

ren Ergebnissen kamen Zontek et al. (2017). Auch Poikkimäki et al. (2019) modellierten die Raumluftkonzentrationen in einem 40 m³ großen Wohnraum und einem Luftwechsel von 0,5/Stunde. Sie kamen auf mittlere Gehalte beim Einsatz von ABS von ~ 30 000 Pt./cm³ bzw. ~ 1000 Pt./cm³ bei PLA.

Zu den möglichen gesundheitlichen Wirkungen der emittierten Partikel liegen bisher kaum Studien vor. Gümperlein et al. (2018) exponierten 26 gesunde Probanden eine Stunde gegenüber 1 600 000 Pt./m³ aus einem 3D-Drucker (mit APS) bzw. gegenüber der Hintergrundbelastung (mit PLA). Es zeigten sich keine akuten Effekte im Sinne einer Inflammation, sondern lediglich eine geringe Zunahme des exhalierten NO bei ABS-Druck im Vergleich zum PLA-Druck, welches als Zeichen einer Entzündungsreaktion gedeutet werden könnte.

Neben partikulären Emissionen muss auch die Abgabe von VOC berücksichtigt werden. So fanden Azimi et al. (2016) bei fünf 3D-Druckern, die mit unterschiedlichen Kunststoffmaterialien betrieben wurden, hohe Emissionen von Caprolactam bei Verwendung von Nylonfilamenten, Styrol bei ABS und HIPS (High-impact Polystyrol) sowie Lactide bei PLA. Vergleichbare Ergebnisse berichten auch Floyd et al. (2017) und Zhang et al. (2019) im Rahmen von Testkammeruntersuchungen. Die TVOC-Emissionen schwankten, in Abhängigkeit von Drucktemperatur, Kunststoffmaterial, Druckertyp und Materialfarbe, im Mittel zwischen 147 µg/h (Polyvinylalkohol) bis zu 1660 µg/h (Nylonfilamente) (Davis et al. 2019). Die Autoren errechneten aus diesen Daten TVOC-Innenraumluftkonzentrationen mit Mittelwerten von 30–256 µg/m³ für einen typischen Wohnraum bzw. von 3–26 µg/m³ für einen Schulklassenraum.

Die Innenraumlufthygiene-Kommission am Umweltbundesamt hat Hinweise zum Umgang mit 3D-Druckern für den Hausgebrauch veröffentlicht (IRK 2020). Die Kommission hat insbesondere Folgendes empfohlen:

- Immer ausreichend lüften und, insbesondere bei häufigerem Geräteeinsatz, den Drucker in einem separaten gut zu lüftenden Raum betreiben.
- Um sich nicht unnötig Emissionen auszusetzen, sollte ein räumlicher Abstand während des Druckvorgangs eingehalten werden.
- Die Herstellerangaben zum Betrieb sind strikt zu beachten.
- Professionelle und kommerziell betriebene 3D-Drucker sind nicht für den Hausgebrauch geeignet.
- 3D-Drucker gehören nicht in die Hände von Kindern.

7.3 Flüchtige organische Verbindungen (VOC)

Die Quellen für VOC in Innenräumen sind vielfältig und einem starken zeitlichen Wandel, z. B. aufgrund von Formulierungsänderungen in Verbraucherprodukten, unterworfen. So ließen sich in den letzten Jahrzehnten deutliche Veränderung in der Zusammensetzung der VOC feststellen (Weschler 2009). Waren in der Vergangenheit aromatische und chlo-

rierte Lösemittel dominant, werden heute eher Terpene und Glykole in der Innenraumluft beobachtet. Folgende wesentliche Gruppen an Quellen lassen sich nennen:

- Gebäude: Emissionen aus Baumaterialien und Einrichtungsgegenständen wie Bodenbeläge, Holzmaterialien und Vorhänge; Lüftungsanlagen; Bioaerosole nach z. B. Feuchteschäden
- Aktivitäten: Anwendung von Farben, Lacken und Klebstoffen; Rauchaktivitäten; Betrieb offener Feuerstellen; Putz- und Reinigungsmitteln; Körperpflegeprodukten/Kosmetika; Raumluftverbesserer; Hobbyaktivitäten; Betrieb von technischen Geräten und Büromaschinen
- durch den Menschen selbst: Ausatmung und Körperausdünstungen; Kleidung
- Außenluft: Verbrennungsprozesse wie Kraftfahrzeugverkehr und Hausbrand sowie von industriellen Prozessen; Emissionen aus der Textilreinigung
- Boden/Grundwasser: Emissionen von VOC über die Bodenpassage aus Altablagerungen/Bodenverunreinigungen

Daneben kommt es in Innenräumen zu komplexen chemischen Reaktionen in der Gas- und Aerosolphase und der Bildung sogenannter sekundär organischer Aerosole (SOA), die aus unterschiedlichen, neu gebildeten organischen Substanzen bestehen können (Uhde & Salthammer 2009). *Siehe hierzu auch Kapitel 4.*

7.3.1 Gesundheitliche Aspekte

Die Wirkungen von VOC sind aufgrund der Vielzahl an Einzelsubstanzen komplex und reichen, je nach Expositionshöhe, von leichten Befindlichkeitsstörungen bis zu toxischen Effekten. In diesem Zusammenhang wird immer wieder eine Assoziation zwischen der Höhe der VOC-Konzentration im Innenraum und eher unspezifischen Symptomen wie Müdigkeit, Kopfschmerzen, verminderte Leistungsfähigkeit sowie irritative Effekte an Schleimhäuten des Auges und der oberen Atemwege hergestellt. In der Bewertungspraxis ist es in der Regel jedoch oft schwierig, die geschilderten Symptome oder Erkrankungen auf die VOC oder einen einzelnen Stoff zurückzuführen.

Mølhave et al. (1986) führten erstmals kontrollierte Testkammerversuche mit einem aus 22 Einzelsubstanzen bestehenden VOC-Gemisch an 62 gesunden Probanden durch. Diese waren über 2,75 Stunden einer Konzentration von 0, 5 oder 25 mg/m³ ausgesetzt. Die Testpersonen klagten bereits ab 5 mg/m³ über schlechte Innenraumluft, Gerüche sowie trockene Schleimhäute und gaben mehr irritative Symptome an. Eine Wiederholung der Untersuchung erfolgte mit 16 Probanden in den USA bei einer Konzentration von 25 mg/m³ bzw. gefilterter Luft (Koren et al. 1992). Während verschiedene psycho-neurologische Leistungstest unverändert blieben, klagten auch hier die Versuchspersonen vermehrt über Kopfschmerzen, schnellere Ermüdbarkeit und Augen- und Rachenreizungen. In einer weiteren experimentellen Untersuchung zeigten sowohl Gesunde als auch Personen, die Beschwerden eines Sick-Building-Syndroms (SBS) angaben, mehr subjektive Symptome, allerdings waren die Effekte bei der SBS-Gruppe stärker ausgeprägt (Kjærsgaard et al. 1991).

Epidemiologische Studien zum Zusammenhang zwischen TVOC-Gehalten (Total Volatile Organic Compounds) in Innenräumen und gesundheitlichen Effekten erbrachten kein einheitliches Bild (Andersson et al. 1997, Seifert 1999). Außerdem versuchten verschiedene bevölkerungsbezogene Untersuchungen einen Zusammenhang zwischen VOC-Konzentrationen in Innenräumen oder der Außenluft und der Entstehung bzw. Verschlechterung von Asthma zu finden. Fünf aktuelle Übersichtsarbeiten sehen dabei teilweise eine Beziehung, kommen jedoch alle zu dem Ergebnis, dass nur eine geringe Evidenz für eine ausgeprägte Assoziation besteht (Heinrich 2011, Tagiyeva & Sheikh 2014, Nurmatov et al. 2015, Kanchnongkittiphon et al. 2015, Rufo et al. 2016).

