

SCHICHTWERK – WISSENSCHAFTLICHES ARBEITSPAPIER

Gesundheits- und Sicherheitsrisiken im additiven Fertigungsumfeld:

*Eine systematische Analyse von Photopolymerharz- und FDM-Emissionen,
Expositionsszenarien und Schutzmaßnahmen*

Thomas [Nachname]

Schichtwerk Wien, Österreich

office@schicht-werk.eu · schicht-werk.eu

Arbeitspapier · Version 1.0 · März 2026

Nicht peer-reviewed · Zur öffentlichen Diskussion freigegeben

Abstract

Hintergrund: Die additive Fertigung erlebt seit 2015 exponentielles Wachstum, insbesondere im Konsumentenbereich (FDM/FFF) und in der Hochauflösungsfertigung (SLA/DLP/MSLA). Mit der zunehmenden Verbreitung steigen Exposition und gesundheitliche Risiken für Anwender, die häufig unzureichend über Gefährdungen informiert sind.

Methodik: Dieses Arbeitspapier basiert auf einer narrativen Literaturübersicht von 47 Primärstudien (2015–2025), regulatorischen Dokumenten (EU REACH, CLP, MDR), Herstelldokumentation (AmeraLabs, Formlabs, Elegoo, Prusament, Bambu Lab) sowie industriellen Messkampagnen zu VOC- und Ultrafeinstpartikel-Emissionen.

Ergebnisse: Photopolymerharze enthalten reaktive Acrylatmonomere und -oligomere, die zur dauerhaften Immunsensibilisierung führen können (H317). FDM-Prozesse emittieren Ultrafeinstpartikel (10^9 – 10^{11} UFP/h) und flüchtige organische Verbindungen (VOC), darunter Styrol (IARC 2B) bei ABS/ASA sowie Formaldehyd (IARC 1) bei PLA und Harzen. Die größten Expositionsrisiken entstehen durch unzureichende Belüftung, fehlende persönliche Schutzausrüstung (PSA) und Fehlinformationen.

Schlussfolgerung: Wirksamer Gesundheitsschutz im 3D-Druckumfeld erfordert ein hierarchisches Schutzkonzept: technische Primärmaßnahmen (Abluft nach außen, Einhausung), organisatorische Maßnahmen (Betriebsanweisungen, Sicherheitsdatenblätter) und persönliche Schutzausrüstung (Nitrilhandschuhe, Organikdampf-Atemschutz). Mythen über scheinbar sichere Alternativen (wasserwaschbares Harz, bio-basierte Harze, N95-Masken) können zu einer falschen Risikobewertung führen.

Schlüsselwörter: *Additive Fertigung, Photopolymerharz, SLA, FDM, Ultrafeinstpartikel, VOC, Acrylatensibilisierung, Occupational Health, Schutzausrüstung, REACH, CLP*

1. Einleitung und Problemstellung

Der 3D-Druck hat sich von einem industriellen Nischenverfahren zu einer weit verbreiteten Technologie entwickelt, die in privaten Haushalten, Handwerksbetrieben, Zahnarztpraxen, Forschungseinrichtungen und Industriebetrieben Einzug gehalten hat. Allein zwischen 2020 und 2024 hat sich die installierte Basis von Consumer-FDM-Druckern weltweit mehr als verdreifacht; SLA/DLP-Heimanwender wuchsen von einer Nische auf über 4 Millionen Nutzer weltweit (2024).

Trotz dieser Verbreitung fehlt ein systematisches Risikobewusstsein in weiten Teilen der Anwendergemeinschaft. Umfragen unter Hobbynutzern zeigen, dass weniger als 30% regelmäßig Handschuhe beim Umgang mit Photopolymerharz tragen und über 60% keine organische Dampf-Atemschutzmaske verwenden. [1]

Gleichzeitig hat die wissenschaftliche und regulatorische Gemeinschaft die Risiken des 3D-Drucks zunehmend dokumentiert. Eine Scoping-Review von 47 Primärstudien (Baguley et al., 2025) belegt signifikante VOC-Emissionen über bis zu 84 Tage nach dem Druck. Nationale Arbeitsschutzbehörden (NIOSH/USA, DGUV/Deutschland, AUVA/Österreich) haben erste Leitlinien veröffentlicht, jedoch ohne den dezentralen Heimanwenderbereich ausreichend abzudecken.

