

VOC-Emissionen im Holzbau in Abhängigkeit von der Konstruktion und der Materialisierung

Prof. Dr. Ingo Mayer
Berner Fachhochschule AHB
Biel, Schweiz



VOC-Emissionen im Holzbau in Abhängigkeit von der Konstruktion und der Materialisierung

1. Zielwerte, Richt- und Leitwerte für die VOC-Konzentration in der Innenraumluft

Mehrere Labels des nachhaltigen Bauens (Minergie-ECO, DGNB, Leed) berücksichtigen bei der Beurteilung der Objekte die emissionsrelevante Materialzusammensetzung, das Emissionsverhalten der eingesetzten Baustoffe sowie die daraus resultierende Raumluftqualität. Konkret werden dabei **Zielwerte** an die Konzentration flüchtiger organischer Verbindungen (engl. **VOC**, Volatile Organic Compounds) in der Innenraumluft gestellt. VOC bezeichnet die Gruppe der flüchtigen organischen Verbindungen, gas- und dampfförmige Stoffe der organischen Chemie in der Luft. Dazu gehören zum Beispiel Kohlenwasserstoffe, Alkohole, Aldehyde und organische Säuren. Viele Lösemittel, Flüssigbrennstoffe und synthetisch hergestellte Stoffe können als VOC auftreten. VOC umfasst aber auch zahlreiche Stoffe, die aus Baustoffen biologischen Ursprungs gasförmig entweichen. Mehrere hundert verschiedene Einzelverbindungen können dabei in der Innenraumluft gemeinsam auftreten.

Die Bestimmung der Innenraumluftqualität zur Überprüfung von Zielwerten erfolgt dabei in aller Regel ein bis drei Monate nach Abschluss der Bauphase, zu einem Zeitpunkt in dem Baustoffe noch vergleichsweise hohe Emissionsraten an VOC aufweisen. Bei den meisten Baustoffen verringert sich die Abgabe an VOC nach Einbau in Innenräume innerhalb der ersten Monate deutlich.

Häufig wird als Zielvorgabe zum VOC-Gesamtgehalt (**Summenparameter TVOC**, Total Volatile Organic Compounds) eine Konzentration von $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ in der Innenraumluft vorgegeben (bei aktiver Luftprobenahme). Zudem kann ein Zielwert für Formaldehyd als Einzelsubstanz von z.B. $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vorgegeben sein. Dabei wird in Gebäuden mit raumlufttechnischen Anlagen (RTA) bei laufender Lüftung gemessen, bei Gebäuden ohne RTA wird eine Messung unter sogenannten «Standardbedingungen» vorgenommen. Letzteres beinhaltet eine intensive Lüftung der Räume, ein Schließen der Fenster und Türen für mindestens acht Stunden und eine anschließende Raumluftmessung.

Neben den Vorgaben der Label des Nachhaltigen Bauens werden auch immer häufiger in Bauprojekten ohne Labelbezug **individuelle Zielwerte in Werkverträgen** gesetzt. Häufig sind dies bislang Projekte, in denen die öffentliche Hand die Bauträgerschaft darstellt, darunter Schulen, Kindertagesstätten, etc. Die dabei einzuhaltenden Zielwerte liegen hier häufig im Bereich der genannten Werte der aufgeführten Labels, teilweise sogar noch darunter.

Unabhängig von in Werkverträgen definierten Zielwerten zum Summenparameter TVOC, werden zur hygienischen Beurteilung der Innenraumluftqualität die **Leitwerte zum Summenparameter TVOC** und die **Richtwerte** des Ausschusses für Innenraumrichtwerte in Deutschland (vormals Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Kommission Innenraumluftthygiene und der Obersten Landesgesundheitsbehörden)^[1] herangezogen, da diese «allgemein für Innenräume einschliesslich Wohnräume abgeleiteten und toxikologisch begründeten Richtwerte sich für eine valide Beurteilung der Luftqualität an Innenraumarbeitsplätzen eignen.»^[2]

Häufig erfolgt diese Beurteilung bei Messungen, die nicht zur Überprüfung der oben genannten Zielwerte nach Abschluss der Bauphase, sondern aufgrund eines Verdachtes erhöhter VOC-Konzentrationen durchgeführt werden (z.B. bei gesundheitlichen Symptomen, Geruchsbelästigung, etc.)