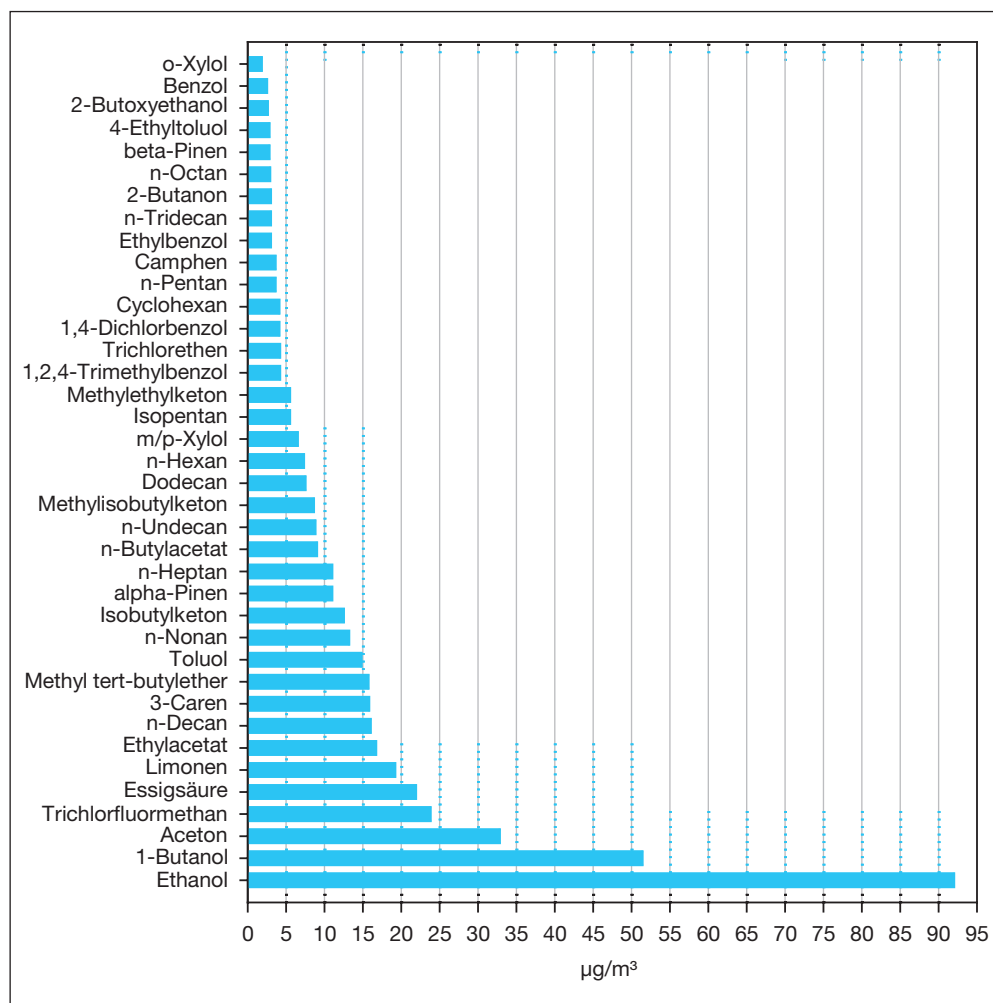


Abb. 11: Rangfolge der medianen Konzentrationen in der Luft von Wohnungen/Schulen (nach Cometto-Muñiz & Abraham 2015)

7.3.2 Vorkommen in Wohninnenräumen

In der wissenschaftlichen Literatur liegt eine Vielzahl an Studien vor, in denen VOC oder einzelne flüchtige organische Stoffe in der Luft von Wohnungen untersucht worden sind. Verschiedene aktuelle Übersichtsarbeiten fassen die publizierten Untersuchungsergebnisse zusammen (Cometto-Muñiz & Abraham 2015, Paciência et al. 2016, Shrubsole et al. 2019). In *Abbildung 11* sind beispielhaft die Substanzen mit den höchsten Konzentrationen in der Innenraumluft, die im Rahmen der Arbeit von Cometto-Muñiz & Abraham (2015) ermittelt wurden, dargestellt.