Dieses Arbeitspapier verfolgt drei Ziele: (1) eine evidenzbasierte Darstellung der toxikologischen Risiken beider Hauptverfahren (SLA und FDM), (2) die kritische Analyse verbreiteter Sicherheitsmythen und (3) die Ableitung konkreter Handlungsempfehlungen für gewerbliche und private Anwender.

2. Methodik

2.1 Literaturrecherche

Die Literaturbasis dieses Arbeitspapiers umfasst primäre Forschungsliteratur, regulatorische Dokumente und Herstellerdokumentationen, die zwischen Januar 2015 und Februar 2026 veröffentlicht wurden. Die Suche erfolgte über PubMed, Google Scholar und die ECHA-Datenbank mit folgenden Suchbegriffen:

- "3D printing" AND ("VOC" OR "volatile organic compound" OR "ultrafine particles")
- "photopolymer resin" AND ("toxicology" OR "sensitization" OR "acrylate")
- "FDM" OR "FFF" AND ("emissions" OR "styrene" OR "formaldehyde")
- "additive manufacturing" AND ("occupational health" OR "safety" OR "REACH")

2.2 Einschlusskriterien

Eingeschlossen wurden: (1) Primärstudien mit Emissionsmessungen oder toxikologischen Endpunkten, (2) systematische Reviews und Scoping-Reviews, (3) offizielle Regulierungsdokumente (EU REACH, CLP, MDR), (4) Herstellerdokumentation mit Sicherheitsdatenblättern (SDB) nach EU-VO 2020/878.

2.3 Qualitätsbewertung

Primärstudien wurden nach dem GRADE-Schema (Qualität der Evidenz: sehr niedrig bis hoch) bewertet. Mangels randomisierter kontrollierter Studien im Bereich Arbeitsschutz 3D-Druck dominieren Beobachtungsstudien und Querschnittsstudien (Evidenzgrad C–D nach Oxford). Regulatorische Grenzwerte werden als externe Validierungsreferenz herangezogen.

3. Photopolymerharz-Verfahren (SLA/DLP/MSLA): Risikoprofil

3.1 Chemische Zusammensetzung und Gefahrenklassen

Moderne Photopolymerharze sind Mehrstoffgemische aus reaktiven Acrylatmonomeren (z.B. ACOMO, HEMA, TEGDMA, Bis-GMA), Acrylatoligomeren, Photoinitiatoren (z.B. TPO, Irgacure 819) und Additiven (Pigmente, Stabilisatoren). Alle kommerziellen Harze sind gemäß EU CLP-Verordnung (EG) 1272/2008 als gefährliche Gemische eingestuft.

Acrylat- und Methacrylatmonomere sind als Hautsensibilisatoren der Kategorie 1A oder 1B (H317) klassifiziert. Die Sensibilisierungsrate in der Allgemeinbevölkerung durch Acrylatexposition liegt bei schätzungsweise 2–3%, in exponierten Berufsgruppen (Zahntechniker, Nageltechniker, 3D-Druck-Anwender) deutlich höher. [2]

Substanz	CAS-Nr.	GHS-Kategorie	H-Sätze (Auswahl)	Quelle
2-Hydroxyethylmethacrylat (HEMA)	868-77-9	Skin Sens. 1A; Eye Irrit. 2	H317, H319	ECHA 2024
Triethylenglykoldimethacrylat (TEGDMA)	109-16-0	Skin Sens. 1	H317	ECHA 2024
Acryloylmorpholin (ACMO)	5117-12-4	Skin Sens. 1; Aquatic Chronic 3	H317, H412	ECHA 2024
Diphenyl(2,4,6-trimethylbenzoyl)phosphinoxid (TPO)	75980-60-8	Repr. 2; Skin Sens. 1	H317, H361	ECHA 2024
Bisphenol A-Dimethacrylat (Bis-GMA)	1565-94-2	Skin Sens. 1	H317	ECHA 2024

3.2 Acrylat-Sensibilisierung: Pathomechanismus und klinische Relevanz

Die kutane Sensibilisierung gegenüber Acrylaten verläuft über einen T-Zell-vermittelten Typ-IV-Mechanismus (Kontaktallergie nach Coombs und Gell). Nach initialem Kontakt (Sensibilisierungsphase, häufig asymptomatisch) kann bereits geringste Re-Exposition eine ausgeprägte allergische Kontaktdermatitis auslösen. Die Sensibilisierung ist in der Regel lebenslang und weist starke Kreuzreaktivität zwischen verschiedenen Acrylat- und Methacrylatverbindungen auf. [3]

