

Innenraumklima – Qualitätssicherung bei Neu- und Umbauten

R. Coutalides, L. Eymann

Zusammenfassung Im Beitrag werden die Auswirkungen des „gesunden“ Bauens auf die Qualität des Innenraumklimas von Neu- und Umbauten beschrieben, die mit dem Label GI GUTES INNENRAUMKLIMA® in der Schweiz zertifiziert wurden. Verglichen werden Objekte ohne spezifische Anforderungen an das Innenraumklima bzw. an emissionsarme Bau- und Konstruktionsweise mit Objekten, bei denen ein Schwerpunkt auf „gesundes“ und ökologisches Bauen gelegt wurde. Neben der Beurteilung der Raumluft auf flüchtige organische Verbindungen wird die Qualität der Zuluft, die durch mechanische Lüftungsanlagen in die Räume gebracht wird, anhand des Feinstaubgehalts beurteilt.

Indoor air quality – quality assurance for new and renovated buildings

Abstract In this article, we will describe the impact of “healthful” construction on the indoor air quality in the interior space of new construction and renovations which have been certified in Switzerland with the label GI GUTES INNENRAUMKLIMA®. Without identifying specific requirements for the climate in the interior space or for low-pollution building and construction methods, the properties are compared with other properties, where the emphasis was placed on “healthful” and ecological construction. Besides assessing the indoor air for volatile organic compounds, the quality of the intake air – which the mechanical ventilation equipment delivers into the rooms – is tested for particulate matter content.

1 Einführung

Im Jahre 2006 wurde das Gütesiegel GI GUTES INNENRAUMKLIMA® in der Schweiz lanciert [1]. Es kann von professionellen privaten und öffentlichen Bauherrschaften für Wohn- und Bürobauten als Qualitätssicherungsinstrument bestellt werden. Zur Frage, ob und wie sich die Anstrengungen des gesunden Bauens auf das Innenraumklima auswirken, wurden Abschlussmessungen von VOC (volatile organic compounds, flüchtige organische Verbindungen) und Aldehyden sowie Feinstaubmessungen in der Zuluft in Objekten, für die bauökologische Maßnahmen und die Anwendung der Planungsleistung Innenraumklima vorgeschrieben wurden, mit solchen verglichen, bei denen das nicht der Fall war.

In der vorliegenden Arbeit versteht man unter den begleiteten Objekten (mit Baubegleitung) solche, bei denen die Planungsleistung Innenraumklima als Ganzes oder Teile davon umgesetzt wurden. Bei den nicht begleiteten Objekten (ohne Baubegleitung) wurden keine speziellen Maßnahmen getroffen. Erfahrungsgemäß kann davon ausgegangen werden, dass Baubegleitungen mit dem Ziel eines besseren

Innenraumklimas die Ausnahme in der Baupraxis in der Schweiz darstellen.

Um in Bauprojekten ein gutes Innenraumklima zu erhalten, wurde die Planungsleistung Innenraumklima entwickelt [2]. Dies führte in der Schweiz zu einer Empfehlung der Interessenvereinigung öffentlicher und privater Bauträger KBOB/IPB [3]. Die Planungsleistung Innenraumklima ist eine Handlungsanleitung, die Planer und Bauherrschaft durch den Planungs- und Realisierungsablauf bis zur Abnahme eines Bauprojektes führt, immer mit dem Ziel, ein gutes Innenraumklima zu erreichen. Pro Leistungsbereich werden die erwarteten Ergebnisse, Leistungen/Einblicke des Auftraggebers und zu erbringende Leistungen der Planer formuliert. Zentral ist, dass die Bauherrschaft die wichtigsten Planungsziele zum Innenraumklima festlegt. Diese können verschiedene Bereiche umfassen, wie z. B. sommerlicher Wärmeschutz, Vermeiden erhöhter elektromagnetischer Strahlung, niedrige chemische Schadstoffkonzentrationen in der Raumluft oder niedrige Keim- und Feinstaubkonzentrationen in der Zuluft bei vorhandenen Lüftungsanlagen.

Die Planungsleistung Innenraumklima hält für jede Planungsphase von der Vorstudie bis zur Realisierung bzw. Abnahme des Gebäudes Kernelemente bereit, die in **Tabelle 1** zusammengestellt sind.

Die Überprüfung des Innenraumklimas kann sich an verschiedenen Standards orientieren. Die umfassendsten und anspruchsvollsten Anforderungen an das Innenraumklima stellt das Label GI GUTES INNENRAUMKLIMA® [4]. Gemessen und bewertet werden ca. 100 Einzelsubstanzen (VOC) in zwölf chemischen Stoffklassen, eine Reihe von Aldehyden sowie Keime und Feinstaub in der Zuluft bei vorhandenen Lüftungsanlagen. Auch Gebäude im Bestand (mindestens fünf Jahre nach letzten substanziellen Bauarbeiten oder Erneuerungsarbeiten im Gebäude) können zertifiziert werden. Zusätzlich werden hier Kohlendioxid- und Radonmessungen verlangt sowie ein Gebäudecheck auf Gebäudeschadstoffe wie Asbest, polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) bzw. polychlorierte Biphenyle (PCB) [5]. In diesem Beitrag werden im Schwerpunkt die Raumluftmessungen auf VOC und Aldehyde in Neu- und Umbauten sowie die Feinstaubmessungen in der Zuluft in Neu- und Umbauten bei vorhandenen Lüftungsanlagen diskutiert.

2 Methodik

Die Abschlussmessungen auf VOC und Aldehyde wurden 30 bis 100 Tage nach letzten Bauarbeiten unter Standardbedingungen durchgeführt, d. h. am Vorabend der Messung wurde nochmals intensiv gelüftet, dann wurden die Fenster geschlossen und nach rund acht Stunden erfolgte die aktive Probenahme. In Gebäuden mit Lüftungsanlagen wurde die Lüftungsanlage am Vorabend der Messungen abgeschaltet, dann ebenfalls über die Fenster gelüftet und nach rund acht Stunden erfolgte die Probenahme bei abgeschalteter Lüf-

Reto Coutalides, Lea Eymann,

BAU- UND UMWELTCHEMIE Beratungen +
Messungen AG, Zürich, Schweiz.

