

# Einfluss von Lüften und Lüftungskonzeption auf die VOC-Konzentrationen

**Jörg Thumulla**  
**Diplom-Chemiker**

öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für  
Schadstoffe und Gerüche in Innenräumen

**anbus**  
analytik gmbh

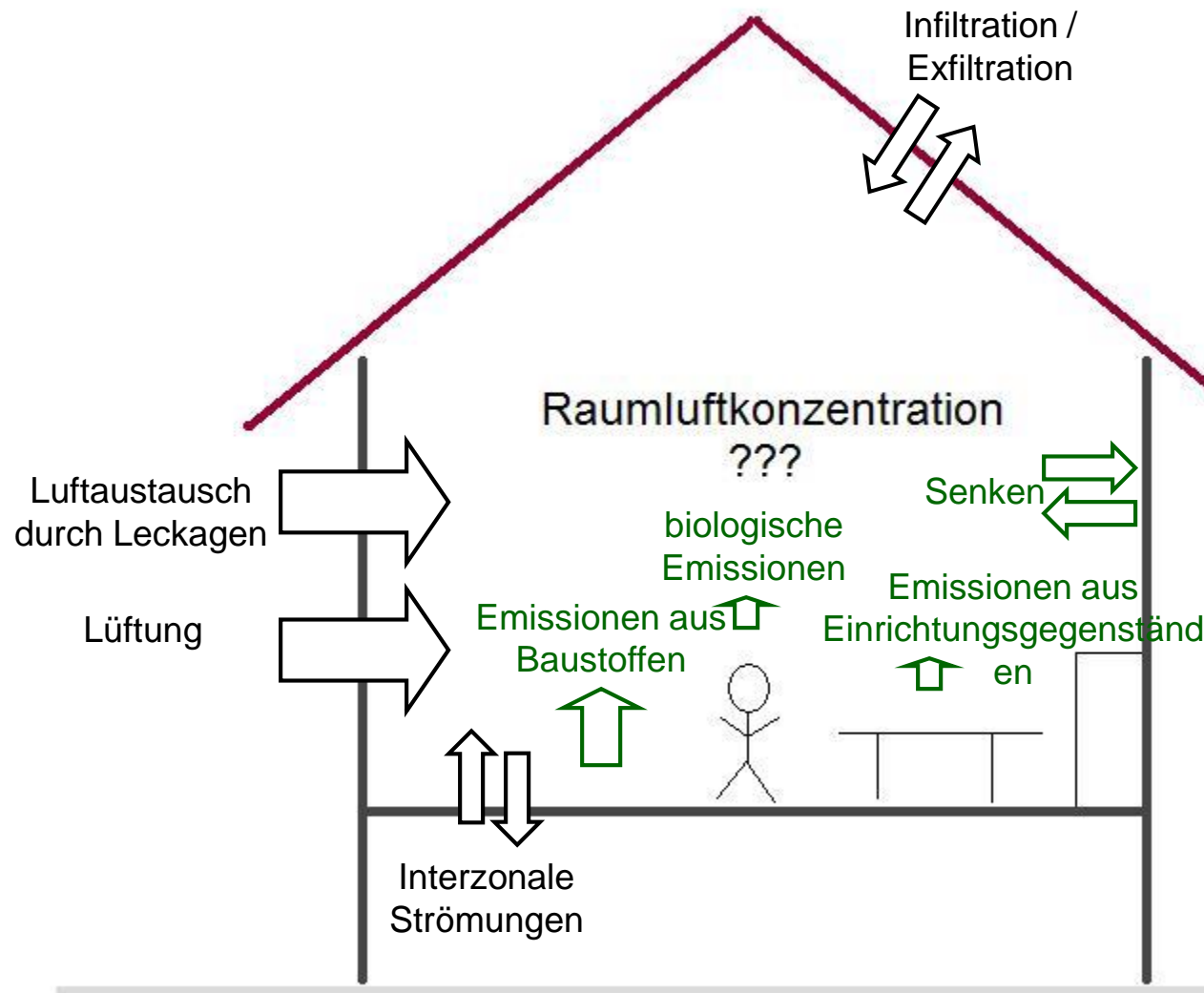
**Gesellschaft für  
Gebäuediagnostik  
Umweltanalytik und  
Umweltkommunikation**

# Ausgangslage

- Zur Energieeinsparung und zur Vermeidung von Bauschäden ist eine immer dichteren Bauweise erforderlich.
- Die Zunahme von Schadstoffkonzentrationen in der Innenraumluft im Zusammenhang mit der damit verbundenen Abnahme des natürlichen Luftwechsels wird seit vielen Jahren diskutiert.
- Dennoch wird dem hygienisch notwendigen Grundluftwechsel bei Neubauten oder energetischer Sanierung nach wie vor kaum Beachtung geschenkt.
- Nutzer und kommunale Entscheider verwechseln Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung nach wie vor mit herkömmlichen Klimaanlage bei denen insbesondere der Umluftbetrieb Schadstoffe im Gebäude nur verteilt. Auch 2017 werden noch viele Gebäude ohne funktionsfähiges Lüftungskonzept gebaut.

- 1. Theoretische Grundlagen**
- 2. Fallbeispiele**
- 3. Systematische Untersuchungen**

# Einflüsse auf die VOC-Konzentration in Innenräumen



# Luftwechsel und Raumluftkonzentration

Unter Annahme des Gleichgewichtszustandes

$$C(n) = \frac{q}{n \times V}$$

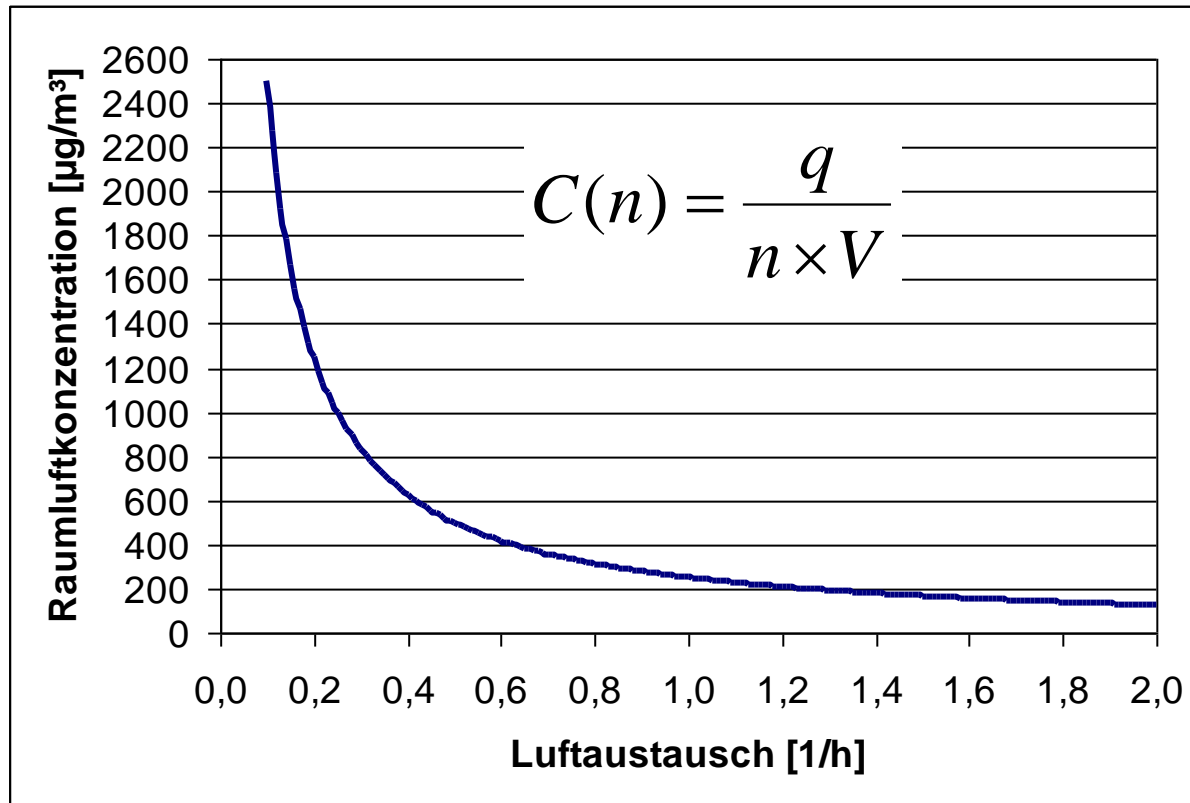
$C(n)$  = Raumluftkonzentration... [ $\mu\text{g} / \text{m}^3$ ]

