

Innenraumhygiene – Zielwerte für Raumklima- und Raumluft

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



Innenraumhygiene – Zielwerte für Raumklima- und Raumluft

Der Bund fördert im Rahmen der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) seit 1. Juli 2021 Nachhaltigkeitsaspekte durch eine eigene «NH-Klasse». Der erforderliche Nachweis für die Förderung erfolgt über die Vergabe des gebäudebezogenen QNG (Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude). Seit 20.04.2022 gelten die QNG-Anforderungen für den Neubau und die Komplettmodernisierung von Nichtwohngebäuden auch für den Bereich «geprüfte Raumluftqualität». Das Qualitätssiegel wird in den Anforderungsniveaus «PLUS» oder «PREMIUM» vergeben, wobei auch die Innenraumluftqualität in die Bewertung einfließt.



Sorgfältig geplante und gebaute Gebäude mit geprüften Baustoffen sind ein Garant für gute Raumluftqualität und unsere Gesundheit. Personen, die in geschlossenen Räumen arbeiten, verbringen im Winter möglicherweise zwischen 8 und 20 Stunden täglich in einer «künstlichen» Gebäudeatmosphäre. Schlechte Raumluftqualität oder unangenehme und unbehagliche Raumklimabedingungen beeinflussen nicht nur das Wohlbefinden, sondern sie können auch dazu führen, dass die Personen anfälliger für Atemwegserkrankungen werden, oder dass bestehende Atemwegserkrankungen und Allergien sich verschlimmern. Gut erforscht sind zudem die negativen Auswirkungen auf die Arbeitsleistung in solchen Innenräumen.

In neu gebauten oder renovierten Gebäuden können extreme, nicht normgerechte Raumklimabedingungen die Schadstoffwerte verfälschen. Wenn deshalb vertraglich vereinbarte Ziel- bzw. Grenzwerte nicht eingehalten werden können, folgen unverschuldet Abnahmeverträge oder Rechtsprobleme. Sowohl chemisch produzierte Baustoffe als auch solche aus nachwachsenden Rohstoffen wie Holz, Holzwerkstoffe, Hanf, Flachs, Zellulose oder Stroh geben natürlicherweise Gerüche, d.h. Ausdünstungen ab, für die es hygienebezogene behördliche Leit- und Richtwerte gibt. Bei Raumluftanalysen, die mit normgerechten Messraumvorbereitungen und unter sensorüberwachten Raumklimabedingungen durchgeführt werden, sind erfahrungsgemäß keine Zielwertüberschreitungen zu erwarten. Anders sieht es aus, wenn Raumluftmessungen bei fehlender Beschattung oder während oder kurz nach der Durchführung von emissionsträchtigen Restarbeiten stattfinden.

Deshalb ist vor jeder Raumluftmessung die Prüfung von messwertverfälschenden Klimafaktoren, Gasen und Partikeln im Gebäude mithilfe von Sensor Handgeräten anzuraten.

1. Raumluftqualität

Die VOC¹ Raumluftqualität in Gebäuden wird durch folgende Material- und Klimafaktoren beeinflusst durch:

- Baustoffe und deren VOC und Baufeinstäube
- Staub
- Sporen
- Rauch, Säuren, Salze
- Schwerflüchtige Organische Verbindungen und Gerüche
- Ansammlung von Peroxiden, Gas und/oder Gasemissionen
- Außenluftqualität
- Luftfeuchtigkeit und Temperatur
- Unzureichende Luftwechsel

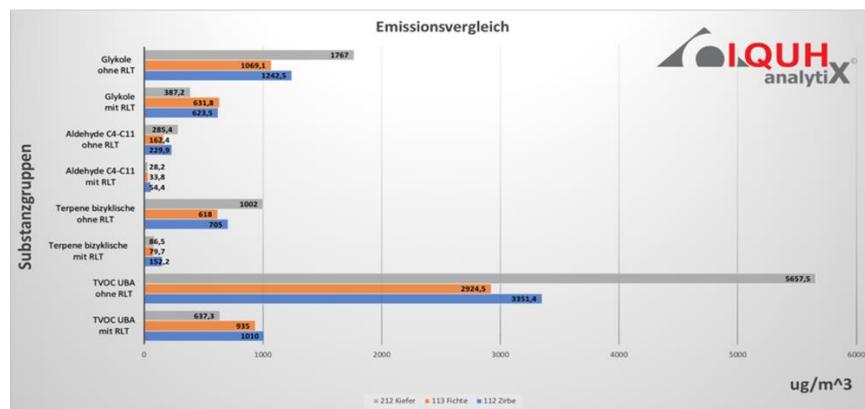


Abbildung 1: Binderholz-Praxisstudie/TUM/IQUH in 3 Räumen – erstellt mit unterschiedlichen Holzarten – Fichte, Kiefer, Zirbe. Ergebnisse ohne und mit laufender RLT-Anlage.

