
Luftqualität und Geruchsbelastung in Schulen

Florian Mayer, Andrea Burdack-Freitag,
Klaus Breuer, Klaus Sedlbauer



Gliederung

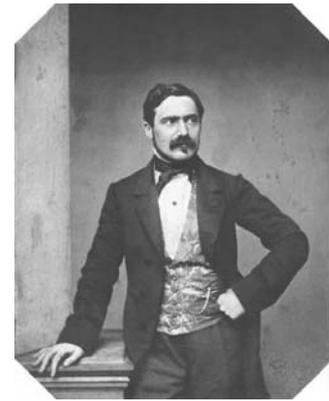
Innenraum-Kontaminanten:

- CO₂ Kohlendioxid
- VOCs **V**olatile **O**rganic **C**ompounds
(flüchtige organische Verbindungen)
- OVOCs **O**doractive **V**olatile **O**rganic **C**ompounds
(Geruchsstoffe)



1858

„ ... dass keine Luft behaglich ist, welche mehr als 1 Vol.-% CO₂ enthält.“
(0,1 % = 1000 ppm)



Max von Pettenkofer

= **Pettenkoferzahl**

CO₂ Gehalt in der Außenluft: 0,04 % (400 ppm)

CO₂ Gehalt in der Ausatemluft: 4% (40.000 ppm)

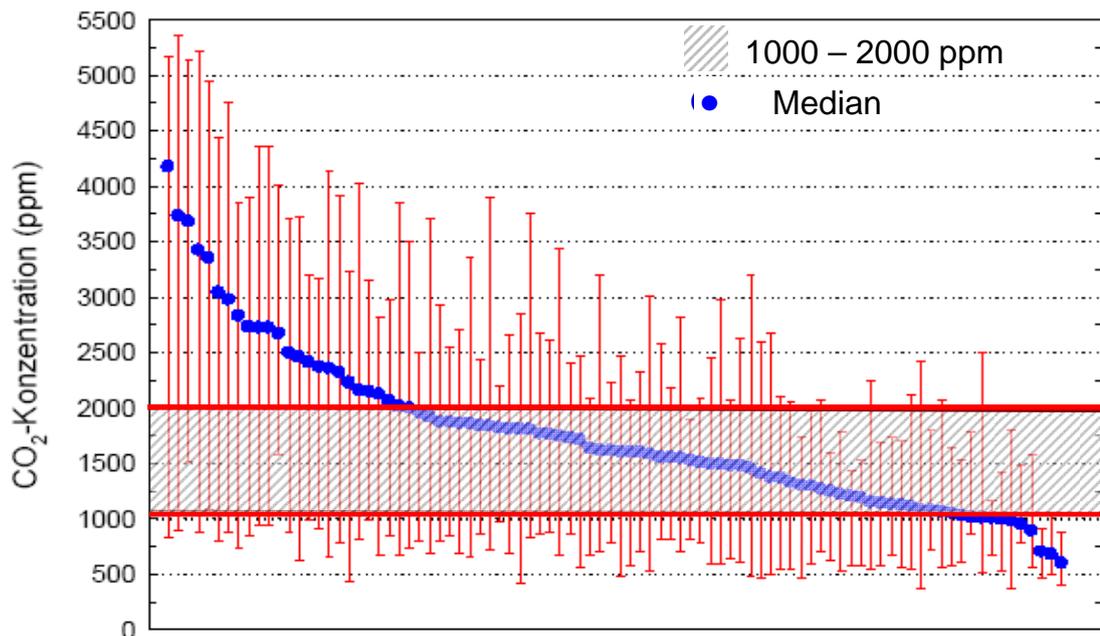
CO₂ Innenraumrichtwerte der Ad-hoc-Arbeitsgruppe des UBA 2008

Tabelle 2. Leitwerte für die Kohlendioxid-Konzentrationen in der Innenraumluft (Ad-hoc-AG 2008)		
CO ₂ -Konzentration [ppm]	Hygienische Bewertung	Empfehlung
< 1000	Hygienisch unbedenklich	▶ Keine weiteren Maßnahmen
1000–2000	Hygienisch auffällig	▶ Lüftungsmaßnahmen intensivieren (Außenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel erhöhen) ▶ Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern
> 2000	Hygienisch inakzeptabel	▶ Belüftbarkeit des Raumes prüfen ▶ ggf. weitgehende Maßnahmen prüfen

Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft,
Bundesgesundheitsblatt – Gesundheitsforschung – Gesundheitsschutz 11, 2008

LEITFADEN FÜR DIE INNENRAUMHYGIENE IN SCHULGEBÄUDEN, UBA, 2008

CO₂-Konzentration in bayerischen Schulen (Winter)



Einzelmessungen in Klassenräumen

Fromme et al. 2006

Wirkung von CO₂

< 0,1 Vol.% (Pettenkofer-Zahl, 1000 ppm):

- Keine negative Auswirkung, unbedenklich

1 Vol. %:

- Erhöhung der Atemfrequenz, Verringerung der körperlichen Leistungsfähigkeit, Azidose (Übersäuerung des Blutes, wird bei fehlender körperlicher Belastung vom gesunden Erwachsenen kompensiert)

3 Vol. %:

- Kopfschmerzen und Schwindel

4-6 Vol. %:

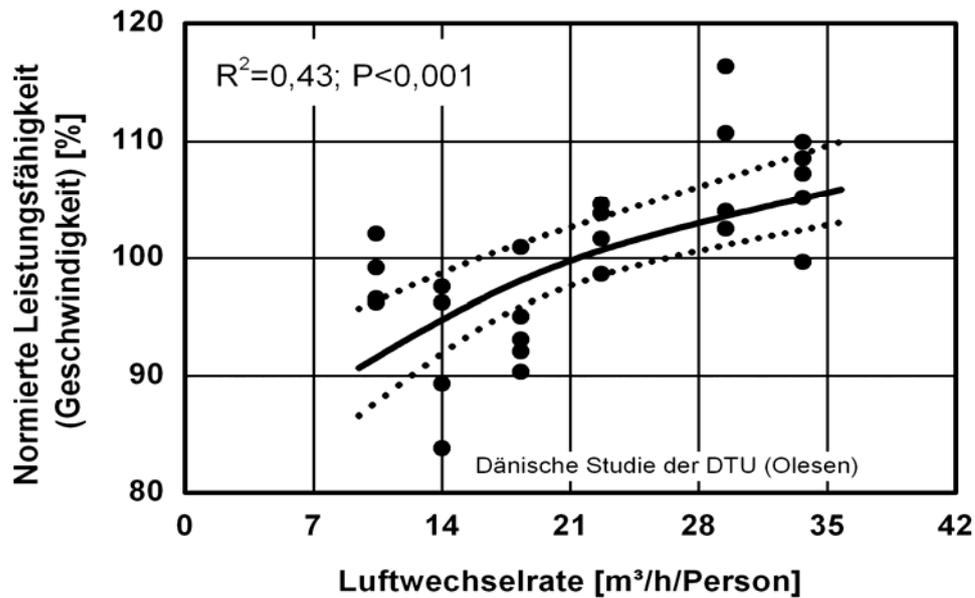
- Kopfschmerzen, Ohrensausen (Tinnitus), Herzklopfen, Blutdruckanstieg, psychische Erregung, Schwindel, Benommenheit

mehr als 6 Vol. %:

- EKG-Veränderungen, starke Aktivierung der Herztätigkeit, Kopfschmerz, Schwindel, erweiterte Pupillen, muskuläre Schüttelkrämpfe

- Bei längerer Exposition Bewusstlosigkeit Tod

Einfluss der Luftqualität auf die Leistungsfähigkeit

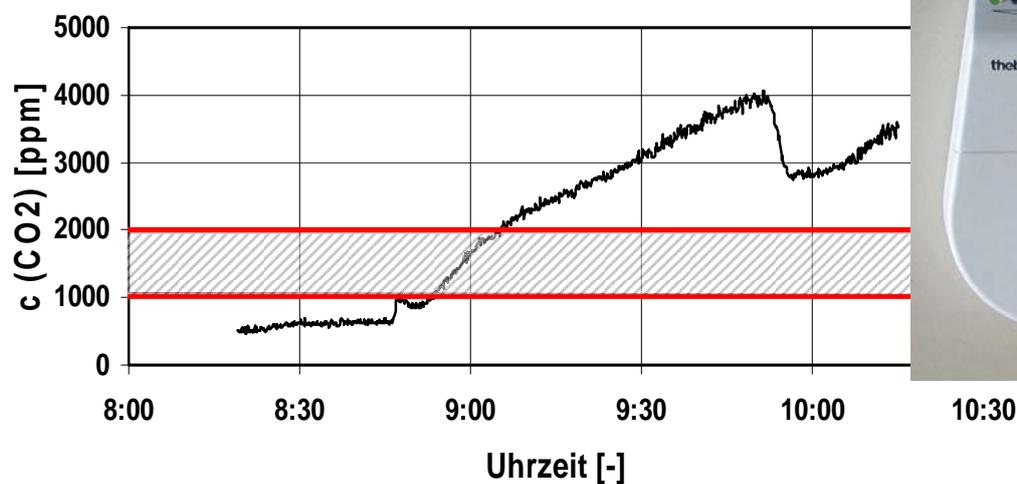


Verdopplung der Außenlufttrate → Verbesserung der Leistung um 8 – 14%

Messung in Klassenzimmern

Berufsschule, München (März):

80er Jahre Klinkerbau, gefliest, 34 Berufsschüler, voll besetzt,
LQ zunehmend schlechter beurteilt,



Messung in Klassenzimmern

Gymnasium, Miesbach:

60er Jahre Bau, Linoleumboden, Fensterlüftung



Klassenraum 205, Baujahr 1964, Südwest



Messung in Klassenzimmern

Messaufbau:

- Kombinierte Temperatur- und Feuchtesensoren auf 0,1m, 0,6 m, 1,1 m und 1,7 m Höhe
- CO₂-Sensor auf 1,7 m Höhe
Abtastrate: 1 Minute
 - am Sitzplatz eines Schülers, in der Mitte zwischen Tafel und hinterer Wand, in der Bankreihe am weitesten vom Fenster entfernt (Türseite)



