Raucherwohnung	11	6400 (Σ Furane:2300)	t-Test	0,25
Nie-Raucherwohnung	7	9100 (Σ Furane: 3800)		
Kein Schimmel wahrgenommen	9	5600	t-Test	0,065
Schimmel wahrgenommen	9	9300		
Konzentration der Schimmelpilzsporen im Innenraum			Lineare Regression	0,99
Temperatur			Lineare Regression	0,35
Luftfeuchtigkeit			Lineare Regression	0,14

„Wo wird die Wäsche überwiegend getrocknet?“

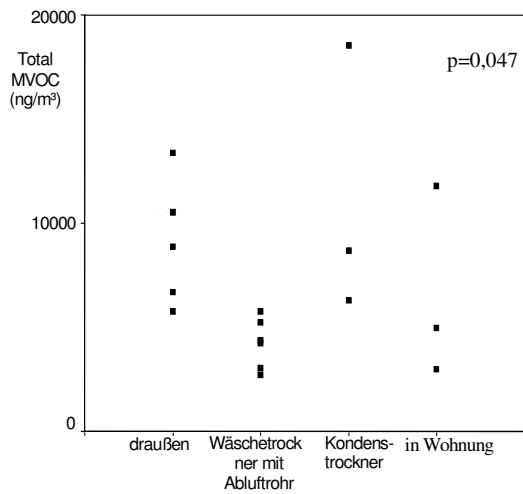


Abbildung 21: MVOC-Konzentrationen in Abhängigkeit zur Art der Wäschetrocknung

„Haben Sie in Ihrer jetzigen Wohnung jemals Schimmel oder Feuchtigkeitsflecken beobachtet (außer auf Lebensmitteln)?“

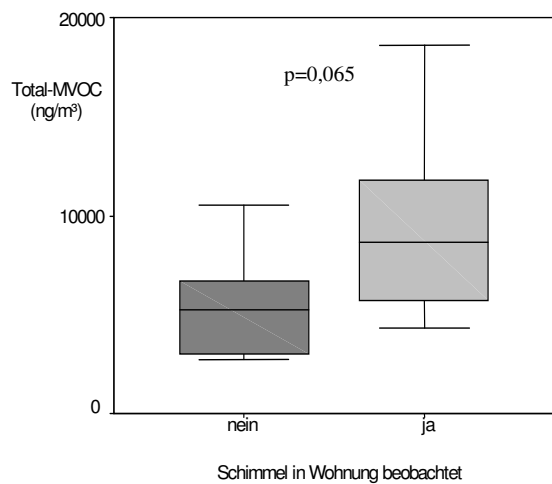


Abbildung 22: MVOC-Konzentrationen in Abhängigkeit zu beobachtetem Schimmel

Luftfeuchtigkeit im Kinderzimmer

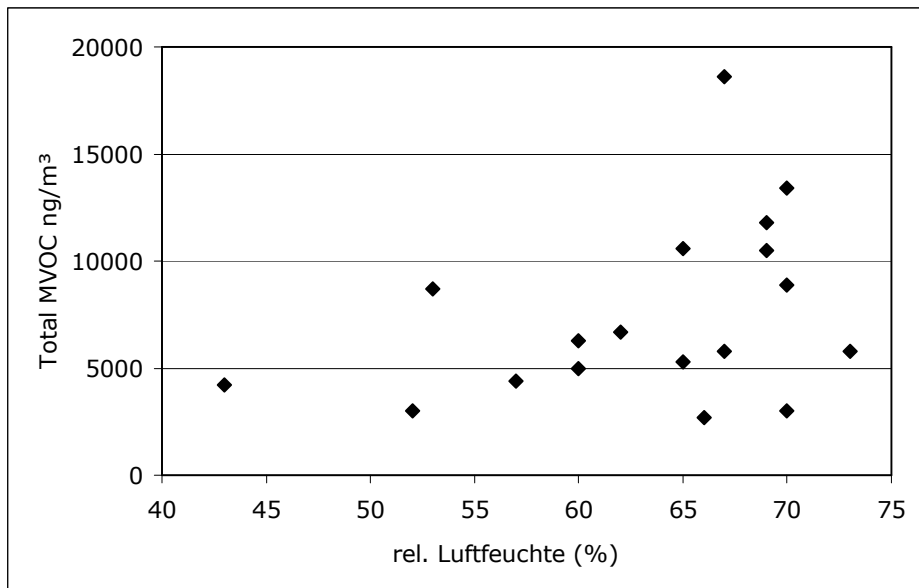


Abbildung 23: MVOC-Konzentrationen in Korrelation zur Luftfeuchtigkeit im Kinderzimmer

Gesamtschimmelpilzsporen im Kinderzimmer

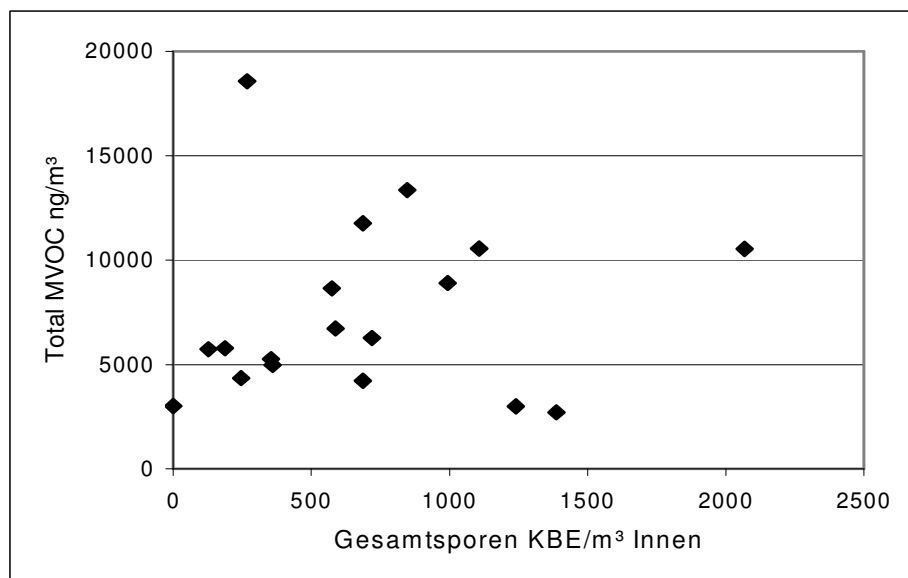


Abbildung 24: MVOC-Konzentrationen in Abhängigkeit zur Gesamtsporenzahl im Kinderzimmer

5. Diskussion

5.1 Bestimmungsmethode

Die Bestimmungsgrenzen der beschriebenen Methode reichten von 417 ng/m³ für α -Pinen bis 4538 ng/m³ für 2-Okten-1-ol. Dabei lagen die Grenzen von 2-Methyl-1-butanol, 3-Methyl-1-butanol und 2-Okten-1-ol mit Werten von mehr als 2500 ng/m³ weit oberhalb von Literaturangaben anderer Untersucher (s. Tabelle 12). Bei zehn Substanzen lagen die Bestimmungsgrenzen im Bereich um 500–600 ng/m³. Bei zwei untersuchten MVOC lagen die Bestimmungsgrenzen unter 500 ng/m³. Elf Substanzen konnten lediglich qualitativ bestimmt werden.

Um die erhaltenen Ergebnisse mit MVOC-Bestimmungsmethoden anderer Autoren zu vergleichen und eine Aussage zur Anwendbarkeit der durchgeführten Methode zu erreichen, wurden die Bestimmungsgrenzen herangezogen (s. Tab.13).

Tabelle 13 zeigt deutlich, dass die Elutionsmethode, die in der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurde, im Vergleich zu anderen Autoren weniger sensibel war. Dies galt insbesondere für die untersuchten Alkohole. Es konnten lediglich sieben Bestimmungsgrenzen direkt miteinander verglichen werden, da sich das Untersuchungsspektrum stark unterschied (s. Tab. 13, fett gedruckt). So lag die Grenze von 3-Methyl-1-butanol in Gießen etwa 170-mal höher als die von Fischer [Fischer 2004] und ca. 12-mal höher als die von Fresenius [Institut Fresenius 2004]. Ähnliche Verhältnisse galten für 2-Methyl-1-butanol. Die Bestimmungsgrenzen von 2-Heptanon und 1-Okten-3-ol lagen bei der **GINA**-Methode ungefähr doppelt so hoch wie bei Fresenius, jedoch ca. 5- (Fischer) bis 74-fach (Keller [Keller 2002 b]) über der Thermodesorptionsmethode. Die weitere Bearbeitung der Elutionsmethode wurde daher abgebrochen und im Rahmen eines neuen Promotionsvorhabens geplant.

Dabei könnten möglicherweise eine Änderung des Ionisationsvorganges (chemische Ionisation) oder andere apparative Möglichkeiten eine Verbesserung der Methode bewirken.

Tabelle 13: Vergleich der Bestimmungsgrenzen verschiedener MVOC-Messmethoden

	Bestimmungsgrenzen (ng/m ³)			
	Fischer	Keller	Institut Fresenius	GINA-Studie
Dimethylsulfid	100	4		
2-Methylfuran	100	29		
3-Methyl-1-butanol	100	16	217	2721
2-Methyl-1-butanol	100	27	200	2638
Dimethyldisulfid	100	11	317	683
Dimethyltrisulfid				604
2-Heptanon	100	16	250	554
1-Okten-3-ol	100	8	217	592
3-Okтанон	100	26	183	908
2-Ethylfuran				596
R-(+)-Limonen				629
α-Pinen				417
2-Pentylfuran	100			446
3-Okтанol	100	13	183	963
endo-Borneol	100	19		
Geosmin	100			
2-Okten-1-ol				4538
2-Isopropyl-methoxypyrazin				542
3-Methylfuran			483	
2-Methylpropanol			200	
2-Pentanol			217	529
2-Hexanon			217	
1-Dekanol			300	

Fischer 2004, Keller 2002b und Institut Fresenius Dresden 2004

Es lässt sich zusammenfassend sagen, dass die Methodik zur MVOC-Bestimmung zurzeit starken Unterschieden hinsichtlich der Ergebnisse unterliegt, wie auch Fischer et al. [2005] in einer Untersuchung zeigten. Dabei wurden zum einen reale Proben aus Innenräumen in vier verschiedenen Laboratorien mit den beiden Methoden parallel ausgewertet. Zusätzlich wurden mit Prüfgas im Labor beaufschlagte MVOC-Proben untersucht und die nachgewiesenen Konzentrationen der MVOC miteinander verglichen. So wurde beispielsweise die Substanz Dimethyldisulfid bei den realen Luftproben mit der Thermodesorptionsmethode (TD) in erheblich größeren Konzentrationen gefunden als mit der Aktivkohlemethode (AK). 1-Okten-3-ol wurde stets bei der AK-Methode nachgewiesen, wohingegen die Verbindung mit TD nicht gefunden wurde.

Auch bei den mit Prüfgas beaufschlagten Laborproben zeigten sich Unterschiede in den gemessenen Konzentrationen. So lagen die Konzentrationen der Parallelproben für die Substanz Dimethyldisulfid für die AK-Methode unterhalb der Nachweisgrenze. Mittels TD wurde Dimethyldisulfid jedoch nachgewiesen. Labor 2 und Labor 3 kamen

für 2-Heptanon und 3-Oktanon zu vergleichbaren Ergebnissen. Labor 4 wies 2-Heptanon jedoch in 10fach niedrigerer und 3-Oktanon ca. 10fach höherer Konzentration als Labor 2 nach. Isoborneol wurde nur in zwei Laboratorien untersucht. Diese beiden Ergebnisse unterschieden sich um den Faktor 10. Die beschriebenen Beispiele unterstreichen eindeutig die starken Unterschiede der beiden MVOC-Bestimmungsmethoden. Dies gilt sowohl für Laboruntersuchungen mit Beaufschlagung von Teströhrchen als auch für reale Innenraumluftproben.

Es existiert im VDI (Verein Deutscher Ingenieure) eine Arbeitsgruppe, die sich mit der Ausarbeitung von Richtlinien für die MVOC-Analysen beschäftigt.

5.2 Feldversuche

Es muss bei der Betrachtung der Ergebnisse der Feldversuche darauf hingewiesen werden, dass sich bei der **GINA**-Studie die Messbedingungen in Bezug auf die Belüftung der beprobten Innenräume in Vergleich zu anderen MVOC-Probenahmen in Innenräumen unterschieden. So war es den Bewohnern beispielsweise erlaubt, Fenster in der Nacht vor der Messung gekippt stehen zu lassen. Die Kinderzimmertür sollte jedoch über Nacht bis zum Ende der Messung geschlossen bleiben. Ein Vergleich mit Messergebnissen anderer Innenraumstudien, bei denen nach der VDI-Richtlinie 4300-6 untersucht wird, ist somit streng genommen nicht möglich. In dieser Arbeit werden jedoch die vorgeschlagenen Referenzwerte, nicht zuletzt auch aus Mangel an Daten, herangezogen, um die MVOC-Ergebnisse einzuordnen.

In der **GINA**-Studie wurden in den untersuchten 18 Räumen folgende MVOC nachgewiesen: Dimethyldisulfid, 2-Methyl-1-butanol, 3-Methyl-1-butanol, 2-Heptanon, 2-Methylfuran und 2-Pentylfuran (Werte: Min: 2700 ng/m³; Max: 19157 ng/m³; Median: 6493 ng/m³). Betrachtet man die Kinderzimmer getrennt voneinander, so lagen die Mediane eines Zimmers im Bereich von 412 ng/m³ bis 2380 ng/m³. Insgesamt wurden in 13 der 18 Zimmer Summenkonzentrationen von mehr als 5000 ng/m³ gemessen, und in 5 von 18 Räumen zudem Werte über 10000 ng/m³.

Diese Werte erscheinen im Vergleich zur aktuellen Literatur vor allem deshalb auffallend hoch, da die untersuchten Räume und auch Wohnungen kein sichtbares

Schimmelpilzwachstum aufwies und eine Belüftung der Zimmer vor der Messung auf Grund der Versuchsbedingungen angenommen werden muss, was normalerweise zu einer Verdünnung der MVOC-Konzentrationen führt [Lorenz 2005, Schleibinger et al. 2008].

Obwohl sich bei der linearen Regression der Schimmelpilzkonzentration zu den MVOC-Werten keine signifikante Abhängigkeit zeigte und auch im Rahmen der Wohnungsbegehung gründlich nach Schimmel gesucht wurde, bedeutet diese Tatsache jedoch nicht zwangsläufig, dass kein Schimmelpilzwachstum vorliegt.

Deshalb stellt sich die Frage, ob

1. die gemessenen MVOC-Werte möglicherweise als Hintergrundwerte in schimmelpilzfreien, bewohnten Wohnungen zum Messzeitpunkt betrachtet werden können oder
2. die MVOC-Werte in nahezu allen Wohnungen auf einen (verdeckten) Schimmelpilzbefall hinweisen oder
3. ein Einlüften der MVOC aus der Außenluft angenommen werden muss oder
4. eine bzw. mehrere sekundäre Quellen innerhalb der Wohnung als Grund für die hohen Werte anzusehen sind.

