

ARBEITSPAPIER / PREPRINT

Open Access · CC BY 4.0

Gesundheits-, Arbeits- und Umweltsicherheit in der dezentralen additiven Fertigung

Eine transdisziplinäre Synthese aus Arbeitsmedizin, Toxikologie, Biologie und Expositionswissenschaft zu Photopolymer- (SLA/DLP/MSLA) und Schmelzschicht-Verfahren (FDM/FFF)

Thomas [Nachname]

Schichtwerk, Wien, Österreich

Korrespondenz: office@schicht-werk.eu · ORCID: 0000-0000-0000-0000 (Platzhalter)

Publikationsmetadaten

Typ: Preprint / Working Paper · Version: 1.0 · Sprache: Deutsch

Lizenz: Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

DOI: wird bei Zenodo-Upload vergeben · Datum: März 2026

Fachgebiete: Occupational Health · Toxicology · Environmental Science · Additive Manufacturing

Dieses Dokument dient der Wissensverbreitung. Es stellt keine verbindliche Norm dar und ersetzt keine fachliche oder rechtliche Einzelfallberatung.

Zusammenfassung (Structured Abstract)

Kontext. Die additive Fertigung („3D-Druck“) hat sich zu einer weitverbreiteten Technologie in privaten, handwerklichen, medizinischen und akademischen Kontexten entwickelt. Mit der Dezentralisierung verlagert sich die Exposition gegenüber prozessbedingten Schadstoffen in Umgebungen ohne etablierte arbeitshygienische Infrastruktur.

Zielsetzung. Diese Arbeit synthetisiert den publizierten Forschungsstand zu gesundheitlichen, arbeitssicherheitstechnischen und ökologischen Aspekten der beiden dominierenden Desktop-Verfahren (SLA/DLP/MSLA und FDM/FFF) über vier Disziplinen hinweg und leitet einen evidenzbasierten, nicht-präskriptiven Orientierungsrahmen ab.

Methodik. Narrative Synthese von 47 begutachteten Primärstudien und systematischen Reviews (2013–2025), ergänzt um regulatorische Primärquellen (EU REACH, CLP, MDR) und stoffspezifische Daten der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA). Analysemethoden zur Schadstoffeffassung werden vergleichend dargestellt.

Ergebnisse. Photopolymere enthalten Acrylat-Monomere mit dokumentiertem Hautsensibilisierungspotenzial (GHS H317); die Sensibilisierung gilt als persistent und kreuzreaktiv. FDM-Prozesse emittieren ultrafeine Partikel (UFP, 10^8 – 10^{11} min^{-1}) und flüchtige organische Verbindungen (VOC) wie Styrol (IARC 2B) und Formaldehyd (IARC 1). Messmethodisch dominieren SMPS, CPC und GC-MS. Die wirksamste Einzelmaßnahme ist die quellnahe Abluftführung ins Freie.

Schlussfolgerung. Ein hierarchischer Schutzansatz (STOP) übertragen auf den Desktop-Maßstab ermöglicht eine deutliche Expositionsminderung. Wesentliche Forschungslücken bestehen in Langzeit-Kohortendaten für Heimanwender und in standardisierten Emissionsprüfprotokollen.

Schlüsselwörter: *additive Fertigung; Photopolymer; FDM; ultrafeine Partikel; flüchtige organische Verbindungen; Acrylat-Sensibilisierung; Arbeitsmedizin; Expositionsbewertung; REACH; CLP*

1. Einleitung

Die additive Fertigung umfasst eine Familie von Verfahren, bei denen Bauteile schichtweise aus einem Ausgangsmaterial aufgebaut werden. Im Desktop- und Consumer-Segment dominieren zwei Prinzipien: die Schmelzschichtung (Fused Deposition Modeling, FDM, bzw. Fused Filament Fabrication, FFF), bei der thermoplastische Filamente aufgeschmolzen und extrudiert werden, sowie die Stereolithografie und verwandte Verfahren (SLA/DLP/MSLA), bei denen flüssige Photopolymere durch Licht selektiv ausgehärtet werden.

Beide Verfahren setzen prozessbedingt Stoffe frei, deren toxikologische und ökologische Relevanz zunehmend Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen ist. Während industrielle Anwender über etablierte arbeitshygienische Strukturen verfügen, findet ein wachsender Anteil der Nutzung in Privathaushalten, Bildungseinrichtungen, Bibliotheken (FabLabs/Makerspaces) und medizinnahen Kontexten statt, in denen entsprechende Schutzinfrastruktur häufig fehlt.^[6]

Diese Arbeit verfolgt einen transdisziplinären Ansatz und integriert Perspektiven aus (i) Arbeitssicherheit und Arbeitsmedizin, (ii) Toxikologie und Humanmedizin, (iii) Zell- und Umweltbiologie sowie (iv) Expositions- und Messwissenschaft. Ziel ist eine sachliche, reproduzierbare Wissensbasis, die der Allgemeinheit zugänglich gemacht wird, ohne präskriptive Verbindlichkeiten zu erzeugen.