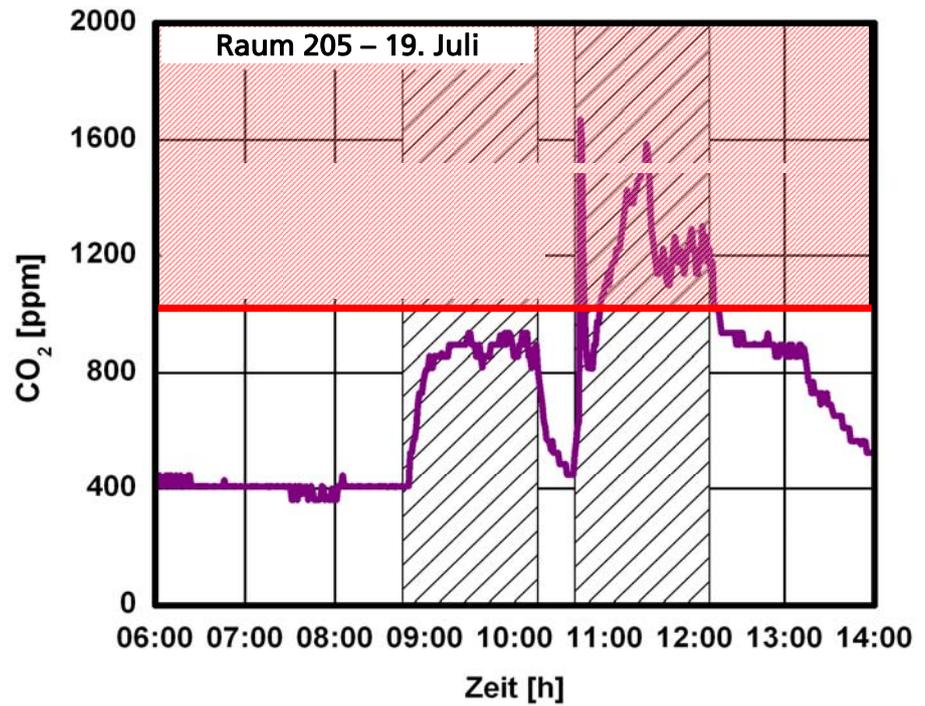
CO₂-Sensor



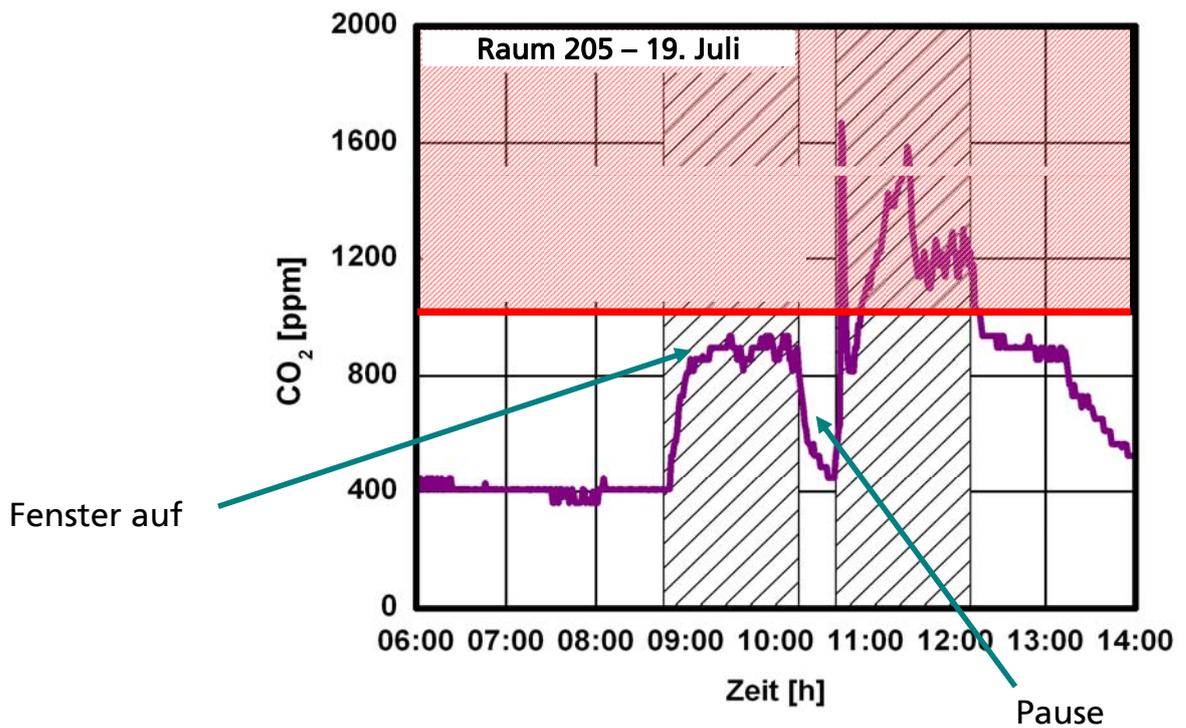
CO₂-Sensor und kombinierter Temperatur- und Feuchtesensor



Messung in Klassenzimmern

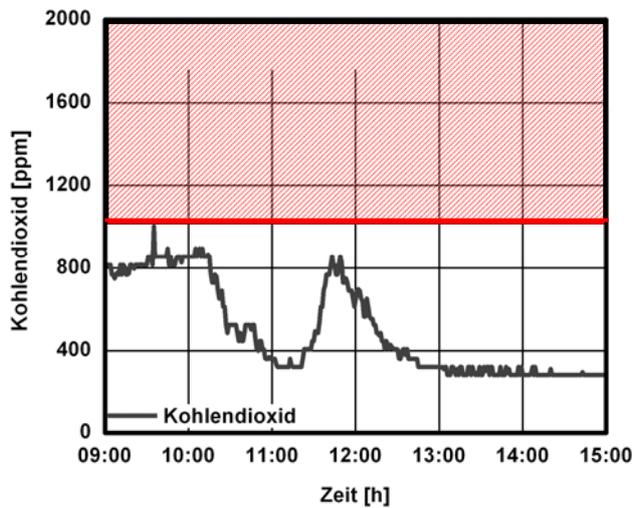


Messung in Klassenzimmern



Messung in Klassenzimmern

CO₂ < 1000 ppm, dennoch LQ schlecht beurteilt – Ursache ?



Flüchtige organische Verbindungen (VOCs) - Einteilung

Flüchtige organische Verbindungen				anorganische Verbindungen
VVOC	VOC	MVOC	SVOC	<u>Salze:</u> Kationen (Alkali- und Erdalkalimetalle, Schwermetalle...), Anionen <u>Säuren und Basen</u> ...
Lösungsmittel, Treibmittel, Halogenkohlenwasserstoffe ...	Lösungsmittel, Restmonomere, Terpene/ Terpenoide ...	gasförmige Emissionen mikrobieller Herkunft ...	polycyclische, aromatische Kohlenwasserstoffe, Weichmacher ...	
<u>Nanoverbindungen</u>				
Diethylether, Pentan, Formaldehyd, Acetaldehyd ...	Ethanol, Benzol, Toluol, Xylol, Styrol, Ethylbenzol, Terpentin, Pinen ...	1-Octen-3-ol 2-Octen-1-ol Dimethyldisulfid 3-Methylfuran Ethanol ...	Benzopyren, Pestizide, Biozide, Phthalate ...	Kalium, Magnesium, Blei, Cadmium, Silber Nitrat, Phosphat Ammoniak, schwefelige Säure Metalloxidkatalysatoren ...
OVOC (Geruchsstoffe)				
Methanthiol ...	Octanal ...	3-Methylbuttersäure ...	Vanillin ...	