Hintergrundwerte und Bewertungsschema

Obwohl die MVOC-Messungen in Innenräumen immer öfter eingesetzt werden, um einen verdeckten Schimmelpilzbefall zu diagnostizieren, wurden Untersuchungen, um schimmelpilzunabhängige Hintergrundwerte der MVOC in Innenräumen zu ermitteln, kaum durchgeführt. Keller et al. [2004, 2006 und 2007] erhielten aus MVOC-Proben von 329 Innenräumen erstmals ein Hintergrundspektrum der MVOC für die Monate von April bis September und Oktober bis März in Wohnungen im Raum Berlin, Schleswig-Holstein, Nordrhein-Westfalen und Oldenburg. Nach Auswertung der Luftproben wurden Referenzwerte festgelegt, die zur Bewertung von MVOC-Proben herangezogen werden können. Ebenso existiert ein Bewertungsschema des Umweltbundesamtes und nach Lorenz [Keller et al. 2004]. Bei den Bewertungsvorschlägen werden Hauptindikatoren und Summenwerte für MVOC in ng/m^3 angegeben. Bei Überschreiten der Summenwerte kann nach Aussage der Autoren mit einer verdeckten Schimmelpilzquelle im Innenraum gerechnet werden (s. Tab. 14).

Tabelle 14: Bewertungsschema von MVOC-Proben

MVOC-Hauptindikatoren		
Keller	UBA	Lorenz
Dimethylsulfid	Dimethyldisulfid	Dimethyldisulfid
Dimethyldisulfid	3-Methylfuran	3-Methylfuran
DMSO	1-Okten-3-ol	1-Okten-3-ol
2-Methylfuran	3-Oktanon	
3-Methylfuran		
1-Okten-3-ol		
2-Pentanol		
3-Oktanon		
2-Methylisoborneol		
Σ 440 ng/m ³ (II./III. Quartal) Σ 530 ng/m ³ (IV./I. Quartal)	Σ 240 ng/m ³	Σ 185 ng/m ³

Quelle: Keller et al. 2004, 2006

Bei der Berechnung der Summenkonzentrationen dieser Indikatoren bezogen auf die 18 Räume der **GINA**-Studie wurden die Orientierungswerte von Keller und Lorenz in allen 18 Räumen überschritten. Bei den UBA-Indikatoren wurde der Summenwert für unauffällige Räume nur in 3 Zimmern (fett gedruckt) nicht erreicht, die übrigen Räume überschritten diesen jedoch (s. Tab. 15).

Tabelle 15: Einordnung der GINA MVOC-Werte in das Bewertungsschema nach Keller, UBA und Lorenz

GINA Raum	Summe Keller Indikatoren (ng/m ³)	Summe UBA Indikatoren (ng/m ³)	Summe Lorenz Indikatoren (ng/m ³)
1	900	481	481
2	1359	383	383
3	8865	7405	7405
4	911	313	313
5	1008	310	310
6	5452	3001	3001
7	1198	220	220
8	810	231	231
9	2166	992	992
10	1442	532	532
11	1731	714	714
12	2775	2113	2113
13	961	471	471
14	1962	717	717
15	2812	1872	1872
16	818	212	212
17	3195	1594	1594
18	619	373	373

Weitere Untersuchungen zu Hintergrundspektren von MVOC in Innenräumen liegen in der aktuellen Literatur bislang nicht vor.

Nimmt man lediglich die Bewertungsschemata nach Keller und Lorenz, so gelten alle 18 untersuchten Räume als schimmelpilzverdächtig. Insbesondere die Räume 3, 6, 12, 15 und 17 mit Summenwerten von über 1500 ng/m³ sind besonders auffällig. Allerdings muss angemerkt werden, dass beim Bewertungsschema nach Keller nur zwei der insgesamt neun Hauptindikatoren überhaupt nachgewiesen wurden (Dimethyldisulfid und 2-Methylfuran). Bei UBA und Lorenz geht nur das Dimethyldisulfid in die Bewertung ein.

Schleibinger et al. [2008] untersuchten 40 Wohnungen mit nachgewiesenem Schimmelpilzbefall und 44 Kontrollwohnungen ohne Hinweise auf sichtbaren Schimmelpilz. Dabei wurden sowohl in schimmelpilzfreien als auch in den Wohnungen mit Schimmelpilz eine Vielzahl von MVOC gefunden.

Schimmelpilzbefall

Im Vergleich zu Untersuchungen in Innenräumen mit vermutetem verdeckten Schimmelpilzbefall erscheinen die MVOC-Konzentrationen der **GINA**-Studie ebenfalls eindeutig erhöht.

Keller et al. [1998] untersuchten 117 Wohnungen, die einen unterschiedlich hohen Schimmelpilzbefall zeigten, sowie 14 Kontrollwohnungen. In den Kontrollwohnungen lagen die Gesamt-MVOC-Konzentrationen (3-Methylfuran, 2-Methyl-1-butanol, 3-Methyl-1-butanol, 1-Dekanol, 1-Okten-3-ol, 3-Oktanol, 3-Oktanon, 2-Heptanon, Dimethylsulfid, Dimethyldisulfid, Dimethyltrisulfid, Dimethylsulfoxid, und Geosmin) unter 10 ng/m³ Luft. Dies entsprach den in 36 Fällen gemessenen Außenluftkonzentrationen von MVOC. In einigen der mit Schimmel belasteten Wohnungen wurden Konzentrationen von 10-35 ng/m³ Gesamt-MVOC gemessen, wobei in diesen Wohnungen von den Bewohnern kein Schimmelpilzgeruch wahrgenommen wurde. Bei „geringem“ Schimmelpilzgeruch wurden Konzentrationen im Bereich von 50-1720 ng/m³ gemessen und bei starker Geruchsbelästigung im Bereich von 160-12300 ng/m³.

In einer anderen Untersuchung von Keller und Groh [1998] wurden die Gesamt-MVOC-Konzentrationen in zwei Wohnungen mit sichtbarem Schimmelpilzbefall sowohl im Sommer als auch im Winter bestimmt. Zum Vergleich zu den beiden Wohnungen wurde eine Kontrollwohnung ohne Schimmelpilzbefall herangezogen. In

der unbelasteten Kontrollwohnung lagen die MVOC-Konzentrationen sowohl in der Sommer- als auch in der Wintermessung unter 5 ng/m^3 . Im Vergleich dazu konnten in den belasteten Wohnungen in der Wintermessung Werte von 155 bzw. 225 ng/m^3 ermittelt werden. Die Sommermessung zeigte analog zur Kontrollwohnung niedrige Werte um 20 ng/m^3 , was auf Grund fehlender Feuchtigkeit in den Wohnungen und dem Lüftungsverhalten der Bewohner erklärt wurde. Beide Literaturbeispiele zeigen einen deutlichen Unterschied zu den in Gießen gemessenen MVOC-Konzentrationen. Zudem konnte in keiner Phase der Probennahme von den Untersuchern der **GINA**-Studie der charakteristische Schimmelpilzgeruch wahrgenommen werden, was auf Grund der hohen Werte eigentlich zu erwarten gewesen wäre (s. Tab.5).

In der bereits erwähnten Studie von Keller et al. [2006] wurden neben den schimmelpilzfreien Wohnungen auch 36 Kontrollwohnungen mit Schimmelpilzbefall untersucht. Dabei lag der Median der MVOC-Summenkonzentration der in Tabelle 14 erwähnten Hauptindikatoren bei 1320 ng/m^3 (95-Perzentilwert: 2195 ng/m^3). Wendet man diese Ergebnisse auf die **GINA**-Studie an, liegen 10 Räume über dem Median.

Ebenfalls deutlich abweichende MVOC-Konzentrationen zu den in der **GINA**-Studie gemessenen MVOC-Werten wurden in einer MVOC-Analyse von Obeloer [1998] nachgewiesen. Die Beschäftigten eines Bürogebäudes, in welchem die MVOC-Proben genommen wurden, klagten zum Teil über schwerwiegende gesundheitliche Beeinträchtigungen. Bei der daraufhin durchgeführten MVOC-Analyse wurde eine Summenkonzentration der MVOC von etwa 600 ng/m^3 gemessen, wovon allein auf 1-Okten-3-ol 300 ng/m^3 entfielen. Diese Substanz wird aktuell als sehr schimmelpilzspezifisch eingestuft und wurde in der **GINA**-Studie in keiner der Proben nachgewiesen.

Schleibinger et al. [2001] fanden in 28 Wohnungen mit sichtbarem Schimmelpilzbefall 23 (u.a. auch Dimethylsulfid, 2-Methylfuran, 3-Methylfuran, 2-Pentanon, 2-Pentanol, 3-Methyl-1-butanol, Pyrazin, 2-Methyl-1-butanol, Dimethyldisulfid, 2-Hexanon, DMSO, 2-Heptanon, 1-Okten-3-ol, 2-n-Pentylfuran) von 38 getesteten MVOC in Konzentrationen von $<0,1 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ (Bestimmungsgrenze) bis maximal $65 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ für 2-Ethyl-1-hexanol (nicht getestet bei der **GINA**-Studie). Der Median der Einzelsubstanzen lag für die meisten Substanzen im Bereich von $<0,1 \text{ } \mu\text{g/m}^3$. Die Substanz 3-Methylfuran war in Raucherwohnungen signifikant höher als

in Nichtraucherwohnungen. In der **GINA**-Studie wurden 2-Methylfuran und 2-Pentylfuran gemessen. Die Summenkonzentration beider Furane war nicht mit dem Raucherstatus korreliert, was sich aber möglicherweise auf die unterschiedliche Methodik zurückführen lässt.

In anderen Untersuchungen von Schleibinger et al. [2004, 2008] wurden 40 Wohnungen mit Schimmel und 44 Wohnungen ohne sichtbaren Schimmelpilzbefall 15 MVOC gemessen: 2-Methyl-1-butanol, 3-Methyl-1-butanol, 2-Pentanol, 3-Oktanol, 1-Dekanol, 1-Okten-3-ol, 2-Methylfuran, 3-Methylfuran, 2-Pentylfuran, 2-Heptanon, 2-Hexanon, 3-Oktanon, Dimethyldisulfid, Dimethylsulfid und DMSO. Es konnte gezeigt werden, dass Schimmelpilzbefall mit signifikant erhöhten Konzentrationen von Dimethyldisulfid, 2-Methyl-1-butanol und 1-Okten-3-ol in Zusammenhang steht. Die Furane 2-Methylfuran und 3-Methylfuran waren assoziiert mit dem Raucherstatus der Wohnungen. Der Alkohol 2-Methyl-1-butanol wurde in 15 der 18 untersuchten Räume, Dimethyldisulfid in allen 18 Räumen der **GINA**-Studie nachgewiesen, 1-Okten-3-ol hingegen niemals. Weitere Literaturangaben zu MVOC-Messungen in Innenräumen sind der Tabelle 16 zu entnehmen.

Interessanterweise zeigten sich in der **GINA**-Studie diskrete Zusammenhänge zwischen den MVOC-Werten und der Frage nach Schimmelpilzen, die den Bewohnern irgendwann einmal in ihrer Wohnung aufgefallen waren, welche aber zum Zeitpunkt der Wohnungsbegehung nicht mehr nachweisbar waren ($p=0,065$). Hier stellt sich die Frage, ob nach Schimmelentfernungsmaßnahmen möglicherweise noch verdeckter Schimmel vorhanden sein könnte oder die MVOC-Werte nach einer durchgeführten Sanierung noch auf erhöhtem Niveau gemessen wurden. Lorenz et al. [2005] wiesen nach, dass die MVOC-Konzentrationen nach Sanierungsmaßnahmen erst über einen Zeitraum von mehr als 100 Tagen sehr langsam wieder abfielen. Aus der Befragung der Bewohner zeigte sich jedoch, dass die beschriebene Schimmelpilzquelle entweder im Bad in Form eines Fugenschimmelpilzes oder im Keller außerhalb des Wohnraumes vorlag. Es bleibt die Frage, ob diese Arten von Schimmelpilzquellen für die hohen MVOC-Konzentrationen verantwortlich sein können.

Tabelle 16: Literaturangaben zu MVOC-Messungen in Innenräumen

Quelle	Substanzen	Belastete Innenräume (ng/m ³)	Unbelastete Referenzräume (ng/m ³)
Ström et al. 1993	3-Methylfuran,3-Methyl-1-butanol, 3-Methyl-2-butanol,2-Pentanol,2-Hexanon, 2-Heptanon,2-Oktanon,3-Oktanol,1-Okten-3-ol, 2-Okten-1-ol,2-Methylisoborneol,Geosmin, 2-Isopropyl-methoxy-pyrazin	∑MVOC: 49100 (Haus)	∑MVOC: 3300 (Haus)
Ström et al. 1994	3-Methylfuran,2-Methyl-1-propanol,1-Butanol, 3-Methyl-1-butanol,3-Methyl-2-butanol, 2-Pentanol,2-Hexanon,2-Heptanon,3-Oktanon, 3-Oktanol,1-Okten-3-ol,2-Okten-1-ol, 2-Methylisoborneol,2-Isopropylmethoxy-pyrazin	Haus A: ∑MVOC:26594, MW: 1773 (Feuchtigkeit und Beschwerden); Haus B: ∑MVOC: 51566, MW: 3683 (Wasserschaden)	Haus C: ∑MVOC: 7948, MW: 530
Keller et al. 1998	u.a. + 3-Methylfuran,3-Methyl-1-butanol, 1-Dekanol,1-Okten-3-ol,3-Oktanol,3-Oktanon, 2-Heptanon,Dimethylsulfid, Dimethyltrisulfid, DMSO und Geosmin	∑ 10-12300	Kontrollwohnungen ∑ <10
Keller und Groh 1998	DMDS,DMS,DMSO,1-Dekanol,2-Methyl-1-propanol,2-Methyl-1-butanol,3-Methyl-1-butanol, 1-Okten-3-ol,Geosmin,2-Pentanol, Isobutylether, Isopentylether,	10-110 für Einzelsubstanzen ∑MVOC: <5-221	Kontrollwohnung <10
Obeloer 1998	1-Okten-3-ol,2-Butanon,2-Heptanon,3-Oktanon, 2-Methyl-1-propanol,2-Methyl-1-butanol, 3-Methyl-1-butanol,3-Oktanol,1-Dekanol, DMDS,DMSO	∑MVOC Pavillion ca. 600; 1-Okten-3-ol: 300; Raum mit Wasserschaden ∑MVOC: 3054;	
Schleibinger et al. 2001	u.a. Dimethylsulfid,2-Methylfuran,3-Methylfuran, 2-Pentanol,3-Methyl-1-butanol,2-Isopropyl-methoxy-pyrazin,2-Methyl-1-butanol,DMDS, 2-Heptanon,1-Okten-3-ol,2-Pentylfuran	u.a. 3-Methylfuran: Median: 1300, Max.: 4400; 2-Ethyl-1-hexanol: Median: 7400, Max.: 65000; 1-Okten-3-ol: Median: <100, Max.: 1500;	
Reinhardt-Benitez und Mergner 2002	3-Methyl-1-butanol,1-Okten-3-ol,3-Oktanon, 3-Methylfuran, DMDS	8 Pavillions: ∑MVOC:~ 900; 10 Massivbauten: ∑MVOC: ~800;	
Keller et al. 2004	DMS,DMDS,DMSO,2-Methylfuran,3-Methylfuran, 1-Okten-3-ol,2-Pentanol,3-Oktanon,2-Methylisoborneol		∑MVOC: Median <62, 95-Perzentile: 482
Keller et al. 2006	DMS,DMDS,DMSO, 2-Methylfuran,3-Methylfuran,1-Okten-3-ol,2-Pentanol,3-Oktanon,2-Methylisoborneol	Oktober bis März : Median 1320 95-Perzentilenwert: 2195	Referenzwerte II. und III Quartal '03: 440 IV. und I. Quartal '04/05: 530

Außenluft

Laut Literatur scheinen die MVOC in der Außenluft keine Rolle zu spielen, sofern die Proben nicht in der Nähe von Sekundärquellen wie z.B. Kompostierungsanlagen genommen werden [Lorenz und Mehrer 2004]. Nach Keller [2000, 2004] konnten

MVOC in ca. 750 bzw. 131 Luftproben bei einer Nachweisgrenze von 10 ng/m³ praktisch nicht bestimmt werden. Ebenso schließen andere Autoren das Eintragen von MVOC aus der Außenluft in den Innenraum aus [Reinhardt-Benitez und Mergner 2002]. Demnach müssen parallel zur Innenluftmessung Außenluftmessungen nur durchgeführt werden, wenn sich z.B. im Umkreis der Wohnung ein Kompostierwerk befindet. Ansonsten kann davon ausgegangen werden, dass in der Regel in der Außenluft MVOC-Summenwerte von unter 0,1 µg/m³ bis maximal 0,2 µg/m³ auftreten [Lorenz 2005]. Auf Grund der Messbedingungen ist generell eine Einlüftung der MVOC aus der Außenluft denkbar. Nur eine parallele Außenluftprobe, die bei der **GINA**-Studie nicht genommen wurde, hätte diese Erklärung für die hohen Innenraumkonzentrationen sicher widerlegen können. Da sich die Wohnungen aber nicht in der Umgebung von MVOC-Emittenten wie einem Kompostierungswerk befanden, ist die Wahrscheinlichkeit des Einlüftens eher als gering einzustufen.