Hinweis zum Geltungsanspruch dieses Dokuments

Dieses Arbeitspapier beschreibt den allgemeinen Stand der publizierten Forschung. Es formuliert keine verbindlichen Betriebsstandards und begründet keine über die geltende Rechtslage hinausgehenden Pflichten für einzelne Akteure. Konkrete Schutzmaßnahmen sind stets im Einzelfall auf Basis einer standortbezogenen Gefährdungsbeurteilung und der jeweils gültigen Sicherheitsdatenblätter festzulegen.

2. Methodik

2.1 Recherchestrategie

Die Literaturliste wurde über PubMed, Web of Science, Google Scholar und die ECHA-Stoffdatenbank im Zeitraum Januar 2013 bis Dezember 2025 erhoben. Die Suchstränge kombinierten verfahrensbezogene Begriffe („3D printing“, „fused deposition modeling“, „stereolithography“, „vat photopolymerization“) mit gesundheits- und expositionsbezogenen Begriffen („ultrafine particles“, „volatile organic compounds“, „sensitization“, „occupational exposure“, „toxicity“).

2.2 Auswahl und Bewertung

Eingeschlossen wurden Primärstudien mit quantitativen Emissions- oder Expositionsdaten, systematische und narrative Reviews sowie regulatorische Primärquellen. Die Bewertung der Evidenzstärke erfolgte qualitativ in Anlehnung an das GRADE-Konzept. Da randomisierte kontrollierte Studien in diesem Feld systembedingt fehlen, überwiegen Kammer- und Feldmessstudien sowie Querschnitts- und Kohortenuntersuchungen.

2.3 Transdisziplinäre Integration

Die Befunde wurden vier Analyseachsen zugeordnet (Arbeitssicherheit, Medizin/Toxikologie, Biologie, Messwissenschaft) und anschließend zu einem integrierten Schutzmodell zusammengeführt. Widersprüchliche Befunde werden explizit benannt.

3. Achse I – Arbeitssicherheit

3.1 Das STOP-Prinzip im Desktop-Maßstab

In der Arbeitssicherheit gilt international die Maßnahmenhierarchie nach dem STOP-Prinzip: Substitution vor technischen vor organisatorischen vor persönlichen Maßnahmen. Übertragen auf die dezentrale additive Fertigung ergibt sich folgende Priorisierung:

Stufe	Prinzip	SLA-Anwendung	FDM-Anwendung	Relative Wirksamkeit
S	Substitution	Materialwahl mit günstigerem H-Satz-Profil	PLA/PETG statt ABS/ASA wo funktional möglich	Hoch, technisch begrenzt
T	Technische Maßnahmen	Quellnahe Abluft ins Freie; geschlossene Wasch-/Härtekette	Einhausung mit Abluft bei emissionsstarken Materialien	Hoch (Primärmaßnahme)
O	Organisatorische Maßnahmen	Zugangsbeschränkung; Trennung Druck-/Aufenthaltsbereich	Geplante Druckzeiten; Lüftungsregime	Mittel
P	Persönliche Schutzausrüstung	Schutzhandschuhe, Atemschutz Typ A, Augenschutz	Atemschutz bei emissionsstarken Materialien	Niedrig (nachrangig)

Empirische Studien zur Wirksamkeit zeigen, dass die quellnahe Erfassung und Ableitung von Emissionen ins Freie die wirksamste Einzelmaßnahme darstellt; alleinige Aktivkohle- oder HEPA-Filterung reduziert die Belastung, eliminiert sie jedoch nicht und unterliegt einer unbemerkten Sättigung. ^[11]

4. Achse II – Medizin und Toxikologie

4.1 Photopolymere: Hautsensibilisierung

Acrylat- und Methacrylat-Monomere, die strukturgebende Komponente der meisten Photopolymere, sind als Hautsensibilisatoren der GHS-Kategorie 1 eingestuft (H317). Der zugrundeliegende Mechanismus ist eine zellvermittelte Typ-IV-Hypersensitivität. Nach erfolgter Sensibilisierung gilt die Reaktionsbereitschaft als persistent; klinisch ist eine ausgeprägte Kreuzreaktivität zwischen verschiedenen Acrylaten dokumentiert. ^[12]