$q$  = Emissionsquellstärke... [ $\mu\text{g} / \text{h}$ ]

$V$  = Raumvolumen... [ $\text{m}^3$ ]

$n$  = Luftaustausch... [ $1 / \text{h}$ ]

# VOC-Konzentration in Abhängigkeit vom Luftwechsel des Raumes

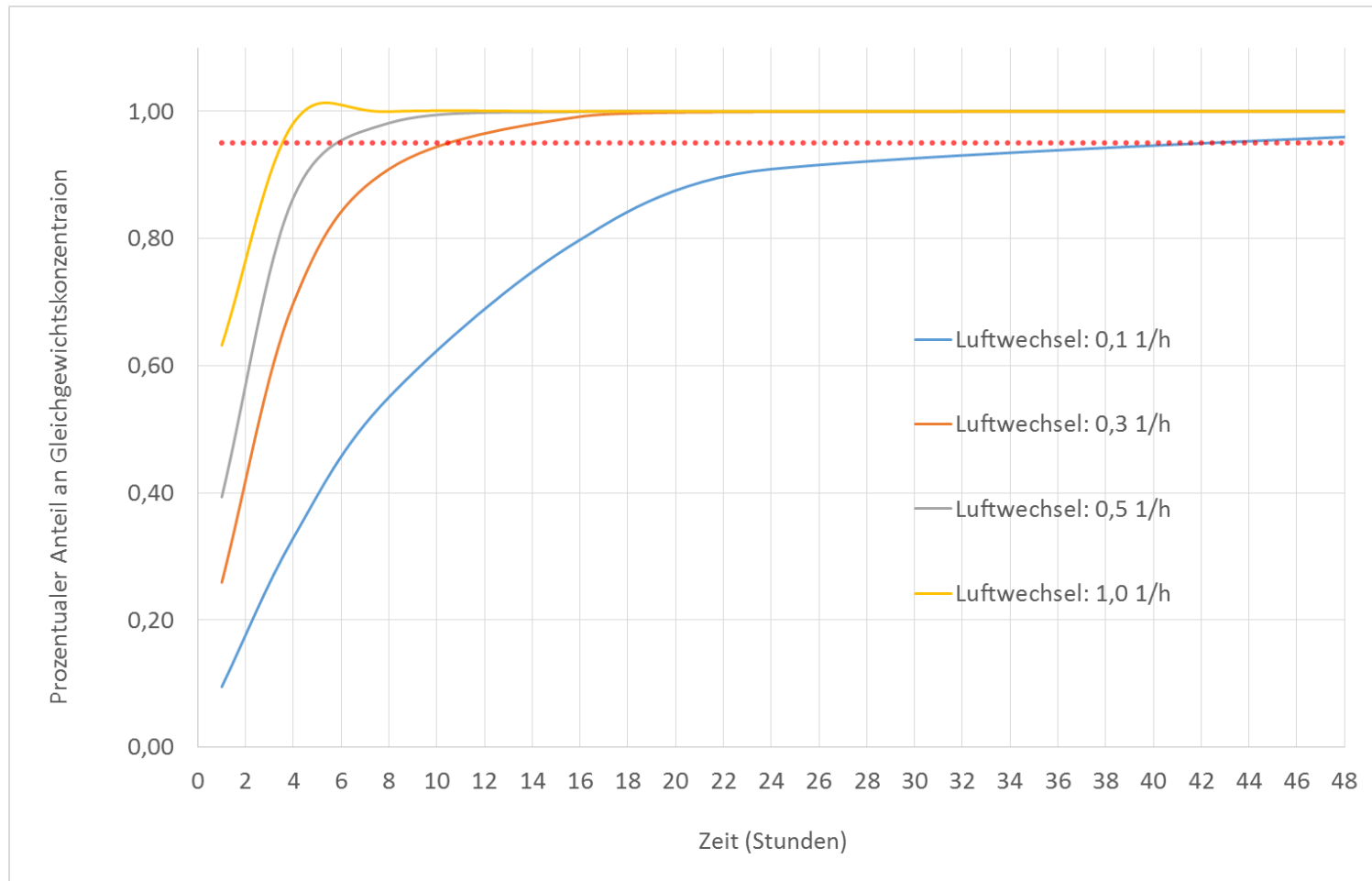


# Benötigte Zeit zur Einstellung der VOC-Ausgleichskonzentration

$$C(t) = \frac{q}{n * V} (1 - e^{-n*t}) \quad \Rightarrow \quad \frac{C(t)}{C(t \rightarrow \infty)} = 1 - e^{-t*n}$$