Sekundärquellen in der Wohnung

Von der Mehrzahl der Bewohner wurde angegeben, dass die Kinderzimmertür mit Ausnahme des Messtages tagsüber meist geöffnet stand, sodass ein Luftaustausch mit den übrigen Zimmern der Wohnung sicher stattgefunden hat.

Dimethyldisulfid als Hauptindikator nach Keller et al. [2006] konnte in unterschiedlich hohen Konzentrationen in allen Räumen nachgewiesen werden. Diese Substanz ist daneben in verschiedenen Aromastoffen enthalten (s. Tab. 3), sodass sich der Nachweis möglicherweise auf ein Einlüftungsphänomen zurückführen lässt.

Durch die Wohnungsbegehung und die Fragebögen konnten eine Vielzahl anderer wichtiger Sekundärquellen (z.B. Pflanzen, ätherischer Öle oder Duftlampen, Rauchverhalten, Renovierungsmaßnahmen) erfasst werden. Die statistischen Tests zeigten keine signifikanten Zusammenhänge zwischen den baulichen Eigenschaften der Wohnungen (Isoliermaßnahmen und der Kinderzimmereinrichtung) oder den Angaben zur Raumnutzung (Rauchen, Lüften oder Feuchtequellen), Ausnahme war die Art der Wäschetrocknung. Hier konnte ein Unterschied zwischen den einzelnen Gruppen nachgewiesen werden. Auf Grund der geringen Fallzahl lässt sich die Frage nach dem „Warum“ allerdings nicht beantworten. Man kann eventuell die erhöhte Feuchtigkeit, die beim Trocknen der Wäsche in der Wohnung oder durch das Benutzen eines Kondenswäschetrockners entsteht, als Ursache vermuten. Denn erhöhte Feuchtigkeit kann zur Schimmelpilzbildung führen und somit

wiederum hohe MVOC-Werte hervorrufen. Eine andere Erklärung wäre möglicherweise, dass eine hohe Luftfeuchtigkeit zu einer hohen Feuchtigkeit von Baumaterialien führt, woraus eine erhöhte VOC-Emission resultiert [Lorenz 2005]. Weiterhin konnte in der **GINA**-Studie gezeigt werden, dass eine erhöhte Luftfeuchtigkeit im Kinderzimmer mit erhöhten MVOC-Werten einhergeht. Dieser Trend war statistisch gesehen jedoch nicht signifikant, was möglicherweise ebenfalls an der geringen Fallzahl liegen könnte. Die Zusammenhänge zwischen hoher Luftfeuchtigkeit und erhöhten MVOC-Werten wurden auch in einer Studie von Schleibinger nachgewiesen [Schleibinger et al. 2004, 2008].

Schleibinger et al. [2004, 2008] beschrieben auch einen signifikanten Zusammenhang zwischen Zigarettenrauch und den zu den MVOC zählenden Furanen 2- und 3-Methylfuran. Dies konnte in der **GINA**-Studie nicht bestätigt werden. Diese Abweichung lässt sich vermutlich mit der Erhebung des Raucherstatus und der geringen Fallzahl erklären.

In zukünftigen Studien müssen weitere Sekundärquellen und Einflussfaktoren für MVOC entdeckt werden, um die Spezifität von MVOC-Untersuchungen noch zu steigern.

Es erscheint zusammenfassend also nicht leicht erklärbar, welche Ursache den hohen MVOC-Konzentrationen in den Kinderzimmern der **GINA**-Studie zu Grunde liegt. Um eine höhere Aussagefähigkeit zu erreichen, hätten neben den Luftkeimmessungen und den MVOC-Messungen zusätzlich Feuchtemessungen von Wänden bzw. Gebäudeteilen in der Wohnung oder eine Wohnungsbegehung mit einem „Schimmelhund“ durchgeführt werden müssen. Die **GINA**-Studie macht eindrucksvoll deutlich, dass eine befriedigende Bewertung von Wohnräumen auf einer Vielzahl von Säulen ruhen muss. Weder durch Wohnraumbegehungen allein noch durch Luftmessungen können klare Aussagen getroffen werden. Auch die Befragung der Bewohner und Materialproben sollten mit einbezogen werden.

Aus den o.g. Gründen erscheint ein Urteil des Amtsgerichtes Berlin-Wedding 67 S 87/97 äußerst fragwürdig, welches einem Mieter das Recht auf fristlose Kündigung seines Mietvertrages zusprach, weil der Nachweis von MVOC in der Raumluft genüge, um von einem Schimmelpilzbefall und somit einer Gesundheitsgefährdung auszugehen [Biomess 2005].

Ergebnisse der **GINA**-Studie wurden im Rahmen von wissenschaftlichen Präsentationen und Veröffentlichungen bereits vorgestellt:

Vorträge:

„Lungentag“ der Kinderklinik Giessen 2002, 2003, und 2004

WHO-Veranstaltung „Housing and Health 2002“, Forli, Italien [Herr et al. 2002]

WHO-Veranstaltung „Housing and Health 2004“, Vilnius, Litauen [Herr et al. 2004 b]

GHU/ISEM-Tagung 2003, Tübingen [Herr et al. 2003]

GHU/ISEM-Tagung 2004, Halle [Herr et al 2004 a]

Poster:

DGAUM/ÖGA-Tagung 2004, Innsbruck, Österreich [Herr et al. 2004 c]

GHU/ISEM-Tagung 2004, Halle [Schenke et al. 2004]

Veröffentlichungen:

Gefahrstoffe-RdL 2005 [Herr et al. 2005]

Umweltmedizin in Forschung und Praxis (peer reviewed), angenommen 11/08;

geplante Veröffentlichung Heft 2 2009 [Schenke et al.]

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung auf Deutsch

Hintergrund

Die von Schimmelpilzen als Stoffwechselprodukte gebildeten MVOC (microbial volatile organic compounds) gelten als Indikatoren für einen verdeckten Schimmelpilzbefall. Die Beurteilung der Höhe der gemessenen Konzentrationen ist aus verschiedenen Gründen problematisch. Auf Grund mangelnder Daten lassen sich nur schwer Orientierungs- oder Referenzwerte für die MVOC angeben. Vor allem fehlen Messungen in unbelasteten Innenräumen, um diese Richtwerte festzulegen oder gesundheitsbezogene Daten zu erhalten (toxikologische Relevanz).

Außerdem werden zur Bestimmung der MVOC zwei verschiedene Labormethoden angewendet, welche je nach Einzelsubstanz deutliche Ergebnisabweichungen zeigen. Neben Schimmelpilzen als Primärquellen werden MVOC auch von so genannten Sekundärquellen emittiert. Diese Sekundärquellen müssen bei der Bewertung von MVOC-Proben als Einflussfaktoren unbedingt berücksichtigt und durch Studien definiert werden.

Methoden

Im Rahmen der **GINA**-Studie der JLU Gießen wurden in 18 augenscheinlich schimmelpilzfreien Kinderzimmern die MVOC in der Innenraumluft gemessen. Zusätzlich wurden die Luftfeuchtigkeit, die Gesamtkeimzahl der Schimmelpilze und - mit Hilfe eines Fragebogens - Hauseigenschaften und das Raumnutzungsverhalten der Bewohner erfasst und in Beziehung zu den MVOC-Konzentrationen gesetzt. Alle qualitativen Parameter wurden mit dem t-Test bzw. der einfachen Varianzanalyse ausgewertet. Die Auswertung der quantitativen Parameter erfolgte mittels linearer Regression.

Ergebnisse

Die Summenkonzentrationen der MVOC lagen in allen Zimmern über 2000 ng/m³ (Min 2703 ng/m³, Mittelwert 7563 ng/m³, Median 6493 ng/m³, Max 19157 ng/m³) und

damit weit über den angegebenen MVOC-Werten in anderen Studien. Die Summenkonzentrationen korrelierten nicht mit den Schimmelpilzkonzentrationen ($p=0,99$) und nur gering ohne Signifikanz mit der Luftfeuchtigkeit im Kinderzimmer (0,14). In Bezug auf die Hauseigenschaften und das Raumnutzungsverhalten zeigte sich kein signifikanter Zusammenhang zu den MVOC-Werten mit Ausnahme der Art der Wäschetrocknung ($p=0,047$).

Aus der in Gießen durchgeführten Elutionsmethode wurden im Vergleich zur Thermodesorptionsmethode wesentlich höhere Bestimmungsgrenzen bestimmt (z.B. 3-Methyl-1-butanol: 2721 ng/m³ vs. 100 ng/m³). Damit ist diese Methode zurzeit nicht ausreichend sensitiv, um die laut Literatur niedrigen MVOC-Konzentrationen zu erfassen.

Zur Bewertung der MVOC hinsichtlich ihrer toxikologischen Relevanz kann auf Grund mangelnder Studien und Daten bislang nur festgehalten werden, dass die in Innenräumen gemessenen MVOC häufig um den Faktor 1000 niedriger liegen als entsprechende Reizkonzentration einzelner Substanzen. Insgesamt existieren aber nur wenig Daten zur toxikologischen Relevanz.

Fazit

In der **GINA**-Studie wurden MVOC in schimmelpilzfreien Kinderzimmern gemessen. Die Ergebnisse dieser Messungen waren unerwartet hoch. Die gleichzeitig bestimmten Schimmelpilzkonzentrationen korrelierten nicht mit den MVOC-Werten. Es zeigte sich der Trend, dass eine hohe Luftfeuchtigkeit im Kinderzimmer mit erhöhten MVOC-Werten einhergeht. Möglicherweise spielt auch die Luftfeuchtigkeitserhöhung eine entscheidende Rolle für den signifikanten Zusammenhang zwischen der Art der Wäschetrocknung und den MVOC-Werten. Zwischen den übrigen getesteten Hauseigenschaften bzw. dem Raumnutzungsverhalten konnten keine Zusammenhänge nachgewiesen werden. Aus diesem Grund erscheint es besonders wichtig, dass geeignete Indikatorsubstanzen, ihre im Innenraum akzeptablen Konzentrationen und bislang unbekanntes Sekundärquellen für MVOC weiterhin nachgegangen werden muss. Zudem ist auch die MVOC-Analytik, die zurzeit mit verschiedenen Verfahren durchgeführt wird, unterschiedlich sensitiv für einzelne MVOC, wodurch weitere Laborstudien und Ringversuche erforderlich werden.

In Hinblick auf die gesundheitliche Relevanz scheinen die MVOC, jedoch nicht die Schimmelpilze, zurzeit keine große Rolle zu spielen. Obwohl die MVOC-Konzentrationen, die in den Kinderzimmern der **GINA**-Studie nachgewiesen wurden, im Vergleich sehr hoch waren, lagen diese Messwerte noch weit unter den toxikologisch relevanten Reizkonzentrationen. Dennoch muss hinzugefügt werden, dass erstens die den MVOC zugeschriebenen Beschwerden genauer definiert werden sollten, zweitens keine standardisierten Erhebungsinstrumente existieren, die exakt diese Beschwerden abfragen und drittens weitere Studien zur Toxikologie und Immunmodulation der MVOC durchgeführt werden müssen.

6.2 Summary

Background

Metabolic compounds produced by mould, i.e. microbial volatile organic compounds (MVOC), are possible indicators of concealed mould infestation. There are several reasons that make the evaluation of concentrations of these compounds difficult. Though reference values for rooms without mould growth have been suggested there is a lack of studies in moldfree environment. Apart from the production by mould as the primary source, MVOC can also be released from secondary sources. This has to be considered in the evaluation von MVOC measurements.

Methods

In June 2002 active sampling was performed in 18 childrens bedrooms without visible mould growth to analyse MVOCs during the **Gießen Indoor Allergen study (GINA-study)**. Additionally, indoor climate parameters as well as total mould counts were measured indoors and outdoors. Room characteristics and habits of use were assessed with a detailed questionnaire. Statistical analysis was performed with SPSS (version no. 11). The significance value threshold α was determined at 0,05.

Results

The results showed no significant correlation between mould counts ($p=0,99$), climate parameters ($p=0,14$) and MVOC. Indoor drying of washed clothes indicated a significant association with MVOC ($p=0,047$). None of the other indoor parameters was identified as a potential secondary source of MVOC. In **GINA** study the MVOC analysis was performed with active charcoal sampler tubes. The results of the detection limit were compared with thermodesorption method. It was shown that the thermodesorption method was more sensitive for MVOC detection.

With regard to the toxicological relevance it is important to mention that the MVOC indoor concentrations are about 1000 fold lower than the corresponding irritation concentrations.

Conclusions

MVOC were conspicuously higher than in other studies. Definite causes could not be presented in detail. None of the indoor parameters, except drying washing, was

identified as a potential secondary source of MVOC. Though there was no significant correlation between mould concentration and MVOC amounts there was a positive association between indoor humidity and measured MVOC-concentration. The results of this study, performed in children's bedrooms without mould growth, underline the need for more data on indoor MVOC concentrations in order to create reference values and find additional sources for MVOC.

It is also necessary to implement more laboratory studies to compare the existing analysing methods. The toxicological relevance of MVOC is neglectable. Though it is important to mention that it has to be determined what kind of toxicological symptoms are MVOC specific symptoms. Furthermore no special questionnaires are available to obtain health problems coming from MVOC.

7. Anhang

7.1 Fragebögen

7.1.1 Begehungsprotokoll

Wohnung allgemein

1. In welchem Jahr wurde das Wohnhaus gebaut?

- nach 1990 1
- 1981 bis 1990 2
- 1971 bis 1980 3
- 1961 bis 1970 4
- 1946 bis 1960 5
- 1900 bis 1945 6
- vor 1900 7

2. Um was für einen Typ Haus handelt es sich?

- Ein- oder Zweifamilienhaus, freistehend 1
- Ein- oder Zweifamilienhaus, nicht freistehend 2
- Mehrfamilienhaus mit weniger als 5 Etagen 3
- Mehrfamilienhaus mit mehr als 5 Etagen 4

3. Weist das Haus eine der folgenden baulichen Besonderheiten auf?

Mehrere Antworten möglich!

