



3D Druckprozesse – Partikel und VOC-Freisetzung in Innenräumen und mögliche Risiken für den Verbraucher

Heike Romanowski

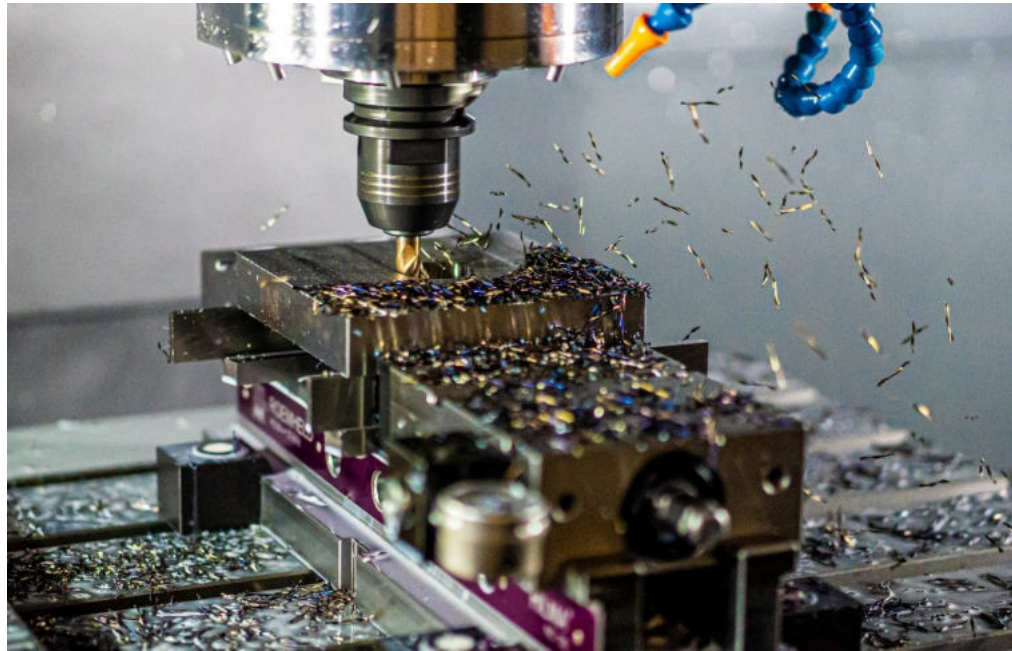
Abteilung: Chemikalien- und Produktsicherheit
Fachgruppe: Produktbeschaffenheit und Nanotechnologie

Gliederung

1. 3D Druck – Was steckt dahinter?
2. Mögliche Risiken
3. Stand der Forschung
4. Ausblick

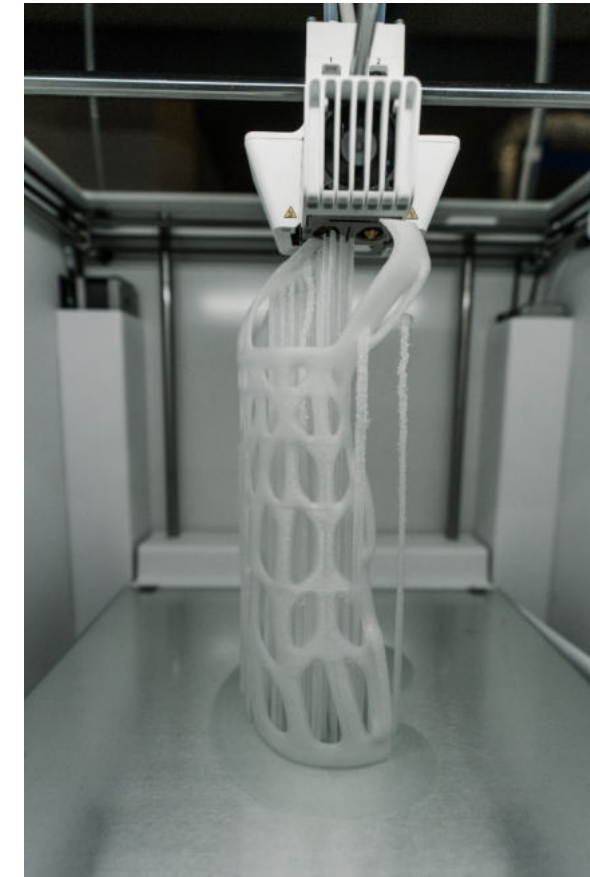
- 1. 3D Druck – Was steckt dahinter?**
2. Mögliche Risiken
3. Stand der Forschung
4. Ausblick