Richtwerte für die Innenraumluft – TVOC *

Stufe 1: TVOC-Wert < 0,3 mg/m³: hygienisch unbedenklich, Zielwert

Stufe 2: TVOC-Wert > 0,3 – 1 mg/m³: hygienisch noch unbedenklich, erhöhter Lüftungsbedarf

Stufe 3: TVOC-Wert > 1 – 3 mg/m³: hygienisch auffällig, befristet (< 12 Monate) als Obergrenze für Räume, die für einen längerfristigen Aufenthalt bestimmt sind

Stufe 4: TVOC-Wert > 3 – 10 mg/m³: hygienisch bedenklich, Raum befristet (maximal 1 Monat) und bei verstärkter Lüftung nutzbar

Stufe 5: TVOC-Wert > 10 - 25 mg/m³: hygienisch inakzeptabel, die Raumnutzung ist allenfalls vorübergehend täglich (stundenweise) und bei Durchführung verstärkter regelmäßiger Lüftungsmaßnahmen zumutbar

* TVOC = Total Volatile Organic Compounds

Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz 7 · 2007

VOC Analytik in Klassenzimmern

- Probenahme im leeren Klassenzimmer
- Probenahme im voll besetzten Klassenzimmer
- Analytik gemäß DIN EN ISO 16000
- TD-GC-MS/FID

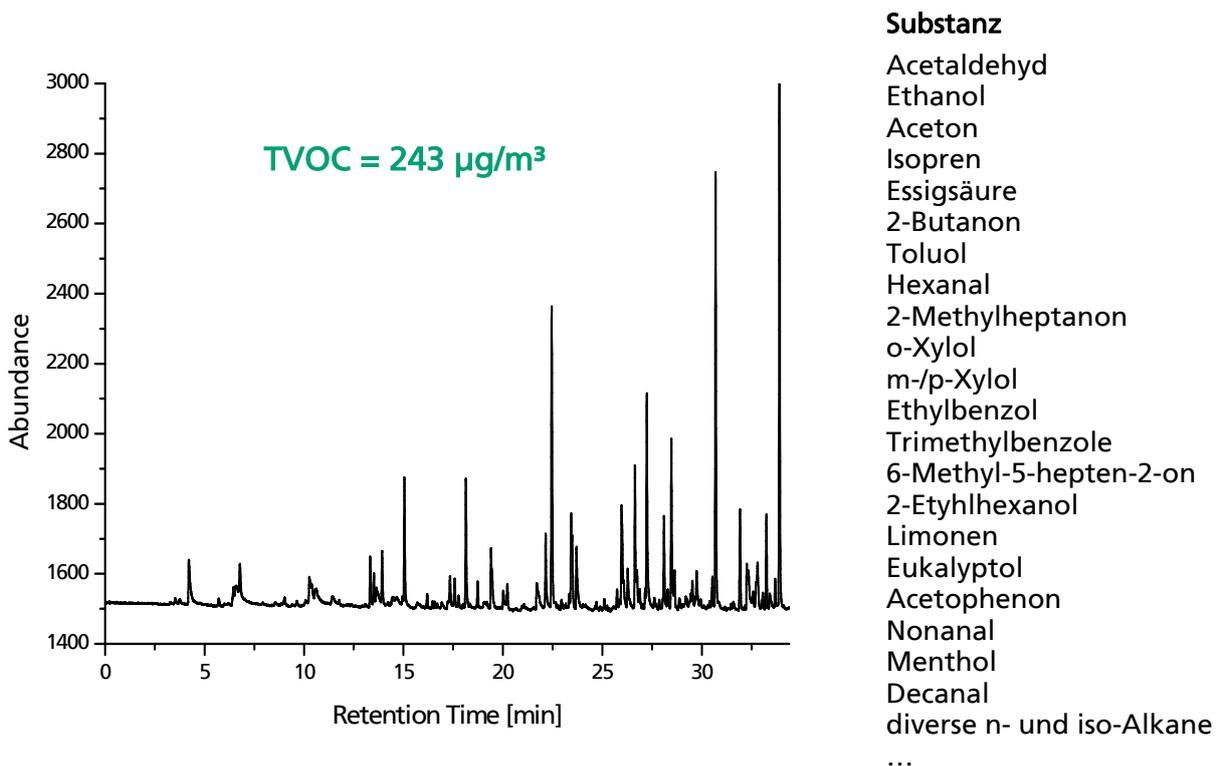


VOC Analytik in Klassenzimmern

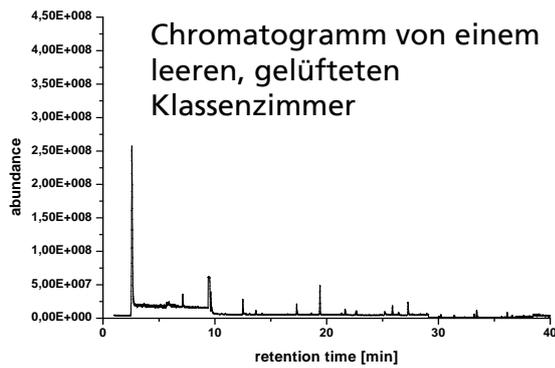
TVOC-Werte [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]

	vor Unterricht	1. Stunde	2. Stunde
Grundschule (Baujahr 2001, viel Holz, viele Pflanzen)	675 hygienisch unbedenklich Lüftungsbedarf	957	1257 hygienisch auffällig
Gymnasium (Baujahr 1964)	104	144	243 hygienisch unbedenklich