Dieses Modell berücksichtigt keine  
Quellen- und Senkeneffekte

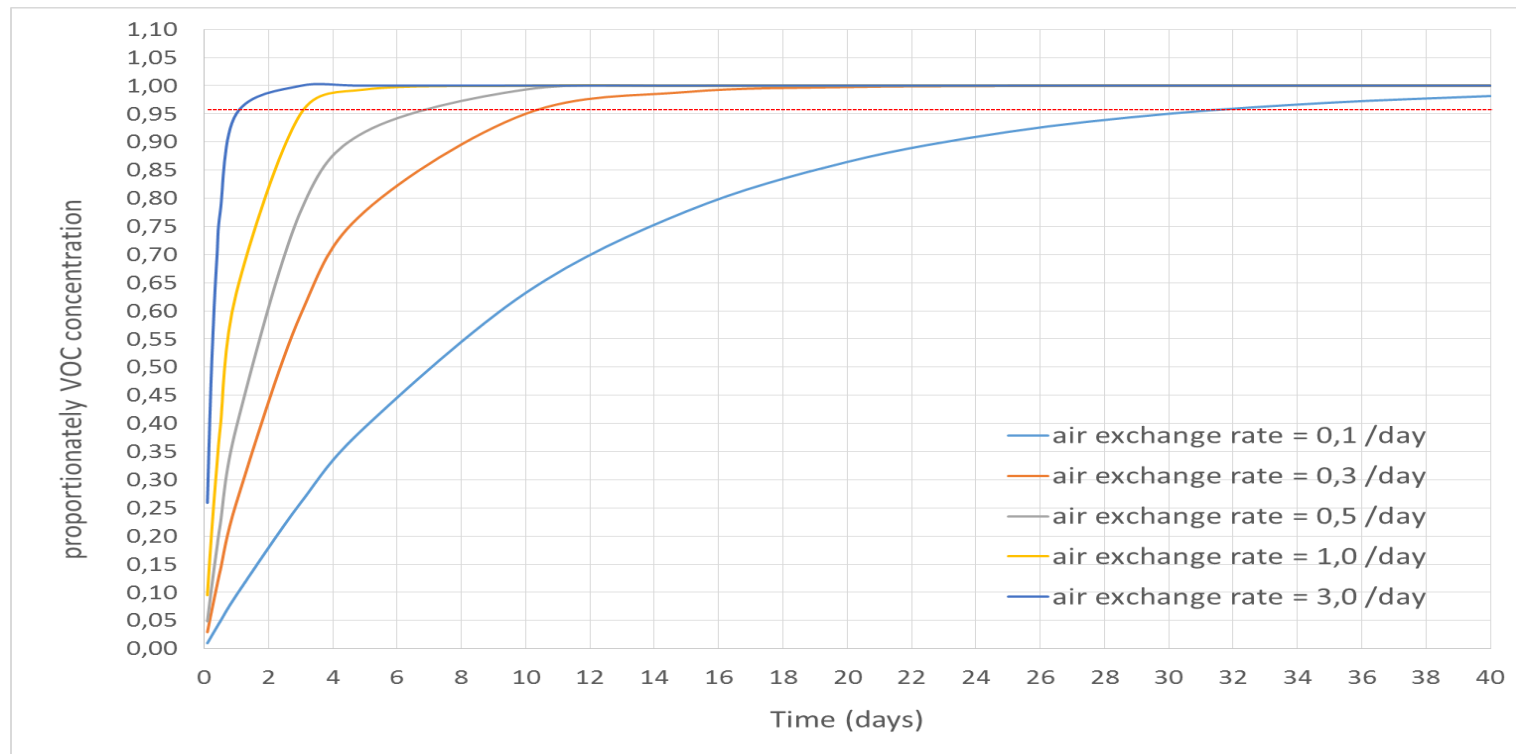
# Modellierung der VOC Konzentration als Funktion der Zeit





# Kleine Luftwechsel

$$C(t) = \frac{q}{n * V} (1 - e^{-n*t}) \quad \Rightarrow \quad \frac{C(t)}{C(t \rightarrow \infty)} = 1 - e^{-t*n}$$



1/Tag	1/h
0,1	0,004
0,3	0,013
0,5	0,021
1	0,042
3	0,125

VOC Concentration as a function of the time  
(V = const.; q = const.; n = const.)

# Folgerungen für die Praxis

- Dieser Zusammenhang erklärt das viele Nutzerbeschwerden insbesondere in seltener genutzten Räumen wie Besprechungsräumen auftreten.
- Gerade bei Neubauten mit dichter Bauweise und geringem Luftaustausch sollte dieser bei der Bewertung von Ergebnissen mit berücksichtigt werden, wenn eine Probenahme 8h nach dem Lüften erfolgt.
- Eine Nichtberücksichtigung kann auch starke Abweichungen zwischen Wiederholungsmessungen erklären
- Diese Modell berücksichtigt keine Quellen- und Senkeneffekte ist in Wohnräumen.

# Wie wirkt sich die Theorie in der Praxis aus

Exemplarische Darstellung von 2 Projekten:

1. Lösung eines Schadstoffproblems eines Schulneubaus durch Einbau einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
2. Umbau einer zuvor teilweise als Labor genutzten Etage in eine reine Büroetage



