

# Raumluftqualität – Stand der Mess- und Sensorüberwachung

Karl-Heinz Weinisch  
Geschäftsführer, Bausachverständiger  
IQUH GmbH  
Institut für Qualitätsmanagement und Umfeldhygiene,  
Weikersheim, Deutschland





# Raumluftqualität – Stand der Mess- und Sensorüberwachung

Eine gute Raumluftqualität ist ein Garant für unsere Gesunderhaltung. In neu gebauten oder renovierten Gebäuden können extreme, nicht normgerechte Raumklimabedingungen die Schadstoff-Kontrollmesswerte verfälschen. Wenn deshalb vertraglich vereinbarte Grenzwerte nicht eingehalten werden können, folgen unverschuldete Abnahme- oder Rechtsprobleme. Besonders nachhaltige Baustoffe wie Holz, Holzwerkstoffe, Hanf, Flachs, Zellulose oder Stroh geben natürlicherweise Gerüche/Emissionen ab, für die es ebenfalls hygienebezogene behördliche Leit- und Richtwerte gibt. Bei Raumluftanalysen, die mit normgerechten Messraumvorbereitungen und sensorüberwachten Raumklimabedingungen durchgeführt werden, sind erfahrungsgemäß keine Grenzwertüberschreitungen zu erwarten. Anders sieht es aus, wenn beispielsweise wegen fehlender Beschattung die Grenzwerte durch hohe Raumtemperaturen nicht eingehalten werden.

Die Einschätzung von gesundheitsrelevanten Klimafaktoren, Gasen und Partikeln in Gebäuden mit Hilfe von Sensor Handgeräten oder mit Innenraumluf-Analysetechniken sorgt für eine normgemäße Überwachung der Atemluftqualität. Eine möglichst schadstoffarme Raumluf spielt für unsere Gesundheit eine große Rolle, da wir durchschnittlich ca. 10-15 kg Atemluft zu uns nehmen – das sind ca. 20.000 Atemzüge jeden Tag.

Personen, die in geschlossenen Räumen arbeiten, verbringen im Winter möglicherweise zwischen 8 und 20 Stunden täglich in einer «künstlichen» Gebäudeatmosphäre. Schlechte Raumluftqualität beeinflusst nicht nur das Wohlbefinden, sondern sie kann auch dazu führen, dass die Personen anfälliger für Atemwegserkrankungen werden, oder dass bestehende Atemwegserkrankungen oder Allergien sich verschlimmern. Zwangsläufig wird schlechte Raumluf sich infolgedessen auch negativ auf die Arbeitsleistung auswirken.

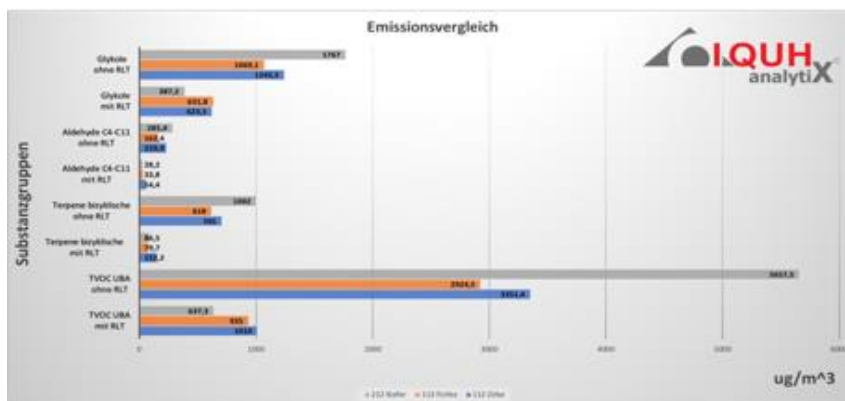


Abbildung 1: Binder-Praxisstudie in 3 Räumen mit unterschiedlichen Holzarten – Fichte, Kiefer, Zirbe. Ergebnisse ohne und mit laufender RLT Anlage.

## 1. Raumluftqualität

Die Raumluftqualität in Gebäuden wird beeinflusst durch:

- Staub
- Sporen
- Rauch
- Organische Verbindungen und Gerüche
- Ansammlung von Peroxiden, Gas und/oder Gasemissionen
- Außenluftqualität
- Luftfeuchtigkeit und Temperatur
- Unzureichende Belüftung

## 1.1. Raumluft/Raumklima-Sensormessungen

Mit PID<sup>1</sup> oder anderen elektro-chemischen Sensor-Analysegeräten (Analog/Kabel oder Bluetooth/Kabellos) kann orientierend das Niveau der Luftqualität abgeschätzt werden.

Die Überwachung folgender Parameter hat gesundheitliche, aber auch behaglichkeitsrelevante Vorteile:

- Partikel (PM 0,3/1/2,5/10) und Radon.
- Flüchtige organische Verbindungen (VOC), Formaldehyd (CH<sub>2</sub>O).
- Anorganische Gase wie Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Kohlenmonoxid (CO), Schwefelverbindungen (HS etc.), Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>), Ozon (O<sub>3</sub>) etc..
- Temperatur, Relative/absolute Luftfeuchtigkeit, Luftzirkulation/Turbulenzgrad und Luftzug.

Qualitative Sensormessungen sind Schätzverfahren bei den organischen Luftanteilen (VOC)<sup>2</sup> mit geringerer Messgenauigkeit und bei den anorganischen Verbindungen (CO<sub>2</sub>) mit höherer Messgenauigkeit.



Abbildung 2: Kontrolle der Feinstaubreinigung (PM 1/2,5) vor VOC Luftmessung.



Abbildung 3: Klima Kontrollmessung Luftfeuchte und Temperatur vor VOC Luftmessung.



Abbildung 4: Lüftungsnachweis über CO<sub>2</sub>/VOC Sensorwert vor VOC Luftmessung.

<sup>1</sup> PID - PhotoIonisationsDektoren

<sup>2</sup> Der VOC Sensormesswert ist ein orientierender Schätzwert. Er ist ungenau und hat eine hohe Querempfindlichkeit und ist mit den „normgerecht ermittelten“ VOC Werten bei Luftprobenahmen nicht vergleichbar.

## 1.2. Baustoff-Grundlagen

Emissionsquellen in Gebäuden können Dämm-, Innenausbau- und Ausstattungsmaterialien, Wand- und Deckenbekleidungen, Fußbodenbeläge, Lacke, Farben, Dichtstoffe oder externe bzw. arbeiter- und nutzerbezogene Quellen wie Zigarettenrauchen, Verkehrs- oder Maschinenabgase von außen oder Reinigungsmaterial sein.