1.1. 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 Reinigungsmittel 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 Prüfzertifikaten Blauer Engel, natureplus, ec1plus, e1plus, Kammerprüfung gem. EN 16516 ausschreiben.
- Die im Werkvertrag konkret verbotenen Baustoffe oder Baustoffemissionen dürfen nicht eingesetzt werden, oder sie müssen vom AG explizit zugelassen werden.
- Wo möglich emissionsarme, emissionsfreie bzw. emissionsbindende mineralische Baustoffe einsetzen.
- Anfangsemissionen/Gerüche durch organische Beschichtungs-, Kleb- oder Dichtstoffe gut ablüften.
- Technische Merkblätter, Sicherheitsdatenblätter, EPD² zu Produkten archivieren und Verarbeitungsvorgaben genau einhalten.
-

¹ VOC = Volatile Organic Compound (Flüchtige Organische Substanzen)

² EPD – Environmental Product Declaration beinhaltet Hinweise zu Emissionsprüfzertifikaten, Inhaltsstoffen und möglichen Emissionsquellen im Produkt.

1.2. Raumluft/Raumklima-Sensormessungen

Mit PID³ oder anderen elektro-chemischen Sensor-Analysegeräten (Analog/Kabel oder Bluetooth/Kabellos) kann orientierend das Niveau der Luftqualität abgeschätzt werden.

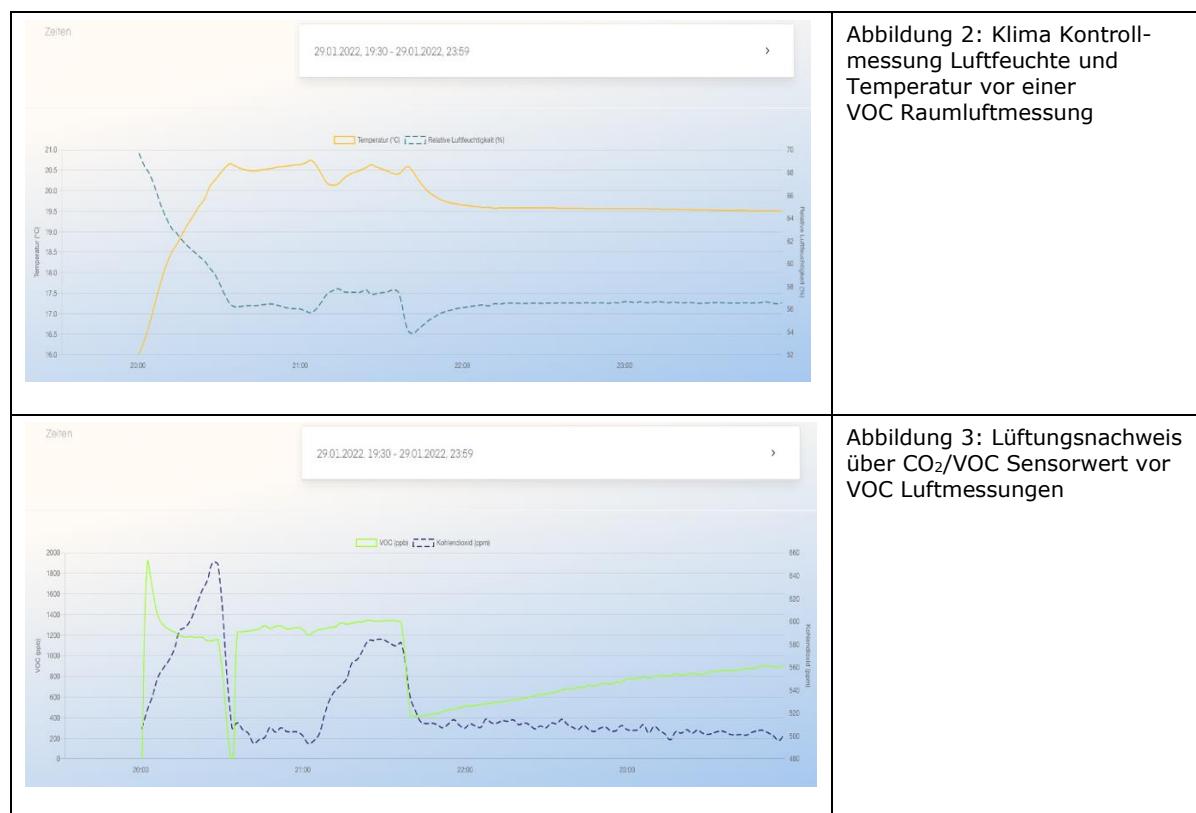
Die Überwachung folgender gesundheitsrelevanter Parameter hat rechtliche, gesundheitliche, aber auch behaglichkeitsbezogene Vorteile:

- Partikel (PM 0,3/1/2,5/10) und Radon.
- Flüchtige organische Verbindungen (VOC), Formaldehyd (CH_2O).
- Anorganische Gase wie Kohlendioxid (CO_2), Kohlenmonoxid (CO), Schwefelverbindungen (HS etc.), Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffdioxid (NO_2), Ozon (O_3) etc..
- Temperatur, Relative/absolute Luftfeuchtigkeit, Luftzirkulation/Turbulenzgrad und Luftzug.

Qualitative Sensormessungen sind Schätzverfahren bei den organischen Luftanteilen (VOC)⁴ mit geringerer Messgenauigkeit, bei den anorganischen Verbindungen wie CO_2 mit höherer Messgenauigkeit.

2. Raumklima Sensormessungen

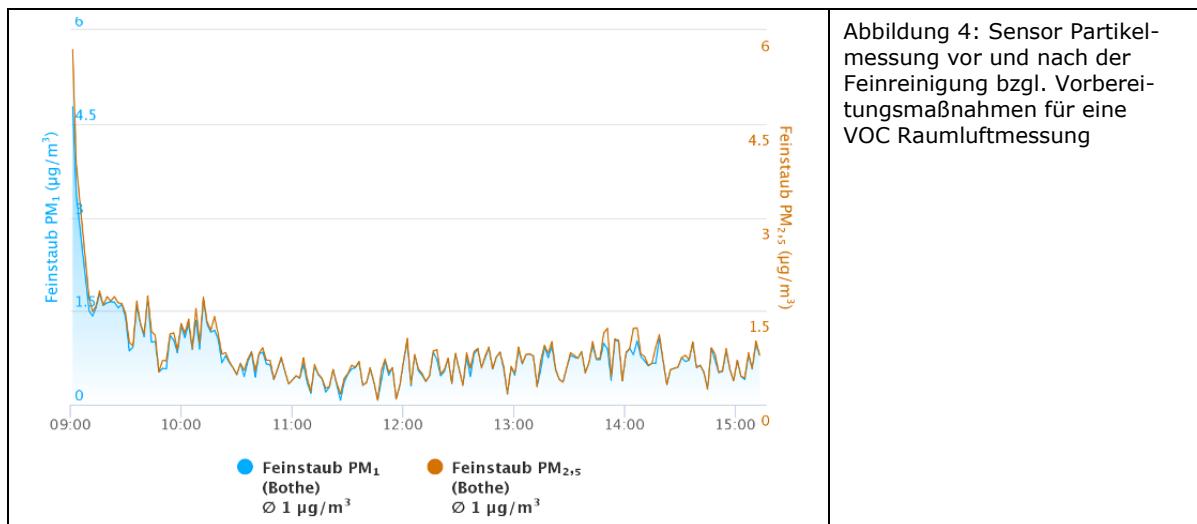
Das Raumklima setzt sich aus verschiedenen Parametern zusammen. Bei orientierenden Klimamessungen kommen Handmessgeräte mit einzelnen Sensoren oder Standmessgeräte (Bluetooth, WLAN unterstützt) mit mehreren unterschiedlichen Sensoren zum Einsatz.⁵



³ PID - PhotoIonisationsDektoren

⁴ Der VOC Sensormesswert mit Handgeräten ist ein orientierender Schätzwert. Er ist ungenau und hat eine hohe Querempfindlichkeit und ist mit den «normgerecht ermittelten» VOC Werten bei Luftprobenahmen und Laborauswertung nicht vergleichbar.