Tabelle 1. Planungsleistung Innenraumklima.

Kernelemente	Erwartete Ergebnisse und Dokumente
Vorstudien	
Personelle Zuweisung des Themas in der Projektorganisation der Bauherrschaft	Organisation des Vorgehens
Formulieren einer Zielvorgabe Innenraumklima (Absichtserklärung) und der projektspezifischen Planungsschwerpunkte	Zielvorgabe Innenraumklima
Immissionsanalyse des Grundstückes	Immissionskataster
Projektanforderungen bei verschiedenen Auswahlverfahren (Architekturwettbewerb, Generalunternehmen etc.) definieren	Kriterienlisten mit definierten Planungsschwerpunkten
Projektierung	
Planungsleistung Innenraumklima festlegen und in Planerverträgen vereinbaren	Planungsleistung Innenraumklima
Schadstoffanalyse der Bausubstanz bei Umbau- und Sanierungen	Schadstoffkataster, Gebäudescreening, Gebäudecheck
Bewertung der Materialien, Anlagen- und Gebäudekonzepte entsprechend Zielvorgabe	Kriterien Konzeptbewertung
Festlegung Zielvereinbarung mit konkreten Werten und Parametern	Zielvereinbarung Innenraumklima
Anforderungen für Betrieb und Unterhalt durch die Bauherrschaft festlegen	Anforderungskatalog
Optimierung von Gebäude-, Anlagen- und Materialkonzepten entsprechend Zielvereinbarung	Optimierte Projektkonzepte des Bauprojektes
Ausschreibung	
Ausschreibungs- und Vergabeverfahren sowie Eignungs- und Zuschlagskriterien bezüglich Innenraumklima definieren	Definierte Zuschlagskriterien
Qualitätssicherung im Submissionsverfahren umsetzen	Bereinigte Angebote
Vergabe von Materialien und Anlagen nach raumluftrelevanten Kriterien	Vergabe
Realisierung	
Erstellen der Baubeschriebe/Detailpläne entsprechend Zielvereinbarung	Baubeschrieb
Information der Lieferanten und Unternehmer über die Zielvereinbarung	Informationsschreiben, Startsitung
Baustellenkontrolle	Protokolle
Überwachung des Terminprogrammes bezüglich Austrocknungs- und Auslüftungszeit	Terminprogramm
Abnahme des Bauwerkes	Abnahmeprotokolle, Abnahmemessungen, Label, Zertifikate

zung. Die Probenahme für den Feinstaub in der Zuluft erfolgte entweder vor oder nach den Raumluftmessungen bei laufender Lüftung. Die Räume durften bis zur Messung nicht mehr betreten, teilweise konnten sie abgeschlossen werden. Ebenfalls wurde darauf geachtet, dass im Gebäude unmittel-

bar vor den Messungen keine Gebäudereinigung und andere Arbeiten stattfanden, bei denen Emissionen entstehen könnten. Gemessen wurde, wenn möglich, in unmobiliertem Zustand. Objekte, die bei den ersten Abschlussmessungen überschrittene Zertifikatswerte aufwiesen, konnten aufgrund der Zertifizierungsanforderungen innerhalb der 30 bis 100 Tage nochmals nachgemessen werden.

Verglichen wurden 18 zertifizierte Objekte mit ökologischer Baubegleitung (Umsetzung der Planungsleistung Innenraumklima bzw. Teile derselben) mit 48 bzw. 44 Objekten ohne Umsetzung der Planungsleistung Innenraumklima. Die Nachmessungen wurden zusammen mit den Erstmessungen pro Objekt ausgewertet und für die Gesamtstatistik berücksichtigt.

In der Gruppe der zertifizierten Objekte wurden insgesamt $n = 124$ Messungen auf VOC und $n = 115$ Messungen auf Aldehyde durchgeführt; in der Gruppe der nicht zertifizierten, nicht begleiteten Objekte $n = 104$ Messungen auf VOC und $n = 91$ Messungen auf Aldehyde.

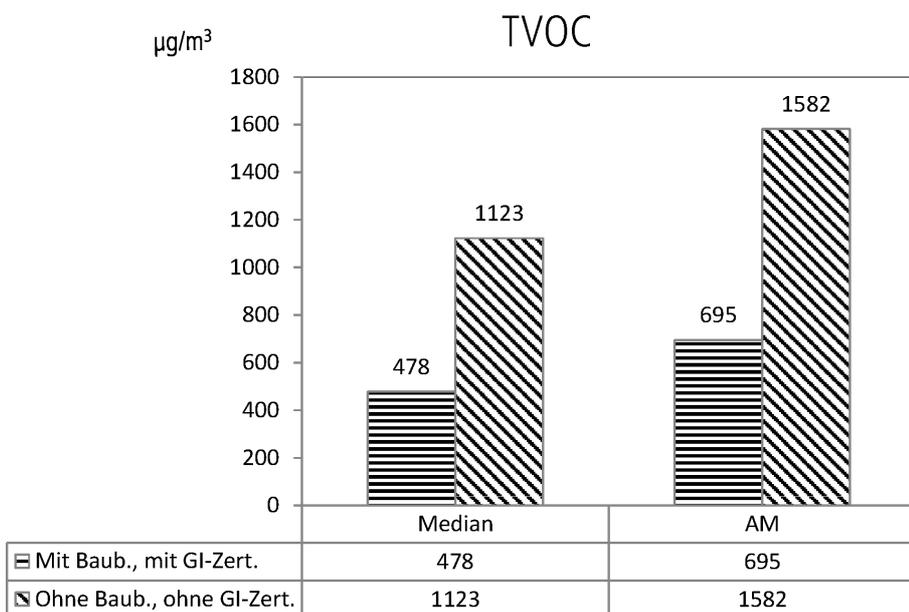


Bild 1. Vergleich des arithmetischen Mittels (AM) und des Medians der TVOC-Konzentrationen von Objekten mit und ohne Baubegleitung. Baub. = Baubegleitung, GI-Zert. = Gütesiegel GI GUTES INNENRAUMKLIMA

3 Ergebnisse

Von den 18 untersuchten zertifizierten Gebäuden mussten sieben nochmals nachgemessen werden. Bei vier Objekten lagen die TVOC-Konzentration und Konzentrationen von Einzelsubstanzen bei den Erstmessungen über den geforderten Zertifikatswerten, bei drei Objekten die Feinstaubwerte in der Zuluft. Die **Bilder 1 bis 5** sowie die **Tabellen 2 bis 4** fassen die Ergebnisse zusammen.