Emissionen die nicht aus Baustoffen sondern von außen kommen (Immissionen) können Messergebnisse verfälschen und sind deshalb auszuschließen. Verarbeitungsfehler müssen unbedingt vermieden werden, da sie zu Emissionsproblemen führen können.

Es wird empfohlen emissionsgeprüfte Baustoffe auszuwählen:

- Baustoffe mit Prüfcertifikaten Blauer Engel, natureplus, ec1plus, e1plus, Kammerprüfung gem. EN 16516
- Emissionsfreie bzw. emissionsbindende mineralische Baustoffe
- Anfangsemissionen/Gerüche durch organische Baustoffe gut ablüften
- Technische Merkblätter, Sicherheitsdatenblätter, EPD<sup>3</sup> zu Produkten archivieren

## 2. Raumklima Sensormessungen

Das Raumklima setzt sich aus verschiedenen Parametern zusammen. Bei orientierenden Klimamessungen kommen Handmessgeräte mit einzelnen Sensoren oder Standmessgeräte (Bluetooth, WLAN unterstützt) mit mehreren unterschiedlichen Sensoren zum Einsatz.<sup>4</sup>

Eine norm- und rechtssichere VOC Raumlufmessung muss zwingend zusammen mit einer Raumklima Sensormessung erfolgen. Die Überprüfung der Dichtigkeit einer Gebäudehülle durch Unterdruckverfahren (BlowerDoor) oder CO<sub>2</sub> Tracergasmessung ist sinnvoll, nicht nur um undichte Stellen zu finden, sondern auch um die unkontrollierte Frischluftzufuhr und den Energieverlust bestimmen zu können.

Falls extreme Klimawerte während Raumlufmessungen herrschen, steigen VOC Werte an. Diese Richtwertüberschreitungen führen dann zu teuren und zeitaufwändigen Nachmessungen. Daher ist die Durchführung einer Raumlufmessung nur dann ratsam, wenn die Klima- und Messnormbedingungen schon Tage vor der Messung innerhalb der Norm liegen, da sonst die VOC Messergebnisse folgendermaßen verfälscht oder nicht anerkannt werden:

<b>Klimasensoren</b>	<b>Norm-Wertebereich</b>	<b>Extrem-Wertebereich</b>
CO <sub>2</sub> Wert/Lüftungskontrolle	geringer ppm Wert	hoher ppm Wert
Luftwechselzahl	hoch	niedrig
Partikelzahl	Geringe Partikelzahl	Hohe Partikelzahl
Luftfeuchte	ca. 30-60 %	>60%
Materialfeuchte	trocken	feucht
Beschattung	vorhanden	nicht vorhanden
Temperatur außen	niedrig	hoch
Temperatur innen	niedrig	hoch
<b>VOC Wert</b>	<b>niedrig</b>	<b>hoch</b>

### **Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)**

Der CO<sub>2</sub> Wert ist ein Indiz für eine ausreichende Frischluftzufuhr. CO<sub>2</sub> gehört zu den natürlichen Bestandteilen der Luft. Zu hohe Kohlendioxid-Konzentrationen im Innenraum führen zu geringerer Leistungsfähigkeit und zu Müdigkeit. Der Anteil des Kohlendioxids beträgt heutzutage ca. 415 ppm in der Außenluft. Bei nicht ausreichender Lüftung kommt es in Innenräumen durch Ausatemluft und Verbrennungsprozesse (z.B. Kerzen, Öfen, Zigarettenrauch) schnell zu ansteigenden Werten. In nicht gelüfteten Schlafzimmern, voll

<sup>3</sup> EPD – EnvironmentalProductDeclaration beinhaltet Hinweise zu Emissionsprüfcertifikaten, Inhaltsstoffen und möglichen Emissionsquellen im Produkt.

<sup>4</sup> Klima- und Behaglichkeit Messsensoren: [www.testo.com](http://www.testo.com), [www.air-q.com](http://www.air-q.com), [www.airthings.com](http://www.airthings.com), [www.decentlab.com](http://www.decentlab.com).

besetzten Klassen- oder Meetingräumen können schnell bis zu 5.000 ppm gemessen werden. Das Umweltbundesamt empfiehlt bei der Überschreitung eines Wertes von 1.000 ppm CO<sub>2</sub>, frische Luft von draußen in den Raum hineinzulüften. Die Maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK-Wert) wird mit 5.000 ppm angegeben. CO<sub>2</sub> Konzentrationen von über 1.000 ppm führen erwiesenermaßen zu nachlassender Konzentration. Über 2.000 ppm zeigen sich deutliche Konzentrationsschwächen und Müdigkeit. Ab 5.000 ppm kommt es zu einem deutlichen Nachlassen der Leistungsfähigkeit und starken Kopfschmerzen.

Die Messung von Kohlendioxid geschieht mittels eines optischen Sensors. Dieser funktioniert auf dem Prinzip der Infrarotabsorption.

### **Sauerstoff (O<sub>2</sub>)**

Sauerstoff (O<sub>2</sub>) ist ein farb- und geruchloses Gas und ist in der Außenluft und in gut gelüfteten Innenräumen zu ca. 21 %, in der ausgeatmeten Luft des Menschen noch zu ca. 16 % enthalten.

Für Sauerstoff gibt es keine gesetzlichen Grenzwerte in Deutschland. Sauerstoff wird mit einem auf optischer Fluoreszenz basierendem Sensor gemessen.

### **Flüchtige Organische Verbindungen (VOC)**

Die Abkürzung VOC (Volatile Organic Compounds, Flüchtige Organische Verbindungen) bezeichnet Kohlenstoff-haltige Stoffe, die schon bei niedrigen Temperaturen beginnen zu verdampfen oder bereits im gasförmigen Zustand auftreten.

Es gibt zwei weitere Untergruppen:

VVOCs (Very Volatile Organic Compounds) beschreiben sehr flüchtige und oft geruchssensitive Stoffe.

SVOCs (Semivolatile Organic Compounds) bezeichnen mittel- bis schwerflüchtige organische Verbindungen.

Die Gesamtheit dieser Stoffe wird als TVOCs (Total Volatile Organic Compounds) bezeichnet und kommt in einem Siedebereich zwischen 50 °C und 250 °C vor. Bekannte VOCs sind z.B. Formaldehyd, Benzol, Toluol, Styrol. Bei der Entstehung von VOCs wird zwischen natürlichen (mikrobielle Stoffwechselprodukte, Fäulnis, biologische Zerfallsprozesse, Reaktionen natürlicher Materialien,) und synthetischen Quellen (Baumaterialien, Lacke, Farben, Teppiche, Dämmstoffe, Lösemittel- und Reinigungsprodukte, Kosmetik, Tabakrauch) unterschieden.