⁵ Klima- und Behaglichkeit Messsensoren: www.testo.com, www.air-q.com, www.airthings.com, www.decentlab.com.



Eine normen- und rechtssichere VOC Raumluftmessung sollte zusammen mit einer Raumklima Sensormessung erfolgen. Die Überprüfung der Dichtigkeit einer Gebäudehülle durch Unterdruckverfahren (BlowerDoor) oder CO₂ 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 Raumluftmessungen herrschen, steigen VOC Werte an. Diese Richtwertüberschreitungen führen dann zu teuren und zeitaufwändigen Nachmessungen. Daher ist die Durchführung einer Raumluftmessung 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:

Klimabedingungen	Norm-Klima Wertebereich	Extrem-Klima Wertebereich
CO ₂ 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 bei Sonnenschein	vorhanden	nicht vorhanden
Temperatur außen	niedrig	hoch
Temperatur innen	niedrig	hoch
VOC Wert	normal und niedrig	hoch

Kohlendioxid (CO₂)

Der CO₂ Wert ist ein Indiz für eine ausreichende Frischluftzufuhr. Der Anteil des Kohlendioxids beträgt heutzutage ca. 415 ppm in der Außenluft. Das Umweltbundesamt empfiehlt bei der Überschreitung eines Wertes von 1.000 ppm CO₂, frische Luft von draußen in den Raum hineinzulüften. Die Maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK-Wert) wird mit 5.000 ppm angegeben. CO₂ 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 dient zur Prüfung eines ausreichenden und nutzerangepassten Luftwechsels vor Raumluftmessungen.

Sauerstoff (O_2)

Sauerstoff (O_2) 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 geruchsintensive 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 unbedenklich	< 0,3 mg/m ³
hygienisch (noch) unbedenklich	0,3 - 1 mg/m ³
hygienisch auffällig	1 - 3 mg/m ³
hygienisch inakzeptabel	> 3 mg/m ³

Zusätzlich existieren Richtwerte für einzelne VOC-Stoffe (siehe aktuelle Richtwerttabellen unter www.uba.de).

VOCs werden mittels eines resistiven Sensors gemessen. Moleküle verursachen eine Änderung des elektrischen Widerstandes im Sensor. Da eine Querempfindlichkeit zu anderen Stoffen besteht, sind die VOC Sensormessergebnisse schwer interpretierbar.

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/m³ (Vorsorgewert). Der Ausschuss für Innenraumrichtwerte empfiehlt allerdings, den Wert auf 40 µg/m³ herunterzusetzen. Der kurzfristige Gefahrenwert liegt bei 250 µg/m³. Als Arbeitsplatzgrenzwert wurden 950 µg/m³ festgelegt. Für Stickstoffdioxid ist in der EU eine Alarmschwelle von 400 µg/m³ festgelegt. 2021 hat die WHO ihre Luftgüte-Richtlinie nach unten hin angepasst. Die neue Empfehlung bei Stickstoffdioxid liegt bei 25 µg/m³ im 24-Stunden-Mittel. 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 mg/m³. Der 8-Stunden-Mittelwert von 10 mg/m³ (8 ppm) sollte laut Umweltbundesamt nicht überschritten werden. Die maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK-Wert) beträgt 35 g/m³ (28 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 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 mg/m³ fest. 2015 wurde die Maximale Arbeitsplatz-Konzentration auf 0,37 mg/m³ 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».

Formaldehyd wird mit einem elektrochemischen Sensor gemessen. Sensorwerte sind gegenüber Labormessungen ungenau und können lediglich als Indiz und mit Hilfe eines Umrechnungsfaktors bewertet werden. Die Sensoren helfen bei der Quellensuche.

Ozon

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. Der bisherige MAK-Wert von 100 ppb (200 µg/m³) wurde bislang noch nicht durch einen verbindlichen Arbeitsplatzgrenzwert ersetzt. Ozon wird mit einem elektrochemischen Sensor gemessen. Zu hohe Peroxid- und Ozonkonzentrationen können die VOC Raumluftmesswerte verfälschen.

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 Rohrleitungsschächte. 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/m³ (300 Zerfälle pro Sekunde pro m³ Luft) Maßnahmen zur Reduzierung getroffen werden.