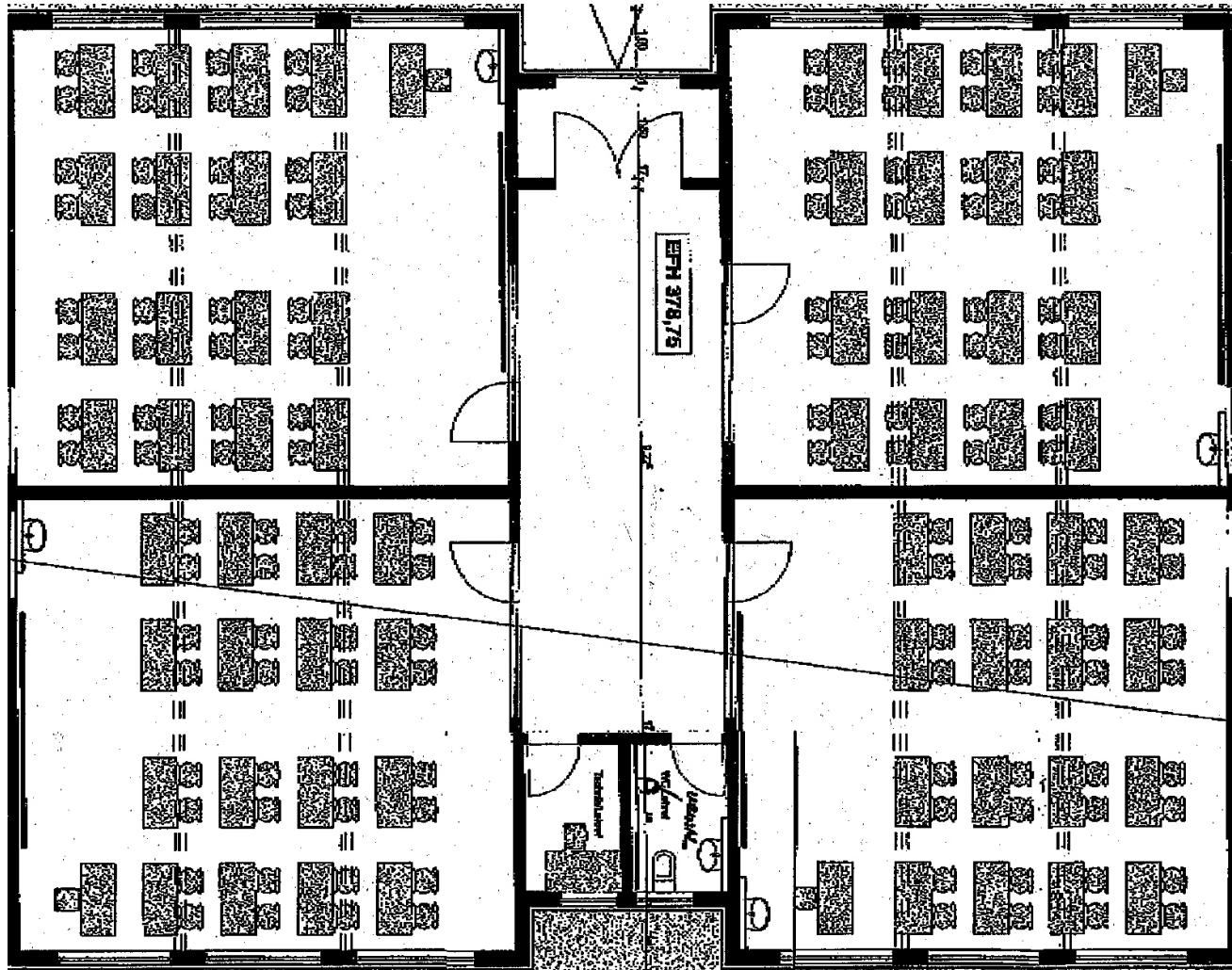


# Projekt I:

## Lösung eines Schadstoffproblems eines Schulneubaus durch Einbau einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung

- Zur Entschärfung der Raumsituation an einer Realschule wurde ein Ergänzungsbau als Pavillon in Holzrahmenbauweise mit 4 Klassenzimmern durch einen Generalunternehmer erstellt.
- Ein Jahr lang erfreute sich die Realschule am neuen Pavillon. Doch nach den lüftungsfreien Sommerferien begannen die Probleme. Bedingt durch intensive Gerüche klagten Schüler und Lehrer über Kopfweh, gereizte Schleimhäute und brennende Augen.

# Grundriss Schulpavillon



# Ergebnisse der ersten Untersuchung

- deutlicher Geruch in allen Klassenzimmern nach höheren Aldehyden und Terpenen.
  - potentielle Quellen:
    - OSB-Platten im Wandaufbau (raumseitig Gipsleichtbauplatten)
    - Linoleumboden
  - geruchssensorische Untersuchungen:
    - Geruch aus den Öffnungen der Innenwände (Steckdosen)
  - Messungen mittels Photoionisationsdetektor (PID) :
    - hohe VOC-Konzentrationen an diesen Wandauslassen.
- Zur Absicherung vergleichende Messungen auf Tenax / DNPH:
- Raumluft (2 h nach Unterrichtsschluss),
  - Hohlraum der Innenwand und einer
  - statischen Messzelle auf dem Linoleumboden

# Ergebnisse der Luftanalysen

	CAS	Innen- wand	Messzelle Linoleum	Raumluft Oktober	Raumluft November	ORW
		[µg/m³]	[µg/m³]	[µg/m³]	[µg/m³]	[µg/m³ ]
<b>Terpene</b>						
α-Pinen	80-56-8	1047	49	53	140	50
β-Pinen	127-91-3	341	10	9	28	20
Δ-3-Caren	13466-78-9	965	18	16	35	20
Limonen	138-86-3	393	20	20	62	50
Σ Terpene		3065	105	101		150
<b>Aldehyde</b>						
Formaldehyd				66*	67*	
Acetaldehyd				53*	92*	
Propanal				10*	19*	
n-Butanal	123-72-8	257	38	14 / 6*	11*	10
n-Pentanal	110-62-3	626	39	29 / 21*	38*	10
n-Hexanal	66-25-1	1833	123	79 / 68*	120*	25
n-Heptanal	111-71-7	224	18	8 / 5*	9*	10
n-Octanal	124-13-0	465	24	13 / 8*	13*	10
n-Nonanal	124-19-6	227	36	26 / 16*	20*	10
n-Decanal	112-31-2	41	8	7	2	10
n-Undecanal	112-44-7	2	3	2		
Benzaldehyd	100-52-7	107	32	15 / 15	25*	10
Furfural	98-01-1	21	4	2	< 2	10
Σ Höhere Aldehyde (ab Butanal)		3803	325	195	238	120
Geruchswert (Odour Value) <sup>1</sup>						
<b>Weitere Verbindungen</b>						
Σ Alkane		410	55	46		200
Σ Alkene		2	2	0		10
Σ Aromaten		513	36	33		200
Σ Einwertige Alkohole		210	44	28		50
Σ Ester einwertiger Alkohole		554	25	23		50
Σ Ketone		132	19	9		50
Σ Cyclische Ether		7,18	0,69	0,29		
Σ Glykole, Glykolether, Glykolester		97	161	140		100
<b>Gesamtsumme einzeln quantifizierter Verbindungen</b>		8805	788	587	640	1000

# Sanierungsmöglichkeiten

- **Rückbau der OSB-Platten und ggf. zusätzlich des Linoleumbodens**
  - **nahezu die gesamte Gebäudesubstanz ist zurückzubauen**
  - **Die Sanierungskosten liegen weit über € 200.000**
  - **Das Gebäude steht für ein Schuljahr dem Unterricht nicht zur Verfügung**
  - **Auch bei Austausch aller Oberflächen, ist unklar ob das Problem nicht wieder auftritt**



# Luftwechsel des Gebäudes

**Blower-Door-Test:  $n_{50} = 0,7$  /h**

**→ Sehr hohe Gebäudedichtigkeit**

**Luftwechsel über Tracergas:  $< 0,02$  /h**

**(kein Luftwechsel in der Messzeit von 1 h nachweisbar)**

# Alternative Sanierungsmöglichkeit

**→ Erhöhung des Luftwechsels durch Einbau einer mechanischen Lüftung**

**Sanierung: Kosten ca. € 10.000 je Klassenzimmer**



# Kontrolluntersuchungen

- Raum vorne links (mit Lüftungsanlage, Maximalleistung Luftwechsel 2/h) im Anschluss an die letzte Unterrichtsstunde durchgeführt. Während des Vormittags waren die Fenster praktisch nicht geöffnet worden.
- Im Referenzraum (hinten links noch ohne Lüftungsanlage) wurde die Messung 1 Stunde nach Schließung der Fenster bei Unterrichtsende durchgeführt. Den gesamten Vormittag waren trotz der winterlichen Außentemperaturen mehrere Fenster im Klassenraum gekippt gewesen, in den Pausen wurde Stoßlüftung durchgeführt.
- Weitere Messung im Juli 2010 im Rahmen des AGÖF-Forschungsprojektes. Sie wurde in den Ferien unter dem eingestellten Grundluftwechsel von 0,7/h durchgeführt, weil die darüber hinausgehende Lüftungsleistung mittlerweile CO<sub>2</sub>-abhängig geregelt wird.