4 Anforderungen an die Analytik

4.1 VOC-Messungen

Die Probenahme erfolgt in Anlehnung an SN EN ISO 16000-5 [6]. Für die VOC-Messungen wird TENAX TA als Trägermaterial mit anschließender Thermodesorption verwendet. Die Identifizierung und Quantifizierung erfolgt über Gaschromatographie/Massenspektrometrie (GC/MS) in Anlehnung an DIN ISO 16000-6 [7]. VOC umfassen alle auf TENAX TA adsorbierbaren und identifizierten Stoffe im angegebenen Retentionszeitbereich zwischen n-Hexan und n-Eicosan. Die identifizierten Stoffe werden oberhalb der pro Substanz angegebenen Bestimmungsgrenze berücksichtigt (2 bis 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), die nicht identifizierten Signale oberhalb von 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nach gaschromatischer Trennung wird die Konzentration der einzelnen im genannten Bereich identifizierten Verbindungen unter Verwendung des jeweils für sie gültigen Responsefaktors mittels externer Standards ermittelt. Weiter wird die Fläche der nicht identifizierten Verbindungen betrachtet. Mithilfe des Responsefaktors der Referenzverbindung Toluol wird die der Referenzverbindung äquivalente Konzentration der noch nicht quantifizierten Verbindungen errechnet. Zur Berechnung des TVOC werden diejenigen Aldehyde, die mit der DNPH-Methode erfasst wurden, vom Wert der mit der Thermodesorptionsmethode gemessenen abgezogen. Die Zertifikatswerte des Labels GI GUTES INNENRAUMKLIMA® für die einzelnen Stoffklassen dürfen nicht überschritten werden, auch wenn die Forderung TVOC $\leq 1\ 000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ erfüllt ist. Stoffe, die weder identifiziert noch einer Stoffklasse zugeteilt werden können, dürfen einen Anteil von 15 % des TVOC nicht übersteigen. Ist die ausgewiesene Restkonzentration höher als 15 %, so ist dies zu begründen. Stoffe, die gefunden, aber nicht in der Liste aufgeführt werden, müssen einzeln beurteilt werden. Dabei wird in Analogie zur Herleitung der Zertifikatswerte vorgegangen [4].

4.2 Aldehydmessungen

Als Träger für Aldehyde sind DNPH-Kartuschen zu verwenden. Die Analyse erfolgt nach DIN ISO 16000-3 [8]. Die identifizierten und aufgelisteten Stoffe werden oberhalb der Bestimmungsgrenze von 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ berücksichtigt.

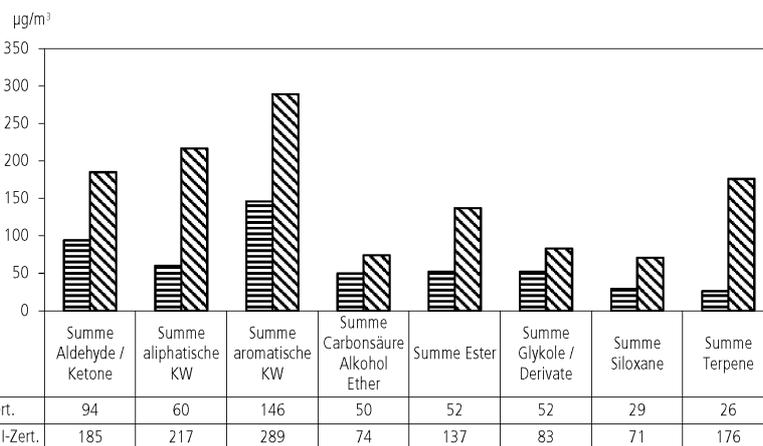


Bild 2. Vergleich der AM ausgewählter Summenkonzentrationen verschiedener relevanter Substanzklassen in Objekten mit und ohne Baubegleitung. KW = Kohlenwasserstoffe

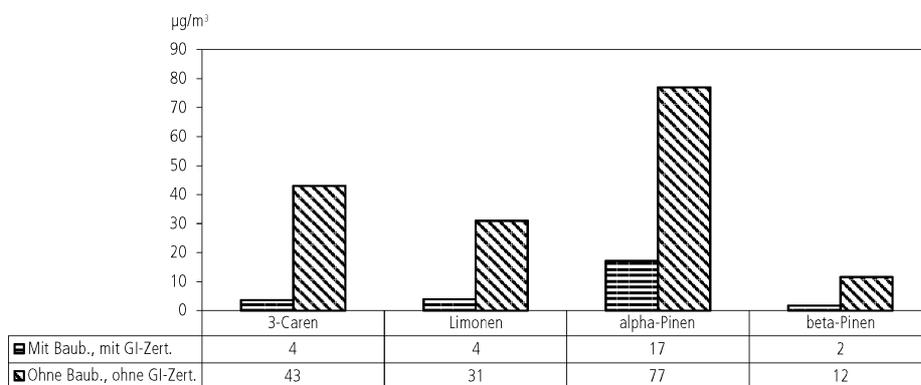


Bild 3. Vergleich der AM von Einzelstoffen einiger in der Raumluft von Holzbauten typischer Verbindungen zwischen Bauten mit und ohne Baubegleitung.