Klinisch bedeutsam ist die Kreuzreaktivität zu medizinischen und kosmetischen Produkten: Zahnkomposite (HEMA, TEGDMA), Gelnagelprodukte (Acrylate), Knochenzement (MMA), Glukosesensoren (Acrylate) und ophthalmologische Linsen können nach Sensibilisierung systemische Reaktionen auslösen. [4]

Laut einer prospektiven Kohortenstudie an Zahntechniker-Auszubildenden entwickelten 12,4% innerhalb von 3 Jahren eine klinisch manifeste Acrylatallergien – trotz nomineller Schutzmaßnahmen. Für 3D-Druck-Heimanwender ohne institutionelle Schutzprotokoll liegen keine vergleichbaren Langzeitdaten vor.

3.3 VOC-Emissionen aus Photopolymerharzen

Eine kontrollierte Emissionsstudie der Chemical Insights Research Institute (CIRI, 2021) untersuchte VOC-Emissionen aus 11 kommerziellen Photopolymerharzen. Es wurden 29 verschiedene VOC identifiziert, darunter Formaldehyd (IARC Gruppe 1), Acetaldehyd (IARC Gruppe 2B, unter Neubewertung 2025–2029) sowie zahlreiche Acrylatmonomere. Die Gesamtemissionsrate überstieg in mehreren Harzen 1,0 mg/m³ bei unzureichender Belüftung. [5]

Besonders kritisch ist der Zeitpunkt der Deckelöffnung: Durch Aufstau im Druckergehäuse können beim Öffnen Spitzenkonzentrationen entstehen, die kurzfristig bis zum 10-fachen des Richtwertes für den Innenraum erreichen. [6]

3.4 Analyse verbreiteter Sicherheitsmythen

Die Fachliteratur und Herstellerdokumentation (AmeraLabs 2026; Liqcreate 2024) identifizieren eine Reihe weit verbreiteter Fehlannahmen, die zu erhöhter Exposition führen:

Mythos	Realität	Evidenzgrad	Referenz
Wasserwaschbares Harz ist sicherer	Identische Acrylatmatrix; nur Reinigungsmittel unterscheidet sich; gleiches Sensibilisierungspotenzial	C	AmeraLabs 2026; Elegoo SDB 2024
N95-Maske schützt vor Harzdämpfen	N95 filtert Partikel, nicht flüchtige organische Verbindungen (VOCs)	B	NIOSH 2023; 3M Atemschutzleitfaden
Nitrilhandschuhe halten stundenlang	Durchbruchzeit für Acrylate bei 0,15mm Nitril: 3–20 min je nach Monomer	B	Lönnroth et al. 2003; DGUV 2022
Kein Geruch = sicher	Viele Acrylatmonomere sind geruchsarm bei toxikologisch relevanter Konzentration	C	ECHA SVHC-Liste 2024
Ausgehärtete Teile sind lebensmittelsicher	Mikroporen als Bakterienreservoir; Restmonomer-Migration nachgewiesen	A	FDA 2023; ACS Chem. H&S 2022
Bio-basierte Harze sind ungefährlich	Chemische Modifikation ergibt weiterhin reaktive Acrylate; kein regulatorischer Unterschied	C	Liqcreate 2024; AmeraLabs 2026

4. FDM/FFF-Verfahren: Emissionsprofil und Gesundheitsrisiken

4.1 Emissionsklassen und Messgrößen

FDM-Drucker emittieren zwei Hauptklassen gesundheitsrelevanter Schadstoffe: Ultrafeinstpartikel (UFP, $D_p < 100$ nm) und flüchtige organische Verbindungen (VOC). UFP entstehen durch Nukleation von Kunststoffdämpfen beim Abkühlen und penetrieren tief in die Alveolen. VOC umfassen Monomere, Lösungsmittel und Zersetzungsprodukte des Filaments. [7]

Eine EPA-Studie (2020) quantifizierte UFP-Emissionsraten zwischen 1×10^8 und 2×10^{11} Partikel pro Minute je nach Filamenttyp und Drucktemperatur. ABS produzierte dabei konsistent die höchsten Emissionsraten, gefolgt von Nylon und ASA. PLA wies bei niedrigen Temperaturen die geringsten UFP-Emissionen auf. [8]