- Eingreifrichtwert: 400 Bq/m³ gilt für Gebäude, die vor 1996 gebaut wurden.
- Planungsrichtwert: 200 Bq/m³ gilt für Gebäude, die nach 1996 gebaut wurden.

Die deutsche Strahlenschutzkommission und die WHO empfehlen, den Wert dauerhaft unter 100 Bq/m³ zu halten, unter Umständen durch Lüftungsanlagen. Langzeitmessungen sind genauer als Kurzzeitmessungen. 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. 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/m³ (1 ppm), der Wert für die Maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK-

Wert) beträgt 2,7 mg/m³. Schwefeldioxid ist ein starkes Atemgift und kann schon in geringen Konzentrationen zu Hustenreiz, Atemnot sowie Reizzonen 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, giftiges Gas. 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 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.

Schwefelwasserstoff wird mit einem elektrochemischen Sensor gemessen. Die Verbindung kann durch Fensterlüftung oder Lüftungsanlagen in Innenräume gelangen.

Feinstaub (PM₁ – PM₁₀)

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, Kleinfeueranlagen, 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, Flammenschutzmittel, Weichmacher) angereichert.

Mit Partikelmessgeräten werden vor der VOC Raumluftmessung die Partikelgrößen (PM₁, PM_{2,5}, PM₁₀) gemessen, um die Qualität einer Feinreinigung nachzuweisen.

Für Feinstaub PM₁₀ (Partikel < 10 µm) setzt das Umweltbundesamt für die Außenluft einen Tagesgrenzwert von 50 µg/m³ und einen Jahresmittelwert von 40 µg/m³. Der Tagesgrenzwert darf lediglich an 35 Tagen im Jahr überschritten werden. Für Feinstaub PM_{2,5} (Partikel < 2,5 µm) gilt seit 2015 der als Beurteilungswert von der WHO festgelegte Jahresgrenzwert von 25 µg/m³ 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 (PM₁₀ hell), je kleiner die Partikel (PM_{2,5}, PM₁) um so dunkler.

Die Partikel reizen die Schleimhäute von Augen, Nase und Rachenraum und die Atemwege und können zu entzündlichen Veränderungen führen. Zu hohe Partikelwerte wegen unzureichender Feinreinigung verfälschen und erhöhen je nach Partikelzusammensetzung die VOC Raumluftmesswerte.

Lufttemperatur

Die subjektiv wahrgenommene Raumtemperatur kann von der gemessenen Lufttemperatur abweichen, da sie durch weitere Faktoren beeinflusst wird. Dazu gehören neben der tatsächlichen Lufttemperatur die Strahlungstemperatur der Raumoberflächen, 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.

Die Temperatur kann mit einem Sensor mit sehr hoher Genauigkeit gemessen werden. Nicht normgerechte Raumtemperaturen verfälschen die VOC Raumluftmesswerte.

Relative Luftfeuchtigkeit

Relative Luftfeuchtigkeit beschreibt das Verhältnis zwischen der absoluten und der maximalen Luftfeuchtigkeit und wird in Prozent angegeben. In Innenräumen entsteht Luftfeuchte durch Baustofftrocknung oder wegen Kochen, Duschen, Baden und Wäschetrocknung. Durch die Austrocknung der Schleimhäute steigt das Infektionsrisiko.

Während Raumluftmessungen wird eine relative Luftfeuchtigkeit von 40 bis 60 % empfohlen. 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 Raumluftmesswerte.

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 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. $6,9 \text{ g}/\text{m}^3$ und ein Höchstwert von ca. $10,4 \text{ g}/\text{m}^3$. 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 Raumluftmesswerte.

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 Pa (Pascal) oder dem Normwert 1 bar angegeben. Die Messung des Luftdrucks ist für die Umrechnung im Labor bzgl. VOC Raumluftmessungen relevant.

Die Druckkammersensoren messen die Deformation einer Membran. Luftdruckwerte bei QNG geforderten Raumluftmessungen benötigt das VOC-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. Zudem sind hohe Luftzugerscheinungen bei gleichzeitig möglichst hohem Luftwechsel zu vermeiden.

Nach Abschluss der Bauarbeiten ist gemäß QNG Förderrichtlinien eine Messung von flüchtigen organischen Stoffen durchzuführen.

3.1. Anforderungen an die VOC Raumluftprobenahme

Die VOC Raumluftmessung stellt eine Kurzzeitprobenahme dar. Klimakontrollmessungen und Messraumvorbereitungen sollten unbedingt 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 CO₂/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.