Für Deutschland sind auf der Homepage der Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute (AGÖF) zahlreiche Untersuchungsergebnisse publiziert worden, die in den Jahren 2006–2012 von privaten Laboren erhoben worden waren (Hofmann et al. 2014). Außerdem liegen Ergebnisse aus zwei repräsentativen Studien des Umweltbundesamtes vor. Bei der einen wurde 2003–2006 im Rahmen des Kinder-Umwelt-Surveys die Luft von 555 Kinderzimmern und bei der zweiten 2014–2017 im Rahmen der Deutschen Umweltstudie zur Gesundheit (GerES V) 639 Innenräume untersucht (UBA 2008, Bethke et al. 2021). Die Substanzen mit den höchsten Medianen in der letztgenannten Studie sind: Ethylacetat ($16,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Decamethylcyclopentasiloxan ($14,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) und Limonen ($12,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Die statistischen Kennwerte für die Einzelsubstanzen aus den beiden vorgeannten UBA-Untersuchungen sind in *Tabelle 7* zusammengestellt.

Neben der Bestimmung einzelner VOC, kann, im Rahmen einer vereinfachten Beurteilung der Innenraumluftqualität, die Summe der Konzentrationen der einzelnen flüchtigen organischen Verbindungen, der sogenannte TVOC-Wert (Total Volatile Organic Compounds), herangezogen werden (Seifert 1999). Hierbei handelt es sich definitionsgemäß um die Summe aller Stoffe, die analytisch im Retentionsbereich zwischen n-Hexan und n-Hexadecan auf einer unpolaren Trennsäule eluieren. Die Quantifizierung der identifizierten Substanzen hat dabei substanzspezifisch anhand von Einzelstandards zu erfolgen. Die nicht identifizierbaren („unbekannten“) Substanzen werden jeweils als Toluoläquivalent quantifiziert (Ad-hoc-AG 2007).

In *Tabelle 8* sind Ergebnisse von neueren Studien zum TVOC-Gehalt in der Innenraumluft zusammengefasst. So wurde z. B. in der ersten repräsentativen Studie des Umweltbundesamtes 2003–2006 ein Median von $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und ein 95. Perzentil von $1100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ beobachtet. In der zweiten Studie 2014–2017 zeigte sich mit $270 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. $950 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ein vergleichbarer Bereich (UBA 2008, Bethke et al. 2021). Im Rahmen der Zusammenfassung von Messergebnissen verschiedener Forschungsinstitute der Jahre 2006–2012 wurde in 146 Wohnungen für TVOC ein Median von $360 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (95. Perzentil: $1975 \mu\text{g}/\text{m}^3$) gefunden (Hofmann et al. 2014).

Tab. 7: Kennwerte für flüchtige organische Substanzen in der Wohninnenraumluft (in µg/m³)