# Sanierungserfolg

Monat/ Jahr	10/08	11/08	01/09	01/09	7/10
Raumluft	hinten links	hinten links	hinten links	vorne links	vorne links
	[µg/m³]	[µg/m³]	[µg/m³]	[µg/m³]	
<b>Aldehyde</b>					
n-Butanal	14 / 6*	11*	2*	<	
n-Pentanal	29 / 21*	38*	6*	<	3
n-Hexanal	79 / 68*	120*	19*	4*	7
n-Heptanal	8 / 5*	9*	<	<	1
n-Octanal	13 / 8*	13*	3*	<	1
n-Nonanal	26 / 16*	20*	5*	3*	5
n-Decanal	7	2			
n-Undecanal	2				
Σ Höhere Aldehyde C4-C9	124*	211*	35*	7*	17
Σ Höhere Aldehyde C4-C11	178/133*	213*			
<b>Geruchswert</b>	5,8*	7,8*	1,5*	0,3*	0,7*

# Sanierungserfolg II

Raum	vorne links	hinten links	vorne rechts
Lüftungsmaßnahmen	Lüftungsanlage auf 100%, praktisch keine Fensterlüftung	laufend mehrere Fenster gekippt, Stoßlüftung in großer Pause	Während dem Unterricht kein Fenster geöffnet, Lüftung nur in Pausen
Betrachteter Zeitraum	9:30 – 11:30 Uhr	7:50 – 11:30 Uhr	10:10 – 13 Uhr
Mittlere CO <sub>2</sub> -Konzentration	ca. 1000 ppm	ca. 1700 ppm	ca. 2400 ppm



# Bewertung CO<sub>2</sub>

Zur Bewertung von Kohlendioxyd in der Raumluft hat die Ad-hoc Arbeitsgruppe Leitwerte für die Kohlendioxidkonzentration in der Innenraumluft festgelegt.<sup>4</sup>

<b>hygienisch unbedenklich:</b>	< 1000 ppm
<b>hygienisch auffällig:</b> Bei Überschreitung eines Wertes von 1000 ppm CO <sub>2</sub> soll gelüftet werden. <i>Lüftungsmaßnahme (Außenluftvolumenstrom bzw. Luftwechsel erhöhen) Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern</i>	1000-2000 ppm
<b>hygienisch inakzeptabel:</b> Bei Überschreitung eines Wertes von 2000 ppm CO <sub>2</sub> muss gelüftet werden <i>Belüftbarkeit des Raums prüfen ggf. weitergehende Maßnahmen prüfen</i>	> 2000 ppm

# Projekt II:

## Geruchsproblem in einem Labor-/ Bürogebäude eines Industrieparks

- Ein Laborgebäude eines Industrieparks wurde modernisiert. Dabei wurde eine Etage vollständig zur Bürofläche umgebaut
- Der Umbau umfasste die Umgestaltung des Grundrisses, Deinstallation der Labor-Lüftungsanlage sowie typische Büroausstattung
- ca. 3 Monate nach Bezug der Büroräume werden unangenehme Gerüche vor allem nach längeren Abwesenheitsphasen (verlängerte Wochenenden) bemängelt
- Aufgrund der Beschwerden droht eine Schließung der gesamten Büroetage





# Bestandsaufnahme Geruch und Untersuchungsstrategie

- **In den Büroräumen sind in unterschiedlichen Intensitäten und Kombinationen folgende Gerüche wahrnehmbar:**
  - süßlich-kunststoffartiger leicht brenzlicher reizender Geruch
  - typischer Teppichboden(fehl)geruch
  - Geruch in den meisten Räumen nicht akzeptabel
- **Untersuchungsstrategie**
  - VOC-Raumluftmessungen
  - Vergleichsmessungen der Luft in Bodenaufbau, Estrich, Rollokästen, Akustikpanel
  - TDS der Einzelschichten des Bodenaufbaus, Sonnenschutzrollo, Akustikpanel
  - Prüfkammeruntersuchungen der einzelnen Schichten des Bodenaufbaus und von Vergleichsproben
  - Bestimmung des Luftwechsels in verschiedenen Büroräumen

# Ergebnisse

- **In allen Räumen** wurden die von dem Ausschuss für Innenraumschadstoffe des Umweltbundesamtes (AIR; ehemals Ad-hoc-Arbeitsgruppe) **toxikologisch abgeleiteten Innenraumrichtwerte (Vorsorgewerte) deutlich unterschritten.**
- **Methyl-Isothiazolinon:** Quelle ist vermutlich die Wandfarbe und es ist in der Regel von einem abklingenden Emissionsverhalten auszugehen.  
**Isothiazolinone** können bei **bereits erfolgter Sensibilisierung** z.B. durch Kosmetikprodukte **allergische Reaktionen** auslösen.
  - nachgewiesene Konzentrationen: in div. Büroräumen **1,0- 2,7 µg/m<sup>3</sup>**,
  - momentan wird von der AIR ein Vorsorgewert zwischen 0,2 und 0,5 µg/m<sup>3</sup> (Gefahrenwert zwischen 2 und 5 µg/m<sup>3</sup>) diskutiert.

# Identifizierte Geruchsquellen

- **Bodenaufbau (I):** der Boden weist zusammen mit dem Kleber einen typischen Teppichbodenfehlgeruch auf. Die Material- und Prüfkammeruntersuchungen ergaben ein mittleres Emissionspotential von „Dodecenisomeren“.
- **Bodenaufbau (II):** in einem Büroraum konnte ein deutliches Emissionspotential von organischen Säuren, Estern sowie Alkoholen nachgewiesen werden. Olfaktorische Untersuchungen zeigen einen deutlich schweißig-muffigen Geruch mit einer hohen Intensität. Die Raumlufprobe aus dem Estrichaufbau zeigt zusätzlich ein Emissionspotential von geruchsaktiven Stickstoffverbindungen. Als Ursache für den Geruch sind „Altlasten“ aus ehemaliger Nutzung zu vermuten.
- **Akustikpanel:** aufgrund der Oberflächenstruktur der Akustikpanels werden von den Baumaterialien abgegebenen Verbindungen gespeichert (vor allem die am Anfang deutlich höheren Emissionen nach der Renovierung). Damit stellen die Akustikpanels sogenannte Sekundärquellen dar die dazu führen dass nach Lüften die Raumlufkonzentration geruchsaktiver Verbindungen sehr schnell wieder ansteigt. Der „Speichereffekt“ ist abhängig vom mittleren Luftaustausch und verzögert insgesamt das Abklingen der „typischen Renovierungsemissionen“

# Und warum riecht es nur hier???

- In allen renovierten Etagen wurden die gleichen Materialien eingesetzt.
- Nach der Renovierung liegt der messtechnisch erfasste Luftwechsel bei unter 0,2 /h (inkl. interzonaler Luftaustausch).
- In den übrigen Etagen, in denen die Labore verblieben, sorgt die Lüftungsanlage der Labore für einen stetigen Unterdruck im Laborbereich. Dieser sorgt dafür, dass auch der Luftwechsel in den gegenüberliegenden Räumen deutlich höher ist, so dass die Geruchsstoffe in ausreichendem Maße abtransportiert werden.
- Der Einfluss des Luftaustausches ist an den innenliegenden Räumen („Thinktanks“) zu sehen. Die hier notwendige Lüftungsanlage sorgt dort für einen Luftaustausch von etwa. 1,0 /h. Damit werden die Emissionen des Bodenaufbaus ausreichend abtransportiert und es gibt auch keine Nutzerbeschwerden