4.3 Feinstaubmessungen

Die Probenahme und Messung erfolgte nach VDI 3867 Blatt 1 [9] bzw. ISO 7708 [10] mit einem Partikelmessgerät von Grimm (DUSTcheck Serie 1.100, Modell 1.108), das auf einer Streulichtmessung mit Laser- und Fotodiode oder einem gleichwertigen Messsystem basiert. Pro Messpunkt muss die Messung so lange ausgeführt werden, bis ein stabiler Messwert erreicht wird, mindestens jedoch 10 min. Als Messwert gilt der Durchschnittswert der letzten 5 min der Messung. Die Messung erfolgt unter isokinetischen Bedingungen.

5 Diskussion

5.1 Lösemittel

Der Median der TVOC-Konzentrationen (Zertifikatswert $\leq 1\ 000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) in Objekten mit Baubegleitung (478 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) ist etwa halb so groß wie in Objekten ohne Baubegleitung (1 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Die Messungen zeigen aber auch, dass es sich in Einzelfällen trotz Kontrolle der Produkte und Baustellenkontrollen nicht vermeiden lässt, dass Produkte eingesetzt werden, die die Raumluft in den ersten Wochen stark belasten können. So wurde in einem Mehrfamilienhaus mit Baubegleitung 30 Tage nach Bauende ein maximaler TVOC-Wert von 11 127 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ gefunden. Rund 80 % davon waren aliphatische Kohlenwasserstoffe eines Gemischs aus n-Nonan bis n-Dodecan (Glykolderivate ca. 2 %). Die Nachmessung 100 Tage nach Bauende erbrachte einen TVOC-Wert von 440 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, der Anteil aliphatischer Kohlenwasser-

Tabelle 2. Aldehyd-Abschlussmessungen (n) der begleiteten Objekte N, (N = 18, n = 113) gegenüber Objekten ohne Baubegleitung (N = 44, n = 91).

Stoff Bezeichnung	CAS	GI-Wert	Mit Baubegleitung & mit GI-Zertifizierung							Ohne Baubegleitung & ohne GI-Zertifizierung						
			Max	AM	Median	P95	P90	Std. Abw.	Häufigkeit in %	Max	AM	Median	P95	P90	Std. Abw.	Häufigkeit in %
Summe Aldehyde/ Ketone		–	1366	297	249	727	508	205	100	4129	743	413	2870	2124	900	100
Formaldehyd	50-00-0	60	68	29	26	50	46	13	100	297	55	41	165	117	48	100
Acetaldehyd	75-07-0	200	142	33	26	86	71	26	98	524	86	48	375	196	112	99
Acrolein	107-02-8	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aceton	67-64-1	0	608	129	89	330	235	111	99	3725	278	143	701	574	482	100
Propionaldehyd	123-38-6	20	31	6	0	20	15	7	49	148	22	12	74	51	30	73
Crotonaldehyd	4170-30-3	5	0	0	0	0	0	0	0	537	11	0	0	0	74	4,4
Methacrolein	78-85-3	–	8,0	0	0	0	0	1	0,9	10	0	0	2	0	2	5,3
Methylethylketon/ 2-Butanon	78-93-3	200	323	58	37	179	137	65	86	2418	92	11	268	186	301	56
n-Butanal	123-72-8	60	28	4	0	14	12	5	40	71	9	0	45	33	16	45
Benzaldehyd	100-52-7	50	54	6	0	34	24	12	29	40	7	6	25	22	9	52
Isovaleraldehyd	590-86-3	60	11	0	0	0	0	2	4,4	36	2	0	16	7	7	14
n-Pentanal	110-62-3	60	50	5	0	18	13	8	44	375	38	11	186	103	69	70
Glutaraldehyd	111-30-8	20	19	1	0	13	8	4	12	60	1	0	4	0	7	6,0
o-Tolualdehyd	529-20-4	–	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
m,p-Tolualdehyd	620-23-5/ 104-84-0	–	35	0	0	0	0	3	0,9	7	0	0	0	0	1	1
n-Hexanal	66-25-1	60	191	25	22	70	52	25	93	801	104	40	439	290	163	92,0
2,5-Dimethylbenzaldehyd	5779-94-2	–	0	0	0	0	0	0	0	1317	27	0	0	0	179	2,0

stoffe betrug noch rund 7 %, der Anteil von Glykolderivaten stieg auf ca. 20 %. Die Quelle der aliphatischen Kohlenwasserstoffe ist ein Teppichreinigungsmittel, das bei der Baureinigung eingesetzt wurde und nach Deklaration einen aliphatischen Anteil an Kohlenwasserstoffen von > 30 % aufwies. Von diesem Produkt wurde bei der Begleitung ausdrücklich abgeraten.

Bei einem unbegleiteten vierstöckigen energieeffizienten Mehrfamilienhaus fand man einen TVOC von 10 582 µg/m³. Etwa 77 % des gesamten maximalen TVOC-Wertes werden von aliphatischen Kohlenwasserstoffen im ungefähren Retentionsbereich von n-Nonan bis n-Tridecan beigesteuert. Die hohen Konzentrationen von aliphatischen Kohlenwasserstoffen können wahrscheinlich, laut mündlicher Auskunft eines Objektverantwortlichen, auf die Verwendung eines lösemittelhaltigen Parkettpflegemittels zurückgeführt werden.

Der maximale Benzylalkoholwert von 173 µg/m³ wurde bei der ersten Zertifikatsmessung (Zertifikatswert ≤ 100 µg/m³) in einem umgebauten Laborgebäude gemessen. Die Quelle war eine Grundierung für ein Beschichtungssystem. Gemäß Deklaration enthielt das Produkt > 40 % Benzylalkohol. Von der Bauherrschaft wurde ein Epoxydharz-Bodenbelag gewünscht. Benzylalkohol wird bei der Verarbeitung von Epoxydharz-Bodenbelägen als Lösemittel verwendet. Benzaldehyd (Zertifikatswert ≤ 50 µg/m³) entsteht durch Oxidation aus Benzylalkohol. Dementsprechend wurde der maximale Benzaldehydwert von 47 µg/m³ bei den Zertifikatsmessungen in diesem Objekt gefunden.