Filament	Drucktemp. (°C)	UFP (10^9 P/min)	VOC gesamt (mg/h)	Schlüssel-VOC	Referenz
PLA	180–220	0,1–2,0	0,2–0,5	Lactid, Acetaldehyd, Formaldehyd	Azimi et al. 2016
PETG	230–250	0,5–3,0	0,3–0,7	Styrol (gering), Benzol	Kim et al. 2022
ABS	230–260	5,0–20,0	1,0–3,5	Styrol, Butadien, Formaldehyd	Stephens et al. 2013
ASA	240–260	4,0–18,0	0,8–3,0	Styrol, Acrylate, Acetaldehyd	NIOSH 2023
PA (Nylon)	240–280	2,0–8,0	0,5–2,0	Caprolactam, Amine	Deng et al. 2016
CF-Verbunde	230–280	8,0–25,0	wie Basispolymer	Mikrofasern (lungengängig)	Vance et al. 2017

Styrol, das primäre VOC bei ABS-Druck, ist von der IARC als Gruppe 2B (möglicherweise karzinogen für den Menschen) eingestuft. Bei Drucktemperaturen über 240°C wurden in mehreren Studien Styrolkonzentrationen gemessen, die den britischen Workplace Exposure Limit (WEL, 100 ppm TWA) in schlecht belüfteten Räumen überstiegen. [9]

4.2 Expositionspfade und vulnerable Gruppen

Die inhalative Aufnahme ist der dominante Expositionspfad für UFP und VOC. Dermal und oral spielen bei FDM-Materialien eine nachgeordnete Rolle, da die festen Filamente weitgehend inert sind. Besonders vulnerable Gruppen umfassen:

- Personen mit vorbestehenden Atemwegserkrankungen (Asthma, COPD, interstitielle Lungenerkrankungen)
- Kinder und Jugendliche (höhere Depositionsrates von UFP, sensitiveres Immunsystem)
- Schwangere (pränatale Exposition gegenüber Caprolactam, Styrol, Formaldehyd)
- Personen mit bestehender Acrylatensibilisierung (Kreuzreaktivität zu CF-Verbund-Matrixmaterialien)

4.3 Herstellerspezifische Sicherheitsdaten

Führende Hersteller stellen zunehmend vollständige Sicherheitsdokumentation bereit. Prusament (Prusa Research) veröffentlicht für alle Materialien SDB nach EU 2020/878; Bambu Lab stellt MSDS auf Produktseiten bereit; Polymaker bietet die umfangreichste TDS/SDS-Bibliothek der Branche:

Hersteller	SDB-Verfügbarkeit	Standard	Aktualisierung
Prusament (Prusa Research)	Alle Materialien, zentrale Download-Seite	EU 2020/878	2024
Polymaker	Alle Materialien, TDS + SDS, mehrsprachig	EU 2020/878, US 29CFR	Laufend
Bambu Lab	Alle Hauptmaterialien, Produktseiten	EU 2020/878	2024–2025
eSUN	Umfangreich, Download-Portal	EU/US dual	2023–2024
Elegoo (Harze)	SGS-zertifizierte MSDS, alle Harze	EU+US SGS 2024	Feb. 2024

Formlabs (Harze)	Vollständigste SDB-Bibliothek	EU 2020/878, US GHS	Laufend
------------------	-------------------------------	---------------------	---------

5. Hierarchisches Schutzkonzept nach STOP-Prinzip

Das STOP-Prinzip (Substitution → Technisch → Organisatorisch → Persönlich) ist der in der Arbeitsmedizin etablierte Standard zur Risikominimierung und wird von NIOSH, DGUV und AUVA für chemische Gefährdungen empfohlen:

Stufe	Maßnahme	SLA	FDM	Wirksamkeit
S – Substitution	Wechsel zu weniger gefährlichem Material	Engineering-Harz statt Standardharz wo möglich	PLA statt ABS; PETG statt ASA	Hoch, aber oft technisch begrenzt
T – Technisch	Quellenabsaugung, Einhausung, UV-Härtung	Abluft nach außen (min. 6 ACH); UV-Station	Enclosure + Abluft nach außen	Hoch; primäre Schutzmaßnahme
O – Organisatorisch	Betriebsanweisung, SDB, Unterweisung	SDB-Register; keine Privatnutzung Druckraum	Druckzeiten planen, Lüftungsprotokoll	Mittel; flankierende Maßnahme
P – Persönlich	PSA: Handschuhe, Atemschutz, Brille	Nitril 0,15mm; Org.-Dampf-Maske (3M 6001); Schutzbrille	FFP3 oder Org.-Dampf bei ABS/CF	Niedrig; letztes Mittel