Dabei wird zwischen dem Richtwert I (RW I) und dem Richtwert II (RW II) unterschieden^[1]:

- «Der **Richtwert II (RW II – Gefahrenrichtwert)** ist ein wirkungsbezogener Wert, der sich auf die gegenwärtigen toxikologischen und epidemiologischen Kenntnisse zur Wirkungsschwelle eines Stoffes unter Einführung von Unsicherheitsfaktoren stützt. Er stellt die Konzentration eines Stoffes dar, bei deren Erreichen bzw. Überschreiten unverzüglich zu handeln ist. Diese höhere Konzentration kann, besonders für empfindliche Personen bei Daueraufenthalt in den Räumen, eine gesundheitliche Gefährdung sein.»
- «Der **Richtwert I (RW I – Vorsorgerichtwert)** beschreibt die Konzentration eines Stoffes in der Innenraumluft, bei der bei einer Einzelstoffbetrachtung nach gegenwärtigem Erkenntnisstand auch dann keine gesundheitliche Beeinträchtigung zu erwarten ist, wenn ein Mensch diesem Stoff lebenslang ausgesetzt ist. Eine Überschreitung ist allerdings mit einer über das übliche Maß hinausgehenden, unerwünschten Belastung verbunden.»

«Aus Gründen der Vorsorge sollte auch im Konzentrationsbereich zwischen Richtwert I und Richtwert II gehandelt werden, sei es durch technische und bauliche Massnahmen am Gebäude... oder durch verändertes Nutzerverhalten. RW I kann als Zielwert bei der Sanierung dienen»^[1]. Im Gegensatz zu den auf acht Stunden bezogenen Arbeitsplatzgrenzwerten handelt es sich bei den Richtwerten üblicherweise um Langzeitwerte (24 Stunden an sieben Tagen pro Woche), die auch für Kinder und Kranke gelten.

Für den Holzbau sind hier insbesondere Richtwerte für die Stoffgruppen der sogenannten bityklichen bzw. monozyklischen Terpene und Aldehyde relevant. Terpene sind flüchtige Bestandteile des Harzes der Nadelhölzer (Konzentrationsunterschiede in Abhängigkeit vom Harzgehalt). In heimischen Laubhölzern sind Terpene nicht enthalten. Zusätzlich bestehen Richtwerte für die Gruppe der Aldehyde zwischen C₄-C₁₁ (Kettenlänge des Kohlenstoff-Grundgerüsts der Moleküle. Formaldehyd als «kleinstes» Aldehyd mit nur einem C-Atom zählt hier nicht dazu). Solche Aldehyde entstehen wie unten beschrieben beim Heißpressvorgang der Werkstoffherstellung durch Umwandlung von Fettsäuren im Holzgewebe.

Tabelle 1: Richtwerte für die Stoffklassen der Terpene und Aldehyde (Auszug aus Richtwert-Tabelle des Ausschusses für Innenraumrichtwerte, ^[1])

Verbindung	Richtwert II (µg/m ³)	Richtwert I (µg/m ³)
Terpene, bityklich (Leitsubstanz α-Pinen)	2'000	200
Monozyklische Monoterpene (Leitsubstanz d-Limonen)	10'000	1'000
Aldehyde, C ₄ bis C ₁₁ (gesättigt, azyklisch, aliphatisch)	2'000	100

2. Innraumluftqualität in Neubauten

Die Baustoffe, aus denen Gebäude errichtet werden und mit denen Innenräume ausgestattet sind, stellen potenzielle Quellen für VOC-Emissionen dar. Dies gilt insbesondere für grossflächig eingesetzte Bauprodukte und Inneneinrichtungsgegenstände, wie z.B. Bodenbeläge sowie dafür eingesetzte Klebstoffe, Anstriche, Wand- und Deckenverkleidungen, Türblätter oder Möbel. Hinzu kommen auch alle Emissionen, die aus tiefer liegenden Schichten im Wand- bzw. Dachaufbau zeitverzögert in den Innenraum diffundieren.