Nach Umbau eines vierstöckigen Bürogebäudes ohne Baubegleitung fand man 30 Tage nach den letzten Bauarbeiten relativ hohe Konzentrationen von Benzylalkohol (143 µg/m³) und 50 µg/m³ Benzaldehyd. Nach neunzig Tagen überprüfte man dieselben Räume und fand 190 µg/m³ Benzylalkohol und 140 µg/m³ Benzaldehyd bei vergleichbaren Raumtemperaturen. Der Benzylalkohol stammte auch hier aus dem Bodenbelag.

Ein weiterer geruchsintensiver Einzelstoff ist Styrol (Zertifikatswert ≤ 70 µg/m³). Im gleichen Objekt wurde ein maximaler Styrolwert 30 Tage nach Bauende von 50 µg/m³ gemessen, neunzig Tage nach Bauende konnte Styrol nicht mehr nachgewiesen werden.

Hohe Terpenkonzentrationen findet man in Holzbauten. Die maximale Summenkonzentration (Zertifikatswert ≤ 400 µg/m³) von Terpenen 45 Tage nach Bezug eines Objekts ohne Baubegleitung betrug 1 422 µg/m³. Den größten Anteil dabei machten Limonen (68 %) und α-Pinen (18 %) aus, gefolgt von Δ³-Caren (11 %), und β-Pinen (3 %). Bei dem Objekt handelt es sich um ein energieeffizientes Mehrfamilienhaus in Holzbauweise, der Boden im gemessenen Wohnzimmer bestand aus einem Lärchen-Dreischichtparkett, geölt mit einem stark lösemittelhaltigen „Bio-Holzbodenöl“, der Wandaufbau aus Spanplatten und Gipsfaserplatten und die Decke war mit OSB-Platten ausgeführt.

Die höchste Summenkonzentration von Glykolderivaten (Zertifikatswert ≤ 300 µg/m³) wurde 30 Tage nach Bauende, unmittelbar vor Bezug in einem energieeffizienten Schulhaus ohne Baubegleitung gemessen (1 167 µg/m³). Im gleichen Schulzimmer wurde ein TVOC von 5 353 µg/m³,

eine Summenkonzentration von Terpenen von 832 µg/m³ und von aromatischen Kohlenwasserstoffen von 1 136 µg/m³ gemessen. Das Schulhaus war mit einer mechanischen Lüftungsanlage ausgestattet. Drei Monate später wurden die gleichen Räume nochmals unter Standardbedingungen gemessen. Zwischenzeitlich wurde ein spezielles Lüftungsregime eingeführt (Mai bis August). Die Lüftung wurde auch nachts betrieben und die Schulräume wurden mehrmals täglich zusätzlich über die Fenster gelüftet. Der TVOC lag noch bei 426 µg/m³, die Summe der Glykolderivate bei 220 µg/m³, die Summenkonzentration Terpene und die Summenkonzentration der aromatischen Kohlenwasserstoffe bei 39 µg/m³. Diese Messungen zeigen, dass Lüftungsanlagen im Normalbetrieb (Luftwechsel ca. 0,2 bis 0,5 h⁻¹) in energieeffizienten Gebäuden nur beschränkt dazu geeignet sind, Schadstoffemissionen aus Baumaterialien abzulüften, da die Luftwechselraten dafür meist nicht ausreichen und man um eine Planung von emissionsarmen Materialien und Konstruktionen nicht umhin kommt.

5.2 Aldehyde/Ketone

Bei den Aldehyden zeigt sich, dass sowohl bei den maximal gefundenen Konzentrationen als auch bei den Mittelwerten, mit Ausnahme von Glutaraldehyd und Benzaldehyd, alle gemessenen Konzentrationen in der Raumluft von Gebäuden

mit Baubegleitung niedriger liegen als in Gebäuden, in denen keine Baubegleitung oder Optimierung der Emissionen der eingesetzten Materialien stattfand. Ohne Baubegleitung lagen die Konzentrationen in einem Bereich, der raumluft-hygienisch abgeleitete Richtwerte teils deutlich überschritt. Sehr hohe Summenwerte an Aldehyden und Ketonen fand man überall dort, wo trocknende Öle (Parkettöle) verwendet wurden, so auch in einem Wohnhaus in Holzbauweise. Es wurde ein maximaler Wert von 4 129 µg/m³ gemessen, davon entfallen 3 725 µg/m³ auf Aceton. Untersuchungen in