Die klinische Relevanz reicht über den Arbeitskontext hinaus: Sensibilisierte Personen können auf acrylathaltige Medizin- und Konsumprodukte (Dentalkomposite, Knochenzement, kontinuierliche Glukosesensoren, künstliche Nägel) reagieren. ^[4]

4.2 Atemwegswirkungen flüchtiger und partikulärer Emissionen

Ultrafeine Partikel (Durchmesser < 100 nm) weisen aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche und tiefen Atemwegsdeposition ein eigenständiges Gefährdungsprofil auf. Tier- und Zellstudien verbinden UFP-Exposition mit oxidativem Stress, pulmonaler Entzündung und kardiovaskulären Effekten. ^[7]

Unter den VOC ist Styrol (vorwiegend bei ABS/ASA) von der Internationalen Agentur für Krebsforschung (IARC) als Gruppe 2B („möglicherweise karzinogen“) klassifiziert; Formaldehyd (u. a. bei PLA und Photopolymeren) ist als Gruppe 1 („karzinogen für den Menschen“) eingestuft. ^[9]

Vulnerable Gruppen (gemäß Literatur)

Personen mit vorbestehenden obstruktiven Atemwegserkrankungen (Asthma, COPD).

Kinder und Jugendliche (höhere gewichtsbezogene Atemrate, sich entwickelndes Immunsystem).

Schwangere (einzelne Monomere wie TPO und Caprolactam mit reproduktionstoxikologischem Verdacht).

Bereits acrylatensibilisierte Personen (Kreuzreaktivität).

5. Achse III – Biologie und Umwelt

5.1 Zelluläre und aquatische Effekte unausgehärteter Photopolymere

In-vitro- und Modellorganismus-Studien (u. a. an Zebrafisch-Embryonen, *Danio rerio*) zeigen, dass unausgehärtete bzw. unvollständig ausgehärtete Photopolymere entwicklungstoxische und teilweise letale Effekte auslösen können. Eine vollständige Aushärtung reduziert diese Toxizität deutlich, eliminiert Restmonomer-Migration jedoch nicht zwangsläufig. ^[14]

5.2 Persistenz, Mikroplastik und Abfallfate

Flüssige Photopolymerreste und kontaminierte Reinigungslösungen (Isopropanol) sind nach der EU-Abfallrahmenrichtlinie als gefährlicher Abfall einzustufen. Acrylat-Komponenten weisen teilweise aquatische Toxizität auf (z. B. H412); ein Eintrag in das Abwassersystem ist daher zu vermeiden.^[14]

Bei FDM-Materialien steht der biologische Abbau im Vordergrund: PLA ist unter industriellen Kompostierungsbedingungen abbaubar, nicht jedoch unter Umgebungsbedingungen. Erodierende Kunststoffteile tragen zur Mikroplastikbelastung bei. Faserverstärkte Filamente (CF/GF) setzen beim Erhitzen und bei der mechanischen Nachbearbeitung lungengängige Faserfragmente frei.

6. Achse IV – Expositions- und Messwissenschaft

6.1 Messgrößen

Die Erfassung prozessbedingter Emissionen erfolgt über zwei Hauptgrößen: die Partikelanzahlkonzentration bzw. -emissionsrate (UFP) und die Konzentration einzelner oder summierter flüchtiger organischer Verbindungen (VOC / TVOC).

6.2 Analysemethoden im Vergleich

Methode	Messgröße	Prinzip	Stärken	Grenzen
SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer)	UFP-Größenverteilung	Elektrische Mobilität	Hohe Größenauflösung 2,5–1000 nm	Laborgerät, kostenintensiv
CPC (Condensation Particle Counter)	Partikelanzahl	Kondensationsvergrößerung + optische Zählung	Hohe Sensitivität bei niedrigen Konz.	Keine Größeninformation
GC-MS	Speziierte VOC	Gaschromatographie + Massenspektrometrie	Substanzgenaue Identifikation	Probennahme + Laborzeit nötig
PTR-MS	VOC in Echtzeit	Protonentransfer-Reaktion	Zeitlich hochaufgelöst	Geräteseitig aufwendig
PID (Photoionisationsdetektor)	TVOC-Summe	Photoionisation	Mobil, kostengünstig, Echtzeit	Keine Spezierung; Querempfindlich
Aktivkohleröhrchen + GC	Zeitgewichtete VOC	Adsorption + Laboranalyse	Standard im Arbeitsschutz (TWA)	Nur Mittelwert über Probennahmedauer

6.3 Repräsentative Emissionswerte aus der Literatur

Die folgenden Werte sind verfahrens- und materialabhängige Größenordnungen aus Kammer- und Feldstudien. Sie dienen der Orientierung, nicht als absolute Grenzwerte; reale Werte variieren mit Drucktemperatur, Materialcharge, Raumvolumen und Luftwechselrate.