# Ergebnisse des AGÖF-Forschungsprojektes

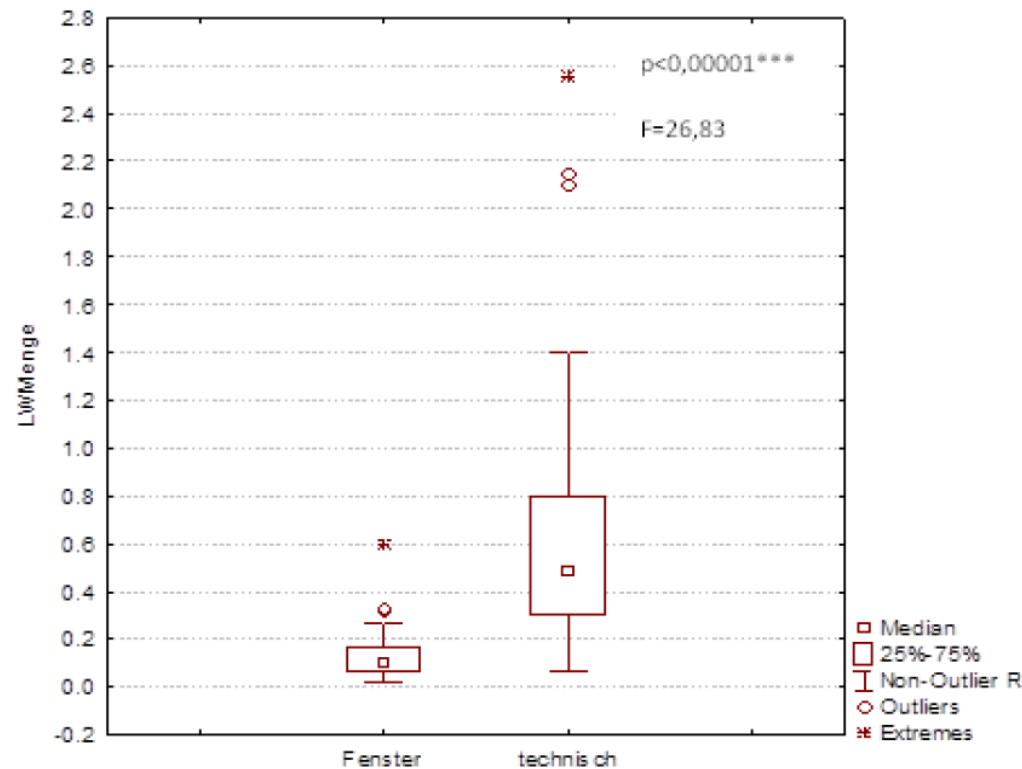
- Im Rahmen des durch den UFO-Plan geförderten Forschungsprojektes „*Bereitstellung einer Datenbank zum Vorkommen von flüchtigen organischen Verbindungen in der Raumluft*“ wurde im Teil B vergleichende Untersuchungen in jeweils 25 Gebäuden mit und ohne Lüftungstechnik durchgeführt:
  - Gebäude wurden nachweislich entsprechend einem Energiestandard von 2002 bzw. später errichtet oder saniert wurden
  - 20 Schulen
  - 31 Wohngebäude

# Luftwechselraten

Luftwechselrate	Schulraummessungen	Wohnraummessungen	Gesamt
MW $\pm$ SD	0,40 $\pm$ 0,61	0,38 $\pm$ 0,31	0,39 $\pm$ 0,45
Min	0,04	0,02	0,02
Max	2,56	1,40	2,56

Signifikante Unterschiede:  
Räumen mit

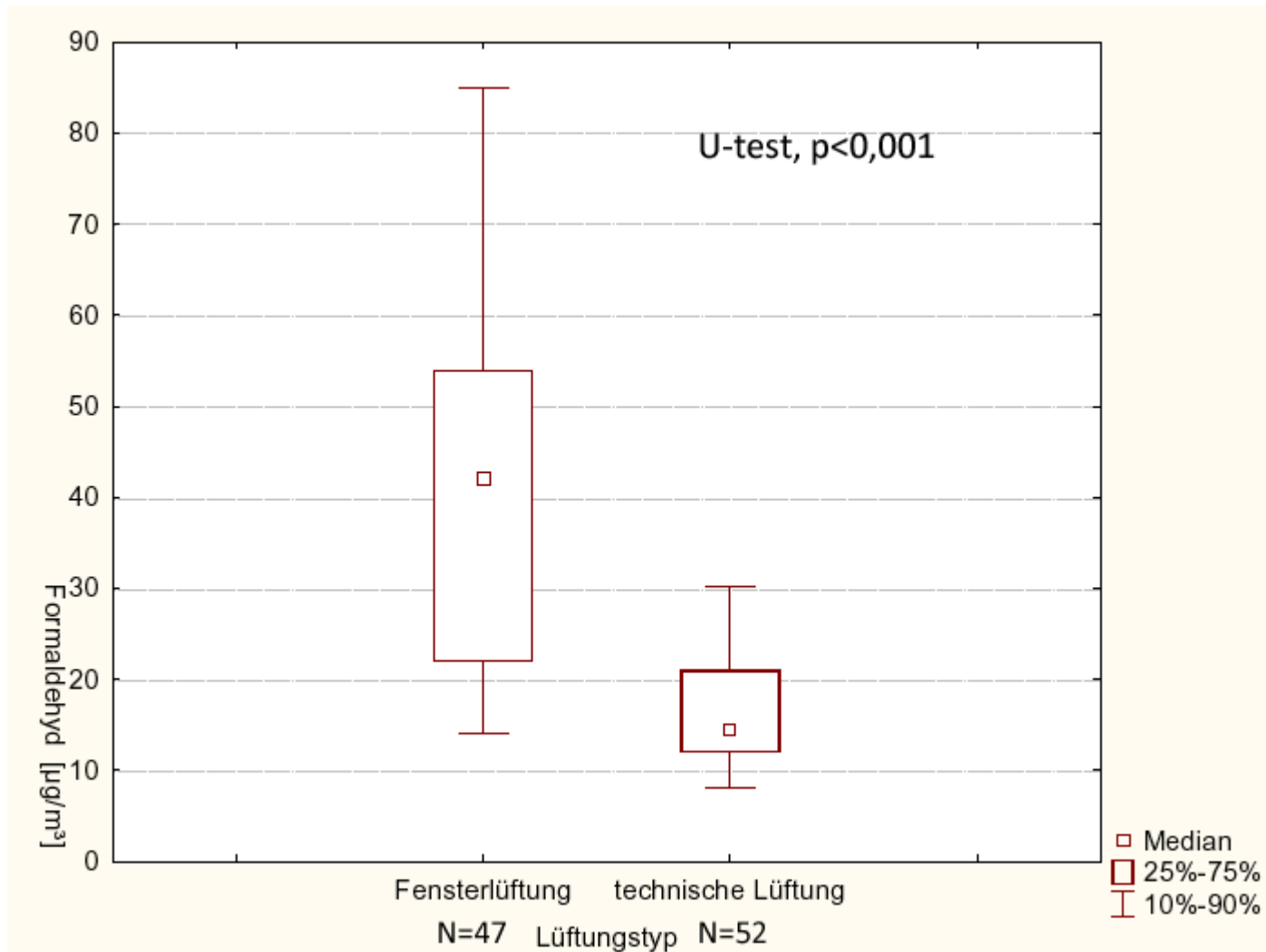
- Fensterlüftung (0,13 /h  $\pm$  0,1)
- Technischen Lüftungsanlagen (0,63 /h  $\pm$  0,51).