VOC Analytik in Klassenzimmern

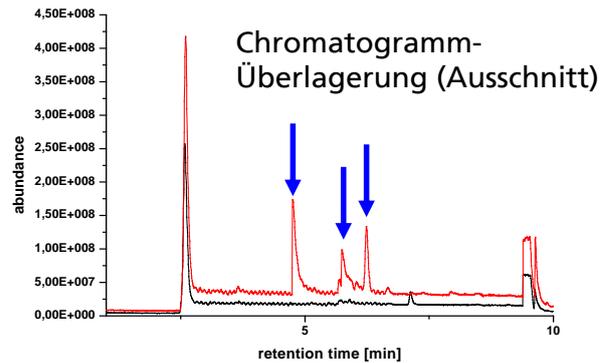
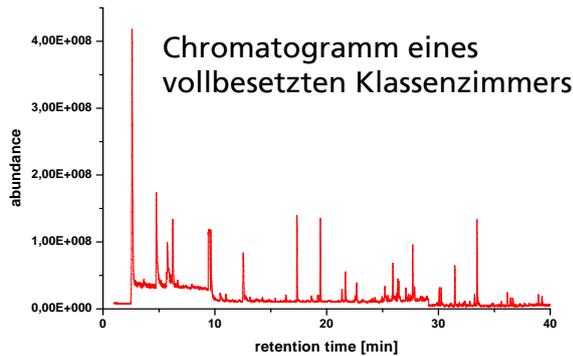


VOC Analytik in Klassenzimmern



Vorgehensweise

Subtraktion der VOCs, die im leeren, gelüfteten Raum gefunden wurden von den VOCs, die im besetzten Raum gefunden wurden
→ Raumeinfluss minimiert



Bioeffluente

Bildungswege

- * Menschlicher Metabolismus
- * Mikrobielle Aktivität auf der Haut

Ausscheidungswege

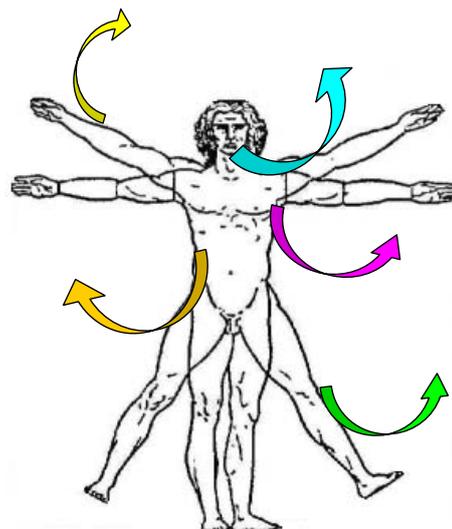
- * oral / nasal (Atem)
- * sekretorisch (Drüsen)
- * transpiratorisch (Schweiß)
- * perspiratorisch (Hautatmung)
- * urinal / fäkal

Emissionsarten

- * anorganisch (CO_2 , Salze, H_2O)
- * **organisch** (Säuren, Triglyceride),
- * **flüchtig** (Aldehyde, Alkohole)
- * Nicht flüchtig (Fette, Harnstoff)

Einflussfaktoren

Ernährung, Geschlecht, Alter, Gesundheitszustand, Zusammensetzung der eingeatmeten Luft, körperliche Verfassung, (schlechte) Angewohnheiten, Einflüsse der Zivilisation (Kleidung, Parfum, Pflegeprodukte, Lösungsmittel)



Leonardo da Vincis „Vitruvian Man“

VOCs menschlichen Ursprungs

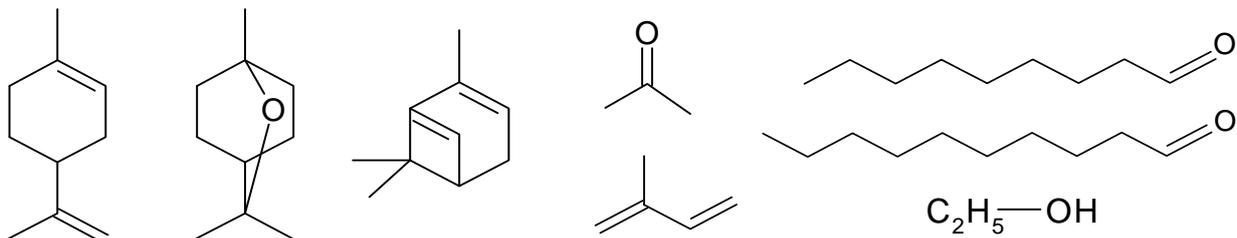
Folgende 8 Substanzen korrelieren mit menschlicher Präsenz

Substanz	Quelle
Aceton	Atem
Isopren	Atem
Ethanol	Atem
Limonen	Kosmetika, Hautatmung, Schwitzen
Eukalyptol	Kosmetika, Hautatmung, Schwitzen
α -Pinen	Kosmetika, Hautatmung, Schwitzen
Nonanal	Mikrobieller Abbau auf der Haut
Decanal	Mikrobieller Abbau auf der Haut

➔ Ihr gemeinsames Auftreten in erhöhten Konzentrationen ist ein Indikator für schlechte Luftqualität