Verfahren / Material	UFP-Emissionsrate	TVOC-Rate	Leit-VOC	Quelle
FDM / PLA	$\sim 10^8\text{--}10^9 \text{ min}^{-1}$	0,2–0,5 mg h ⁻¹	Lactid, Acetaldehyd	Azimi 2016 [12]
FDM / ABS	$\sim 10^{10}\text{--}10^{11} \text{ min}^{-1}$	1,0–3,5 mg h ⁻¹	Styrol, Formaldehyd	Stephens 2013 [7]
FDM / ASA	$\sim 10^{10} \text{ min}^{-1}$	0,8–3,0 mg h ⁻¹	Styrol, Acrylate	NIOSH 2023 [11]
FDM / Nylon	$\sim 10^9\text{--}10^{10} \text{ min}^{-1}$	0,5–2,0 mg h ⁻¹	Caprolactam	Deng 2016 [15]
FDM / CF-Verbund	$\sim 10^{10}\text{--}10^{11} \text{ min}^{-1}$	wie Basispolymer	+ Faserfragmente	Vance 2017 [13]
SLA / Photopolymer	verfahrensbedingt gering	bis > 1,0 mg m ⁻³ *	Formaldehyd, Acrylate	CIRI 2021 [5]

* Raumkonzentration bei unzureichender Belüftung; SLA emittiert primär VOC und weniger thermisch erzeugte UFP als FDM.

7. Integriertes Schutzmodell

Die Zusammenführung der vier Analyseachsen ergibt ein kohärentes, nicht-präskriptives Orientierungsmodell. Die nachstehenden Punkte fassen den Konsens der ausgewerteten Literatur zusammen:

1. Quellnahe Abluftführung ins Freie ist die wirksamste technische Einzelmaßnahme für beide Verfahren.
2. Beim Umgang mit unausgehärteten Photopolymeren reduzieren chemikalienbeständige Schutzhandschuhe (Nitril) und Augenschutz die dermale und okuläre Exposition; Durchbruchzeiten begrenzen die Tragedauer.
3. Atemschutz gegen organische Dämpfe (Filtertyp A) adressiert VOC; partikelfilternde Masken (FFP/N95) sind hierfür wirkungslos, jedoch bei faserhaltigen Materialien (P3) relevant.
4. Vollständige Nachhärtung von SLA-Bauteilen mindert Restmonomergehalt und biologische Toxizität.
5. Materialsubstitution (z. B. PLA/PETG statt ABS/ASA) senkt die Emissionslast an der Quelle.
6. Sachgerechte Abfalltrennung verhindert Umwelteinträge gemäß EU-Abfallrahmenrichtlinie.

8. Limitationen und Forschungsbedarf

- Es fehlen prospektive Langzeit-Kohortenstudien zur Sensibilisierungs- und Atemwegsmorbidität bei dezentralen Heimanwendern.
- Standardisierte, gerätevergleichende Emissionsprüfprotokolle für Desktop-Drucker befinden sich erst in Entwicklung (ISO/ANSI-Initiativen).
- Die toxikologische Datenlage zu neueren, TPO-substituierenden Photoinitiatoren ist unvollständig.
- Langzeitmigration von Restmonomeren aus ausgehärteten Bauteilen über die Produktnutzungsdauer ist unzureichend untersucht.
- Die narrative Synthese dieser Arbeit ersetzt keine quantitative Metaanalyse; eine systematische Aggregation der Emissionsdaten bleibt künftiger Forschung vorbehalten.

9. Schlussfolgerung

Die dezentrale additive Fertigung ist bei sachgerechter Handhabung beherrschbar. Die ausgewertete Evidenz stützt einen hierarchischen, an die Desktop-Skala angepassten Schutzansatz, dessen Kern die quellnahe Ableitung von Emissionen ins Freie bildet. Wissenslücken bestehen vorrangig im Langzeitbereich und in der Standardisierung von Messverfahren. Die Veröffentlichung dieser Synthese soll Anwendern, Bildungseinrichtungen und Institutionen eine sachliche, herstellerunabhängige Orientierung bieten.

Erklärungen

Interessenkonflikt

Der Autor betreibt mit Schichtwerk ein Dienstleistungsunternehmen im Bereich der additiven Fertigung. Diese Arbeit wurde ohne externe Förderung erstellt und verfolgt keine produkt- oder herstellerbezogenen Werbeziele. Die dargestellten Befunde geben den publizierten Forschungsstand wieder.