# VOC-Konzentrationen und Lüftungskonzepte

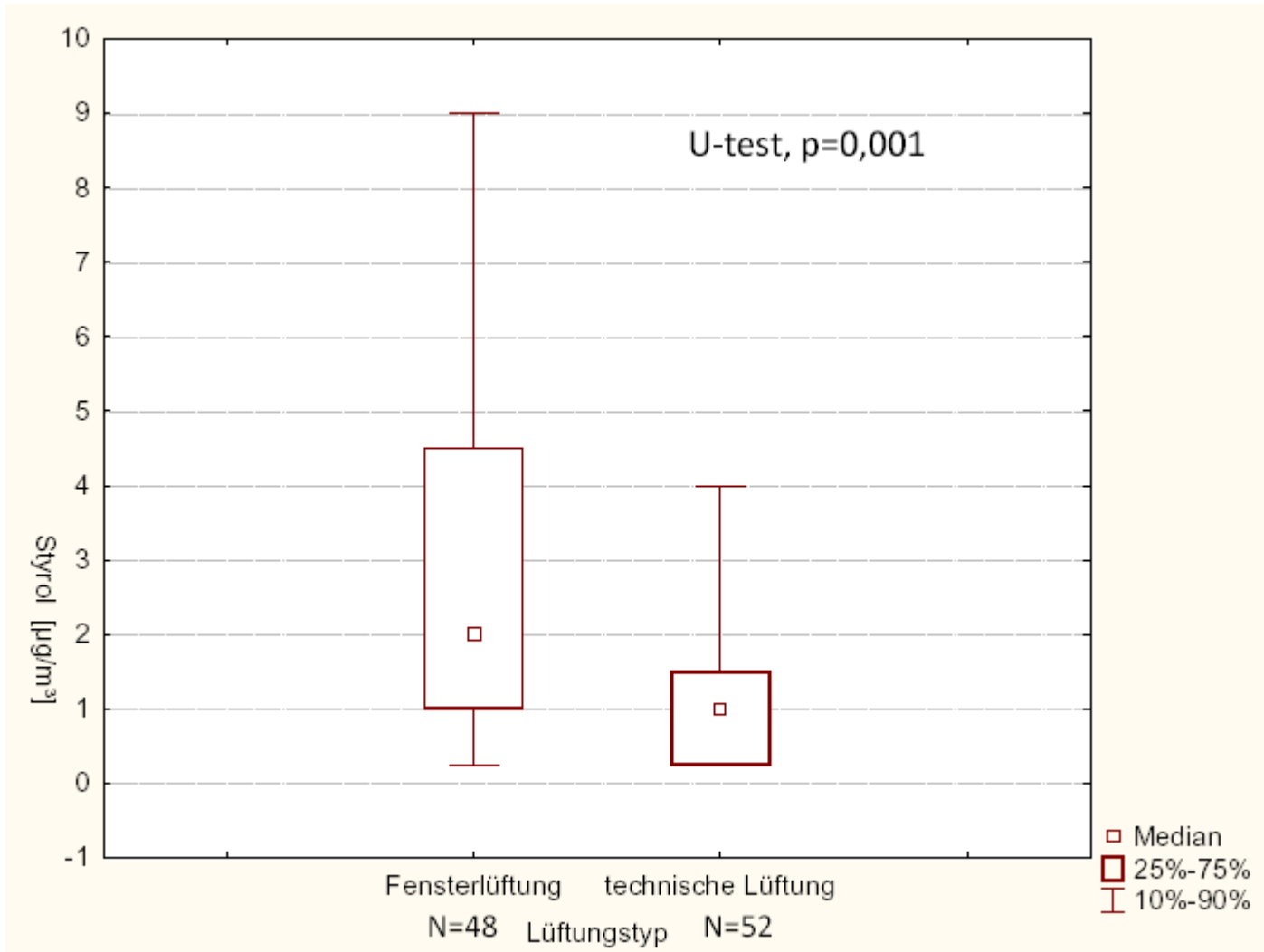
- Für 44 Einzelstoffe und den TVOC wurden statistische Tests (Mann-Whitney U-Tests) durchgeführt, um die Stoffkonzentrationen zwischen Räumen mit ausschließlicher Fensterlüftung und technischer Lüftung zu vergleichen.
- Dabei zeigt sich bei 30 der 45 Parameter, das Vorhandensein von technischen Lüftungsanlagen die VOC-Konzentrationen signifikant verringerte.
- Berücksichtigt man, dass die Luftwechselraten bei Vorhandensein technischer Lüftung signifikant höher waren, so ist auch eine indirekte antiproportionale Korrelation zwischen dem VOC-Gehalt und dem Luftwechsel nachweisbar.