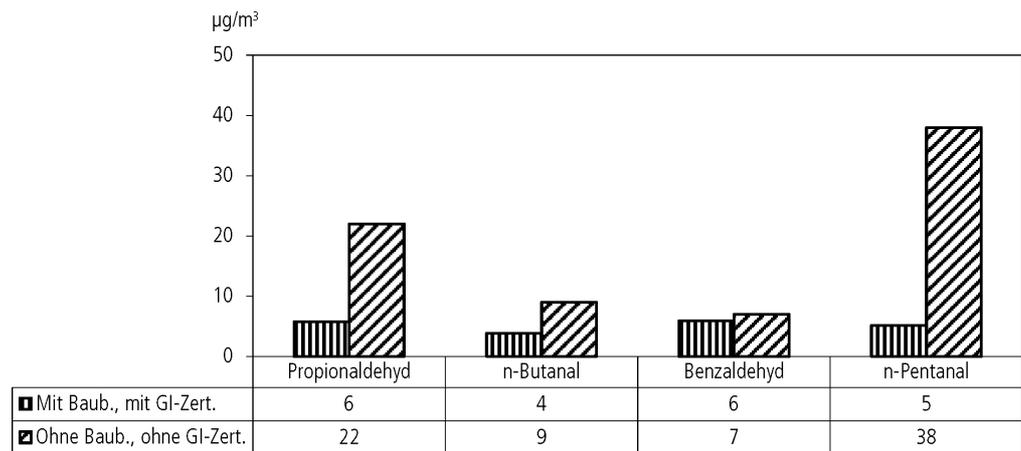
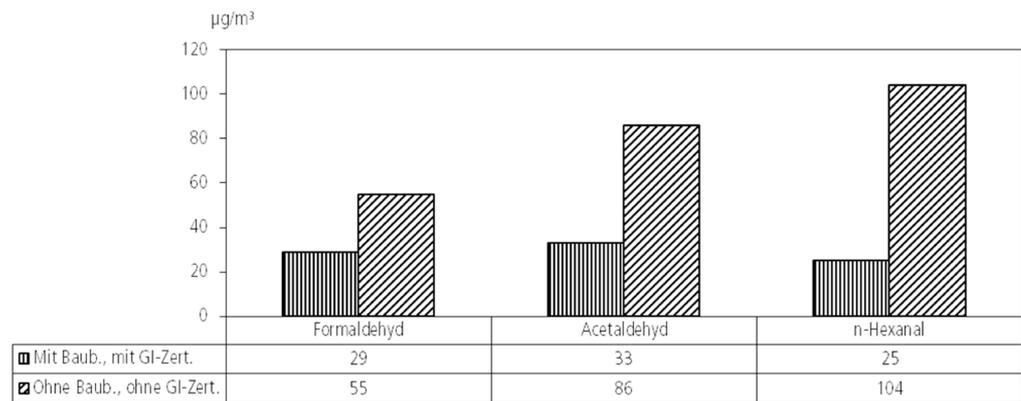


Bild 4a und b. Vergleich der arithmetischen Mittel (AM) verschiedener Aldehyde zwischen Bauten mit und Bauten ohne Baubegleitung.

Tabelle 3. Feinstaubmessungen (n) der begleiteten Objekte (N = 28, n = 70 bzw. N = 27, n = 60) gegenüber den Objekten ohne Baubegleitung (N = 11, n = 33 bzw. N = 8, n = 30).

Messgröße	Durchmesser	GI-Wert (Partikel/Liter)	n	Mit Baubegleitung							Ohne Baubegleitung							
				Max	AM	Median	P95	P90	Std. Abw.	Häufigkeit in %	n	Max	AM	Median	P95	P90	Std. Abw.	Häufigkeit in %
Feinstaub	> 0,8 µm	≤ 150	70	2340	284	77	1744	940	532	96	33	8044	479	73	1648	582	1449	100
Feinstaub	> 2,0 µm	≤ 10	60	204	13	3	41	29	30	70	30	950	60	4	314	61	193	77

Tabelle 4. Feinstaubmessungen (n) im Rahmen von Hygieneinspektionen von Lüftungsanlagen in der Schweiz [13] (N = 33, n = 47 bzw. N = 30, n = 40).

Messgröße	Durchmesser	GI-Wert (Partikel/Liter)	n	Zuluftmessungen bei Hygieneinspektionen						
				Max	AM	Median	P95	P90	Std. Abw.	Häufigkeit in %
Feinstaub	> 0,8 µm	≤ 150	47	6606	369	166	874	535	986	100
Feinstaub	> 2,0 µm	≤ 10	40	137	16	4	52	44	26	90

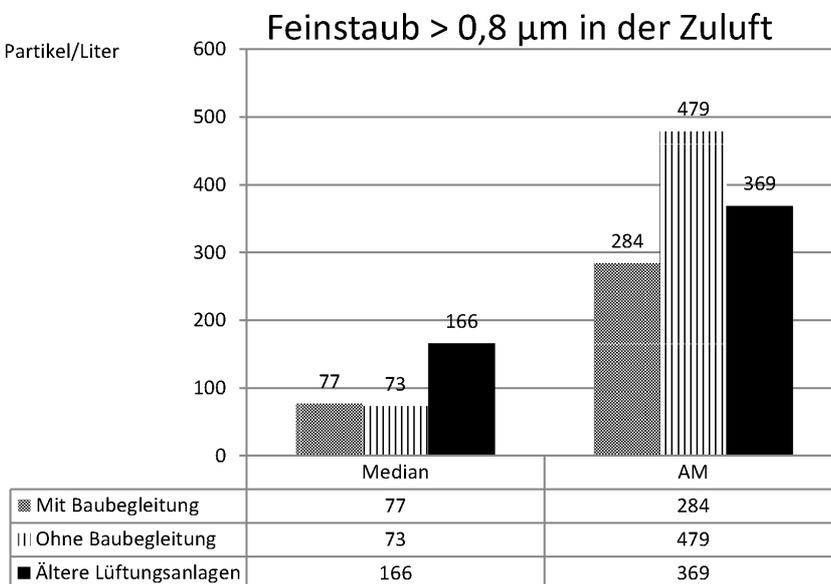
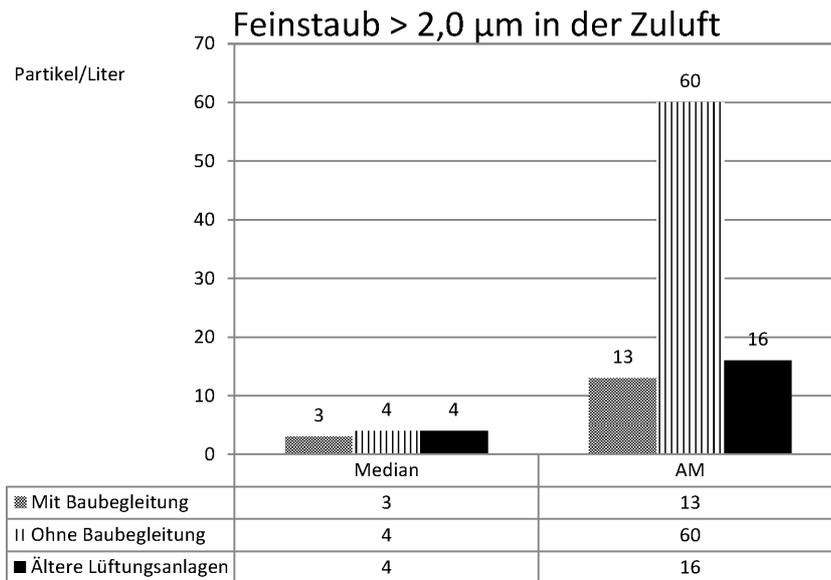