In Deutschland gibt es Grenzwerte für beispielsweise Benzol bisher nur für produktions-technisch besonders belastete Arbeitsplätze.

Das Umweltbundesamt hat mittlerweile Empfehlungen für das Vorkommen von VOCs ausgesprochen. Die TVOC Leitwerte sind in Stufen gegliedert:

hygienisch (noch) unbedenklich (unter 1 mg/m<sup>3</sup>)

hygienisch auffällig (zwischen 1 bis 3 mg/m<sup>3</sup>)

hygienisch inakzeptabel (über 10 mg/m<sup>3</sup>)

Zusätzlich wurden Richtwerte für einzelne Stoffe der VOC-Gruppe festgelegt. (siehe aktuelle Richtwerttabellen unter [www.uba.de](http://www.uba.de))

VOCs werden mittels eines resistiven Sensors gemessen. Moleküle verursachen eine Änderung des elektrischen Widerstandes im Sensor. Eine Querempfindlichkeit zu anderen Stoffen besteht.

Die Symptome durch hohe VOC Werte sind auch als Sick-Building-Syndrom bekannt und beschreiben eine akute Belastung. Diese können sich in Geruch- und Geschmackswahrnehmung oder auch einer Reizung von Haut, Augen bzw. Schleimhäuten äußern.

### **Stickstoffdioxid**

Stickstoffdioxid entsteht bei der Verbrennung fossiler Energieträger. In Innenräumen wird es beispielsweise durch Kerzen, offene Feuerstellen und Tabakrauch freigesetzt.

In Innenräumen gilt der Einstunden-Richtwert von 80 µg/m<sup>3</sup> (Vorsorgewert). Der Ausschuss für Innenraumrichtwerte empfiehlt allerdings, den Wert auf 40 µg/m<sup>3</sup> herunterzusetzen.

Der kurzfristige Gefahrenwert liegt bei  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Als Arbeitsplatzgrenzwert wurden  $950 \mu\text{g}/\text{m}^3$  festgelegt. Für Stickstoffdioxid ist in der EU eine Alarmschwelle von  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  festgelegt. 2021 hat die WHO ihre Luftgüte-Richtlinie nach unten hin angepasst. Die neue Empfehlung bei Stickstoffdioxid liegt bei  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im 24-Stunden-Mittel.

Stickstoffdioxid verengt die Bronchien, es kommt zu Schwindel und Kopfschmerzen, bei höheren Konzentrationen zu Atemnot und Lungenschädigungen.

Stickstoffdioxid wird mit einem elektrochemischen Sensor gemessen.

### **Kohlenmonoxid (CO)**

Kohlenmonoxid ist ein farb-, geruchs- und geschmacksneutrales Gas. Das starke Atemgift ist leichter als Luft. Es entsteht durch die unvollständige Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Stoffen z.B. im Straßenverkehr, und im Haus durch mangelhafte Ablüftung von Kaminöfen oder durch Öl- und Gasheizungen.

Die normale Konzentration in der Luft beträgt ca.  $0,6$  bis  $6 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Der 8-Stunden-Mittelwert von  $10 \text{ mg}/\text{m}^3$  ( $8 \text{ ppm}$ ) sollte laut Umweltbundesamt nicht überschritten werden. Die maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK-Wert) beträgt  $35 \text{ g}/\text{m}^3$  ( $28 \text{ ppm}$ ).

CO wird mit einem elektrochemischen Sensor gemessen. Folgen von zu hoher Konzentration sind Schwindel, Ermüdung, Übelkeit bis hin zum Tod.

### **Formaldehyd**

Formaldehyd ist ein farbloser, stechend riechender, gut wasserlöslicher und bei Raumtemperatur gasförmiger Stoff. Es kommt natürlicherweise in geringen Mengen auch im menschlichen Körper, in Früchten und in Holz vor. Es entsteht außerdem bei Verbrennungen und anderen Oxidationsprozessen sowie beim Rauchen.

In der Atmosphäre kommt Formaldehyd mit einer Konzentration ca.  $1 \text{ ppb}$  vor.

In der Industrie wird Formaldehyd als Ausgangsstoff für viele chemische Verbindungen, wie z.B. Klebstoffe und Kunststoffe verwendet und kam früher bei vielen Holzprodukten zum Einsatz.

Der Ausschuss für Innenraumrichtwerte legte 2016 einen Richtwert für die Innenraumluft von  $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$  fest. 2015 wurde die Maximale Arbeitsplatz-Konzentration auf  $0,37 \text{ mg}/\text{m}^3$  festgelegt.

Rechtsverbindlich ist Formaldehyd seit dem 1. April 2015 im Anhang VI der Verordnung 2008/1272/EG in der Kategorie 1B eingestuft: «wahrscheinlich karzinogen beim Menschen». Es können Allergien, Atemwegs- oder Augenreizungen sowie Konzentrations- und Schlafstörungen hervorgerufen werden.

Formaldehyd wird mit einem elektrochemischen Sensor gemessen. Sensorwerte sind gegenüber Labormessungen ungenau und können lediglich als Indiz bewertet werden.

### **Ozon**

Ozon ist ein wichtiges Spurengas in der Atmosphäre und bildet die natürliche Ozonschicht in  $20$ - $30 \text{ km}$  Höhe. Es ist ein farbloses bis leicht blaues Gas, das stechend-scharf bis chlorähnlich riecht. Ozon ist sehr reaktionsfreudig, brandfördernd, schwerer als Luft und wirkt auf den Menschen giftig. In Innenräumen kann Ozon durch elektrische Geräte wie z.B. Drucker unter Einwirkung von UV-Strahlung entstehen.

Ozon zerfällt normalerweise innerhalb kurzer Zeit. Erreicht die Ozonkonzentration im Freien einen Wert von  $120 \text{ ppb}$  ( $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), wird eine Ozonwarnung ausgesprochen.

Der bisherige MAK-Wert von  $100 \text{ ppb}$  ( $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) wurde bislang noch nicht durch einen verbindlichen Arbeitsplatzgrenzwert ersetzt.

Bei einem hohen Ozongehalt in der Luft sinkt die Leistungsfähigkeit ab. Es kann zu Reizungen der Augen und Schleimhäute kommen. Ozon wirkt sich nachteilig auf die Lungenfunktion aus und steht im Verdacht, krebserregend zu sein.

Ozon wird mit einem elektrochemischen Sensor gemessen. Zu hohe Ozonkonzentrationen aber auch andere Peroxide verfälschen die VOC Raumlufmesswerte.