Finanzierung

Diese Arbeit erhielt keine externe Förderung.

Datenverfügbarkeit

Diese Arbeit basiert ausschließlich auf publizierter Sekundärliteratur und öffentlich zugänglichen regulatorischen Quellen. Es wurden keine neuen Primärdaten erhoben. Alle herangezogenen Quellen sind im Literaturverzeichnis aufgeführt.

Haftungsausschluss

Dieses Dokument dient ausschließlich der Information und Wissensverbreitung. Es stellt keine verbindliche Norm, keine Betriebsanweisung und keine rechtsverbindliche Auskunft dar. Verantwortung für konkrete Schutzmaßnahmen verbleibt

beim jeweiligen Anwender auf Basis einer standortbezogenen Gefährdungsbeurteilung und der gültigen Sicherheitsdatenblätter.

Empfohlene Zitierweise

[Nachname] T. Gesundheits-, Arbeits- und Umweltsicherheit in der dezentralen additiven Fertigung: Eine transdisziplinäre Synthese. Preprint, Version 1.0. Zenodo; 2026. DOI: [bei Upload].

Literaturverzeichnis

Vancouver-Stil, nummeriert in Zitationsreihenfolge.

- [1] AmeraLabs UAB. Resin Safety Myths in 3D Printing: A Comprehensive Guide. Vilnius: AmeraLabs Technical Publication; 2026.
- [2] Pesonen M, Jolanki R, Larese Filon F, et al. Patch test results of the European baseline series among patients with occupational contact dermatitis (ESSCA network, 2009–2012). *Contact Dermatitis*. 2015;72(3):154–163.
- [3] Aalto-Korte K, Suuronen K, Kuuliala O, Henriks-Eckerman ML, Jolanki R. Occupational contact allergy to monomeric acrylates. *Contact Dermatitis*. 2010;63(6):340–346.
- [4] Spencer A, Gazzani P, Thompson DA. Acrylate and methacrylate contact allergy and allergic contact disease: a 13-year review. *Contact Dermatitis*. 2016;75(3):157–164.
- [5] Chemical Insights Research Institute. Characterization of Volatile Organic Compound and Particle Emissions from Desktop 3D Printers Using Filaments and Resins. Research Triangle Park: CIRI/UL; 2021.
- [6] Baguley BJ, 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] US Environmental Protection Agency. Characterization of Emissions from Fused Deposition Modeling 3D Printers. Washington DC: EPA; 2020. EPA/600/R-20/166.
- [9] Kim H, Park S, Kim Y, et al. Volatile organic compound emissions from fused deposition modelling 3D printers and associated health risks. *Indoor Air*. 2022;32(4):e13032.
- [10] Lönnroth EC. Toxicity of medical glove materials and dental monomers: a review. *Swed Dent J Suppl*. 2003;157:1–83.
- [11] National Institute for Occupational Safety and Health. 3D Printing Safety: Filaments and Resins. Cincinnati: NIOSH; 2023. Publication 2023-101.
- [12] Azimi P, Zhao D, Pesto C, Khosrowpour N, Stephens B. Emissions of ultrafine particles and VOCs from commercially available desktop 3D 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] Oskui SM, Diamante G, Liao C, et al. Assessing and reducing the toxicity of 3D-printed parts. *Environ Sci Technol Lett*. 2016;3(1):1–6.
- [15] Deng Y, Cao SJ, Chen A, Guo Y. The impact of manufacturing parameters on submicron particle emissions from a desktop 3D printer. *Build Environ*. 2016;104:311–319.
- [16] European Chemicals Agency (ECHA). Candidate List of Substances of Very High Concern and Substance Evaluation. Helsinki: ECHA; 2024.
- [17] Zhang Q, Wong JPS, Davis AY, Black MS, Weber RJ. Characterization of particle emissions from consumer fused deposition modeling 3D printers. *Aerosol Sci Technol*. 2017;51(11):1275–1286.
- [18] Väisänen A, Alonen L, Ylönen S, Hyttinen M. Volatile organic and particle emissions of FDM 3D printers in workplaces. *Saf Health Work*. 2022;13(1):65–74.
- [19] International Agency for Research on Cancer. IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans: Styrene, Formaldehyde. Lyon: IARC/WHO; 2019/2012.
- [20] European Parliament and Council. Regulation (EC) No 1272/2008 on Classification, Labelling and Packaging of Substances and Mixtures (CLP). Brussels: OJ L 353; 2008.