Bild 5a und b. Vergleich der arithmetischen Mittel und Mediane von Feinstaubmessungen in der Zuluft von Lüftungsanlagen in Neubauten im Vergleich zu Feinstaubmessungen in der Zuluft von Lüftungsanlagen in Bestandsbauten (ältere Lüftungsanlagen) in der Schweiz.

neu erstellten Wohnbauten aus Holz [11] zeigten, dass bei Verwendung von Bodenölen für die Parkettbehandlung neben sehr hohen Konzentrationen der verschiedenen Aldehyde auch hohe Lösemittelkonzentrationen in der Raumluft generiert werden und dass bei falscher Behandlung Depots gebildet werden können, die über Jahre hohe Lösemittel- und Aldehydemissionen verursachen [2].

Der maximale Acetaldehydwert (524 µg/m³) und Propionaldehydwert (148 µg/m³) wurde in einem neu erstellten energieeffizienten Schulgebäude in Holzbauweise gefunden. Glutaraldehyd kommt in Reinigungsmitteln vor und es wird davon ausgegangen, dass der gemessene Glutaraldehyd sowohl in begleiteten als auch nicht begleiteten Objekten aus den Reinigungsmitteln in die Raumluft gelangte. Der maximale 2-Butanonwert (2 418 µg/m³) wurde 28 Tage nach Einbringen eines Polyurethanbodenbelags in einer großen Nasszelle gemessen. Eine Nachmessung ergab 100 Tage nach Einbringung einen Wert von 112 µg/m³. Der maximale Hexanalwert (801 µg/m³) wurde in einem Einfamilienhaus in Holzbauweise drei Wochen nach Fertigstellung gemessen.

70 Tage danach betrug der Wert noch 113 µg/m³. Benzaldehyd als Oxidationsprodukt wurde im Zusammenhang mit den Bodenbelägen weiter oben schon diskutiert.

Die Ergebnisse der Formaldehydmessungen decken sich auch mit den Erfahrungen der Autoren mit Gebäuden, in denen Holzwerkstoffe großflächig verwendet wurden [2]. Mit der Verwendung von Holzwerkstoffen der Emissionsklasse E1 können bei großflächiger Verwendung in dichten Gebäuden mit geringem Luftwechsel Raumluftkonzentrationen von Formaldehyd unter 125 µg/m³ nicht garantiert werden. Das Erreichen des GI-Zertifikatswerts von 60 µg/m³ ist ohne eine gezielte Auswahl emissionsarmer Holzwerkstoffe ebenfalls nicht zu garantieren. Der maximale Formaldehydwert von 297 µg/m³ (Temperatur 25,5 °C, 55 % rel. Feuchte) wurde in einem 2012 neu erstellten Schulgebäude in Holzbauweise ohne Baubegleitung gemessen. Im gleichen Raum fand man eine Hexanalkonzentration von 336 µg/m³. Nachmessungen im Mai des darauf folgenden Jahres in jeweils fünf verschiedenen Unterrichtsräumen ergaben unter Standardbedingungen Formaldehydwerte zwischen 133 und 178 µg/m³ bei moderaten Temperaturen zwischen 22 und 24 °C und 45 % rel. Feuchte. Die Hexanalkonzentrationen sanken im gleichen Zeitraum und es wurden noch Konzentrationen von 96 bis 159 µg/m³ gemessen. Daraufhin wurden an verschiedenen Stellen im Gebäude an verbauten Holzwerkstoffen Emissionsmessungen und zusätzliche Messungen der Holzwerkstoffe in der Prüfkammer durchgeführt. Dabei stellte man fest, dass formaldehydverleimte Tischler- und Dreischichtplatten verwendet wurden, die relativ hohe Formaldehydemissionen aufwiesen. Diese Platten wurden als Deckenplatten in die Schulzimmer eingebaut.

In der Schweiz ist es in den letzten Jahren in neu erstellten Holzbauten zu kostenintensiven Sanierungen wegen zu hoher Formaldehydwerte gekommen. Durch eine sorgfältige Planung und Ausführung ist es aber möglich, auch in großen Bauten in Holzbauweise, wie das neu erstellte Verwaltungsgebäude des Bundesamtes für Raumentwicklung ARE [12] in Ittigen in der Nähe von Bern zeigt, sehr niedrige Formaldehydkonzentrationen trotz der Verwendung von viel Holz im Innenausbau zu erreichen. Die Messungen in insgesamt acht Räumen ergaben maximale Formaldehydkonzentrationen von 35 µg/m³.

5.3 Feinstaubmessungen

Die Zertifikatsanforderungen [5] beim Gütesiegel GI GUTES INNENRAUMKLIMA® verlangen, dass die Zuluft in die Räume auf Feinstaub und Keime (Schimmelpilze und Bakterien) überprüft werden muss. In Gebäuden mit mechanischen Lüftungsanlagen waren bei den Erstmessungen vor allem die Feinstaubwerte in der Zuluft, verglichen mit den geforderten Zertifikatswerten zu hoch (17 % der Objekte). In diesen Fällen konnten durch eine Nachreinigung der Anlagen

die geforderten Werte anschließend erreicht werden. Solche Überprüfungen mit Abschlussmessungen haben zudem den Vorteil, dass Missstände entdeckt werden. So stellte man z. B. in einem großen neu erstellten Bürogebäude (2 500 Arbeitsplätze) im Passivhausstandard mit mechanischer Lüftungsanlage fest, dass auf einzelnen Stockwerken gar keine Zuluft strömte, obwohl die Anlage von den Lüftungstechnikern abgenommen war.