### **Radon**

Radon ist ein farb-, geruch- und geschmackloses radioaktives Gas. Es entsteht im Gestein und im Erdreich durch den Zerfall von Uran und Thorium, steigt von dort zur Erdoberfläche auf und entweicht in die Atmosphäre, in das Grundwasser, in Höhlen und Bergwerke und auch in Keller und Rohrleitungsschächten. Die Radonbelastung schwankt regional stark.

Es gibt im deutschen Strahlenschutzgesetz verbindlich festgelegte Referenzwerte. Danach müssen in Arbeits- und Aufenthaltsräumen bei einer Radonkonzentration ab 300 Bq/m<sup>3</sup> (300 Zerfälle pro Sekunde pro m<sup>3</sup> Luft) Maßnahmen zur Reduzierung getroffen werden.

Bei Verkauf oder Vermietung von Wohnungen muss dieser Wert auch auf Verlangen vom Mieter oder Käufer attestiert werden. Eingreifrichtwert: 400 Bq/m<sup>3</sup> gilt für Gebäude, die vor 1996 gebaut wurden. Planungsrichtwert: 200 Bq/m<sup>3</sup> gilt für Gebäude, die nach 1996 gebaut wurden. Die deutsche Strahlenschutzkommission und die WHO empfehlen, den Wert dauerhaft unter 100 Bq/m<sup>3</sup> zu halten, unter Umständen durch Lüftungsanlagen. Langzeitmessungen sind sinnvoll.

Radon erhöht das Risiko, an Lungenkrebs zu erkranken. Rechtssichere Langzeitmessungen werden mit passiven Exposimetern durchgeführt, die im Labor ausgewertet werden. Orientierende Messungen werden mit Sensorgeräten durchgeführt.

### **Schwefeldioxid**

Schwefeldioxid ist ein farbloses, stechend riechendes und sauer schmeckendes Reizgas. Es ist nicht brennbar, leicht wasserlöslich und schwerer als Luft. Schwefeldioxid entsteht bei der Verbrennung schwefelhaltiger fossiler Brennstoffe und wird von Vulkanen und beim Abbrand in Gebäudeheizanlagen freigesetzt. Außerdem wird es durch verschiedene Verkehrsmittel, industrielle Energie- und Wärmegewinnungsanlagen, bei der Produktion von Zement und Zellstoff sowie bei der Verarbeitung von Erzen und Erdöl freigesetzt.

Der Arbeitsplatzgrenzwert liegt laut deutscher Gefahrstoffverordnung bei 2,5 mg/m<sup>3</sup> (1ppm), der Wert für die Maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert) beträgt 2,7 mg/m<sup>3</sup>. Schwefeldioxid ist ein starkes Atemgift und kann schon in geringen Konzentrationen zu Hustenreiz, Atemnot sowie Reizungen von Augen und Schleimhäuten führen.

Schwefeldioxid wird mit einem elektrochemischen Sensor gemessen und kann durch die Lüftungsanlage ins Gebäudeinnere gelangen.

### **Schwefelwasserstoff**

Schwefelwasserstoff ist ein farbloses, hochgiftiges Gas, das brennbar und leicht entzündlich ist. Man nimmt es bereits in geringen Mengen an dem typischen Geruch nach faulen Eiern wahr. Schwefelwasserstoff entsteht durch die Zersetzung von Proteinen durch Fäulnis- und Schwefelbakterien. Es ist schwerer als Luft und sammelt sich daher am Boden. Schwefelwasserstoff kommt in vielen Rohstoffen vor wie z.B. in Erdöl und Erdgas vor und entsteht bei jeglicher Form des Biomasseabbaus (z.B. in Klärwerken, Landwirtschaft/Gülle, Kanalisation etc.)

Der Arbeitsplatzgrenzwert liegt bei 5 ppm und die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert) bei 10 ppm. Dieser Wert darf zu keiner Zeit auch nur kurzzeitig überschritten werden. Die Geruchsschwelle liegt schon bei 0,13 ppm.

Bereits bei geringen Konzentrationen über einen längeren Zeitraum kann es zu Müdigkeit, Kopfschmerzen, Konzentrationsschwäche kommen. Höhere Konzentrationen können zu starken Schleimhautreizungen, Augenschädigungen und Wassereinlagerungen in der Lunge führen. Schwefelwasserstoff wirkt auch toxisch auf Nervensystem und Herz. Schwefelwasserstoff wird mit einem elektrochemischen Sensor gemessen.

### **Feinstaub (PM<sub>1</sub> – PM<sub>10</sub>)**

Feinstaub ist ein Teil des Schwebstaubs «Particulate Matter-PM». Er besteht aus festen und flüssigen Teilchen, die nicht gleich zu Boden sinken, sondern eine gewisse Zeit in der Raumluft verweilen.

Als häufige Feinstaub-Quellen gelten Emissionen aus der Natur, Industrie, Kraftwerken Kleinf Feueranlagen, Straßenverkehr, Landwirtschaftliche Tierhaltung, Tabakrauch, Kerzen, Haushalts- und Bürogeräten (z.B. Drucker, Kopierer), Kaminöfen, Kochen und Braten



sowie biogene Partikel (z.B. Viren, Sporen von Pilzen und Bakterien, Pollenflug, Ausscheidungen von Hausstaub-Milben). Hinzu kommen Abriebstäube und chemische Ausdünstungen durch Teppiche, Möbel, Fußböden und Wandoberflächen. Feinstaub verfügt über ein hohes Adsorptionspotenzial für gasförmige Verbindungen und wird dadurch mit mittel- bis schwerflüchtigen Schadstoffen (z.B. Pestizide, Flammschutzmittel, Weichmacher) angereichert.

Mit Partikelmessgeräten werden vor der VOC Raumlufmessung die Partikelgrößen ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $PM_1$ ) gemessen, um die Qualität einer Feinreinigung nachzuweisen.

Für Feinstaub  $PM_{10}$  (Partikel  $< 10 \mu m$ ) setzt das Umweltbundesamt für die Außenluft einen Tagesgrenzwert von  $50 \mu g/m^3$  und einen Jahresmittelwert von  $40 \mu g/m^3$ . Der Tagesgrenzwert darf lediglich an 35 Tagen im Jahr überschritten werden. Für Feinstaub  $PM_{2,5}$  (Partikel  $< 2,5 \mu m$ ) gilt seit 2015 der als Beurteilungswert von der WHO festgelegte Jahresgrenzwert von  $25 \mu g/m^3$  in der Außenluft und in Wohnräumen.