Luftprobenahmen sind auf Formaldehyd und VOC ausgerichtet und finden zum Zeitpunkt der Bauabnahme statt, d.h. im schlüsselfertigen (bezugsfertigen) aber unmöblierten Zustand. Innentüren müssen gebrauchsfertig eingebaut sein. Für schon bezogene und möblierte Gebäude muss eine Sonderregelung getroffen werden.

3.2. Klimafaktoren und Baustoffemissionen

Generell sollten 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 von Faktoren wie dem jahreszeitlichen Außenklima, dem Standort, der Heizungsart und dem Materialfeuchteverhalten ab. Winddruck oder Unwetter können die VOC Emissionswerte unerwartet erhöhen.

3.3. Lüftungsplanung vor VOC Raumluftmessungen

Gebäude ohne technische Lüftungsanlagen müssen rechtzeitig über Fensterlüftung quer-gelüftet werden. Die normativ vorgegebenen Verschlusszeiten (8h) müssen eingehalten werden. Zu empfehlen ist 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, CO₂, 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 (Frischluftzufuhr 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 CO₂ Messgerät.
- mit RLT Anlagen (Zentrale Lüftungsgeräte oder Einzellüfter mit Feuchte- und/oder Wärmerückgewinnung) – Funktionsnachweis über CO₂ 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 sollten. Um diesbezügliche 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): Raumklimzielwerte 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 Türensolange bis der CO₂ Wert des Innenraums in etwa dem der Außenluft entspricht.
- Können die Raumklimaparameter wie Raumlufttemperatur 19-25 °C, Raumluftfeuchte < 65 % rel. LF, CO₂ < 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.
- Motorisierte Außenarbeiten um das Gebäude sind während Messungen zu unterlassen.
- Mehrere Messräume möglichst zeitlich parallel messen.
- Der Prüfingenieur muss während der Messung 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 und die Funktion auf das Raumklima kontrolliert und protokolliert.

Die Messbereiche sind für andere Personen vor und während der Messung verschlossen zu halten. Der ausführende Messtechniker selbst sowie dessen Gerätschaften müssen beim Messvorgang frei von VOC Emittenten wie Markierstifte, Kabelgeruch, Parfüm oder Zigarettengeruch sein. Der Messtechniker wird den Messraumzustand und die Klima-Sensormesswerte abnehmen, fotografieren und protokollieren.

Für Luftprobenahmen gelten die Vorgaben von EN ISO 16000-1 Innenraumluftverunreinigungen – Teil 1: Allgemeine Aspekte der Probenahmestrategie. Für die VOC Raumluftüberwachung sind die in der Norm vorgeschrieben Prüfröhrchen zu verwenden und die in der Norm vorgesehene Probenahmetechnik anzuwenden. Die Laborvorgaben bei der Probenahme sind zu beachten. Sensorparameter wie VOC/Geruch, CO₂, NO₂, CO, HS, O₃ 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. QNG Anforderungen an die VOC Messwerte

Allgemeine Richtwertauslegungen:

- 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/m³ ist mindestens einzuhalten.
- Der Richtwert für Formaldehyd in Höhe von 100 µg/m³ ist mindestens einzuhalten.
- Andere Zielwerte können vom Auftraggeber festgelegt werden, daher sind Werkverträge auf strengere Richtwerte hin zu überprüfen.
- 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/m³, 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/m³ überschritten, muss der AN emissionsreduzierende Maßnahmen sowie kurzfristig eine Nachmessung nach Absprache mit dem Auftraggeber durchführen.

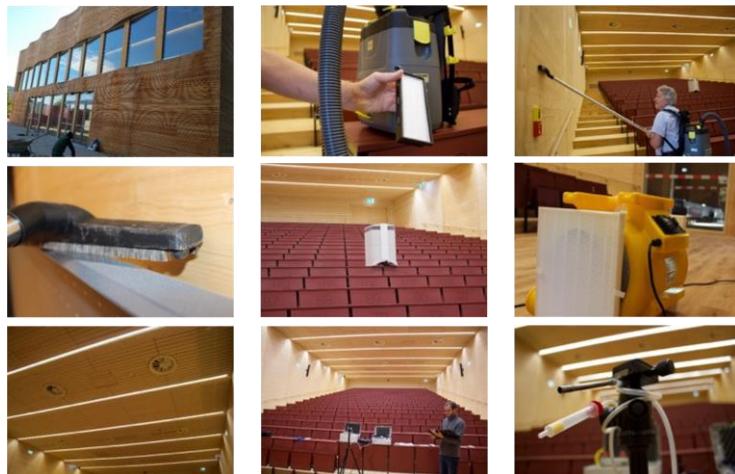


Abbildung 6: Hörsaal, innen komplett aus Holz und Lüftungsanlage. Bilder von Feinreinigung und VOC Messung.