Die Angabe allgemeingültiger Messwerte für Neubauten ist aufgrund der objektspezifischen Unterschiede bezüglich Raum-, Nutzungs-, Materialisierungs- und Lüftungskonzepten nicht möglich. Die langjährige Erfahrung von Raumluftmessungen in Gebäuden in Massivbau- sowie Holzbauweise belegen, dass der genannte Zielwert für den Summenparameter TVOC (z.B. 1000 µg/m³) zum Abschluss der Bauphase teilweise deutlich überschritten wird. Eine genauere Betrachtung von VOC-Einzelwerten bei Messungen in Neubauten in Holzbauweise ohne RTA zeigt nicht selten Konzentrationen an bityklichen

Terpenen von über $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, in Einzelfällen sogar bis zu $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ebenso überschreiten die Messwerte für azyklische Aldehyde (C_4 bis C_{11}) mit häufig über $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ den Richtwert I^[3]. Zunehmend sind damit auch individuelle Zielwerte in Werkverträgen überschritten, die an den genannten Leit- und Richtwerten orientieren.

Zwischen Holzbau und Massivbau können Unterschiede in der Zusammensetzung der VOC-Emissionen in der Innenraumluft festgestellt werden. Objekte in Holzbauweise weisen in Abhängigkeit der eingesetzten Baustoffe einen höheren Anteil an VOC aus den Stoffklassen der Terpene, Aldehyde und Ester auf (Abbildung 1) ^[3].

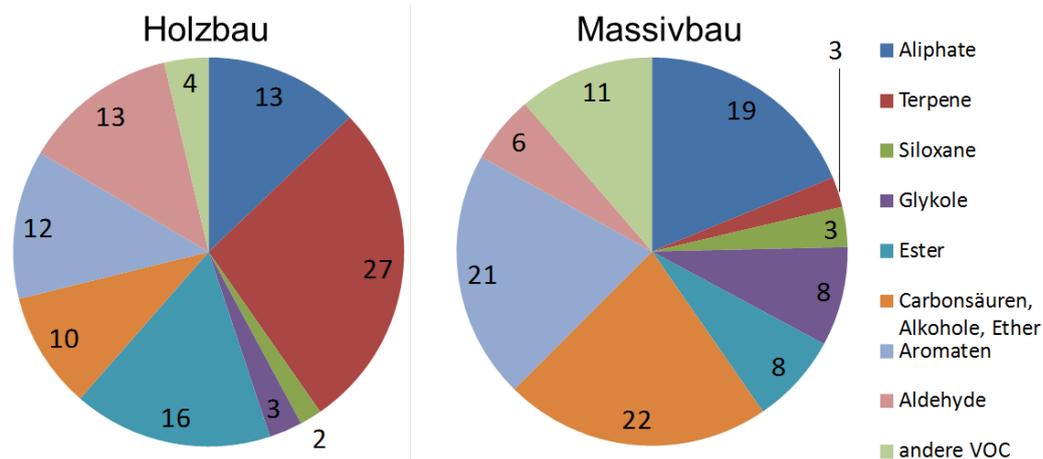


Abbildung 1: Prozentuale Zusammensetzung der VOC in der Innenraumluft neu errichteter Gebäude in Holz- und Massivbauweise, 11 bis 32 Tage nach Abschluss der Bauphasen inkl. Innenausbau. Messungen der Berner Fachhochschule zwischen 2009 und 2016, n=23 (Massivbau), n=21 (Holzbau) ^[3].

Holzwerkstoffe tragen dabei zu den VOC-Emissionen in Gebäuden in Holzbauweise maßgeblich bei. Grund hierfür ist die Tatsache, dass Emissionen aus Holzwerkstoffen (insbesondere Terpene, Aldehyde und organische Säuren) aus dem Wand-, Boden- und Deckenaufbau in die Innenraumluft abgegeben werden und im Rahmen des TVOC-Wertes mit erfasst werden. Dies gilt auch für Werkstoffe, die als mittlere Schichten in einem mehrschichtigen Wandaufbau vorkommen und innerhalb einer möglichen Dampfsperre liegen. Diese Emissionen aus Holzwerkstoffen «addieren» sich dann zu den ohnehin vorhandenen Lösemittelmittelmitteln weiterer Baustoffe (Bodenbelagskleber, Parkettsiegel, Farben, Dichtmassen, etc.).