Feinstaub wird mittels optischer Streuung gemessen. Eine Infrarot-LED und ein Detektor sind räumlich durch eine Wand getrennt und «sehen» sich nie direkt. Erst wenn Feinstaubpartikel im Licht der LED auftauchen, sieht der Detektor ein Aufblitzen, zählt diese Blitze und je nachdem wie hell diese sind, kann die Partikelgröße bestimmt werden. Große Partikel ( $PM_{10}$  hell), je kleiner die Partikel ( $PM_{2,5}$ ,  $PM_1$ ) um so dunkler.

Die Partikel reizen die Schleimhäute von Augen, Nase und Rachenraum und die Atemwege und können zu entzündlichen Veränderungen führen. Je nach Zusammensetzung besteht die Möglichkeit, dass die darin gebundenen chemischen und biologischen Schadstoffe allergische Reaktionen hervorrufen. Kleinste Partikel gelangen auch über die Lungenbläschen in den Blutkreislauf und beeinträchtigen somit das Herz-Kreislauf-System. Zu hohe Partikelwerte verfälschen und erhöhen je nach Partikelzusammensetzung die VOC Raumlufmesswerte.

### **Lufttemperatur**

Die Lufttemperatur beeinflusst den Stoffwechselprozess des Menschen. Die subjektiv wahrgenommene Raumtemperatur kann von der gemessenen Lufttemperatur abweichen, da sie durch viele Faktoren beeinflusst wird. Dazu gehören neben der tatsächlichen Lufttemperatur die Strahlungstemperatur der Raumbooberflächen, die Körpertemperatur der im Raum anwesenden Menschen sowie individuelle Eigenschaften der Haut, Verdunstung über die Haut, Luftfeuchtigkeit und Sonneneinstrahlung.

Das Umweltbundesamt empfiehlt für Wohnbereiche 21 bis 23°C, für Kinder- und Badezimmer 23°C, für Küchen 18 – 19°C, für Schlafzimmer 16 – 18 °C und für Büroräume 21 – 22 °C.

Temperatur und Luftfeuchtigkeit beeinflussen maßgeblich das individuelle Wohlbefinden in Innenräumen. Bei zu niedrigen Temperaturen versucht der Körper, durch Zittern, die Körpertemperatur zu erhöhen, bei zu hohen Temperaturen durch Schwitzen und Erweiterung der Blutgefäße diese zu senken. Menschen mit Kreislaufproblemen können stark auf Temperaturschwankungen reagieren. Sowohl zu niedrige als auch zu hohe Temperaturen können zu Unwohlsein führen und die Leistungsfähigkeit einschränken.

Die Temperatur kann mit einem Sensor mit sehr hoher Genauigkeit gemessen werden. Zu hohe Raumtemperaturen verfälschen die VOC Raumlufmesswerte und lassen sie ansteigen.

### **Relative Luftfeuchtigkeit**

Luftfeuchtigkeit beschreibt den Wasserdampfgehalt in der Luft. Relative Luftfeuchtigkeit beschreibt das Verhältnis zwischen der absoluten und der maximalen Luftfeuchtigkeit und wird in Prozent angegeben. In Innenräumen entsteht Luftfeuchte durch trocknende Baustoffe oder Atmen von Menschen und Tieren, Kochen, Duschen, Baden, Trocknen von Wäsche usw. Von außen kann durch undichte Fenster und Türen Wasser eindringen, das zu Wasserdampf verdunstet.

In geschlossenen Räumen wird eine relative Luftfeuchtigkeit von 40 bis 60 % empfohlen. Bei zu geringer Luftfeuchtigkeit wird die Atemleistung vermindert. Durch die Austrocknung

der Schleimhäute steigt das Infektionsrisiko. Zu hohe Luftfeuchtigkeit kann die Leistungsfähigkeit beeinträchtigen und den Kreislauf belasten. Bei Luftfeuchtigkeit von über 60 % kommt es zu einer verstärkten Vermehrung von Pilzen, Bakterien, Hausstaubmilben.

Die relative Luftfeuchtigkeit kann mit einem Sensor mit sehr hoher Genauigkeit gemessen werden. Zu hohe Werte verfälschen und erhöhen die VOC Raumlufthmesswerte.

### **Absolute Luftfeuchtigkeit**

Die absolute Luftfeuchtigkeit gibt die Wasserdampfdichte an, d.h. jene Masse an Wasserdampf, die in einem festgelegten Luftvolumen enthalten ist. Sie wird in  $\text{g/m}^3$  angegeben. Sie bewegt sich zwischen 0 und dem maximalen Wasserdampfgehalt, den die Luft mit einem festgelegten Volumen bei einer bestimmten Temperatur erreichen kann. Wie viel Wasserdampf die Luft aufnehmen kann, ist stark von der Lufttemperatur abhängig.

Als allgemeine Empfehlung für Innenräume gilt ein Mindestwert von ca.  $6,9 \text{ g/m}^3$  und ein Höchstwert von ca.  $10,4 \text{ g/m}^3$ . Wenn im Winter kalte Luft, die nur wenig Wasserdampf aufnehmen kann, hineingelüftet wird, erwärmt sich diese im Innenraum, was dazu führt, dass die relative Luftfeuchte bei gleichbleibender absoluter Luftfeuchte abnimmt. Dadurch entsteht das Problem von zu trockener Luft im Winter. Die größte Gefahr einer länger andauernden zu hohen relativen Luftfeuchtigkeit liegt in der Schimmelbildung, die wiederum durch die Temperaturunterschiede an kalten Außenwänden durch die Unterschreitung des Taupunktes noch begünstigt wird.

Aus dem gemessenen Wert der relativen Luftfeuchtigkeit wird der Wert der absoluten Luftfeuchtigkeit abgeleitet. Zu hohe Werte verfälschen die VOC Raumlufthmesswerte.

### **Luftdruck (p)**

Als Luftdruck wird die Kompression, also die Verdichtung der Luft bezeichnet. Sie entsteht durch die kontinuierliche Bewegung der Luftmassen in der Atmosphäre. Diese Bewegungen werden durch die Erdanziehung, Sonneneinstrahlung und Hoch- und Tiefdruckgebiete beeinflusst. Der Luftdruck nimmt mit zunehmender Höhe über dem Meeresspiegel deutlich ab. Auf Höhe des Meeresspiegels wird der mittlere Luftdruck mit einem Wert von  $101.325 \text{ Pa}$  (Pascal), oder dem Normwert 1 bar angegeben. Die Messung des Luftdrucks ist für die Umrechnung im Labor bzgl. VOC Raumlufthmessungen relevant.