Leitwert (mg/m ³)	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

Leitwerte für TVOC in der Innenraumluft. Quelle: Umweltbundesamt.

Abbildung 7: Vorbildlich gute VOC Werte im Holzgebäude nach korrekter Klimaeinstellung und Messraumvorbereitung (IQUH Archiv).

3.7. QNG Richtwerte

Die Raumluftzielwerte und die dazugehörige Punktebewertung gemäß QNG Förderrichtlinien sind in folgender Tabelle dargestellt. Für die QNG Premiumzertifizierung muss eine möglichst hohe Punktezahl erzielt werden.

Tabelle 1: Anforderung an die TVOC- und Einzelkonzentrationen

Quelle: Anforderungen nach BNB_BN_3.1.3 Innenraumlufthygiene

Qualitäts-niveau (QN)	Raumluftkonzentration aller untersuchter Räume			Bewertung	
	VOC				
	TVOC [mg/m ³]	Zulässige Messwerte TVOC [mg/m ³]	Einzelkonzentrationen		
2	≤ 0,3	≤ 0,304	≤ RW I	50	
1	≤ 1,0	0,305 bis 1,04	≤ RW I	25	
0	≤ 3,0	1,05 bis 3,04	≤ RW II	0	
	> 3,0	≥ 3,05	> RW II	keine Zertifizierung möglich!	

4. Zusammenfassung und Aussichten

Gemäß unseren letztjährigen Messerfahrungen bestehen aktuell keine Probleme mit zu hohen Formaldehyd- oder VOC Emissionswerten, wenn Lüftungsanlagen für nutzungsrechte Luftwechsel sorgen und die vormals beschriebenen Messraumvorbereitungen eingehalten werden.

Wurden im Werkvertrag VOC Zielwerte für die Raumluftqualität vereinbart ist es ratsam möglichst VOC geprüfte Produkte gemäß Prüfnorm DIN EN 16516 einzusetzen. Empfehlenswert sind ausreichend große zugluftvermeidende raumlufttechnische Anlagen mit Sensorsteuerung hinsichtlich Raumlufttemperatur, Raumluftfeuchte und Kohlendioxid (CO₂). Hohe Temperatur- oder Feuchtwerte und Gerüche durch Trocknungsprozesse im Prüfraum sowie (Außen) Klimaextreme können zu VOC Ergebnisverfälschungen führen.

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.⁶ Weitere Studien weisen sogar darauf hin, dass Terpene gesundheitsfördernd sein können.⁷ Diese für den Holzbau positiven wissenschaftlichen Studienergebnisse zu natürlichen VOC Emissionen (Terpene, Aldehyde, Carbonsäuren z.B. durch natürliches Holz) sollten in den VOC Bewertungsrichtlinien dazu führen, dass diese VOC Richtwerte wesentlich erhöht werden.

Folgende aktuelle DBU geförderte Studie in Waldmünchen/Bayern unter Leitung der TU München/Lehrstuhl Stefan Winter soll Erkenntnisse zu Emissionen, zum bauphysikalischen und raumklimatischen Verhalten und zur Ökobilanzierung/Nachhaltigkeit in unterschiedlich

⁶ Infos/Quellen unter <https://baustoffe.fnr.de/projekte/emissionen/>

⁷ Infos/Quellen unter <http://www.holz-und-raumluft.de/forschung>

gebauten Holzgebäuden generieren. Die Beteiligten erhoffen sich neue positive Argumente für nachhaltige Bauweisen zur Förderung von Umwelt- und Klimaschutz, aber auch für ein gesundheitsförderliches Raumklima.



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

1. Kommission Innenraumlufthygiene + Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden, VOC Richtwerte für die Innenraumluft. Herausgeber: Umweltbundesamt, Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes.
2. Holzbau Deutschland/Informationsdienst Holz, Berlin: www.holz-und-raumluft.de

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