3. VOC-Emissionen aus Holzwerkstoffen im Holzbau

VOC-Emissionen aus Holzwerkstoffen sind auf Holzinhaltsstoffe, die teilweise bei der Holzwerkstoffherstellung unter Temperatur- und Sauerstoffeinfluss chemisch verändert werden, zurückzuführen. Es bestehen sehr große Unterschiede in der Zusammensetzung und Höhe der VOC-Emissionen je nach eingesetzter Holzart. Neben der Emission an Formaldehyd aus Klebstoffsystemen (insbesondere UF-Harze), welche an dieser Stelle nicht thematisiert werden sollen, kommt es zu keinen relevanten VOC-Emissionen aus Klebstoffbestandteilen von Holzwerkstoffen.

Bei Nadelhölzern sind die emissionsrelevanten Inhaltstoffe im Wesentlichen Terpene (z.B. α -Pinen und 3-Caren) und Fettsäuren. Bei Kiefernholz ist der Harzanteil (Terpene) und der Anteil an Fettsäuren im Vergleich zu anderen heimischen Nadelholzarten hoch. OSB-Platten aus Kiefernholz haben deshalb ein großes Emissionspotential für VOC ^[5,6]. Die im Harz enthaltenen Fette und freien Fettsäuren, werden unter Temperatureinfluss leicht durch Sauerstoff oxidiert ^[11]. Bei einer fortschreitenden Oxidation der Fettsäuren werden schließlich Aldehyde gebildet, insbesondere Pentanal und Hexanal. Fettsäuren sind so empfindlich gegenüber oxidativen Veränderungen, dass auch bei Raumtemperatur fortlaufend Fettsäuren zu Aldehyden und anderen VOC durch Luftsauerstoff oxidiert werden und als VOC abgegeben werden.

Bei Laubhölzern besteht eine andere Ausgangslage. Da heimisch Laubholzarten keine Harzkanäle beinhalten, kommen im Laubholz keine Terpene oder Harzsäuren vor. Auch Fettsäuren kommen hier in deutlich geringerem Umfang als bei Nadelhölzern vor, da Laubhölzer, wie z.B. die Rotbuche eher Polysaccharide (Stärke) als Energiespeicher-Moleküle nutzen. Diese sind nicht flüchtig und erzeugen beim Heißpressen keine emissionsrelevanten Abbauprodukte. Lediglich die chemisch etwas unterschiedlich aufgebauten Hemicellulosen (höherer Anteil an Xylanen und Acetyl-Seitengruppen) resultieren in höheren Emissionen an Essigsäure und (in sehr geringem Umfang) an Furfural. Im Vergleich zu den Emissionen aus harzreichen Nadelhölzern stellen heimische Laubhölzer jedoch emissionsarme Alternativen für die Holzwerkstoffindustrie dar. Der Einsatz alternativer Holzarten für die OSB-Herstellung kann die VOC-Emission deutlich reduzieren. So wiesen z.B. OSB-Platten hergestellt im Technikums-Maßstab und basierend auf Buchenholz-Strands stark reduzierte VOC-Emissionen auf ($\text{VOC} < 150 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$, Tag 28 der Emissionsprüfung; Vergleich: OSB aus Kiefer bei ca. $1000 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$) Bei der Verwendung von Pappel-Strands konnten sogar noch tiefere Emissionsraten von ca. $60 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ erzielt werden [4].

Holzwerkstoffe wurden in mehreren Studien hinsichtlich ihres Emissionsverhaltens untersucht [5-13]. In einigen Studien wurde zur Erfassung und Bewertung der VOC-Emissionen auch das AgBB-Bewertungsschema zugrunde gelegt [14]. Dabei konnten einige OSB-Produkte aus Kiefernholz die Anforderungen des AgBB-Schemas hinsichtlich der VOC-Emissionen nicht erfüllen. Arbeiten an der Universität Hamburg zeigen einen Einfluss der Trocknungsparameter für OSB-Strands auf die resultierenden VOC-Emissionen von OSB-Platten auf, der produktionstechnische Spielraum bei der OSB-Herstellung ist jedoch begrenzt, so dass keine wesentliche Reduktion des Emissionsverhaltens von OSB-Platten erzielt werden konnte [15,16].