Die Druckkammersensoren messen die Deformation einer Membran. Luftdruckwerte benötigt das Prüflabor zur Funktionskontrolle eines regelgerechten Messablaufs.

## **3. Messtechnik durch Luftprobenahmen**

Konstruktion und Ausstattung der Gebäude (Private, Schulen, Büros) haben sich in den letzten Jahren verändert und sie sind aufgrund des Wärmeschutzes auch luftdichter geworden. Deshalb wird schon bei der Planung moderner Lüftungskonzepte der Einsatz von Raumklima-Sensorsystemen (Kohlendioxid, Luftfeuchte, Temperatur) während der Nutzungsphase empfohlen.

Nach Abschluss der Bauarbeiten und vor der Bauabnahme wird zunehmend die Messung von flüchtigen organischen Stoffen (VOC: engl. Volatile Organic Compounds, dt. leichtflüchtige organische Verbindungen) im Werkvertrag gefordert. Im Folgenden werden die rechtlichen Anforderungen an eine normgerechte Klima- und Messraumvorbereitung insbesondere mit der Probenahmetechnik und den Empfehlungen zur Auswertung und Bewertung der Messergebnisse beschrieben.

### **3.1. Allgemeine Grundlagen zur VOC Raumlufthprobenahme**

Die VOC Raumlufthmessung stellt eine Kurzzeitprobenahme dar. Klimakontrollmessungen und Messraumvorbereitungen müssen im dazugehörigen Messprotokoll folgendermaßen beschrieben werden:

- Alle Klima- u. Raumparameter werden messtechnisch erfasst und schriftlich dokumentiert.
- Das Mess- und Analyseverfahren führt zu nachvollziehbaren bzw. zu nachträglich kontrollierbaren Ergebnissen.

- Alle vorgegebenen und zum Messzeitpunkt herrschenden klimatischen Einflussparameter wie Außentemperatur, Innenraumtemperatur, Außen- und Innenraumluftfeuchte und Lüftungsverhältnisse, der VOC/Sensorwert, der Formaldehyd/Sensorwert, der Partikel/Sensorwert, der CO<sub>2</sub>/Sensorwert aber auch auffällige Gerüche werden erfasst und protokolliert.
- Die Vorgehensweise wird fototechnisch festgehalten.
- Die Bewertung der Messergebnisse erfolgt im Abgleich mit den aktuellen behördlichen Grenz-, Richt-, Leitwerten und den Vorgaben im Werkvertrag.

Diese Luftprobenahmen sind auf Formaldehyd und VOC ausgerichtet. Sie beziehen sich auf die existierenden Normen und sonstige Vorschriften und auf neue praxiserprobte Erkenntnisse. Dadurch wird die Vergleichbarkeit von Messergebnissen in Holzgebäuden verbessert.

Die Anwendung ist vorgesehen für Gebäude zum Zeitpunkt der Bauabnahme, d.h. im schlüsselfertigen (bezugsfertigen) Zustand, jedoch unmöbliert. Räume mit Einbaumöbeln sollten nicht mitgemessen werden. Ansonsten, wenn sie in den Leistungsbereich des Gebäudeherstellers zählen, sind Sonderregelungen erforderlich. Innentüren müssen gebrauchsfertig eingebaut sein. Für schon bezogene und möblierte Gebäude muss eine Sonderregelung getroffen werden.

### 3.2. Klimafaktoren und Baustoffemissionen

Generell müssen schon mindestens 2 Wochen vor Messtermin die vorgegebenen Raumklimaparameter eingestellt werden. Neben einem hohen Luftwechsel muss auf die Temperatur und die Material- und Baufeuchte geachtet werden, da sie einen direkten Einfluss auf das Abklingverhalten von Baustoffemissionen haben.

Das Raumklima hängt ab von Faktoren wie jahreszeitliches Außenklima, Standort, Heizungsart, Materialfeuchteverhalten. Auch Winddruck oder Unwetter können die VOC Emissionen unerwartet fördern.

### 3.3. Lüftungsplanung

Gebäude ohne technische Lüftungsanlagen müssen rechtzeitig über Fensterlüftung querlüftet werden. Die normativ vorgegebenen Verschlusszeiten (8h) müssen eingehalten werden. Wir empfehlen eine zusätzliche Kontrollmessung unter Nutzungsbedingungen, was einem regelgerechten hygienisch geforderten Lüftungsvorgang je Zeitintervall entsprechen würde.

Gebäude mit RLT-Anlagen (dezentral und zentral mit Wärme- und/oder Feuchterückgewinnung) dürfen während der Messung unter nutzungsbezogenen Voreinstellungen angeschaltet bleiben.



Abbildung 5: Test mit 3 unterschiedlich großen dezentralen Lüftungsanlagen im gleichen Klassenraum. Von links – Sensormessgeräte für Partikel, CO<sub>2</sub>, Feuchte/Temperatur, VOC Raumluftanalyse/Pumpenausrüstung.

Zu untersuchende Gebäude müssen normgerechte und möglichst nutzerangepasste Raumklimawerte aufweisen.

Es wird bei den Klimaanforderungen unterschieden zwischen Gebäuden

- ohne RLT Anlagen (Frischluftezufuhr über Undichtigkeiten oftmals ca. 0,1-0,3 Luftwechsel/h – Nachweis durch BlowerDoor Prüfverfahren 10-50 Pascal Unterdruck).
- ohne RLT Anlagen aber mit undefinierten und selbstregulierenden Lüftungselementen an Fenstern und Türen – Funktionsnachweis über CO<sub>2</sub> Messgerät.
- mit RLT Anlagen (Zentrale Lüftungsgeräte oder Einzellüfter mit Feuchte- und/oder Wärmerückgewinnung) – Funktionsnachweis über CO<sub>2</sub> Messgerät. Ein 4 stufiges Gerät funktioniert 1. nach dem Prinzip Minimalstufe zum Feuchteschutz und 2. Mindestanforderung mit reduzierter Lüftung und 3. Nennlüftung/def. Nutzerbezogen und 4. Intensivlüftung/max. nutzungsbezogen.