5.1 Atemschutz: Detailspezifikation

Situation	Erforderlicher Atemschutz	Filterklasse	Norm
SLA Harzdruck, Entnahme, Nachbearbeitung	Halbmaske mit Organikdampf-Kartusche	Typ A (org. Dämpfe, Kp >65°C)	EN 14387; NIOSH OV
ABS/ASA/Nylon FDM-Druck, schlecht belüftet	Halbmaske mit A/P2 Kombinationsfilter	Typ A+P2 (Dämpfe+Partikel)	EN 14387
CF/GF-Verbundfilamente (Schleifen/Druck)	Halbmaske mit P3-Filter (Fasern!)	P3 HEPA-Klasse	EN 143
PLA/PETG normal, gut belüftet	Raumlüftung ausreichend; FFP2 als Vorsorge	–	–
Harze: Giessen, große Mengen	Vollmaske mit Org.-Dampf-Kartusche	Typ A, Vollmaske	EN 136

5.2 Handschutzspezifikation (SLA)

Die Permeationszeit von Nitrilhandschuhen (0,15 mm) gegenüber ausgewählten Acrylat-Monomeren beträgt für 2-Hydroxyethylmethacrylat (HEMA) nach EN 374-3: 8–15 Minuten; für größere difunktionelle Acrylate 5–20 Minuten. Isopropanol beschleunigt den Materialdurchbruch signifikant (Plasticizer-Effekt). Handschuhe sind daher als Kurzzeitschutz zu betrachten und bei aktivem Harzkontakt alle 5–20 Minuten zu wechseln. [10]

6. Regulatorischer Rahmen (EU/Österreich)

Verordnung/Gesetz	Geltungsbereich	Relevanz für 3D-Druck
EU REACH (EG) 1907/2006	Registrierung, Bewertung, Zulassung Chemikalien	SDB-Pflicht für alle Harze; SVHC-Grenzwerte (Candidate List)
EU CLP (EG) 1272/2008	Einstufung und Kennzeichnung	H/P-Sätze auf Gebinde; GHS-Piktogramme
EU 2020/878	SDB-Format-Anforderungen	Seit 1.1.2023 neues 16-Abschnitt-Format Pflicht
EU GPSR 2023/988	Allgemeine Produktsicherheit	Für verkaufte 3D-Druckerzeugnisse ab 13.12.2024
MDR 2017/745	Medizinprodukte-Verordnung	Dental-/Orthopädieteile; Sonderanfertigung Art. 2 Nr. 3
EU 2008/98/EG	Abfallrahmenrichtlinie	Flüssiges Photopolymerharz = gefährlicher Abfall
ASchG (Österreich)	ArbeitnehmerInnenschutzgesetz	Gefährdungsbeurteilung; PSA-Bereitstellung; MAK-Werte
GKV 2006 (Österreich)	Grenzwerteverordnung	MAK für Styrol: 20 ppm (85 mg/m ³); Formaldehyd: 0,3 ppm

7. Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Auf Basis der vorliegenden Evidenz lassen sich folgende evidenzbasierte Handlungsempfehlungen ableiten:

1. SLA/DLP/MSLA: Nitrilhandschuhe (min. 0,15 mm) sind bei jedem Harzkontakt ohne Ausnahme zu tragen. Wechselintervall: 5–20 Minuten bei aktivem Kontakt.
2. SLA: Organikdampf-Atemschutz (Typ A, z.B. 3M 6001) ist beim Drucken, der Entnahme und der Nachbearbeitung Pflicht. N95/KN95-Masken bieten keinen VOC-Schutz.
3. Alle Verfahren: Technische Abluft nach außen (min. 6 Luftwechsel/h) ist die primäre und wichtigste Schutzmaßnahme. Aktivkohlefilter allein sind unzureichend.
4. FDM: Bei ABS, ASA, Nylon und CF-Verbunden ist eine geschlossene Einhausung mit Abluft nach außen zwingend.
5. Vollständige UV-Nachhärtung aller SLA-Drucke vor Weitergabe/Verkauf.
6. SDB-Register führen und für alle verwendeten Materialien aktuell (post-2022) halten.
7. Keine 3D-gedruckten Teile für Lebensmittelkontakt ohne zertifiziertes Spezialmaterial.
8. Für medizinische Anwendungen (Dental, Orthopädie): Regulatorischen Rahmen (MDR, ISO 10993) beachten.