- Energiesparhaus 1
- Öko-Haus 2
- Flachdachhaus 3
- Bauernhaus mit direkt angebautem Stallgebäude, in dem Tiere gehalten werden 4

4. Baumaterial des Hauses? *Bei mehreren Materialien bitte das überwiegende Baumaterial nennen!*

- Ziegelbau 1
- Klinkerbau 2
- Hohlblock 3
- Beton 4
- Lehm/Fachwerkhaus 5
- Fertighaus 6
- Holz 7
- Sonstiges 8

Und zwar _____

5. Ist das Haus unterkellert?

- voll unterkellert 1
- teilweise unterkellert 2
- kein Keller 3

6. Wie sind die Außenmauern bzw. das Dach des Hauses isoliert?

Außenmauern:

- keine Isolierung 1
- Hohlblockbauweise 2
- Außenisolierung (z. B. durch Verkleidung) 3
- Innenisolierung (z. B. durch Gipskarton) 4
- Dachisolierung 5

7. In welcher Umgebung befindet sich das Haus?

- Dorf 1
- Stadttrand 2
- Stadtzentrum 3
- Industriegebiet 4

8. Bebauungsdichte *mehrere Antworten möglich!*

- ländlich 1
- geringe Bebauung (mit großen unbebauten Flächen) 2
- lockere Bebauung (Ein- und Mehrfamilienhäuser) 3
- dichte Bebauung (Mehrfamilienhäuser) ohne Gewerbebetriebe 4
- dichte Bebauung (Mehrfamilienhäuser) mit Gewerbebetrieben 5
- Straßenschlucht 6

9. Befindet sich in unmittelbarer Umgebung des Hauses (bis zu 20 m Entfernung)

- ein Komposthaufen 1
- ein Misthaufen 2
- eine Biomülltonne 3

10. In welcher Etage des Hauses befindet sich das Schlafzimmer des Kindes?

Souterrain/Keller 1
 Erdgeschoß 2
 1. Etage 3
 2. Etage 4
 3. Etage 5
 4. Etage oder höher 6

11. Art der Fenster im Schlafzimmer des Kindes

Einscheibenfenster 1
 Kastendoppelfenster/2-Rahmenfenster 2
 Isolierverglasung, Thermofenster, Schallschutzfenster 3
 keine Fenster 4

Bewohner allgemein

12. Wie viele Bewohner hat die Wohnung?
 I_I_I

13. Wieviele Menschen schlafen im Schlafzimmer des Kindes?

(das Kind nicht mitgerechnet) I_I

14. Gibt es Haustiere in der Wohnung?
 ja nein \Rightarrow Frage 15!

Falls **ja**, welche?

Hund ja nein
 ... kommt regelmäßig ins Schlafzimmer des Kindes ja nein
 Katze ja nein
 kommt regelmäßig ins Schlafzimmer des Kindes ja nein
 Vogel ja nein
 kommt regelmäßig ins Schlafzimmer des Kindes ja nein
 andere (z.B. Ratte, Meerschweinchen, Fische) ja nein
 kommt regelmäßig ins Schlafzimmer des Kindes ja nein

Reinigungsgewohnheiten

15. Wie häufig wird das Schlafzimmer des Kindes gereinigt?

Fußboden saugen 1
 Staub wischen 1
 wischen der Möbel 1
 Mehr als zweimal die Woche 1
1 1
 ein- bis zweimal die Woche 2
2 2
 weniger als einmal die Woche 3
3 3

16. Sind Gardinen im Schlafzimmer des Kindes vorhanden? Ja
 nein \Rightarrow Frage 17!
 Falls **ja**, wie häufig werden diese gewaschen?
 monatlich oder häufiger 1
 1 mal im Quartal 2
 2 mal jährlich 3
 1 mal jährlich 4
 seltener 5

17. Bei welcher Temperatur waschen Sie die Bettwäsche des Kindes überwiegend?

kochend 90°C 1
 heiß 60 °C 2
 warm 30°C - 40°C 3
 kalt 4
 Bettwäsche wird außer Haus gewaschen 5
 weiß nicht 6

18. Wo wird die Wäsche überwiegend getrocknet?

In der Wohnung, nicht mit einem Wäschetrockner 1
 draußen, bzw. auf dem Balkon oder Dachboden 2
 Wäschetrockner mit Abluftrohr nach draußen 3
 Wäschetrockner ohne Abluftrohr nach draußen 4

19. Wird die Bettwäsche des Kindes gebügelt oder heiß gemangelt?

ja
 nein
 weiß nicht

Heizung und Lüftung

20. Wie wird die Wohnung überwiegend beheizt?

Fern-/Zentralheizung

(kein Brenner in den Wohnräumen sondern Heizkörper oder Fußbodenheizung, die von außerhalb der Wohnung (z.B. Keller) mit Wärme versorgt werden) ⇒ Frage 21!

Etagenheizung

(ein Brenner in den Wohnräumen, über den eventuell mehrere Heizkörper mit Wärme versorgt werden)

Wenn ja, wo befindet sich der Brenner?

- Küche, Bad
Wohnzimmer
gesonderter Raum

Einzelraumheizung

(mehrere Öfen in der Wohnung)

Falls Sie **Etagen- oder Einzelraumheizung** haben, womit heizen Sie überwiegend?

- Holz/Koks/Kohle/Briketts
Gas
Öl
Strom

21. Haben Sie in Ihrer Wohnung einen offenen Kamin, einen Kaminofen oder Beistellherd?

ja nein ⇒ Frage 22!

Falls ja, wie oft benutzen Sie ihn während der Monate von Oktober bis April?

- (fast) nie 1
1-2 mal im Monat 2
1-2 mal in der Woche 3
(fast) täglich 4

22. Benutzen Sie Gas zum Kochen?

ja nein

zum Warmwasserbereiten (mittels Boiler/Durchlauferhitzer)? ja nein

Gibt es für den Kochherd einen besonderen Abzug (Dunstabzug) nach draußen?

ja nein

23. Wird eine Klimaanlage verwendet?

ja nein

Wird im Schlafzimmer des Kindes ein PASSIVER Luftbefeuchter (mit Wasser gefüllte Gefäße) verwendet? ja nein

Wird im Schlafzimmer des Kindes ein AKTIVER Luftbefeuchter (Verdunster, Vernebler) verwendet? ja nein

Falls ein aktiver Luftbefeuchter verwendet wird, wie häufig wird er benutzt?

- täglich 1
mehrmals die Woche 2
1 mal pro Woche 3
1 mal pro Monat 4
seltener 5

24. Wie lüften Sie Ihre Wohnung im Winter?

Schlafzimmer des Kindes

selten, nie 1

einmal täglich für kurze Zeit gut durchlüften

2

mehrmals täglich für kurze Zeit gut durchlüften

3

über mehrere Stunden das Fenster ganz öffnen

4

Fenster ist ständig gekippt

5

kein Fenster

6

25. Wie lüften Sie Ihre Wohnung im Sommer?

Schlafzimmer des Kindes

selten, nie 1

einmal täglich für kurze Zeit gut durchlüften

2

mehrmals täglich für kurze Zeit gut durchlüften

3

über mehrere Stunden das Fenster ganz öffnen

4

Fenster ist ständig gekippt

5

kein Fenster

6

26. Wie warm ist es im Schlafzimmer des Kindes

tagsüber in der Heizperiode?

unter 18°C 1

circa 20°C 2

mehr als 22°C 3

Schimmel, Feuchtigkeit

27. Sind Feuchtigkeitsflecken im Schlafzimmer des Kindes wahrnehmbar?

Ja, gesamte Fläche kleiner als eine Postkarte 1

Ja, gesamte Fläche zwischen einer Postkarte und einem Blatt Papier (DIN A4)

2

- Ja, gesamte Fläche zwischen einem Blatt Papier (DIN A4) und 1 m² 3
 Ja, gesamte Fläche größer als 1m² 4
 Nein, nicht wahrnehmbar 5

28. Sind **Schimmelflecke** im Schlafzimmer des Kindes wahrnehmbar?

- Ja, gesamte Fläche kleiner als eine Postkarte 1
 Ja, gesamte Fläche zwischen einer Postkarte und einem Blatt Papier (DIN A4) 2
 Ja, gesamte Fläche zwischen einem Blatt Papier (DIN A4) und 1 m² 3
 Ja, gesamte Fläche größer als 1m² 4
 Nein, nicht wahrnehmbar 5

29. Haben Sie in Ihrer jetzigen Wohnung jemals **Schimmel** oder **Feuchtigkeitsflecken** beobachtet (außer auf Lebensmitteln)?

- ja
 nein ⇒ Frage 30!

Wenn **ja**, in welchen Räumen?
 Mehrere Antworten möglich!

- Badezimmer 1
 Wohnräume 2
 Kinderzimmer 3
 Küche 4
 sonstige Räume 5

30. Wurden bereits Maßnahmen zur Bekämpfung aufgetretener

- Feuchtigkeit oder von Schimmel getroffen? ja
 nein ⇒ Frage 31!

Falls **ja**, welche?

- Behandlung der Außenwände mit feuchtigkeitsbindenden Chemikalien (Hydrophobierungsmaßnahme) 1
 Behandlung der Innenwände mit schimmeltötenden Chemikalien (Fungiziden) 2
 Mechanisches Abtragen der betroffenen Flächen 3

Schädlingsbekämpfungsmaßnahmen

31. Wurden in den letzten 12 Monaten Maßnahmen zur Bekämpfung von Schädlingen (z.B. Ameisen, Küchenschaben) in der Wohnung durchgeführt?

- ja nein

32. Haben Sie im Schlafzimmer des Kindes in den letzten 2 Monaten Mittel zur Abtötung von Hausstaubmilben angewandt?

- ja nein

Schlafzimmer des Kindes

33. In welche Himmelsrichtung ist das Schlafzimmer des Kindes ausgerichtet?

- nord 1
 nordost 2
 ost 3
 südost 4
 süd 5
 südwest 6
 west 7
 nordwest 8

34. Wieviele Topfpflanzen befinden sich im Schlafzimmer des Kindes?

- unter 5 1
 5 - 10 2
 mehr als 10 3

35. Was befindet sich unter dem Boden des Schlafzimmers des Kindes?

- Bewohnte Wohnung 1
 unbewohnte Wohnung, bzw. Souterrain, Keller 2
 Fundament, Erde 3

36. Womit ist der Fußboden des Schlafzimmers des Kindes belegt?

- Stein, Fliesen 1
 Parkett, Kork 2
 Linoleum, PVC etc. 3
 kurzfloriger Teppichboden 4
 hochfloriger Teppichboden 5
 lose Teppiche 6

37. Art der Schlafgelegenheit des Kindes

- Bett 1
 Stockbett 2
 Kind schläft oben
 Kind schläft unten
 Liege oder ähnliches 3

38. Welche Fläche hat die Matratze bzw. die Schlaffläche des Kindes?
 I_I,I_I m²

Aus welchen Materialien besteht die Matratze?

Schaumstoff 3

Rosshaar 3

Federkern 3

Latex 3

Wasserbett 3

Weiß nicht 3

Alter der Matratze? I_I,I_I Jahre

Falls sich noch weitere Matratzen im Kinderzimmer befinden:
 Gesamtfläche dieser Matratzen?
 I_I_I,I_I m²

39. Ist die Matratze, auf der das Kind schläft, mit einem allergen- und milbendichten Bezug umhüllt? ja nein

40. Befinden sich im Schlafzimmer des Kindes Sessel oder andere Polstermöbel?
 ja nein ⇒ Frage 41!

Falls **ja**, aus welchem Material sind diese?
 glatte Oberfläche, Kunststoff, Skai
 ja nein

Leder ja nein

aus gewobenem Stoff, Wolle, Baumwolle
 ja nein

41. Was befindet sich oberhalb der Decke des Schlafzimmers des Kindes?

bewohnte Wohnung 1

unbewohnte Wohnung bzw. Dachboden 2

Außenluft, Decke ist Teil der Dachkonstruktion 3

7.1.2 Anhang zum Begehungsprotokoll

Datum der Begehung: _____ Code-
Nr.: _____
Untersucher: _____

Anhang zum Wohnungsbegehungsprotokoll nach Brunekreef

Bemerkungen:

1. Die Wohnungen sollen an den Messtagen **nicht übermäßig gesaugt und geputzt werden**. Alles soll so wie an üblichen Tagen gereinigt werden.
2. Die Bewohner sollen nach **Schimmelpilzstellen** und **feuchten Stellen** gefragt werden
3. Die **MVOC- Messungen** bedeuten evtl. eine **Lärmbelästigung** durch die Pumpe. Die Mittagschlafgewohnheiten der Kleinkinder sollten abgefragt werden.
4. Die Bewohner sollen über den **Datenschutz** aufgeklärt werden (Anonyme Veröffentlichung der Ergebnisse; Fotografien anonym)
5. Die Bewohner könne ihre aktuellen **Messergebnisse jederzeit erfahren**
6. Die **Messbedingungen** sollen für alle Probanden und für alle Messtermine **gleich** sein
7. Die Angaben, die im **Begehungsprotokoll** gemacht wurden, sollten wenn möglich **überprüft** werden (Art des Teppichs im Kinderzimmer, Vorhänge)

Zusätzliche Fragen:

1. Wird in der Wohnung Biomüll gesammelt?

Ja Nein (bitte weiter Frage 4)

Wenn ja: Wo wird der Biomüll gesammelt: _____

2. Wird der Biomüll in einem geschlossenen Behälter gesammelt?

Ja Nein

3. Wie lange ist der Biomüll in der Wohnung gelagert? _____ Tage

4. Befinden sich in der Wohnung „Feuchtequellen“ (z.B. Aquarium, Gefäße mit Wasser, viele Blumen) ?

Wenn ja: In welchem Zimmer/ Was: _____

5. Wie wird das Kinderzimmer gewöhnlich gelüftet?

Sommer: _____

Winter: _____

6. Die Tür des Kinderzimmers ist :

1. tagsüber überwiegend: _____

2. nachts überwiegend _____

7. Die Türen aller Zimmer sind:

3. tagsüber überwiegend: _____

4. nachts überwiegend _____

8. Einrichtung des Kinderzimmers:

Mobiliar: _____

9. Wie sind die Möbel behandelt (Lauge, Öl, Beize , Biofarben)?

10. Werden im Kinderzimmer ätherische Öle benutzt (z.B. Duftlampen, Duftöle, Cremes mit ätherischen Ölen, Reinigungsprodukte) ?