### 3.4. Messvorbereitung

Für eine reibungslose Messplanung ist es erforderlich, dass sich der Messingenieur schon Wochen vor der Messung im ständigen Austausch mit der Bauleitung oder der Bauherrschaft befindet. Da solche Raumluftmessungen kurz vor Übergabe des Gebäudes stattfinden, ist zudem mit erhöhten Emissionen durch abtrocknende und aushärtende Baumaterialien zu rechnen, die rechtzeitig und weitreichend abgelüftet werden müssen. Um solche Messwertverfälschungen zu minimieren sind folgende Maßnahmen einzuhalten:

- Messvorbereitung 1: Das zu untersuchende Gebäude sollte schon mindestens 14 Tage vor Beginn der Messungen unter Beobachtung stehen. Emissionsträchtige Arbeiten wie Lackierarbeiten vor Ort (z.B. Treppengeländer) mit lösemittelhaltigen Inhaltsstoffen sollte in den letzten 2 Wochen vermieden werden.
- Messvorbereitung 2 (Beginn 1 Woche vor Messtermin): Ständiges Lüften mit LWZ > 2, wobei hier das aktuelle Außenklima zu beachten ist. Wenn RLT- Anlagen vorhanden sind, sollten diese nun durchgängig auf höchster Stufe laufen.
- Messvorbereitung 3 (Beginn 24h vor Messtermin): Raumklimazielwerte 21°C und ca. 50% rLF sind einzustellen. Feinreinigung der Messräume. Je nach verbauter RLT-Anlage, sollten die Zuluftleitungen auf Verschmutzungen untersucht und ggf. gereinigt werden (ohne chem. Reinigungsmittel!). Die Filter der RLT Anlagen sind zu erneuern. Gelüftet wird im Überdruckverfahren durch Einblasen (Gebläse mit HEPA Filter - min. H13) von Frischluft über die Fenster bei geschlossenen Türen, solange bis der CO<sub>2</sub> Wert des Innenraums in etwa dem der Außenluft entspricht.
- Können die Raumklimaparameter wie Raumlufttemperatur 19-25 °C, Raumluftfeuchte < 65 % rel. LF, CO<sub>2</sub> < 1000 ppm und Beschattung nicht eingehalten werden, ist eine Verschiebung des Messtermins empfohlen.
- Die Messbereiche sind für andere Personen vor und während der Messung verschlossen zu halten. Der ausführende Messtechniker sowie alle anderen Personen, die den Messraum betreten, müssen frei von Duftstoffen (Parfüm, Haarpflegemittel, Rasierwasser) und Rauchgeruch sein. Motorunterstützte Außenarbeiten um das Gebäude sind zum Messtermin zu unterlassen.
- Mehrere Messräume möglichst zeitlich parallel messen.
- Der Prüfenieur muss während der Messung unter Nutzungsbedingungen normative Vorgaben exakt einhalten und protokollieren.
- Die Anzahl zu prüfender Messräume richtet sich nach den Vorgaben im Werkvertrag.

### 3.5. VOC Messvorgang

Falls eine RLT Anlage vorhanden ist, wird diese gemäß Lüftungsplanung unter Nutzungsbedingungen vor und während der VOC Messung zugeschaltet.

Die Messbereiche sind für andere Personen vor und während der Messung verschlossen zu halten. Der ausführende Messtechniker sowie alle anderen Personen, die den Messraum betreten, müssen frei von Fremdgerüchen wie Markierstifte, Parfüm oder Zigarettengeruch sein. Der Messtechniker muss den Messraumzustand und die Klima-Sensormesswerte abnehmen und protokollieren.

Für Luftprobenahmen gelten die Vorgaben von EN ISO 16000-1 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 1: Allgemeine Aspekte der Probenahmestrategie. Für die VOC Raumlufüberwachung sind die in der Norm vorgeschriebenen Prüfröhrchen zu verwenden und die in der Norm vorgesehene Probenahmetechnik ist anzuwenden. Die Laborvorgaben bei der Probenahme sind zu beachten. Bei der Überprüfung zur Einhaltung eines Richtwertes oder wenn Aussagen über das Verhältnis von Innen- und Außenluftkonzentration erzielt werden sollen, sind die Randbedingungen wie der letzte Lüftungszeitpunkt (evtl. mit Luftwechselrate), die Raumtemperatur, die relative Feuchte und die Nutzungsbedingungen vor bzw. während der Messung zu dokumentieren. Weitere Sensorparameter wie VOC/Geruch, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, HS, O<sub>3</sub> und Innen- und Außenklimaparameter wie Luftdruck, Feuchte, Temperatur und Luftzug sollten protokolliert werden.

So sollen bei der Auswahl des Raumes die Nutzungsdauer und die Nutzungsart, die Lage im Gebäude, die Art der Lüftung und mögliche Emissionsquellen (grobe Baustoffauswahl) im Raum beschrieben werden. Als geeignete Stelle im Raum wird im Allgemeinen die Mitte des Raumes angesehen, der Wandabstand muss mindestens 1 m betragen. Nach ISO 16000-1 ist die Probenahme 1,5 m über dem Fußboden durchzuführen und im Protokoll zu vermerken.

### 3.6. Interpretation von VOC Messergebnissen

#### **Empfohlene Richtwerte:**

- Die Einzelstoff-Richtwerte II (ERW II) der beim Vertragsabschluss aktuelle AIR/UBA Richtwerttabelle sind mindestens einzuhalten.
- Der TVOC-Wert in Höhe von 1.500 µg/m<sup>3</sup> ist mindestens einzuhalten.
- Der Richtwert für Formaldehyd in Höhe von 100 µg/m<sup>3</sup> ist mindestens einzuhalten.
- Andere Zielwerte können vom Auftraggeber festgelegt werden, daher sind Werkverträge auf strengere Richtwerte hin zu überprüfen.

#### **Interpretations- und Handlungsempfehlungen bei Vorliegen der VOC Messergebnisse:**

- Werden die ERW II oder der vorgegebene TVOC-Wert unterschritten, wird die Nutzung freigegeben.
- Werden die ERW II eingehalten und liegt der TVOC-Wert über 1.500 µg/m<sup>3</sup>, dann muss der Auftragnehmer (AN) eine weitere Kontrollmessung nach Absprache mit dem Auftraggeber durchführen, um die Abklingraten der Emissionen zu dokumentieren.
- Werden die ERW II und der TVOC-Wert von 1.500 µg/m<sup>3</sup> überschritten, muss der AN emissionsreduzierende Maßnahmen und kurzfristig eine Nachmessung nach Absprache mit dem Auftraggeber durchführen.