Neben dem Emissionspotential der eingesetzten Holzart besitzt der Zerkleinerungsgrad der Holzpartikel (Strands, Späne, Fasern) einen Einfluss auf die VOC-Emissionen, welche mit zunehmendem Zerkleinerungsgrad kleiner werden (Tabelle 2). So variieren die VOC-Emissionen in frisch produzierten Holzwerkstoffen in einem Bereich von ca. $100 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (MDF-Platte mit hohem Laubholzanteil) und in Einzelfällen von mehr als $5000 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (OSB-Platten mit sehr hohem Kiefernholz-Anteil (Tabelle 2).

Tabelle 2: Zusammenstellung typischer VOC-Emissionsraten handelsüblicher Holzwerkstoffe. Messwerte von Emissionskammerprüfungen, ISO 16000-9, Tag 28 [4]. Formaldehyd als VVOC ist nicht miterfasst.

Baustoff	Emissionsrate TVOC ($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)
MDF-Platte	< 150
Spanplatte, Holzmix	< 250
OSB 3/OSB 4, Kiefer	500 - 1'200 (- 5'000)
3-Schichtplatte, Fichte	< 250
3-Schichtplatte, Tanne/Fichte	< 20
Leimholz-Platte, Kiefer	500 – 1'500
Massivholz, Kiefer, Kernholz	5'000 – 10'000
Massivholz, Kiefer, Splintholz	1'000 – 2'000

Bei Verfolgung des zeitlichen Verlaufs der Emissionen ist festzuhalten, dass insbesondere die Terpen-Emissionen in den ersten Wochen nach offener Exposition eines Holzwerkstoffes zur Raumluft stark zurückgehen. Dies ist ebenfalls an Messwerten von Emissionskammerprüfungen ersichtlich. Solange ein Holzwerkstoff über mehrere Wochen ungehindert VOC-Emissionen abgeben kann, ist schnell ein markanter Rückgang der Terpen-Emissionen feststellbar. Weniger günstig ist das zeitliche Emissionsverhalten für die aus Fettsäuren gebildeten Aldehyde. Die zugrundeliegenden Oxidationsreaktionen laufen langsam aber kontinuierlich ab und führen zu langanhaltenden Aldehyd-Emissionen. Durch Lagerung und Transport der Platten in Plattenstapeln und anschließend rascher Verbauung in mehrschichtigen Konstruktionen ist diese ungehinderte Auslüftungsphase in der Praxis - im Gegensatz zum normierten Emissionsprüfkammerversuch - in den Regeln jedoch nicht

gegeben. Holzwerkstoffe aus harzreichen Hölzern (insbesondere OSB-Platten mit hohem Kiefernanteil) stellen auch aufgrund Ihrer Einbausituation ein mittel- bis langfristiges Emissionsquelle für VOC-Emissionen dar.

Zunehmend kommt es in den letzten Jahren auch zu Klagen und Reklamationen von Endverbrauchern aufgrund auffälliger Gerüche in Innenräumen bei neu errichteten Gebäuden oder nach Bauen im Bestand. Auffällige Gerüche sind mittlerweile die am häufigsten genannte Ursache für Untersuchungen zur Raumluftqualität in Gebäuden (noch vor Überprüfung von Richtwerten, auftretenden Reizerscheinungen und Gesundheitsbeschwerden). Eine Reklamation von Fehlgerüchen trifft nicht selten bei Gebäuden in Holzbauweise auf, da die aus OSB entweichenden Aldehyd-Emissionen als olfaktorisch unangenehm empfunden werden («Fehlgerüche») (Abbildung 2).

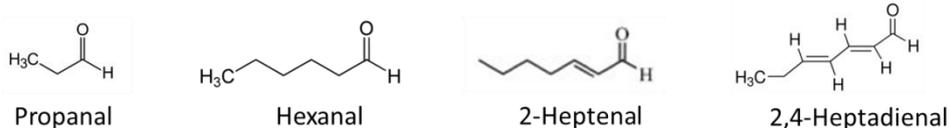


Abbildung 2: Strukturformeln geruchsintensiver Aldehyde aus Holz und Holzwerkstoffen, die beim oxidativen Abbau der im Holz enthaltenen Fettsäuren entstehen und an die Raumluft abgegeben werden