Die Feinstaub- und Keimmessungen der Zuluft bei vorhandenen Lüftungsanlagen helfen weiter, den Verschmutzungsgrad der ausgeführten Lüftungsanlagen zu beurteilen. Zudem ist die Messung des Feinstaubes in der Zuluft ein einfaches Qualitätssicherungsinstrument, um die Reinigungswirkung der Lüftungsanlage zu überprüfen. In einer Studie, in der ausschließlich energieeffiziente Eigenheime in Holzbauweise mit mechanischer Lüftungsanlage untersucht wurden, stellte man fest, dass in 80 % der Fälle Grobfilter G4 anstelle der geforderten Feinstaubfilter F7 eingebaut waren. Eine Reinigungswirkung von feineren Partikeln war so nicht möglich. Die Auswertung der Messergebnisse in dieser Arbeit zeigt, dass im Mittel (Median) etwa die gleichen Feinstaubbelastungen der Zuluft in begleiteten wie in nicht begleiteten Neubauten gemessen werden, dass aber die maximalen Konzentrationen in den nicht begleiteten Objekten deutlich höher lagen als in begleiteten Objekten. Weiter zeigt sich, dass die gröberen Partikel $> 2,0 \mu\text{m}$ besser zurückgehalten werden als die feineren $> 0,8 \mu\text{m}$, was mit Art und Qualität der installierten Filter und deren korrekter Installation zusammenhängt. Die Zertifikatswerte lagen bei den kleinen Partikelgrößen $> 0,8 \mu\text{m}$ in Bestandsbauten sowohl im Median als auch im arithmetischen Mittel über den geforderten Werten. Ob sich dies bei einer größeren Anzahl gemessener Gebäude bestätigt, ist noch zu untersuchen. Vergleicht man die Feinstaubwerte in der Zuluft von begleiteten Gebäuden mit den Werten, die bei Hygieneinspektionen von Lüftungsanlagen mit erhoben wurden [13] (Messungen nicht aufgrund von gesundheitlichen Klagen durchgeführt), so stellt man fest, dass die Anlagen in Neubauten bei den kleineren Partikeln ($> 0,8 \mu\text{m}$) deutlich niedrigere Konzentrationen aufweisen. Anders formuliert: Lüftungsanlagen müssen regelmäßig gewartet und gereinigt werden, um eine gute Zuluftqualität zu garantieren, was leider in der Praxis eher die Ausnahme als die Regel darstellt [13].

6 Fazit

Die Anwendung bauökologischer Kriterien und Baustellenkontrollen reduziert die Belastung des Innenraumklimas mit Aldehyden und VOC. Werden zusätzlich für die Raumluft Zielwerte für Einzelsubstanzen vorgeschrieben, können meist deutlich niedrigere Werte in begleiteten Neubauten erreicht werden. Solche Begleitungen sind ein zusätzlicher Aufwand. Auswertungen an mittleren bis großen Gebäuden haben ergeben, dass sich die Kosten einer Begleitung einschließlich der Abschlussmessungen und Zertifizierung auf

einige Promille der Baukosten belaufen. Vergleichsmessungen mit anderen Gebäudelabeln zeigen zudem, dass rein planerische Vorgaben allein nicht ausreichen, die gesetzten Ziele zu erreichen. Vor allem Baustellenkontrollen während des Innenausbaus sind aufgrund unserer Erfahrung unabdingbar. Ein guter Einbezug der Bauleitung sowie Schulungen der Handwerker helfen zudem, die Qualität hinsichtlich eines guten Innenraumklimas zu steigern.

Literatur

- [1] Schiegg, Y.: Neues Label „Gutes Innenraumklima“. tec21 (2006) Nr. 15, S. 18-21.
- [2] Coutalides, R. (Hrsg.); Sträuli, W.: Innenraumklima – Wege zu gesunden Bauten. 2. Aufl. Zürich: Werd 2009.
- [3] Gutes Innenraumklima ist planbar. Hrsg.: Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren (KBOB). Empfehlung 2004/1. www.bbl.admin.ch/kbob
- [4] Coutalides, R.; Heinss, U.; Thalmann, P.: Ein neues Schweizer Label für die Zertifizierung des Innenraumklimas. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 67 (2007) Nr. 3, S. 63-69.
- [5] www.innenraumklima.ch
- [6] SN EN ISO 16000-5: Innenraumluftverunreinigungen – Teil 5: Probenahmestrategie für flüchtige organische Verbindungen (VOC). Winterthur, Schweiz 2007.
- [7] DIN ISO 16000-6: Innenraumluftverunreinigungen – Teil 6: Bestimmung von VOC in der Innenraumluft und in Prüfkammern, Probenahme auf TENAX TA®, thermische Desorption und Gaschromatographie mit MS/FID. Berlin: Beuth 2012.
- [8] DIN ISO 16000-3: Innenraumluftverunreinigungen – Teil 3: Messen von Formaldehyd und anderen Carbonylverbindungen in der Innenraumluft und in Prüfkammern – Probenahme mit einer Pumpe. Berlin: Beuth 2013.
- [9] VDI 3867 Blatt 1: Messen von Partikeln in der Außenluft – Bestimmung der Partikelkonzentrationen und Anzahlgrößenverteilung von Aerosolen – Grundlagen. Berlin: Beuth 2009.
- [10] ISO 7708: Air quality – Particle size fraction definitions for health-related sampling. Genf: International Organization for Standardization 1995.
- [11] Luftqualität in Wohnbauten mit tiefem Energieverbrauch (LIWOTEV). Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Gesundheit BAG, Verband geprüfter Qualitätshäuser VGQ, Bundesamt für Umwelt BAFU. Zürich 2008. www.raumlufthygiene.ch/download/LIWOTEV-Schlussbericht.pdf
- [12] Henzmann, E.; Taferner, O.: Frischluft im Verwaltungsbau. In: Schweizer Energiefachbuch, S. 86-89. St. Gallen: Kömedia 2014.
- [13] Sicre, B. et. al.: Hygienezustand von RLT-Anlagen in der Schweiz. Abschlussbericht Hochschule Luzern – Technik & Architektur 2012.