11. Was wurde am Tag der Messung gekocht?

12. Haben die Bewohner ein Haustier?

Ja Nein

Wenn ja, welches: _____

13. Bemerkungen:

7.1.3 Probennahmeprotokoll

Protokoll zur Schimmelpilzstudie Probanden- Nr.: _____

Datum: _____

1. Überprüfen der Messprotokolle

2. Überprüfen der Fragebögen auf Vollständigkeit

- A. Eltern- Fragebogen: ausgefüllt am: _____

ausgefüllt von: _____

Kontrolle durch: _____

- B. Kinder- Fragebogen : ausgefüllt am: _____

ausgefüllt von: _____

Kontrolle durch _____

3. Allgemeines:

Fabrikat des Staubsaugers des Haushaltes: _____

Besonderheiten (Staubfilter, usw.): _____

- Nach Veränderungen der Wohnsituation fragen:

a. neue Blumen: 0 Ja 0 Nein

wenn ja: 0 Hydro 0 Erde:

- Standort: **Wohnzimmer, Schlaf(Kind), Schlaf (Eltern), Küche, Flur**

b. neues Mobiliar: 0 Ja 0 Nein

wenn ja: -
Art: _____

- Standort **Wohnzimmer, Schlaf(Kind), Schlaf(Eltern), Küche, Flur**

- behandelt mit **Farbe, Beize, Holzschutzlack, Lasur**

c. neues Haustier: 0 Ja 0 Nein

wenn ja: - Tierart: **Katze, Hund, Maus, Ratte, Vogel**

Wo hält sich Tier auf: **Wohnzimmer, Schlaf(Kind),Schlaf(Eltern), Küche, Flur**

d. neue Matratze: 0 Ja 0 Nein

wenn ja: - Art **Latex, Federkern, Naturmaterialien (Kokos), Schaumstoff**

- Größe **100x200, 70x150, 90x200, 150x200,**

e. Renovierungsarbeiten: 0 Ja 0 Nein

wenn ja: -
Was: _____

- Wann wurde renoviert: _____ (TT/MM/JJ)

- Was wurde benutzt: **Farbe, Lack, Kleber, Lasur, Holzschutzmittel, Beize**

- Nach Reinigungsmitteln fragen:

Wurden seit der letzten Messung besondere Reinigungsmittel benutzt:

1. **Teppichreiniger** 0 Ja 0 Nein

2. **Bodenversiegelung, alkoholischer Reiniger**
0 Ja 0 Nein

3. **Möbelpolitur** 0 Ja 0 Nein

4. **Fensterreiniger, alkoholischer Reiniger**
0 Ja 0 Nein

5. **Sonstiges:** _____

- Nach chemischen Schädlingsbekämpfungsmittel fragen:

Wurden seit der letzten Messung folgende Produkte verwendet:

1- Pflanzenschutzmittel: 0 Ja 0 Nein

wenn ja: Art: _____
Wie oft <2x, 2-5x, >5x

2- Insektenvernichtungsmittel: 0 Ja 0 Nein

wenn ja: Art: _____
Wie oft <2x, 2-5x, >5x

3- Schimmelvernichtungsmittel: 0 Ja 0 Nein

wenn ja: Art: _____
Wie oft <2x, 2-5x, >5x

4- Milbenbekämpfungsmittel: 0 Ja 0 Nein

wenn ja: Art: _____
Wie oft <2x, 2-5x, >5x

4. aktuelles Wetter:

a. Außentemperatur: _____

b. Luftfeuchtigkeit: _____

c. Luftdruck: _____

d. Wetterlage beschreiben: **trocken, schwül, kalt, neblig,
Regen, Schnee, Hagel**

5. Besonderheiten:

7.2 Flächenberechnung der MVOC

2-Pentanol	Konz. µg/l	Fläche 1 (f1)	Fläche 2 (f2)	Fläche 3 (f3)	Fläche 4 (f4)	Mittelwert f1-f4	Standardabweichung	MW+Stabwn	MW-Stabwn
	30,25	486	350			418	68	486	350
	60,5	581	626	353	521	520	103	624	417
	121	1219	1007	885	657	942	203	1145	739
	242	1969	1771	1362	1342	1611	268	1879	1343
	363	2895	3186	3542	2786	3102	293	3395	2809
	484	3847	3941	4034	3734	3889	111	4000	3778
	605	4942	5924	4879	5444	5297	423	5720	4874
	726	5835	6995	8002	6595	6857	782	7638	6075
	847	8103	6920	8040	7860	7731	477	8207	7254
	968	8409	8361	9168	8355	8573	344	8917	8229
3-Methyl-2-butanol	Konz. µg/l	f1	f2	f3	f4	Mittelwert f1-f4	Standardabweichung	MW+Stabwn	MW-Stabwn
	34,25		280			280	0	280	280
	68,5	545	491			518	27	545	491
	137	925	1141	696	809	893	165	1057	728
	274	2523	1642	1493	1275	1733	474	2208	1259
	411	3500	3666	3649	3468	3571	88	3658	3483
	548	4500	4683	4591	4521	4574	72	4645	4502
	685	5466	6253	5246	6916	5970	662	6632	5308
	822	7188	8143	9285	7942	8140	751	8891	7388
	959	10107	7686	9415	8661	8967	899	9867	8068
	1096	10146	10486	10433	9766	10208	286	10494	9922

2-Pentanon	Konz. µg/l	f1	f2	f3	f4	Mittelwert f1-f4	Standardabweichung	MW+Stabwn	MW-Stabwn
	28,75	1346	1164	1446	1123	1270	132	1402	1138
	57,5	1569	1759	1644	1324	1574	159	1733	1415
	115	2607	2506	2138	1694	2236	358	2595	1878
	230	4104	3076	3126	2343	3162	626	3788	2536
	345	3883	3238	3998	3295	3604	340	3944	3263
	575	4312	5183	4294	4461	4563	364	4927	4198
	690	4942	5924	4741	6817	5606	830	6436	4776
	756	6105	6729	7607	8478	7230	897	8126	6333
	805	8590	6163	8468	8498	7930	1021	8951	6909
	920	9247	8767	9308	8559	8970	317	9287	8654
2-Ethylfuran	Konz. µg/l	f1	f2	f3	f4	Mittelwert f1-f4	Standardabweichung	MW+Stabwn	MW-Stabwn
	31,5		489	481		485	4	489	481
	63	741	1002	670	659	768	139	907	629
	126	1616	1972	1358	1188	1534	295	1829	1238
	252	2752	2610	2473	2577	2603	100	2703	2503
	378	4696	5047	6111	5098	5238	527	5765	4711
	504	5965	6491	6349	6727	6383	277	6660	6106
	630	7257	6780	7547	8972	7639	817	8456	6822
	756	9255	9690	11232	11252	10357	898	11255	9459
	882	11809	10398	12961	12134	11826	925	12751	10900
	1008	11124	12096	13230	13390	12460	919	13379	11541

3-Methyl-1-butanol	Konz. µg/l	f1	f2	f3	f4	Mittelwert f1-f4	Standardabweichung	MW+Stabwn	MW-Stabwn
	138,5		458			458	0	458	458
	277	920	924	446	381	668	255	923	412
	554	1839	1982	1213	1259	1573	341	1915	1232
	1108		2977	2759	3130	2955	152	3108	2803
	1662	5608	6398	7002	5953	6240	521	6762	5719
	2216	7496	7828	8058	7930	7828	208	8036	7620
	2770	8953	9768	9220	11885	9957	1152	11108	8805
	3324	11232	13029	15209	15506	13744	1737	15481	12007
	3878	16107	12656	16902	15431	15274	1599	16873	13675
	4432	16079	16870	16370	16194	16378	302	16680	16076
2-Methyl-1-butanol	Konz. µg/l	f1	f2	f3	f4	Mittelwert f1-f4	Standardabweichung	MW+Stabwn	MW-Stabwn
	135	576				576	0	576	576
	270	910	764			837	73	910	764
	540	1740	1823	989	892	1361	423	1784	938
	1080	3081	2751	2066	2669	2642	366	3008	2275
	1620	4688	5367	5276	4339	4918	424	5341	4494
	2160	5738	6407	5946	5468	5890	343	6233	5546
	2700	6885	8012	6950	8739	7647	773	8420	6873
	3240	9153	10282	11675	11867	10744	1104	11848	9641
	3780	11805	10132	12069	12860	11717	994	12710	10723
	4320	12602	13158	14071	12887	13180	551	13730	12629

Methyldisulfid	Konz. µg/l	f1	f2	f3	f4	Mittelwert f1-f4	Standardabweichung	MW+Stabwn	MW-Stabwn
	42,75			378		378	0	378	378
	85,5	1060	940	576	639	804	202	1006	602
	171	2009	2160	1372	1306	1712	377	2089	1334
	342	3761	3156	2904	3029	3213	329	3541	2884
	513	5619	6010	6409	6239	6069	296	6365	5773
	684	6993	7083	8048	7801	7481	453	7934	7028
	855	8491	8826	9008	10596	9230	810	10040	8420
	1026	10914	11948	13663	13774	12575	1201	13776	11373
	1197	14227	11305	14819	14384	13684	1390	15074	12293
	1368	14597	15444	15875	15253	15292	460	15753	14832
2-Hexanon	Konz. µg/l	f1	f2	f3	f4	Mittelwert f1-f4	Standardabweichung	MW+Stabwn	MW-Stabwn
	32	7081	6989	8785	8189	7761	757	8518	7004
	64	7502	7588	8181	9064	8084	623	8707	7460
	128	8219	8116	9906	10006	9062	896	9957	8166
	256	9466	8919	9699	10700	9696	645	10341	9051
	384	10168	11018	12915	12583	11671	1125	12796	10546
	512	12189	10635	14185	14092	12775	1470	14245	11305
	640	12422	12547	14889	15347	13801	1327	15129	12474
	768	14380	15771	18272	18128	16638	1639	18276	14999
	896	16726	15180	19424	18773	17526	1681	19207	15845
	1024	17153	17350	20458	18970	18483	1341	19823	17142

2- Heptanon	Konz. µg/l	f1	f2	f3	f4	Mittelwert f1-f4	Standardabweichung	MW+Stabwn	MW-Stabwn
	31,75		504			504	0	504	504
	63,5	1046	953	560	948	877	187	1064	690
	127	1853	1652	1208	1537	1563	234	1796	1329
	254	3019	2807	2186	2434	2612	323	2934	2289
	381	4633	5601	5575	5107	5229	396	5625	4833
	508	5923	6182	6791	6949	6461	423	6884	6039
	635	6924	7322	8115	9473	7959	974	8932	6985
	762	8125	10550	12607	12613	10974	1847	12821	9126
	889	12288	9644	13817	13425	12294	1630	13923	10664
	1016	13079	13410	14740	14408	13909	685	14594	13224
a-Pinen	Konz. µg/l	f1	f2	f3	f4	Mittelwert f1-f4	Standardabweichung	MW+Stabwn	MW-Stabwn
	32,75		323			323	0	323	323
	65,5	758	607	505	414	571	128	699	443
	131	1404	1449	962	971	1197	231	1427	966
	262	2759	2215	1987	2162	2281	289	2569	1992
	393	4000	3783	4780	4268	4208	372	4580	3835
	524	5160	5385	5666	5553	5441	191	5632	5250
	655	5981	6787	7224	8159	7038	786	7824	6252
	786	7731	8666	9781	9449	8907	790	9697	8116
	917	10939	8744	11471	10635	10447	1028	11475	9419
	1048	10877	11294	11724	11677	11393	341	11734	11052

1-Okten-3-ol	Konz. µg/l	f1	f2	f3	f4	Mittelwert f1-f4	Standardabweichung	MW+Stabwn	MW-Stabwn
	31,75		215			215	0	215	215
	63,5	420	362	198	256	309	87	396	222
	127	722	867	612	640	710	99	809	611
	254	1489	1250	1076	1367	1296	152	1448	1143
	381	2394	2743	2938	2484	2640	215	2854	2425
	508	3177	3141	3654	3316	3322	203	3525	3119
	635	3550	4026	4056	4796	4107	446	4553	3661
	762	4847	5136	6585	6003	5643	691	6333	4952
	889	6961	5534	7382	6989	6717	703	7419	6014
	1016	6938	7298	7266	7386	7222	170	7392	7052
3-Oktanol	Konz. µg/l	f1	f2	f3	f4	Mittelwert f1-f4	Standardabweichung	MW+Stabwn	MW-Stabwn
	54,25		190			190	0	190	190
	108,5	672	535	290	355	463	150	613	313
	217	803	1438	870	977	1022	248	1270	774
	434	2764	2186	1508	2098	2139	445	2584	1694
	651	4289	4745	4179	3871	4271	314	4585	3957
	868	5444	5473	5894	6083	5724	273	5997	5450
	1085	5492	6653	6965	6871	6495	590	7085	5905
	1302	7985	9104	10128	9863	9270	832	10102	8438
	1519	9792	8960	11167	11368	10322	993	11315	9329
	1736	11530	11925	11137	11159	11438	322	11759	11116

3-Oktanon	Konz. µg/l	f1	f2	f3	f4	Mittelwert f1-f4	Standardabweichung	MW+Stabwn	MW-Stabwn
	57,75		303			303	0	303	303
	115,5	879	642	509	492	631	155	785	476
	231	1611	1737	1096	1106	1388	290	1677	1098
	462	3344	2650	2557	2662	2803	315	3118	2488
	693	5082	5175	6406	5561	5556	523	6079	5033
	924	6646	7040	7630	7231	7137	354	7491	6782
	1155	7109	7999	9000	9131	8310	820	9130	7490
	1386	9608	10625	12190	12088	11128	1074	12202	10054
	1617	12730	10285	14722	13423	12790	1613	14403	11177
	1848	13494	14021	13585	14216	13829	299	14128	13530
2-Pentylfuran	Konz. µg/l	f1	f2	f3	f4	Mittelwert f1-f4	Standardabweichung	MW+Stabwn	MW-Stabwn
	31,75		455	406		431	25	455	406
	63,5	933	946	577	747	801	151	952	649
	127	1991	2283	1508	1367	1787	368	2155	1419
	254	4277	3537	3127	3228	3542	450	3993	3092
	381	6295	6541	7844	6928	6902	589	7491	6313
	508	8076	8759	9396	9170	8850	502	9352	8348
	635	9910	10778	10791	14147	11407	1622	13029	9784
	762	12572	13966	15462	16500	14625	1489	16114	13136
	889	17039	14454	17875	17038	16602	1286	17888	15315
	1016	17766	17882	18776	18184	18152	391	18543	17761

Methyltrisulfid	Konz. µg/l	f1	f2	f3	f4	Mittelwert f1-f4	Standardabweichung	MW+Stabwn	MW-Stabwn
	43		455	406		431	25	455	406
	86	933	946	577	747	801	151	952	649
	172	1991	2283	1508	1367	1787	368	2155	1419
	344	4277	3537	3127	3228	3542	450	3993	3092
	516	6295	6541	7844	6928	6902	589	7491	6313
	688	8076	8759	9396	9170	8850	502	9352	8348
	860	9910	10778	10791	14147	11407	1622	13029	9784
	1032	12572	13966	15462	16500	14625	1489	16114	13136
	1204	17039	14454	17875	17038	16602	1286	17888	15315
	1376	17766	17882	18776	18184	18152	391	18543	17761
R-(+)-Limonen	Konz. µg/l	f1	f2	f3	f4	Mittelwert f1-f4	Standardabweichung	MW+Stabwn	MW-Stabwn
	34		402			402	0	402	402
	68	726	726		454	635	128	764	507
	136	1283	1571	1038	845	1184	272	1456	912
	272	2513	2101	1940	2127	2170	210	2381	1960
	408	3731	4243	4893	4210	4269	413	4682	3856
	544	5001	5227	5734	5333	5324	265	5589	5058
	680	5676	6087	6477	7145	6346	541	6887	5805
	816	7423	8358	9975	9715	8868	1036	9903	7832
	952	10022	8471	11099	10627	10055	991	11046	9064
	1088	10311	10911	10965	11107	10824	304	11128	10519

2-Okten-1-ol	Konz. µg/l	f1	f2	f3	f4	Mittelwert f1-f4	Standardabweichung	MW+Stabwn	MW-Stabwn
	195,75		336			336	0	336	336
	391,5	461	289		270	340	86	426	254
	783	866	1018	375	548	702	254	955	448
	1566	2031	1487	1140	1251	1477	343	1821	1134
	2349	2836	3164	3452	2596	3012	324	3336	2688
	3132	3737	3967	3748	4194	3912	187	4099	3724
	3915	4591	5476	5397	6452	5479	660	6139	4819
	4698	5581	7125	8298	8398	7351	1138	8488	6213
	5481	9151	7482	10055	9042	8933	925	9858	8007
	6264	9358	9615	9510	8996	9370	234	9604	9135
2-Isopropylmethoxy-pyrazin	Konz. µg/l	f1	f2	f3	f4	Mittelwert f1-f4	Standardabweichung	MW+Stabwn	MW-Stabwn
	31		704			704	0	704	704
	62	967	886	551	681	771	164	936	607
	124	1944	2081	1500		1842	248	2090	1594
	248	3810	3095	1904	3176	2996	689	3685	2308
	372	5595	6384	7174	6169	6331	566	6896	5765
	496	7276	7781	8819	8078	7989	559	8547	7430
	620	8443	9726	9437	12612	10055	1551	11606	8503
	744	10445	12400	15239	14284	13092	1838	14930	11254
	868	15939	12653	17276	16064	15483	1715	17198	13768
	992	16551	16415	16267	16878	16528	226	16754	16302