# VOC-Konzentrationen und Lüftungskonzepte





# VOC-Konzentrationen und Lüftungskonzepte

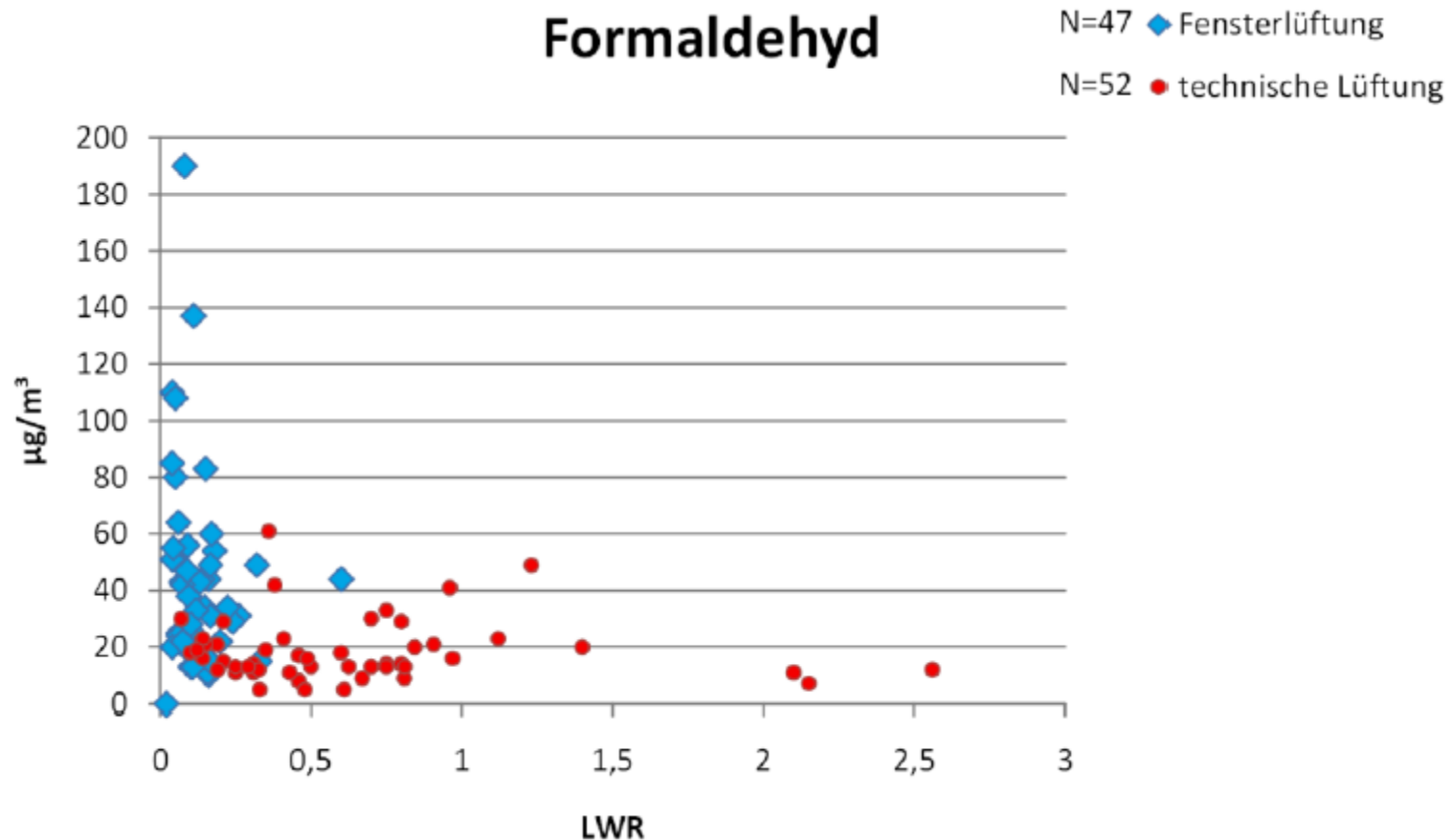


# VOC-Konzentrationen und Luftwechselraten

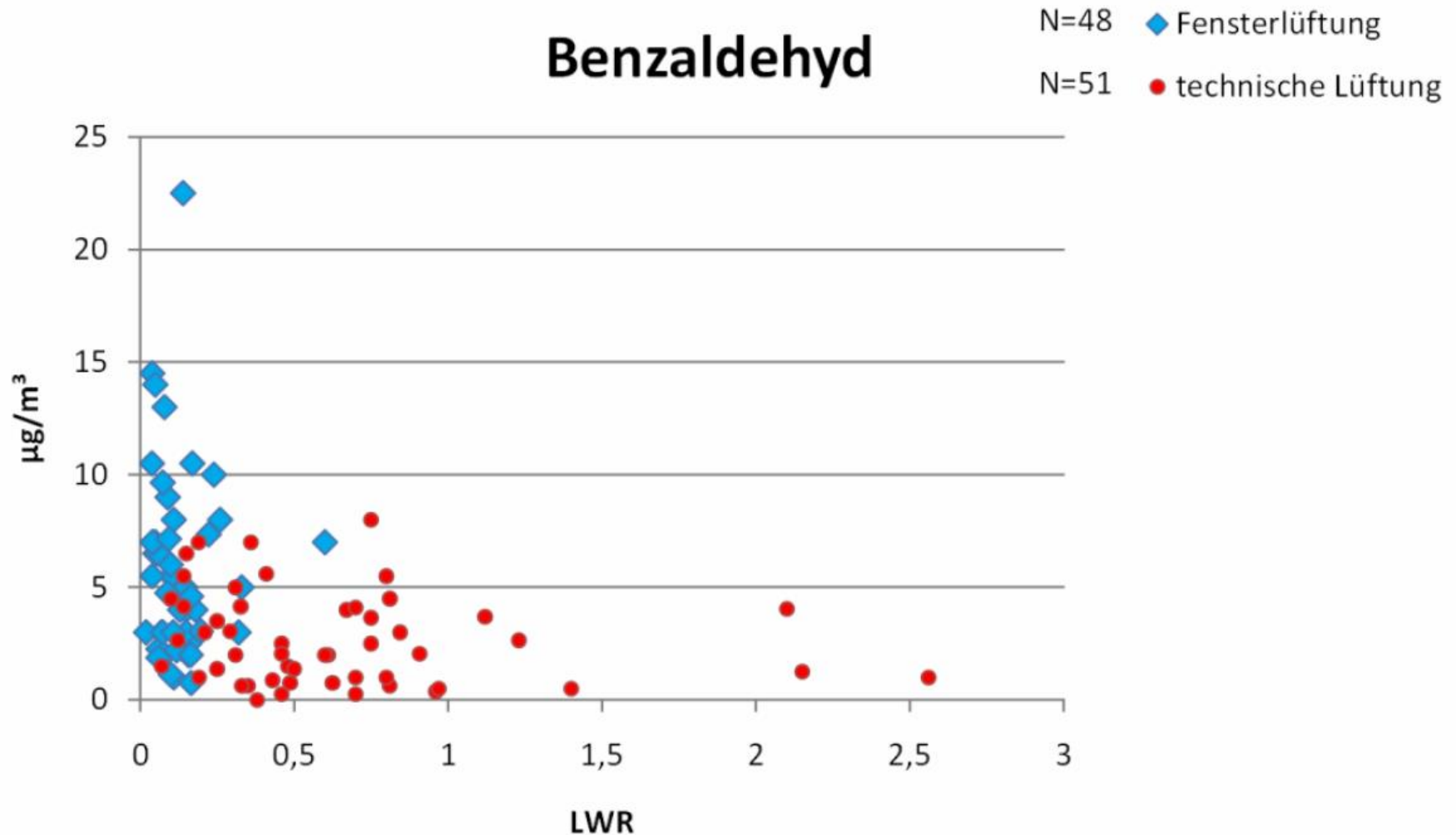
Ob eine Korrelation zwischen den Stoffkonzentrationen und den Luftwechselraten vorlag, wurde getrennt für Räume mit Fensterlüftung und technischer Lüftung mit Spearman-Korrelationen untersucht.

Aufgrund der geringen Fallzahlen und dem relevanten Einfluss, ob eine Quelle für die betrachtete Substanz überhaupt vorhanden ist, konnten keine systematisch nachweisbaren Korrelationen nachgewiesen werden. Es ist jedoch klar zu erkennen, dass das Vorhandensein einer Lüftungstechnischen Anlage Extremwerte verringert.

# VOC-Konzentrationen und Luftwechselraten



# Korrelation: Luftwechselrate Raumlufkonzentration



**Danke für die Aufmerksamkeit !!!**