Substanz	Kinder-Umwelt-Survey 2003–2006 (N = 555) (UBA 2008)				Deutsche Umweltstudie zur Gesundheit 2014–2017 (N = 639) (Bethke et al. 2021)			
	% ≥ BG	Median	95. Perzentil	Maximum	% ≥ BG	Median	95. Perzentil	Maximum
Alkane								
n-Heptan	63	1,4	22,8	414	54	1,3	13,7	150
n-Octan	54	1,1	10,3	69,4	41	<1,0	5,1	55,0
n-Nonan	47	<1,0	12,1	66,4	48	<1,0	7,9	85,0
n-Decan	60	1,4	14,9	108	70	1,1	11,0	93,0
n-Undecan	60	1,4	14,8	135	77	1,4	12,0	230
n-Dodecan	54	1,1	7,9	186	63	1,0	6,4	33,0
n-Tridecan	42	<1,0	4,2	44,0	53	<1,0	2,8	32,0
n-Tetradecan	85	1,7	5,4	55,4	74	1,1	3,8	18,0
n-Pentadecan	63	1,2	3,7	21,1	56	0,8	2,7	5,0
n-Hexadecan	46	<1,0	2,3	9,7	64	0,9	2,7	76,0
n-Heptadecan	23	<1,0	2,0	6,3	12	<1,0	1,0	85,0
n-Octadecan	7	<1,0	2,0	3,5	3	<1,0	<1,0	150
Cyclohexan	73	2,5	39,1	456	45	<1,0	6,2	33,0
Methylcyclohexan	52	1,1	26,5	400	45	<1,0	16,7	64,0
Σ 14 Alkane		22,3	158	707				
Aromaten								
Benzol	75	1,8	7,7	61,0	54	1,1	3,6	29,0
Toluol	100	13,5	57,6	2400	99	4,7	27,0	160
Ethylbenzol	68	1,4	6,8	40,8	70	0,9	5,0	30,0
m-, p-Xylol	91	3,2	16,0	200	95	1,9	15,0	93,0
o-Xylol	57	1,2	5,5	47,8	55	0,7	6,0	39,0
Isopropylbenzol	7	<1,0	1,3	3,7	4	<1,0	<1,0	7,0
n-Propylbenzol	18	<1,0	2,6	14,4	18	<1,0	1,7	21,0
2-Ethyltoluol	14	<1,0	2,3	13,6	-	-	-	-
3-Ethyltoluol	39	<1,0	5,5	41,2	15	<1,0	3,4	21,0
4-Ethyltoluol	14	<1,0	2,6	19,7	17	<1,0	2,3	30,0
1,2,3-Trimethylbenzol	20	<1,0	2,9	12,3	22	<1,0	2,8	19,0

1,2,4-Trimethylbenzol	68	1,5	10,3	58,8	65	0,8	8,8	50,0
1,3,5-Trimethylbenzol	19	<1,0	2,9	24,3	19	<1,0	1,9	120
Styrol	41	<1,0	4,8	32,0	58	0,9	4,4	14,0
Naphthalin	7	<1,0	1,2	4,9	18	<1,0	1,1	10,0
4-Phenylcyclohexen	0				0			
Σ16 Aromaten		32,9	123	2430				
halogenhaltige Verbindungen								
1,1,1-Trichlorethan	5	<1,0	<1,0	14,3				
Trichlorethen	4	<1,0	<1,0	64,3				
Perchloroethen	7	<1,0	1,4	28,0				
1,4-Dichlorbenzol	1	<1,0	<1,0	11,3				
Σ 4 halogenhaltige Verbindungen		2,8	5,4	70,5				
sauerstoffhaltige Verbindungen								
Ethylacetat	98	9,3	70,8	785	84	16,6	204	1200
Butylacetat	88	4,1	30,7	214	97	4,9	31,8	150
1-Methoxy-2-propanolacetat	23	<1,0	3,6	93,5				
Methylethylketon	6	<7,5	9,2	139				
Methylisobutylketon	27	<1,0	2,6	17,3				
1-Butanol	98	5,4	17,6	71,6				
Isobutanol	9	<3,5	4,9	40,7	54	1,2	10,0	51,0
2-Methoxyethanol	5	<1,0	1,2	14,1				
2-Ethoxyethanol	10	<1,0	1,5	7,1	0			
2-Butoxyethanol	61	1,4	10,3	117	6	<1,0	6,1	13,0
2-Butoxyethylacetat	-	-	-	-	0			
2-Butoxyethoxyethanol	33	<1,0	6,0	35,5	0			
2-Phenoxyethanol	36	<1,0	3,7	11,5	26	<1,0	7,4	12,0
1-Methoxy-2-propanol	64	1,5	8,4	86,1	45	<1,0	12,0	91,0
1-Butoxy-2-propanol	47	<1,0	12,8	126	50	<1,0	41,6	81,0