7.3 MVOC-Ergebnisse (Aachen)

Verbindungen/Probe Nr.	1	2	Mittelwert	3	4	Mittelwert
Raum-Nr.	397064208X	397064208X	397064208X	8004760748	8004760748	8004760748
2-Methylfuran	2.410	510	1.460	981	971	976
3-Methyl-1-butanol	1.177	342	759	2.142	1.822	1.982
2-Methyl-1-butanol	906	211	558	776	559	668
Dimethyldisulfid	14.391	419	7.405	516	251	383
2-Heptanon	2.510	1.174	1.842	1.611	1.537	1.574
2-Pentylfuran	1.911	741	1.326	1.175	1.096	1.136
Σ MVOC	23.304	3.397	13.350	7.201	6.236	8.374

Verbindungen/Probe Nr.	5	6	MW	10	11	MW
Raum-Nr.	7755432126	7755432126	7755432126	3655700688	3655700688	3655700688
2-Methylfuran	554	284	419	677	719	698
3-Methyl-1-butanol	1.111	1.545	1.328	638	538	588
2-Methyl-1-butanol	320	499	409	n. n.	n. n.	n.n.
Dimethyldisulfid	698	263	481	334	285	310
2-Heptanon	1.720	1.859	1.789	1.738	1.734	1.736
2-Pentylfuran	1.390	1.236	1.313	960	802	881
Σ MVOC	5.792	5.686	5.739	4.348	4.078	4.213

Verbindungen/Probe Nr.	7	13	MW	8	9	MW
Raum-Nr.	7406921383	7406921383	7406921383	9190673826	9190673826	9190673826
2-Methylfuran	394	1.561	978	229	264	246
3-Methyl-1-butanol	136	162	149	617	639	628
2-Methyl-1-butanol	n. n.	n. n.	n.n.	276	270	273
Dimethyldisulfid	143	298	220	320	426	373
2-Heptanon	646	858	752	809	1.209	1.009
2-Pentylfuran	472	736	604	494	436	465
Σ MVOC	1.791	3.615	2.703	2.745	3.244	2.995

Verbindungen/Probe Nr.	18	21	MW	22	25	MW
Raum-Nr.	4773864740	4773864740	4773864740	3476867676	3476867676	3476867676
2-Methylfuran	474	505	490	1.044	990	1.017
3-Methyl-1-butanol	480	317	399	915	959	937
2-Methyl-1-butanol	n. n.	172	172	436	339	387
Dimethyldisulfid	419	522	471	792	637	714
2-Heptanon	1.579	1.707	1.643	2.687	2.795	2.741
2-Pentylfuran	1.716	2.063	1.890	3.076	2.626	2.851
Σ MVOC	4.669	5.286	5.063	8.949	8.346	8.647

Verbindungen/Probe Nr.	14	16	MW	15	20	MW
Raum-Nr.	4185485837	4185485837	4185485837	*067166012	*0670166012	*0670166012
2-Methylfuran	290	869	579	830	990	910
3-Methyl-1-butanol	344	433	388	589	559	574
2-Methyl-1-butanol	n. n.	n. n.	n.n.	227	216	222
Dimethyldisulfid	174	289	231	325	738	532
2-Heptanon	1.010	1.077	1.044	1.120	1.113	1.117

2-Pentylfuran	655	888	772	1.149	843	996
Σ MVOC	2.474	3.555	3.014	4.242	4.459	4.350

Verbindungen/Probe Nr.	17	23	MW	12	24	MW
Raum-Nr.	8758850095	8758850095	8758850095	8170471194	8170471194	8170471194
2-Methylfuran	620	576	598	1.415	1.787	1.601
3-Methyl-1-butanol	302	391	347	1.936	1.619	1.778
2-Methyl-1-butanol	109	n. n.	109	n. n.	1.163	1.163
Dimethyldisulfid	288	337	313	1.170	2.017	1.594
2-Heptanon	1.557	2.039	1.798	4.227	4.455	4.341
2-Pentylfuran	2.235	2.060	2.148	8.488	8.872	8.680
Σ MVOC	5.111	5.404	5.312	17.236	19.913	19.156

Verbindungen/Probe Nr.	26	27	MW	32	40	MW
Raum-Nr.	3969421389	3969421389	3969421389	7553100583	7553100583	7553100583
2-Methylfuran	403	4.498	2.451	471	741	606
3-Methyl-1-butanol	323	1.826	1.075	1.227	1.351	1.289
2-Methyl-1-butanol	n. n.	n. n.	n.n.	641	672	657
Dimethyldisulfid	420	5.581	3.001	191	232	212
2-Heptanon	1.015	3.602	2.309	1.823	2.012	1.918
2-Pentylfuran	565	5.286	2.925	n. n.	2.185	2.185
Σ MVOC	2.725	20.794	11.760	4.353	7.193	6.866

Verbindungen/Probe Nr.	33	34	MW	35	36	MW
Raum-Nr.	4866333005	4866333005	4866333005	6751403809	6751403809	6751403809
2-Methylfuran	457	867	662	1.081	800	940
3-Methyl-1-butanol	698	901	799	935	850	892
2-Methyl-1-butanol	306	457	381	377	342	359
Dimethyldisulfid	2.418	1.808	2.113	2.346	1.397	1.872
2-Heptanon	1.501	1.667	1.584	2.668	2.256	2.462
2-Pentylfuran	509	945	727	2.713	2.026	2.370
Σ MVOC	5.888	6.645	6.267	10.120	7.670	8.895

Verbindungen/Probe Nr.	28	38	MW	37	39	MW
Raum-Nr.	4512329104	4512329104	4512329104	6919860836	6919860836	6919860836
2-Methylfuran	1.145	1.345	1.245	1.005	1.343	1.174
3-Methyl-1-butanol	4.796	3.615	4.205	3.577	3.001	3.289
2-Methyl-1-butanol	664	649	656	1.006	1.054	1.030
Dimethyldisulfid	481	954	717	831	1.152	992
2-Heptanon	2.325	1.950	2.137	2.317	2.277	2.297
2-Pentylfuran	1.444	1.737	1.591	1.501	2.005	1.753
Σ MVOC	10.854	10.250	10.552	10.236	10.832	10.534

7.4 Toxikologische Daten

Name	Literatur	Sympt. bei Exposition	Zytotox. IC50 (mMol)	Genotox.	Mutagen.	Kanzergenität	RD50-Wert, mg/m³	RD50-Wert ppm	RIL, mg/m³	Geruchsschwelle	IL-8 Stim.	Tierversuch
1-Okten-3-ol	Seidel, Plappert 1999		ab 100 µg/ml zytotox., abs. zytotox ab 300 µg/ml	Fällt genotoxisch auf	neg bei 100µg/ml					~10µg/m³ (H2O) und 16µg/m³ (Luft)		
	Kreja, Seidel 2001		<10		neg						pos	
	Korpi et al. 1999						182					
	Böck 2001									16 µg/m³, pilzig, herb		
	Pasanen et al. 1998						182		0,1			
3-Methyl-1-butanol	Seidel, Plappert 1999		ab 500µg/ml zytotox., abs. zytotox. ab 700µg/ml	Neg	neg					~ 0,07µg/m³		
1ppm~3,6mg/m³	Schaper 1993						2624	729				
	Böck 2001									30 µg/m³, fuselölartig		
	Pasanen et al. 1998						9325		7			
1-Dekanol	Kreja, Seidel 2001		<1	Neg	neg						pos	
	Keller et al. 1998									0,6 µg/m³		

3-Oktanol	Kreja,Seidel 2001		<10								pos	
	Korpi et al. 1999						1359					
	Pasanen et al.1998						1359		1			
1-Hexanol	Kreja,Seidel 2001		<10	Neg							pos	
	Pasanen et al.1998						1289		1			
2-Pentanol	Pasanen et al.1998						9907		7,4			
1-Butanol	Kreja,Seidel 2001		<50	Neg							pos	
	MAK= 100 ppm (300mg/m³)											
	IPCS,EHC Nr.65	Stark augenreizend, mäßig hautreizend										LD50 (orl):Ratte: 0,7-2,1g/kg
	Schaper 1993						75706	15962				
	Alarie et al.,1996						13125	4375				
	Molhave et al. 2000	Eye irritation:750mg/m³									11 mg/m³	
2-Methyl-1-butanol	Kreja,Seidel 2001		<42	Neg	neg						pos	
	Alarie et al.,1996							2588				
	Böck 2001									45 µg/m³,sauer, scharf		
3-Methyl-2-butanol	Kreja,Seidel 2001		<110	Neg								
	Pasanen et al.1998						9645		7,2			
3-Oktanon	Kreja,Seidel 2001		<48	Neg	neg						pos	

	Keller et al. 1998									30000 µg/m³, mild,fruchtig		
	Korpi et al. 1999					17586						
	Böck 2001									324 µg/m³,fruchtig,würzig		
	Pasanen et al.1998					17586		13,2				
2-Heptanon	Kreja,Seidel 2001		<26	Neg	neg						Pos	
1ppm~4,66mg/m³	Cometto-Muniz,1997	Nasenreizung:563 ppm; Augenreizung: 100 ppm								0,1 ppm		
	Schaper 1993					4163	893					
	Keller et al. 1998									94 µg/m³, pizartig, muffig		
	Alarie et al.,1996						893					
	Böck 2001									94 µg/m³,pikant, würzig		
	Pasanen et al.1998					4163		3,1				
2-Hexanon	Kreja,Seidel 2001		<55	Neg	neg						pos	
1ppm~4mg/m³	Alarie et al.,1996					10718	2552					
	NTP des NIEHS, USA											LC50 (ihl).Ratte: 8000 ppm/4h; LD50 (orl): Maus:2,43g/kg
	ATSDR ;NIOSH, USA	Müdigkeit, Benommenheit, Kribbeln der Haut an Fingern und Zehen;NIOSH recommended: 1ppm 10h/d										
	Schaper 1993					10449	2555					

	Böck 2001									708 µg/m³, med., scharf		
	Pasanen et al. 1998					10449			7,8			
	MAK =5 ppm (21mg/m³)	Irrit. der Augen, Schleimhäute, obere Atemwege, in hohen Konz. narkotisierend, periphere Neuropathie, Muskelkraftverlust der Finger, Dermatitis, Chron.: Degeneration der Axone, Atrophie des Hodenkeimepithels, Depression der zirkulierenden weißen Blutkörperchen, Gewichtsverlust										
2-Pentanon 1ppm~3,5mg/ m³	Kreja, Seidel 2001											
	Alarie et al., 1996						5929					
	Schaper 1993					20850	5933					
	Cometto-Muniz, 1997	Nasenreizung: 10000 ppm; Augenreizung: 5623 ppm								316 ppm		
	NTP des NIEHS, USA				smc (sln): lowest dose: 13600 ppm							LD50 (orl): Ratte/ Maus: 1,6g/kg
	Pasanen et al. 1998					20850			15,6			
	MAK	Augen- und Schleimhautreizung, Kopfschmerzen, Dermatitis, narkot. Wirkung, Übelkeit, Erbrechen, ZNS-Effekte										
2-Butanon	Kreja, Seidel 2001		<328	Neg								pos
	ATSDR ; NIOSH, USA	NIOSH recommended: Exposure limit: 200 ppm 10h/d in 40h/ w									5-8 ppm, süßlich, scharf	

	Keller et al. 1998								740 µg/m³, süß, scharf		
	IPCS:EHC Nr.143 (1ppm= 2,95mg/m³)	300-600 ppm chron.:Taubheit der Finger und Arme,Kopfschmerzen, Magenverstimmung,Appetit verlust,Gewichtsverlust;Ver stärkt die Leber- und Nierentoxizität von Halogenalkanen in Mischung									LC50(oral): Ratte/Maus:2-6 g/kg
1ppm~3mg/m³	Schaper 1993					26486, 31621, 92482	9000, 10745, 31426				
	NTP des NIEHS, USA				smc (sln): lowest dose: 33800 ppm						LC50(ihl) Ratte:23,5g/m³ /8h;Maus:40mg/m³/2h
	MAK= 200 ppm (590mg/m³)	Augenreizung ab 350 ppm									
	MAK	Irrit. der Augen,Haut,obere Atemwege,Kopfschmerzen, Übelkeit,Schwäche,Müdigkeit,Diarrhoe,Erbrechen, Bewusstlosigkeit, ZNS-Effekte, Neuropathie, Augenkontakt führt zur Uveitis ant., Hornhautschädigung									
DMSO	Kreja,Seidel 2001									pos	
	NTP des NIEHS, USA										LD50 (oral):Ratte:14,5 g/kg; Maus:7.9g/kg
	Alarie et al.,1996						17021				

	MAK	Hyperventilation, Photophobie, Kopfschmerzen, Diarrhoe, Dermatitis, Pustelbildung, Nieren und Leberschäden, Dyspnoe, Ikterus, Übelkeit, Erbrechen, Schock, Knoblauchgeschmack im Mund, Hornhauttrübung, allerg. Reaktionen										
2-Methyl-1-propanol 1ppm~3mg/m³	Kreja, Seidel 2001		<150	Neg	neg						pos	
	Böck 2001											3300 µg/m³, süß, weinartig
	Keller et al. 1998											3 µg/m³, muffig, pilzartig
	IPCS; EHC Nr. 65											LD50 (orl): Ratte: 2,5-3,1 g/kg; Atemwegsreizung bei Ratte ab 15,7g/m³
	NTP des NIEHS, USA				E.coli: lowest dose: 25000 ppm							LD50 (orl): Ratte: 2,46 g/kg
	Schaper 1993						5499	1818				
	Pasanen et al. 1998						5499		4,1			
	MAK	Konjunktivitis, ekzem, Dermatitis, Reizungen der Augen und der oberen Atemwege, Kopfschmerzen, Polishers' Keratitis, trockener Hals										
Pinen	Molhave et al. 2000											23 mg/m³
	Pasanen et al. 1998						6006	1073	4,5			
Limonen	Molhave et al. 2000	Eye irritation: 1700-3400mg/m³										12 mg/m³

	Böck 2001									2450 µg/m³		
	Pasanen et al. 1998						4519		3,4			
Dimethylsulfid	Böck 2001									2,5 µg/m³,verfault		
	Keller et al. 1998									2 µg/m³,verfault		
Dimethyldisulfid	Böck 2001									0,1 µg/m³,unangenehm		
	Keller et al. 1998									0,1 µg/m³,unangenehm		
	NTP des NIEHS, USA											LC50 (ihl):Ratte: 15,85mg/m³/2h ; Maus:12,3mg/m³/2h
	MAK	Haut- und Augenreizungen, chron.:Kopfschmerzen, Übelkeit,Erbrechen,bei Aspiration:Lungenödem und chem. Pneumonie										
Dimethyltrisulfid	Böck 2001									6 µg/m³,faulig		
	Keller et al. 1998									6 µg/m³,faulig		
Geosmin	Böck 2001									7,6 µg/m³,erdig		
	Pasanen et al. 1998						216		0,2			
2-Methylisoborneol	Böck 2001									0,007 µg/m³,erdig		

	Keller et al. 1998									7 µg/m³, erdig		
2-Okten-1-ol	Pasanen et al. 1998					182			0,1			

Legende:

ATSDR: Agency of toxic substances and disease registry
EHC: Environmental health criteria
IC50-Wert: IC 50- Wert (in mMol): Substratkonzentration, die das Koloniewachstum bzw. Absorption im MTT- und im MB- Assay auf 50% der Kontrollwerte reduziert; Vergleichsubs.: MMS, Formaldehyd IC50<1, Gliotoxin IC50<0,0003
ihl: inhalation
IPCS: International Program on chemical safety
LC50: lethal concentration 50% kill
LD50: lethal dose 50% kill
neg : getestet mit negativem Ergebnis
NIEHS: National institute of environmental health sciences
NIOSH: National Institute for occupational safety and health
NTP: National toxicology program
OEL- Wert (occupational exposure level): $RD50 * 0,03 = OEL$ (8 h/d, 5 d/wk)
orl: oral
pos : getestet mit positivem Ergebnis;
RD 50- Wert: die Konzentration einer Chemikalie, die die Atemfrequenz einer Maus um 50% senkt. (vgl. Alarie, Y et al. 1966) = "sensory irritating potency"
RIL- Wert (recommended indoor air level): $OEL / 40$ bzw. $RD50 / 1333$
sln: sex chromosome loss + nondisjunction
smc: Saccharomyces cerevisiae

8. Literaturverzeichnis

1. EnEG; Gesetz zur Einsparung von Energie - Energieeinsparungsgesetz. 22-7-1976.
2. Wärmeschutzverordnung.
www.bmwbw.de/Anlage4176/Waermeschutzverordnung.pdf . 29-4-2004.
3. EnEV; Energieeinsparverordnung - "Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden" - Februar 2002. http://141.51.66/Informationen/EnEV-FAQ/8enev_begruendung_i.htm . 29-4-2004.
4. SPSS 2003. www.spss.com/de . 5-2-2005.
5. Alarie Y, Schaper M, Nielsen GD, and Abraham MH, 1996, Estimating the sensory irritating potency of airborne nonreactive volatile organic chemicals and their mixtures: SAR and QSAR in Environmental Research, 5, 151-165.
6. Andriessen JW, Brunekreef B, and Roemer W, 1998, Home dampness and respiratory health status in european children: Clinical and Experimental Allergy, 28, 1191-1200.
7. ATSDR : Agency of toxic substances and disease registry.
<http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles> . 2002.
8. BBI- Bauberatendes Ing. Büro, Karl Lassl. [http:// www.schimmelschimmelpilz.de/](http://www.schimmelschimmelpilz.de/) . 2001.
9. Behrendt H and Lemmen C, 2004, Schimmelpilzexposition: Pathomechanismus und Krankheitsbilder: Keller R, Senkpiel K, Samson RA, Hoekstra ES (Hrsg.): Schriftreihe des Instituts für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene der Universität zu Lübeck, Band 8:Erfassung biogener und

chemischer Schadstoffe des Innenraumes und die Bewertung umweltbezogener Gesundheitsrisiken, 69-92.

10. Biomess Ingenieurbüro GmbH. [http:// www.biomess.de](http://www.biomess.de) . 2001.
11. Biomess Ingenieurbüro GmbH. Der Nachweis von MVOC genügt als Beweis für Schimmel. www.biomess.de/biomess-Site/mvoc_genugt.htm . 1-2-2005.
12. Bornehag CG, Sundell J, Bonini S, Custoviv A, Malmberg P, Skerfving S, Sigsgaard T, and Verhoeff A, 2004, Dampness in buildings as a risk factor for health effects, EUROEXPO: a multidisciplinary review of the literature (1998-2000) on dampness and mite exposure in buildings and health effects: *Indoor Air*, 14, 243-257.
13. Böck R, Schleibinger H, and Rüden H, 1998, Flüchtige sekundäre Metaboliten als Indikator für eine intramurale Schimmelpilzbelastung: *Umweltmedizin in Forschung und Praxis*, 3, 359-364.
14. Böck R, 2001, Sensorische Wirkung von flüchtigen Metaboliten (MVOC) in verschimmelten Innenräumen: *Umweltmedizin in Forschung und Praxis*, 6, 137-142.
15. Brunekreef B, 1992, Damp housing and adult respiratory symptoms: *Allergy*, 47, 498-502.
16. Brunekreef B, Verhoeff AP, van Strien RT, and van Wijnen JH, 1994, Home dampness and childhood respiratory symptoms: the role of sensitisation to dust mites and moulds, *in* Samson et al.: *Air Quality Monographs Vol.2 -Health Implications of Fungi in Indoor Environments* (Amsterdam, Elsevier, 189-199.
17. Cometto-Muniz JE, Cain WS, and Hudnell HK, 1997, Agonistic sensory effects of airborne chemicals in mixtures: Odor, nasal pungency and eye irritation: *Perception & Psychophysics*, 59, 665-674.

18. Dalton P. Upper airway irritation, odor perception and health risk due to airborne chemicals. *Toxicology letters* 140-141, 239-248. 2003.
19. Dewey S, Sagunski H, Palmgren U, and Wildeboer B, 1995, Mikrobielle flüchtige organische Verbindungen in der Raumluft: Ein neuer diagnostischer Ansatz bei feuchten und verschimmelten Wohnräumen?: *Zentralblatt Hygiene*, 197, 504-515.
20. DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) a, 2003, MAK-und BAT-Werte-Liste 2003: Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH.
21. DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) b, 2003, Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründung von MAK-Werten: Weinheim, Wiley-VCH GmbH.
22. Dharmage S, Bailey M, Raven J, Abeyawickrama K, Cao D, Guest, Rolland, Rolland J, Forbes A, Thien F, Abramson M, and Walters EH, 2002, Mouldy house influence symptoms of asthma among atopic individuals: *Clinical and Experimental Allergy*, 32, 714-720.
23. DIN 32645. Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenze- Ermittlung unter Wiederholungsbedingungen. 1994. Berlin, Beuth-Verlag.
24. Duke JA. <http://www.ars-grin.gov/cgi-bin/duke/highchem.pi> . 2002.
Ref Type: Electronic Citation
25. Engelhart S., 2002, Erfassung und umweltmedizinische Bewertung von Innenraumallergenen: Keller R, Senkpiel K, Samson RA, Hoekstra ES (Hrsg.): *Schriftreihe des Instituts für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene der Universität zu Lübeck, Band 6:Umgebungsanalyse bei gesundheitlichen Beschwerden durch mikrobielle Belastungen im Innenraum*, 169-186.
26. Engvall K, Norrby C, and Norbäck D, 2002, Ocular, airway and dermal symptoms related to building dampness and odors in dwellings: *Archives of*

Environmental Health, 57, 304-310.

27. Fiedler K and Schütz E, 2001, Einfluss der Wachstumsbedingungen (klimatische Faktoren, Materialien) und des Alters der Schimmelpilzkulturen auf die Produktion von organischen Stoffwechselprodukten (MVOC): Keller, R.; Senkpiel, K.(Hrsg.): Schriftreihe des Instituts für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene der Universität zu Lübeck, Heft 4: Gesundheitliche Aspekte toxinogener Schimmelpilze in Gebäuden; Mykotoxine und MVOCs; 193-220.
28. Fischer G, Schwalbe R, Möller M, Ostrowski R, and Dott W, 1999, Species-specific production of microbial volatile organic compounds (MVOC) by airborne fungi from a compost facility: Chemosphere in press, KRdL-3/7/02 N 1999 12.
29. Fischer G. Bestimmungsgrenzen der MVOC. 2004. Personal Communication
30. Fischer G, Möller M, Gabrio T, Palmgren U, Keller R, Richter H, Dott W, and Paul R, 2005, Vergleich der Messverfahren zur Bestimmung von MVOC in Innenräumen: Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz, 48, 43-53.
31. Gabrio T, Dill I, Grüner CH, Palmgren U, Richardson N, Seidl HP, Szewzyk R, Trautmann CH, and Weidner U, 2002, Wohnungshygienische Umgebungsanalyse - Begehungsprotokoll und Qualitätssicherung aus Sicht des LGA Baden- Württemberg: Keller R, Senkpiel K, Samson RA, Hoekstra ES (Hrsg.): Schriftreihe des Instituts für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene der Universität zu Lübeck, Band 6:Umgebungsanalyse bei gesundheitlichen Beschwerden durch mikrobielle Belastungen im Innenraum, 105-168.
32. Garrett MH, Rayment PR, Hooper MA, Abramson MJ, and Hooper BM, 1998, Indoor airborne fungal spores, house dampness and associations with

environmental factors and respiratory health in children: *Clinical and Experimental Allergy*, 28, 459-467.

33. Hansen LF and Nielsen GD, 1994, Sensory irritation, pulmonary irritation and structure-activity relationship of alcohols: *Toxicology*, 88, 81-99.
34. Hempel-Jorgensen A, Kjaergaard SK, Molhave L, and Hudnell KH, 1999, Sensory Eye irritation in humans exposed to Mixtures of volatile organic compounds: *Archives of Environmental Health*, 54, 416-424.
35. Herbarth O, Diez U, Lehmann I, Müller A, Rolle-Kampczyk U, and Wichmann G, 2002, Umweltmedizinische Untersuchungen beim Vorliegen einer Schimmelpilzbelastung und Erfassung immunmodulatorischer Effekte: Keller, R. et al (Hrsg.): *Schriftreihe des Instituts für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene der Universität zu Lübeck, Band 6: Umgebungsanalyse bei gesundheitlichen Beschwerden durch mikrobielle Belastungen im Innenraum*, 35-60.
36. Herr C, Bittighofer PM, Bünger J, Eikmann T, Fischer AB, Grüner CH, Idel H, zur Nieden A, Palmgren U, Seidel HJ, and Velcovsky HG, 1999, Wirkung von mikrobiellen Aerosolen auf den Menschen: *Gefahrstoffe- Reinhaltung der Luft*, 59, 229-239.
37. Herr C and Harpel S., 2001 MVOC- ein relevantes gesundheitliches Problem für die Bevölkerung. *Umweltmedizin in Forschung und Praxis*, 6[3], 125-126.
38. Herr CEW, Harpel S, Schenke S., Ulu F, Bergmann A, Lindemann H, and Eikmann TF, 2002, Assessment of microbial volatile organic components (MVOC), molds and indoor allergens in home of children with lung disease: WHO Housing and Health-Symposium, Casa e Salute- Convegno internazionale- Abstract Book, 283.
39. Herr C, Harpel S, Schenke S, Ulu F, Bergmann A, Lindemann H, and Eikmann TF, 2003, Einschätzung der Konzentrationen von mikrobiellen flüchtigen

organischen Verbindungen (MVOC), Schimmel und Innenraumallergenen im Wohnumfeld von atemwegskranken Kindern: Umweltmedizin in Forschung und Praxis, 8, 192.

40. Herr C, Harpel S, Bergmann A, Ulu F, Schenke S, Lindemann H, and Eikmann TF (a), 2004, Atemwegsbeschwerden und gesundheitliche Lebensqualität im Zusammenhang zu Innenraumklima und mikrobiellen Kontaminanten in Schlafzimmern atemwegskranker Kinder: Umweltmedizin in Forschung und Praxis, 9, 207.
41. Herr C, Harpel S, Bergmann A, Ulu F, Schenke S, Lindemann H, and Eikmann TF (b), 2004, Association between respiratory complaints and health-related quality of life and indoor climate and microbial contaminants in bedrooms of children with lung disease: WHO Housing and Health-Symposium - Abstract Book, 56.
42. Herr CEW, Harpel S, Fischer G, Schenke S, Ulu F, Stilianakis N, Lindemann H, and Eikmann TF (c), 2004, Einschätzung der Konzentrationen von mikrobiellen flüchtigen organischen Verbindungen (MVOC), Schimmel und Innenraumallergenen im Wohnumfeld von atemwegskranken Kindern: Arbeitsmedizin Sozialmedizin Umweltmedizin, 39, 65-66.
43. Herr CEW, Harpel S, Schenke S, zur Nieden A, Rethage T, Lindemann H, and Eikmann T F., 2005, Erfassung biogener Innenraumfaktoren im Schlafzimmer und Gesundheitsbeschwerden bei Kindern einer pulmonologischen Spezialambulanz im Jahresgang. Gefahrstoffe- Reinhaltung der Luft 9, 345-352.
44. Innenraumlufthygienekommission. Schimmelpilz-Leitfaden. www.umweltbundesamt.org/fpdf-l/2199.pdf . 29-4-2004. Umweltbundesamt, Berlin.

45. Institut Fresenius Dresden. 2004.
Personal Communication
46. IPCS (International Programme on chemical safety. Environmental Health Criteria (EHC). <http://www.inchem.org> . 2002.
47. Kauffman S, Zuidema S, and De Monchy JGR, 1994, Clinical significance of fungi in asthma: Aerobiology and clinical studies, *in* Samson et al.: Air Quality Monographs Vol.2 -Health Implications of Fungi in Indoor Environments Amsterdam, Elsevier, 221-228.
48. Kayser FH, Bienz KA, Eckert J, and Zinkernagel RM, 1998, Medizinische Mikrobiologie: Stuttgart- New York, Georg Thieme Verlag, 356.
49. Keller R and Groh J, 1998, Nachweis und quantitative Bestimmung von MVOC´s in pilzbelasteten und – unbelasteten Innenräumen: Keller, R.(Hrsg.): Schriftreihe des Instituts für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene der Universität zu Lübeck, Heft 1: Biogene Luftschadstoffe in Wohn- und Aufenthaltsräumen, 193-215.
50. Keller R, Senkpiel K, and Ohgke H, 1998, Geruch als Indikator für Schimmelpilzbelastung in natürlich belüfteten Innenräumen- Nachweis mit analytischer MVOC- Messung: VDI (Hrsg.), Gerüche in der Umwelt,VDI- Verlag, VDI- Bericht 1373, 155-163.
51. Keller R, 2000, Nachweis von Schimmelpilzen und Hausschwamm durch die Detektion der microbial organic compounds (MVOC): Keller, R. et al (Hrsg.): Schriftreihe des Instituts für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene der Universität zu Lübeck, Heft 4: Mikrobielle Schadwirkungen auf Mensch und Material in Gebäuden, 217-232.
52. Keller R, 2001, Möglichkeiten und Grenzen der MVOC- Analytik: Keller, R.; Senkpiel, K.(Hrsg.): Schriftreihe des Instituts für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene der Universität zu Lübeck, Heft 4: Gesundheitliche Aspekte

toxinogener Schimmelpilze in Gebäuden; Mykotoxine und MVOCs, 221-253.

53. Keller R (a), 2002, Mikrobielle Sekundärmetabolite aus Schimmelpilzen-
Nachweis und Bewertung: Keller R, Senkpiel K, Samson RA, Hoekstra ES
(Hrsg.): Schriftreihe des Instituts für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene
der Universität zu Lübeck, Band 6: Umgebungsanalyse bei gesundheitlichen
Beschwerden durch mikrobielle Belastungen im Innenraum, 193-241.
54. Keller R (b), 2002, Microbial volatile organic compounds (MVOCs) in
Innenräumen: Entwicklung einer Methode zur Detektion von MVOCs aus
Schimmelpilzen: Düsseldorf, VDI-Verlag GmbH.
55. Keller R, Reinhardt-Benitez S, Döringer K, Eilers J, Laußmann D, Mergner HJ,
Ohgke H, Schmidt A, Senkpiel K, Solbach W, Walker G, Weiß R, and Butte W,
2004, Hintergrundwerte von flüchtigen Schimmelpilzmetaboliten in
unbelasteten Wohngebäuden: Gefahrstoffe- Reinhaltung der Luft, 64, 187-
190.
56. Keller R, Senkpiel K, and Butte W, 2006, Detektion von saisonal bedingten
MVOC-Referenzwerten in unbelasteten: Gefahrstoffe- Reinhaltung der Luft,
66, 3, 107-111
57. Keller R, Senkpiel K, Butt W, 2007, Schimmelpilze und deren
Sekundärmetabolite (MVOC) in Luftproben unbelasteter Wohnungen
Gefahrstoffe- Reinhaltung der Luft 67, 77-84
58. Kerkmann ML.
http://www.roemerbiotec.de/schaedlingsbeschreibungen/pilze/besch_pilze.htm
. 2002.
59. Kilpeläinen M, Terho EO, Helenius H, and Koskenvuo M, 2001, Home
dampness, current allergic diseases, and respiratory infections among young
adults: Thorax, 56, 462-467.