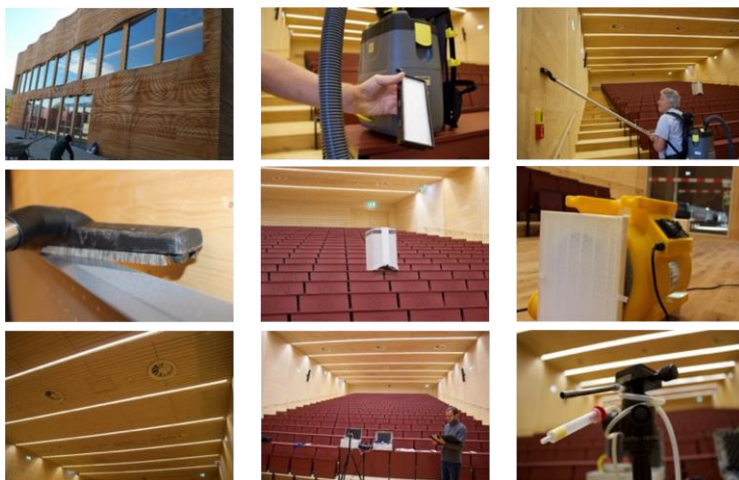


Abbildung 6: Hörsaal, innen komplett aus Holz und Lüftungsanlage. Feinreinigung und VOC Messung.

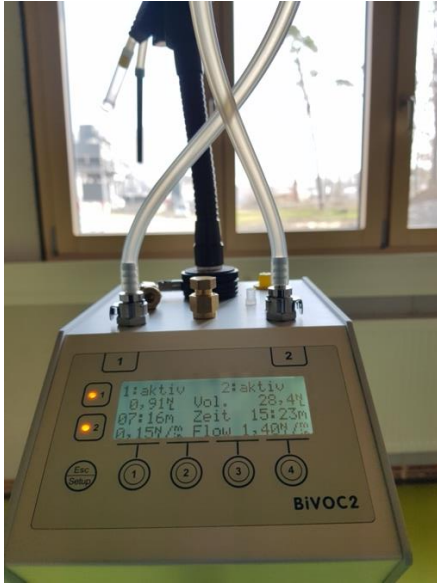


Abbildung 7: BIVOC-Elektronisch gesteuerte Pumpe für VOC Messung.

Leitwert (mg/m <sup>3</sup> )	Hörsaal II Garching	Hygienische Bewertung
<=0,3	0,0847	Hygienisch unbedenklich
>0,3 - 1		Hygienisch noch unbedenklich, sofern keine Richtwertüberschreitungen für Einzelstoffe bzw. Stoffgruppen vorliegen
>1 - 3		Hygienisch auffällig
>3 - 10		Hygienisch bedenklich
>10	10	Hygienisch inakzeptabel

Tabelle 2: Leitwerte für TVOC in der Innenraumluft. Quelle: Umweltbundesamt.

Abbildung 8: Vorbildlich gute VOC Werte nach korrekter Klimaeinstellung und Messraumvorbereitung.

## 4. Zusammenfassung und Aussichten

Wurden im Werkvertrag Zielwerte für die Raumluftqualität vereinbart, sind diese durch Kontrollmessungen nachzuweisen. Daher ist es ratsam auf Produkte umzustellen, die nach der aktuellen Prüfnorm DIN EN 16516 zertifiziert wurden. Empfehlenswert sind Raumlufttechnische Anlagen mit Sensorsteuerung hinsichtlich Raumlufttemperatur, Raumluftfeuchte und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>).

Hohe Temperatur- oder Feuchtwerte, Gerüche durch Trocknungsprozesse oder zu geringe Beheizung oder Belüftung sind erfahrungsgemäß die am häufigsten auftretenden Klimaextreme, die bei VOC Messungen wertverfälschend wirken.

Neueste toxikologische bzw. tier- und zellenbasierte Studien zeigen, dass vor allem die durch Holz und Holzwerkstoffe verursachten Terpenkonzentrationen keine schädlichen Auswirkungen auf die Gesundheit haben.<sup>5</sup> Weitere Studien weisen sogar darauf hin, dass Terpene gesundheitsfördernd sein können.<sup>6</sup>

<sup>5</sup> Infos/Quellen unter <https://baustoffe.fnr.de/projekte/emissionen/>

<sup>6</sup> Infos/Quellen unter <http://www.holz-und-raumluft.de/forschung>



Abbildung 9: Seniorenwohnanlage Waldmünchen - Geplante Messstudie 2022 (Raumklima und VOC) in 11 Holzgebäuden mit unterschiedlicher Bauweise. Bauphysikalische Sensormessungen – TU München Lehrstuhl Winter. Raumklimatische und raumluftanalytische Messungen – IQUH.

## 5. Anlagen

### 5.1. Grundlagen zur VOC Ergebnisbewertung

Kommission Innenraumlufthygiene + Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden, VOC Richtwerte für die Innenraumluft

Herausgeber: Umweltbundesamt, Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes. Link: [UBA](https://www.umweltbundesamt.de/themen/innenraumluft)

### 5.2. Literatur, Normen

DIN 1946	DIN 1946-1-6 befasst sich mit dem Anwendungsbereich und jenen Neuerungen der Norm, die ventilatorgestützte Systeme betreffen.
	DIN 1946-6 «Lüftung von Wohnungen – Allgemeine Anforderungen, Anforderungen zur Bemessung, Ausführung und Kennzeichnung, Übergabe/ Übernahme (Abnahme) und Instandhaltung».
DIN EN 16798 Teil 1	Lüftungs- und Behaglichkeitsnorm (Früher: DIN EN 15251, EN 13779)
EN 16516	Bauprodukteprüfung
EN ISO 7730	Thermische Behaglichkeit
VOB/C ATV DIN 18379-3	Grundlage für die Planung und Auslegung von Lüftungs- und Klimaanlagen in Nichtwohngebäuden, die für den Aufenthalt von Menschen bestimmt sind.
DIN EN ISO 16000-1 (2006)	Innenraumluftverunreinigungen – Teil 1: Allgemeine Aspekte der Probenahmestrategie
DIN EN ISO 16000-2 (2006)	Innenraumluftverunreinigungen – Teil 2: Probenahmestrategie für Formaldehyd
DIN ISO 16000-3 (2013)	Innenraumluftverunreinigungen – Teil 3: Messen von Formaldehyd und anderen Carbonylverbindungen – Probenahme mit einer Pumpe - Allgemeine Aspekte der Probenahmestrategie
DIN EN ISO 16000-5 (2007)	Innenraumluftverunreinigungen – Teil 5: Probenahmestrategie für flüchtige Verbindungen (VOC)
DIN ISO 16000-6 (2012)	Innenraumluftverunreinigungen – Teil 6: Bestimmung von VOC in der Innenraumluft und in Prüfkammern, Probenahme auf Tenax TA, thermische Desorption und Gaschromatographie mit MS oder MS-FID
DIN ISO 16000-8 (2008):	Innenraumluftverunreinigungen - Teil 8: Bestimmung des lokalen Alters der Luft in Gebäuden zur Charakterisierung der Lüftungsbedingungen