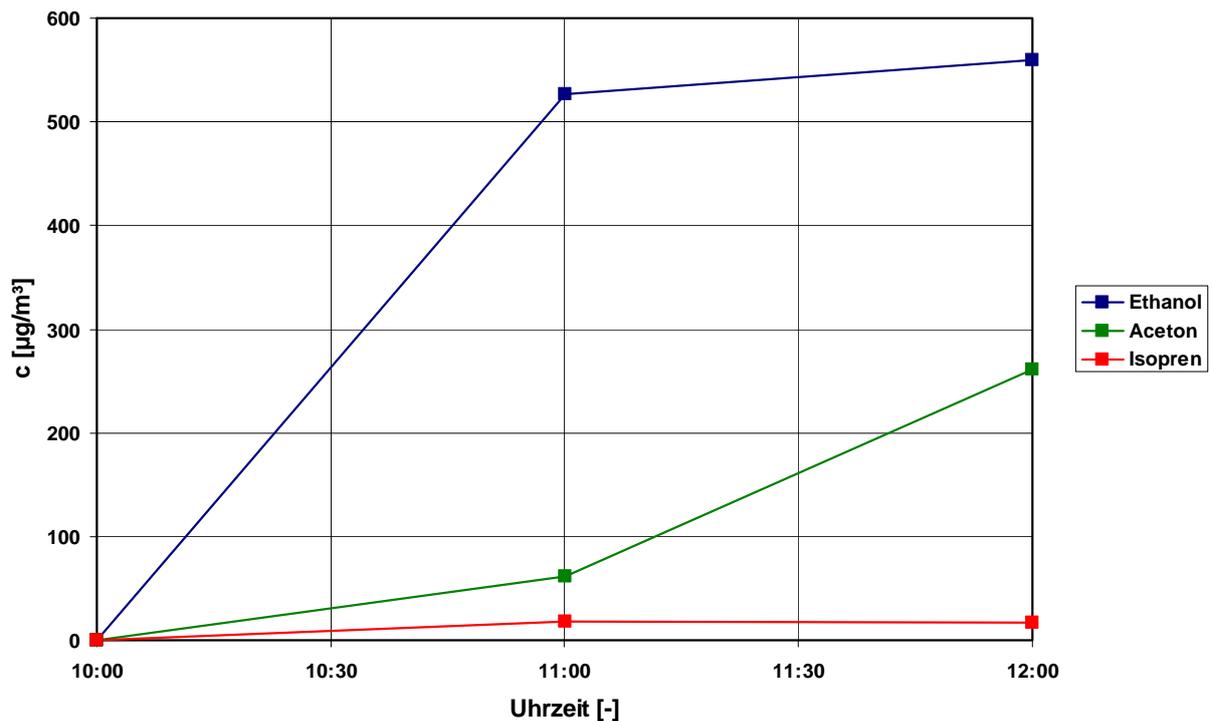
VOCs menschlichen Ursprungs

- Die Luftqualität wird von menschlichen Emissionen beeinflusst
- Indikatoren für menschliche Präsenz sind:
Ethanol, Acetone, Isopren, Limonen, Eukalyptol, α -Pinen, Nonanal, Decanal



- Ihr gemeinsame Auftreten in erhöhten Konzentrationen korreliert mit schlecht empfundener Luftqualität
- **Diese Substanzen sind Indikatorverbindungen für den menschlichen Einfluss auf die Luftqualität, aber sie sind i. d. R. nicht dafür verantwortlich!**
- Verbindungen, die tatsächlich für schlecht empfundene Luft verantwortlich sind, sind geruchsaktive Verbindungen, die meist allerdings nur in Spuren in der Raumluft vorkommen

VOC Verlauf über die Zeit



Geruchsanalytik

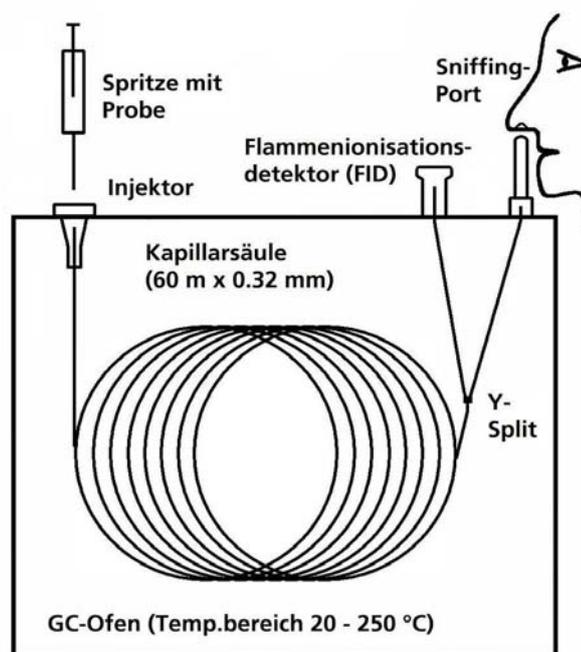
Gaschromatographie - Olfaktometrie (GC-O)

Lokalisierung der für den Geruch verantwortlichen Stoffe mittels

- Gaschromatographie -
Olfaktometrie (GC-O)

und anschließende Identifizierung mittels

- Gaschromatographie -
Massenspektrometrie (GC-MS)



Geruchsanalytik

Identifizierung der für den Geruch verantwortlichen Stoffe



1. Abriechen des Gaseffluenten einer gaschromatographisch aufgetrennten Probe und Markieren geruchsaktiver Stellen im Chromatogramm

→ Unterscheidung geruchsaktiver von geruchlosen Stoffen

2. Schrittweises Verdünnen der Probe und erneutes Abriechen

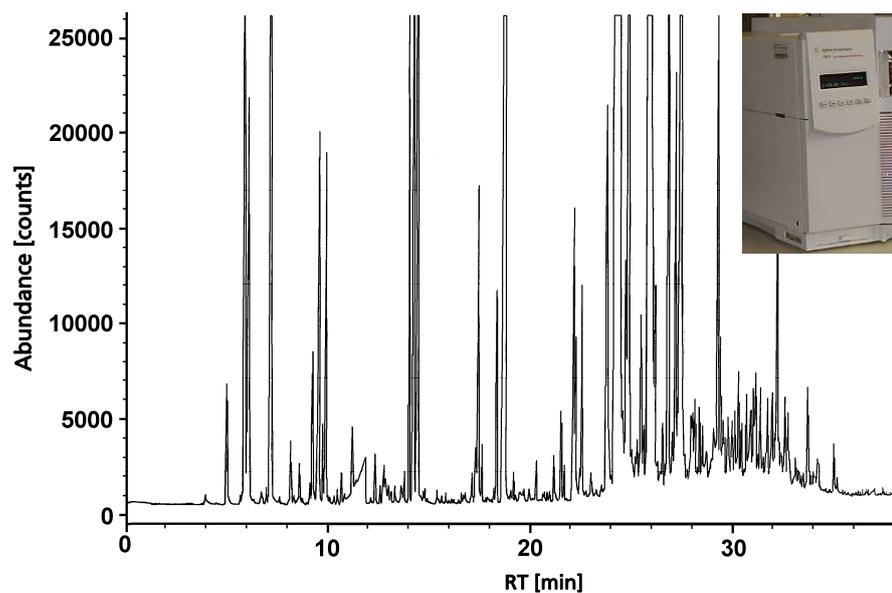
→ Selektion der wichtigsten Geruchsstoffe