Ref ID: 71

Reprint: Not in File

60. Koch A, Keilemann KJ, Bischof W, Heinrich J, and Wichmann HE, 2000, Indoor viable mold spores- a comparison between two cities, Erfurt (eastern Germany) and Hamburg (western Germany): *Allergy*, 55, 176-180.
61. Korpi A, Alarie Y, Kosma VM, Pasanen AL, and Kasanen JP, 1999, Sensory irritating potency of some microbial volatile organic compounds (MVOC`s) and a Mixture of five MVOC`s: *Archives of environmental health*, 54, 347-352.
62. Kreja L and Seidel HJ, 2001, Toxikologische Untersuchung einiger häufig nachgewiesener flüchtiger organischer Metabolite der Schimmelpilze (MVOC): *Umweltmedizin in Forschung und Praxis*, 6, 159-163.
63. Kreja L and Seidel HJ (a), 2002, Evaluation of the genotoxic potential of some microbial volatile organic compounds (MVOC) with the comet assay, the micronucleus assay and the HPRT gene mutation assay: *Mutation Research*, 513, 143-150.
64. Kreja L and Seidel HJ (b), 2002, On the cytotoxicity of some microbial volatile organic compounds as studied in the human lung cell line A549: *Chemosphere*, 49, 105-110.
65. Larsen L, 1994, Fungal Allergens, *in Samson et al.: Air Quality Monographs Vol.2 -Health Implications of Fungi in Indoor Environments*, Amsterdam, Elsevier, 215-220.
66. Larsen TO and Frisvad JC, 1994, Production of volatiles and presence of mycotoxins in conidia of common indoor *Penicillia* and *Aspergillii*, *in Samson et al.: Air Quality Monographs Vol.2 -Health Implications of Fungi in Indoor Environments (Amsterdam, Elsevier)*, 291-305.

67. Laußmann D, Braun P, Schleibinger H, and Eis D, 2002, Methylfurane in der Raumluft- nicht nur typisch für Schimmelpilze: Umweltmedizinischer Informationsdienst (UMID), 2, 17-19.
68. LGA Baden-Württemberg (Stuttgart), 1998, Zusammenhang zwischen biologischen Innenraumbelastungen und Allergien bzw. Atemwegserkrankungen, Studie 1997/98, Heft 2000/3: Zusammenhang zwischen biologischen Innenraumbelastungen und Allergien bzw. Atemwegserkrankungen, Studie 1997/98.
69. Lorenz W and Mehrer A, 2004, MVOC-Untersuchungen in der Praxis und mögliche anthropogene Einflüsse: Keller R, Senkpiel K, Samson RA, Hoekstra ES (Hrsg.): Schriftreihe des Instituts für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene der Universität zu Lübeck, Band 8: Erfassung biogener und chemischer Schadstoffe des Innenraumes und die Bewertung umweltbezogener Gesundheitsrisiken, 279-336.
70. Lorenz W, 2005, MVOC-Bestimmungen zur Erkennung mikrobieller Schäden in Gebäuden, *in* Handbuch für Bioklima und Raumlufthygiene; Moriske HJ und Turowski E: Landsberg, ecomed-Verlag.
71. Lorenz W, Guenther D, Esbach R, Richter H, and Keller R, 2006, Laboratory chamber measurements to simulate the effect of secondary MVOC sources: International Conference Healthy Buildings, HB Lisbon.
72. Meier C, 2002, Erfassung und Bewertung bauphysikalischer Mängel im Innenraum: Keller R, Senkpiel K, Samson RA, Hoekstra ES (Hrsg.): Schriftreihe des Instituts für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene der Universität zu Lübeck, Band 6: Umgebungsanalyse bei gesundheitlichen Beschwerden durch mikrobielle Belastungen im Innenraum, 241-304.
73. Meklin T, Husman T, Vepsäläinen A, Vahteristo M, Koivisto J, Halla-Aho J, Hyvärinen A, Moschandreas D, and Nevalainen A, 2002, Indoor air microbes and respiratory symptoms of children in moisture damaged and reference

schools: *Indoor Air*, 12, 175-183.

74. Mølhave L, 1991, Volatile organic compounds, indoor air quality and health: *Indoor Air*, 4, 357-376.
75. Mølhave L, Kjaergaard SK, Hempel- Jørgensen A, Juto JE, Andersson K, Stridh G, and Falk J, 2000, The eye irritation and odor potencies of four terpenes which are major constituents of the emission of VOCs from Nordic soft woods: *Indoor Air*, 10, 318.
76. Mücke W and Lemmen C, 1999, Schimmelpilze- Vorkommen, Gesundheitsgefahren, Schutzmaßnahmen: Landsberg, Ecomed Verlagsgesellschaft Ag& Co. KG.
77. Müller T, Thißen R, Braun S, Dott W, and Fischer G, 2003, (M)VOC and composting facilities, Part 2:(M)VOC dispersal in the environment: *Environment Science and Pollution Research*, online first, 1-6.
78. NIEHS- National Institute of Environmental Health Sciences. National Toxicology Program /NTP . <http://ntp-server.niehs.nih.gov/htdocs/> . 2001.
79. Nilsson A, Kihlström E, Lagesson V, Wessen B, Szponar B, Larsson L, and Tagesson C, 2004, Microorganisms and volatile organic compounds in airborne dust from damp residences: *Indoor Air*, 14, 74-82.
80. Obeloer M, 1998, Nachweis und Lokalisierung biogener Belastungen in Innenräumen: Keller, R.(Hrsg.): *Schriftreihe des Instituts für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene der Universität zu Lübeck*, Heft 2: *Gesundheitliche Gefahren durch biogene Luftschadstoffe*, 245-255.
81. Pasanen AL, Korpi A, Kasanen JP, and Pasanen P, 1998, Critical aspects on the significance of microbial volatile metabolites as indoor air pollutants: *Environment International*, 24, 703-712.

82. Quadripur SA, 1996, Pilze und Pilzerkrankungen - Ein Leitfaden für die Praxis: Stuttgart- New York, Georg Thieme Verlag, 14.
83. Reiling N, Brandt E, and Lorenz W, 2006, The effect of microbial emissions on human granulocytes: International Conference Healthy Buildings, HB Lisbon.
84. Reinhardt-Benitez S and Mergner HJ, 2002, Einsatz von Sporenkonzentrations- und MVOC-Messungen zur Abklärung von Schimmelpilzverdacht: Erfahrungen aus dem Routine-Messeinsatz: Keller R, Senkpiel K, Samson RA, Hoekstra ES (Hrsg.): Schriftreihe des Instituts für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene der Universität zu Lübeck, Band 6:Umgebungsanalyse bei gesundheitlichen Beschwerden durch mikrobielle Belastungen im Innenraum, 401-422.
85. Reinikainen LM and Jaakkola JJK, 2003, Significance of humidity and temperature on skin and upper airway symptoms: Indoor Air, 13, 344-352.
86. Robert-Koch-Institut, Berlin. Bundesgesundheitsurvey 2001. www.rki.de . 5-2-2005.
87. Ross MA, Curtis L, Scheff PA, Hryhorczuk DO, Ramakrishnan V, Wadden RA, and Persky VW, 2000, Association of asthma symptoms and severity with indoor bioaerosols: Allergy, 55, 705-711.
88. Sagunski H, 1997, Mikrobielle flüchtige organische Verbindungen: Expositionsindikatoren bei Schimmelpilzbefall in Innenräumen?: Umweltmedizin in Forschung und Praxis, 2, 95-100.
89. Schaper M, 1993, Development of a database for sensory irritants and its use in establishing occupational exposure limits: American Industrial and Hygiene Association Journal, 54, 488-544.
90. Schenke S, Harpel S, Bergmann A, Ulu F, Lindemann H, Eikmann T, and Herr C, 2004, Einschätzung der Konzentrationen von mikrobiellen flüchtigen

organischen Verbindungen (MVOC), Schimmelpilzsporen und Innenraumallergenen im Wohnumfeld im Jahrgang: Umweltmedizin in Forschung und Praxis, 9, 240-241.

91. Schleibinger H, Mangler M, Brattig C, Block I, Nickelmann A, and Rüden H, 2001, Mikrobiell gebildete flüchtige organische Verbindungen (MVOC) als Indikatoren für einen verdeckten Schimmelpilzbefall: Labor- und Feldversuche: Keller, R.; Senkpiel, K.(Hrsg.): Schriftreihe des Instituts für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene der Universität zu Lübeck, Heft 4: Gesundheitliche Aspekte toxinogener Schimmelpilze in Gebäuden; Mykotoxine und MVOCs, 255-269.
92. Schleibinger H, Laußmann D, Samwer H, Eis D, and Rüden H (a), 2004, Sind MVOC geeignete Indikatoren für einen verdeckten Schimmelpilzbefall?: Umweltmedizin in Forschung und Praxis, 9, 151-162.
93. Schleibinger H, Laußmann D, Marchl D, Braun P, Eis D, and Rüden H (b), 2004, MVOC- zum Nachweis von Schimmelpilzbefall geeignet?: Umweltmedizinischer Informationsdienst (UMID), 1, 23-26.
94. Schleibinger H, Laußmann D, Bornehag CG, Eis D Rueden H, 2008, Microbial volatile organic compounds in the air of mouldy and mouldfree indoor environments, Indoor Air 18, 113-124
95. Schuschke G, 1996, Sinnesvermittelte Umwelteinwirkungen. Umweltwahrnehmung und Gesundheit: Umweltmedizin in Forschung und Praxis, 1, 93-101.
96. Seidel HJ and Plappert U, 1999, Zur Toxikologie zweier häufig nachgewiesener MVOCs: 1-Okten-3-ol und 3-Methyl-1-butanol: Umweltmedizin in Forschung und Praxis, 4, 285-288.
97. Seidel HJ, Weidner U, Dill I, Fischer G, Grün L, Hoekstra ES, Rabe R, Samson RA, and Trautmann C, 2005, Ringversuch "Innenraumrelevante

Schimmelpilze": Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz, 48, 36-42.

98. Senkpiel K, Kurowski V, and Ohgke H, 1996, Raumlufuntersuchung schimmelpilzbelasteter Wohn- und Aufenthaltsräume bei ausgewählten Patienten mit Asthma bronchiale (unter besonderer Berücksichtigung der Bewertungsproblematik): Zentralblatt Hygiene, 198, 191-203.
99. Silbernagl S and Despopoulos A, 1991, Taschenatlas der Physiologie: Stuttgart- New York, Georg Thieme Verlag, 296.
100. Sönnichsen R and Keller R, 1998, Methodische Grundlagen zur Identifizierung der flüchtigen organischen Stoffwechselprodukte von Schimmelpilzen mittels GC- MSD und Thermodesorption: Keller, R.(Hrsg.): Schriftreihe des Instituts für Medizinische Mikrobiologie und Hygiene der Universität zu Lübeck, Heft 1: Biogene Luftschadstoffe in Wohn- und Aufenthaltsräumen, 161-192.
101. Steinheider B, 1999, Environmental odours and somatic complaints: Zentralblatt Hygiene und Umweltmedizin, 202, 101-119.
102. Ström G, Norbäck D, West J, Wessen B, and Palmgren U, 1993, Microbial volatile organic compounds (MVOC): A causative agent to sick building problems: Int.Conf.On Building Design, Technologies and Occupant Well-being, ASHRAE Special Publications, 351-357.
103. Ström G, West J, Wessen B, and Palmgren U, 1994, Quantitative analysis of microbial volatiles in damp swedish houses, *in* Samson et al. .: Air Quality Monographs Vol.2 -Health Implications of Fungi in Indoor Environments Amsterdam, Elsevier, 291-305.
104. Trautmann C, 2003, Schimmelpilzbefall bei Feuchteschäden: Luftverunreinigungen im Innenraum VDI: Kommission Reinhaltung der Luft, VDI- Berichte 1778, 21.

105. VDI-Richtlinie 4300, Blatt 6, 2000, Messen von Innenraumluftverunreinigungen-Messstrategie für flüchtige organische Verbindungen (VOC), Berlin, Beuth Verlag GmbH
106. Wan GH and Li CS, 1999, Dampness and airway inflammation and systemic symptoms in office building workers: Archives of Environmental Health, 54, 58-63.
107. Wessen B and Schoeps KO, 1996, Microbial volatile organic compounds- What substances can be found in sick buildings?: Analyst, 121, 1205.
108. Wolkoff P, Clausen PA, Wilkins CK, and Nielsen GD, 2000, Formation of strong airway irritants in Terpene/ Ozone Mixtures: Indoor Air, 10, 82-91.

Erklärung

Gießen, den 09. Mai 2009

Erklärung

„Ich erkläre: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbständig, ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten.“

Simone Schenke

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meiner Doktormutter Frau Professor Dr. med. C. Herr für die Überlassung des Themas, für die vielen Ideen und die Unterstützung während der gesamten Dauer der Arbeit.

Des Weiteren möchte ich mich bedanken bei:

Herrn Professor Dr. med. T. Eikmann, dem Leiter des Instituts für Hygiene und Umweltmedizin der Justus-Liebig-Universität Gießen, für die Ermöglichung der Arbeit und die Unterstützung

Herrn Professor Dr. med. H. Lindemann, dem ehemaligen Leiter der pädiatrischen Pneumologie und Allergologie und des Mukoviszidose-Zentrum am Zentrum für Kinderheilkunde und Jugendmedizin der Justus-Liebig-Universität Gießen, für die freundliche Beratung und Unterstützung

Frau Dipl. Ing. S. Harpel, der Leiterin des Umweltlabors des Instituts für Hygiene und Umweltmedizin der Justus-Liebig-Universität Gießen, für die Betreuung, die Organisation und die Unterstützung während der gesamten Arbeit

Frau J. Haub, die als MTLA mich besonders während der Laborarbeit tatkräftig unterstützte und bei der Organisation der Probennahme zur Seite stand

Frau Professor Dr. rer. nat. A. B. Fischer, Frau Dr. rer. nat. H. Seitz und insbesondere Frau Ulrike Eckhart († **16. Juli 2009**, Danke für Deine tollen Ratschläge in jeder Lebenssituation, ich werde Dich nie vergessen) für das Korrekturlesen und die guten Ratschläge sowie Herrn PD Dr. G. Fischer für die Auswertung der MVOC-Proben und der Überlassung von Literatur

Meinen „Mitdoktoranden“ Fatma Ulu und Alexander Bergmann für die gute und unvergessliche Zusammenarbeit während der Datenerhebung

Allen Mitarbeitern und Doktoranden des Instituts für Hygiene und Umweltmedizin der JLU Gießen, die an dieser Studie beteiligt waren und mich in irgendeiner Form unterstützt haben und hier nicht näher aufgeführt sind

Ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, meinem Mann Jochen Thiele und meinem Sohn Leon sowie meinen Eltern Heidrun und Alois Schenke für die Unterstützung während der Datenerhebung und des Schreibens, für die Geduld und das Korrekturlesen.