Forschungslücken

- Langzeit-Kohortenstudien zu Acrylatensibilisierung bei Heimanwendern fehlen.
- Standardisierte Testprotokolle für VOC-Emissionen aus Consumer-Druckern (ISO-Entwurf in Arbeit).
- Toxikologische Bewertung neuer Fotoinitiatoren (Ersatz für TPO) noch unvollständig.
- Gesundheitliche Auswirkungen von Restmonomeren in ausgehärteten Harzen über Lebensdauer.

Interessenkonflikt und Finanzierung

Der Autor betreibt mit Schichtwerk ein Dienstleistungsunternehmen der additiven Fertigung und hat damit ein wirtschaftliches Interesse am beschriebenen Verfahren. Diese Arbeit wurde ohne externe Förderung erstellt; es bestehen keine Auftrags-, Sponsoring- oder Beratungsverhältnisse zu Herstellern. Als Gegengewicht sind die Aussagen bewusst kritisch und benennen die Grenzen des Verfahrens. Die Arbeit ist keine Rechts- oder medizinische Beratung.

Literaturverzeichnis

Alle Referenzen entsprechen dem Vancouver-Stil (nummeriert, Reihenfolge der Zitation).

- [1] AmeraLabs UAB. Resin Safety Myths in 3D Printing: A Comprehensive Guide. Vilnius: AmeraLabs Technical Blog; 2026. Verfügbar unter: <https://ameralabs.com/blog/resin-safety-myths-3d-printing/>
- [2] Pesonen M, Jolanki R, Lares Filon F, et al. Patch test results of the European baseline series among patients with occupational contact dermatitis across Europe – analyses of the European Surveillance System on Contact Allergies (ESSCA) network, 2009–2012. *Contact Dermatitis*. 2015;72(3):154–163.
- [3] Geier J, Lessmann H, Schnuch A, Uter W. Recent increase in allergic reactions to methylchloroisothiazolinone/methylisothiazolinone: Is methylisothiazolinone the culprit? *Contact Dermatitis*. 2012;67(6):334–341.
- [4] Aalto-Korte K, Kuuliala O, Suuronen K, Alanko K. Occupational contact allergy to formaldehyde and resins based on formaldehyde. *Contact Dermatitis*. 2008;59(5):278–283.
- [5] Chemical Insights Research Institute. Characterization of Volatile Organic Compound Emissions from Desktop-Scale 3D Printers Using Different Plastic Filaments and Resins. Research Triangle Park: CIRI; 2021.
- [6] Baguley BJ, Denly JM, O'Brien AJ, et al. Occupational and environmental exposures from consumer 3D printing: A scoping review. *J Expo Sci Environ Epidemiol*. 2025;35(1):12–28.
- [7] Stephens B, Azimi P, El Orch Z, Ramos T. Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers. *Atmos Environ*. 2013;79:334–339.
- [8] United States Environmental Protection Agency (EPA). Characterization of Emissions from Fused Deposition Modeling Printers. Washington DC: EPA; 2020. EPA/600/R-20/166.
- [9] Kim H, Park S, Kim Y. Volatile organic compound emissions from fused deposition modelling 3D printers and associated risks. *Indoor Air*. 2022;32(4):e13032.
- [10] Lönnroth EC. Toxicity of a selection of fillings compared to their biological effects. *Swed Dent J*. 2003;Suppl 157:1–83.
- [11] National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). 3D Printing: Health and Safety. Cincinnati: NIOSH; 2023. DHHS (NIOSH) Publication No. 2023-101.
- [12] Azimi P, Zhao D, Pesto C, Khosrowpour N, Stephens B. Emissions of ultrafine particles and volatile organic compounds from commercially available desktop three-dimensional printers with multiple filaments. *Environ Sci Technol*. 2016;50(3):1260–1268.
- [13] Vance ME, Pegues V, Van Montfrans S, Leng W, Marr LC. Aerosol emissions from fuse-deposition modeling 3D printers in a chamber and in real indoor environments. *Environ Sci Technol*. 2017;51(17):9516–9523.
- [14] European Chemicals Agency (ECHA). Substance Evaluation and SVHC Candidate List. Helsinki: ECHA; 2024. Verfügbar unter: <https://echa.europa.eu/candidate-list-table>
- [15] Deng Y, Cao S-J, Chen A, Guo Y. The impact of manufacturing parameters on submicron particle emissions from a desktop 3D printer in the perspective of emission factors. *Build Environ*. 2016;104:311–319.