Untersuchung von: - Gasraumproben und
- aufgereinigten Lösungsmittel-Extrakten

Geruchsanalytik

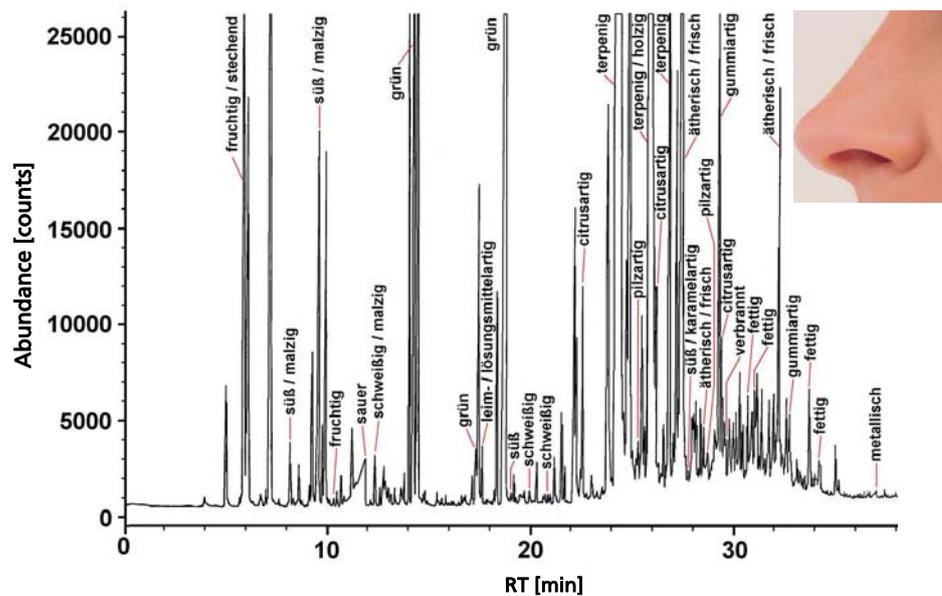
GC-FID-
Chromato-
gramm
einer
Gasraum-
probe

Frage:
Welches sind die
geruchsaktiven
Stoffe ?



GC-O-Chromatogramm einer Gasraumprobe

GCO ermöglicht die Lokalisierung von Geruchsstoffen



Geruchsanalytik

Vorgehensweise

Probe: Gasraumprobe und / oder Lösungsmittlextrakt

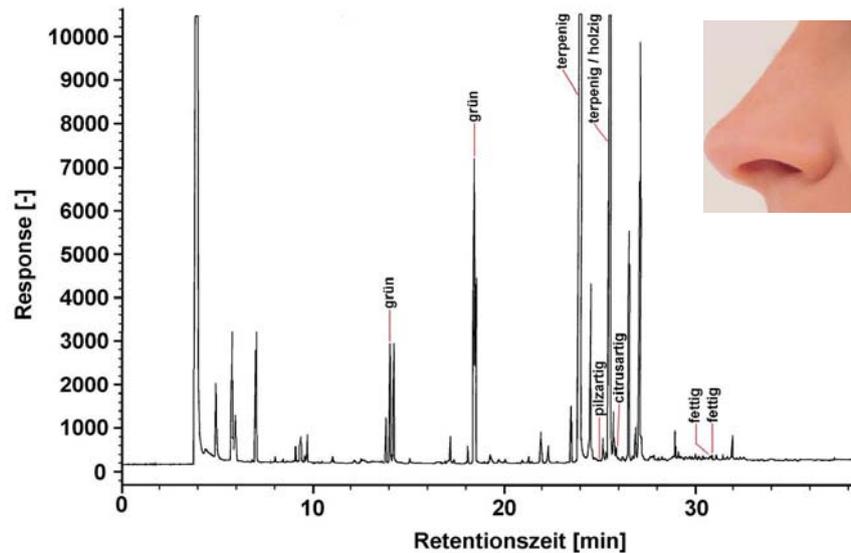
1. Gaschromatographie – Olfaktometrie (GC-O):
 - ➔ Geruchsqualität
 - ➔ Retentionsindex (auf mindestens zwei GC-Säulen unterschiedlicher Polarität)
2. Verdünnungsexperimente:
 - ➔ wichtigste Geruchsstoffe
3. Identifizierungsexperimente (nach Probenaufreinigung durch z. B. Säulenchromatographie, Multidimensionale Gaschromatographie):
 - ➔ Massenspektrum
 - ➔ Vergleich mit Referenzverbindung hinsichtlich Übereinstimmung (IBP Sammlung von Geruchsstoffen)

Verdünnungsanalyse

Stete Verringerung der Probenkonzentration / des Probenvolumens (1:1...1:100, min. 5 Schritte)

→ immer weniger Geruchseindrücke bei der GCO

= **wichtigste Geruchsstoffe**



In Klassenzimmerluft gefundene Geruchsstoffe

Aldehyde

Methylpropanal
Butanal
3-Methylbutanal
Hexanal
Octanal
Nonanal
Decanal
(Z)-4-Heptenal
(E)-2-Nonenal
(Z)-2-Nonenal
(Z)-2-Undecenal
(E,E)-2,4-Nonadienal
(E,Z)-2,6-Nonadienal
Benzaldehyd
Phenylacetaldehyd