4. Emissionen aus mehrschichtigen Wand- und Dachaufbauten in die Innenraumluft

Weitestgehend unbekannt und empirisch noch nicht erfasst ist das Verhalten von Emissionen aus mehrschichtigen Aufbauten über einen längeren Zeitraum. Dies gilt insbesondere für die Frage der Migration von VOC-Emissionen durch eine oder mehrere darüber liegende Materialschichten in die Raumluft. In Hinblick auf übliche Materialkombinationen in Innenräumen betrifft dies insbesondere die häufig innenseitig eingebauten Gipskarton- oder Gipsfaserplatten mit darüber aufgetragenen Putz- und Farbschichten. Die Fragen a) wie stark zeitverzögert und b) ob eventuell abgeschwächt die Migration von VOC-Emissionen aus darunter eingebauten Holzwerkstoffen erfolgt, wird momentan in einem aktuell an der BFH-AHB durchgeführten Forschungsvorhaben untersucht. Erste Ergebnisse zeigen die hohe Diffusionsoffenheit von Gips-gebundenen Plattenwerkstoffen sowie auch für Wandfarben für VOC-Emissionen aus darunterliegenden Schichten im Wandaufbau.

So kann z.B. bei Gipsfaserplatten bereits nach wenigen Tagen ein Durchschlagen der Emissionen aus dahinter verbauten OSB-Platten im Rahmen von Emissionsprüfkammer-Untersuchungen gemessen werden. Auch darüber aufgetragene Wandfarben auf Latexbasis reduzieren die Emissionen der tiefer liegenden Materialschichten kaum.

5. Bedeutung des Luftwechsels und der Temperatur während und nach der Bauphase

Wie anfangs beschrieben, erfolgen die Raumluftmessungen zur Überprüfung der vertraglich definierten Zielwerte in einem Zeitraum von ein bis drei Monaten nach Abschluss der Bauphase. Diese Zeit steht grundsätzlich zur Verfügung, um Lösemittelmissionen und andere VOC-Emissionen aus dem Gebäude durch intensives Lüften zu entfernen.

Das dies möglich ist, zeigen Versuchsreihen an der BFH-AHB, bei der eine Zusammenstellung häufig eingesetzter Baustoffe, u.a. ein mit PU-Lack beschichtetes Eichenparkett, ein Buntlack- und ein Abrieb-Muster nach vier Wochen in einem Prüfraum mit unterschiedlichen Temperatur- und Luftwechseleinstellungen untersucht wurden ^[4]. Es sollte geklärt werden, ob bestimmte klimatische oder Luftwechsel-Einstellungen das rasche Ausbringen von VOC in den ersten Monaten nach Ende der Bauphase begünstigen. Die Ergebnisse zeigen, dass durch eine intensive Lüftung (Luftwechsel von 1 h^{-1}) ein deutlicher Rückgang der VOC-Emissionen in der Raumluft erzielt werden kann. Umgekehrt kann nach vier Wochen eine um 118 % höhere VOC-Konzentration gemessen werden, wenn ein nur geringer Luftwechsel vorherrschte ($n = 0.1 \text{ h}^{-1}$) (Abbildung 3).

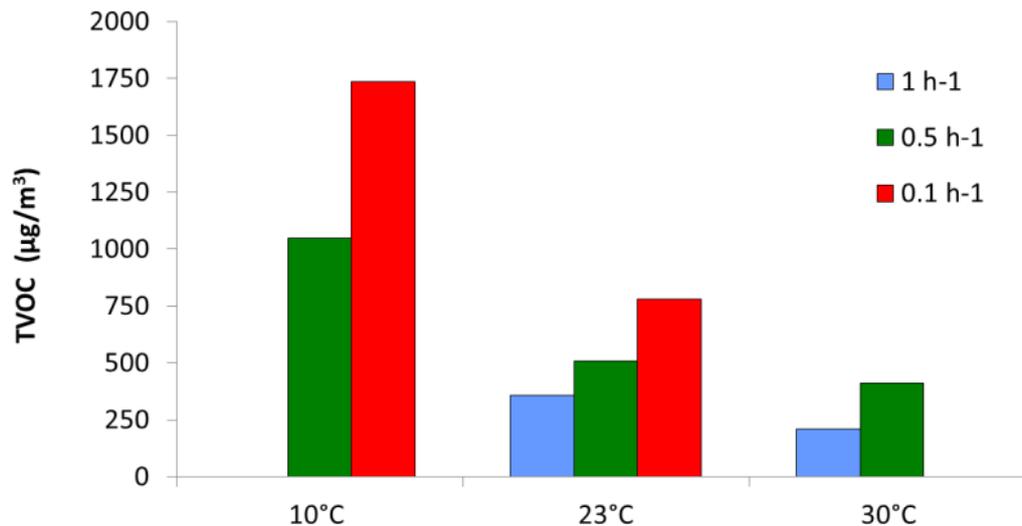


Abbildung 3: Resultierende TVOC-Konzentration in Emissionsprüfkammern vier Wochen nach Einbringen frisch applizierter Baustoffe (lackierter Parkettboden, Buntlack und Abrieb) bei unterschiedlichen Luftwechseln und Temperaturen.

6. Fazit

Die immer häufiger in Werkverträgen festgelegten Zielwerte zum Summenparameter TVOC und zu einzelnen VOC-Stoffgruppen sind für den Holzbau dann schwer einzuhalten, wenn bestimmte Faktoren zusammenkommen. Insbesondere wenn keine raumlufttechnische Anlage verbaut ist (Konsequenz: Raumlufmessung bei Standardbedingungen, für 8 h geschlossener Raum) und großflächig OSB-Platten in Wand- und Deckenaufbauten verbaut sind, liegen die VOC-Konzentrationen in der Innenraumluf teilweise über den Zielwerten. Hinzu kommen immer häufiger Reklamationen der Raumnutzer entsprechender Objekte aufgrund von wahrgenommenen Fehlgerüchen, die ebenfalls mehrheitlich auf Emissionen handelsüblicher OSB-Platten zurückgeführt werden können. Die häufig zum Innenraum hin auf OSB verbauten Baustoffe (z.B. Gipsfaserplatten, Wandfarben) bieten keine effiziente Sperrwirkung gegen die Emissionen tieferliegender Materialschichten in den Innenraum. Kurzfristig kann der Einsatz von 3-Schichtplatten aus Tanne/Kiefern-Mix eine emissions-technische (aber mit Mehrkosten verbundene) Alternative darstellen. Mittelfristig sind insbesondere OSB-Platten, hergestellt aus Holzarten mit geringerem Emissionspotential, eine Option. Holzarten wie Pappel oder Buche sind hierbei aus emissionstechnischer Sicht interessante alternative Holzarten bei der Herstellung von OSB.

7. Literatur

- [1] Umweltbundesamt, Richtwerte Innenraumluft, Stand 10.02.2017, http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/355/bilder/dateien/0_ausschuss_fuer-innenraumrichtwerte_empfehlungen_und_richtwerte20161202.pdf
- [2] Grenzwerteliste 2015, Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz, IFA Report 4/2015, DGUV Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
- [3] Mayer, I. und von Arx, U. 2009-2016, Unveröffentlichte Ergebnisse aus Messungen der Berner Fachhochschule BFH-AHB.
- [4] Akrami, A. 2016, Dissertation Universität Hamburg, 2014
- [5] Roffael, E.; Dix, B.; Schneider, T. WKI-Kurzberichte 2004, 21/04.
- [6] Horn, W.; Jann, O.; Kasche, J.; Bitter, J.; Müller, D.; Final-report UFOPLAN: 202 62 320; Federal Environmental Agency (Germany): 2007.94
- [8] Salthammer, T., Boehme, B., Meyer, B., Siwinski, N. Proceedings of the 7th International Conference Healthy Buildings 2003, 2003; pp 160-165.
- [9] Manninen; Pasanen; Holopainen Science Direct- Atmospheric Environment 2002, 36, 1763-1768.
- [10] Augustin, H.; Puls, J. Timber Bulletin for Europe 1982, 34.
- [11] Roffael, E. Ursachen für Emissionen aus Holz und Holzwerkstoffen. Holz-Zentralblatt, 2006.
- [12] Jann O., Wilke O., Brödner D. UBA-Texte 74/99; UBA - Umweltbundesamt: Berlin, 1999.
- [13] Aehlig, K.; Broege, M. Holztechnologie 2005, 46, 11-17.
- [14] Wilke, Brozowski, Wiegner, Brauer (2013): UMID 1. Schwerpunkt Chemikalien, Umwelt und Gesundheit
- [15] Makowski, M.; Ohlmeyer, M. Holzforschung 2006, 60, 414-422.
- [16] Makowski, M.; Ohlmeyer, M. Holzforschung 2006, 60, 533-538.