Ketone

2,3-Butandion
1-Hexen-3-on
1-Octen-3-on
1-Nonen-3-on
6-Methyl-5-hepten-2-on
2-Octanon
Acetophenon

Ester

Butylacetat
Ethylbutanoat
Ethyl-2-methylbutanoat
Ethyl-3-methylbutanoat
Ethylcinnamat

In Klassenzimmerluft gefundene Geruchsstoffe

Schwefelverbindungen

Methanthiol
Ethanthiol
Dimethylsulfid
Dimethyldisulfid
Dimethyltrisulfid
Diethylsulfid
3-Methyl-2-buten-1-thiol
1-/4-Mercapto-2-butanon
2-Methyl-3-furantiol
3-Methylthiopropional
2-Furfurylthiol

Säuren

Essigsäure
3-Methylbuttersäure

Sonstige

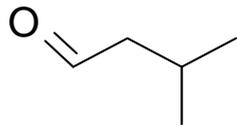
Eukalyptol
4-Hydroxy-2,5-dimethyl-3(2H)-furanon
3-Hydroxy-4,5-dimethyl-2(5H)-furanon
2-Methoxyphenol
2-Acetyl-1-pyrrolin

In Klassenzimmerluft gefundene Geruchsstoffe

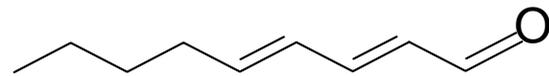
Geruchsqualitäten, Geruchsschwellen, Analogien zu Lebensmitteln

Geruchsstoff	Geruchsqualität	Geruchsschwelle [ng / L Luft]	Vorkommen in Lebensmitteln
3-Methylbutanal	malzig	3	Brot
Nonanal	citrusartig	4,5	Fette, Öle
E-2-Nonenal	fettig	0,1	Fette, Öle
Z-2-Nonenal	fettig	0,005	Fette, Öle
E,E-2,4-Nonadienal	fettig	0,4	Pommes Frites
E,Z-2,6-Nonadienal	gurkenartig	0,2	Gurke
1-Octen-3-on	pilzartig	0,03	Champignon
Ethyl-3-methylbutanoat	fruchtig	0,07	Ananas

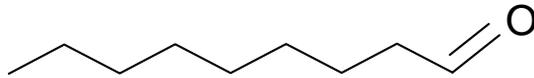
In Klassenzimmerluft gefundene Geruchsstoffe



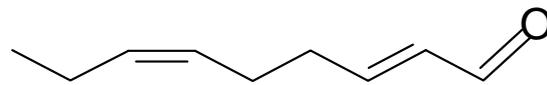
3-Methylbutanal



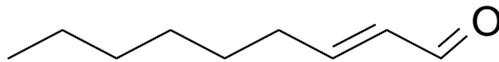
(E,E)-2,4-Nonadienal



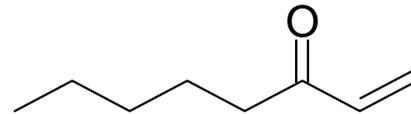
Nonanal



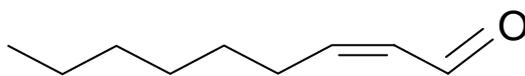
(E,Z)-2,6-Nonadienal



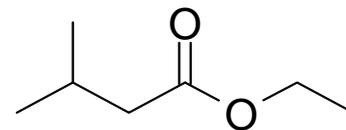
(E)-2-Nonenal



1-Octen-3-on



(Z)-2-Nonenal



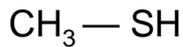
Ethyl-3-methylbutanoat

In Klassenzimmerluft gefundene Geruchsstoffe

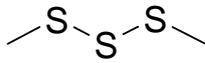
Geruchsqualitäten, Geruchsschwellen, Analogien zu Lebensmitteln

Geruchsstoff	Geruchsqualität	Geruchsschwelle	Vorkommen in Lebensmitteln [ng / L Luft]
Methanthiol	faulig	2	Kohl
Dimethyltrisulfid	kohlartig	0,06	Kohl
2-Methyl-3-furanthiol	fleischig	0,001	Fleisch
3-Methylthiopropional	kartoffelartig	0,1	Kartoffeln
4-Hydroxy-2,5-dimethyl-3(2H)-furanon	süß, karamellartig	1,0	Erdbeeren
3-Hydroxy-4,5-dimethyl-2(5H)-furanon	liebstockelartig	0,015	Maggi
2-Methoxyphenol	rauchig	0,1	Speck
2-Acetyl-1-pyrrolin	röstig	0,02	Popkorn

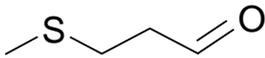
In Klassenzimmerluft gefundene Geruchsstoffe



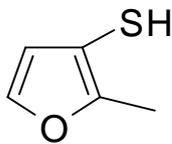
Methanthiol



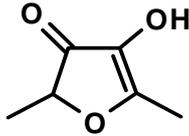
Dimethyltrisulfid



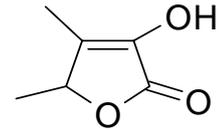
3-Methylthiopropanal



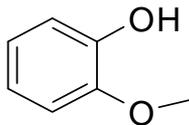
2-Methyl-3-furanthiol



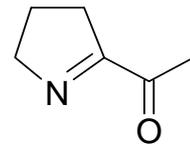
4-Hydroxy-
2,5-dimethyl-
3(2H)-furanon



3-Hydroxy-
4,5-dimethyl-
2(5H)-furanon



2-Methoxyphenol



2-Acetyl-1-pyrrolin

Zusammenfassung

Innenraum-Kontaminanten:

- CO_2 < 1000 ppm !
- VOCs $\Sigma < 0,3 \text{ mg/m}^3$!
- OVOCs so wenig wie möglich, aber nicht immer vermeidbar