1. 3D Druck – Additives Verfahren



Subtraktive Fertigung z.B. Fräsen

Photo by Daniel Smyth on <https://unsplash.com/photos/8IRxZRFR7ig>



Additive Fertigung / 3D Druck

Vorteile:

- Komplexere Strukturen
- Individuelle Anfertigung
- Weniger Material

Photo by Tom Claes on <https://unsplash.com/photos/mNVh70d9zUU>

3D Druck - Anwendungsbeispiele

Unternehmenskooperation:

Stratasys und Airbus weiten ihre Zusammenarbeit beim 3D-Druck von Polymerteilen für die Kabinenausstattung aus

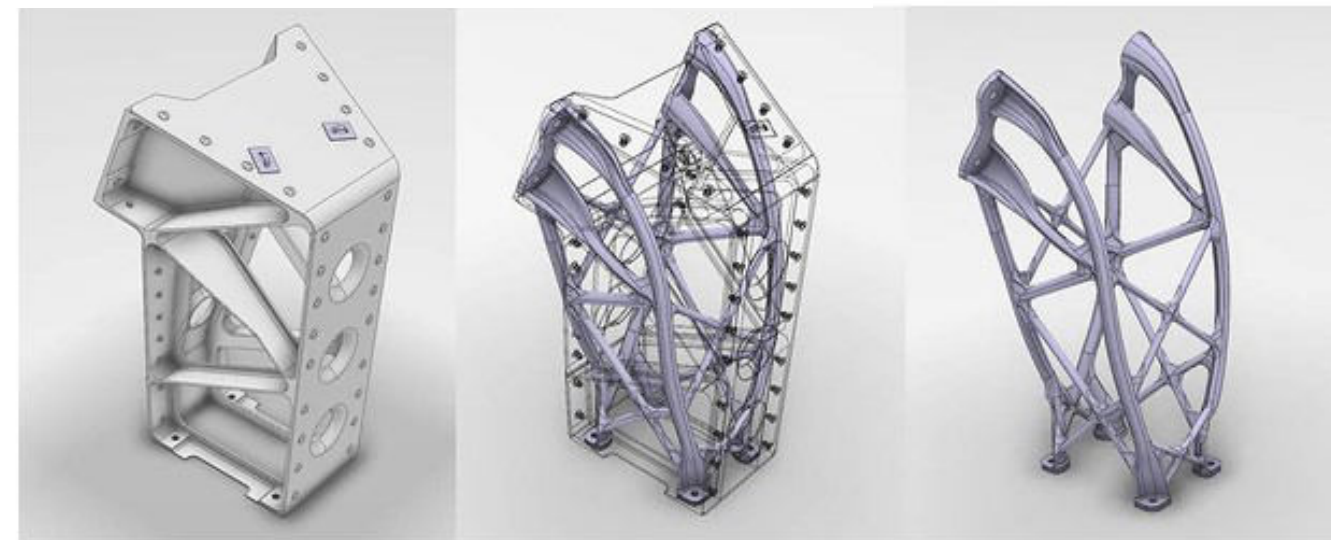


Der Airbus A350 besitzt über 1000 3D-gedruckte Bauteile

3. März 2021



Der US-amerikanische 3D-Drucker-Hersteller Stratasys gab bekannt, dass das Unternehmen eine Vertragsverlängerung für die Produktion von 3D-gedruckten Polymerteilen für die Kabinenausstattung für Airbus-Flugzeuge erhalten hat. Der Vertrag wird dabei auf Ersatzteile für die Wartung, Reparatur und Überholung (MRO) sowie auf Bauteile für Flugzeugplattformen (wie A300, A330, A340 und A320) zusätzlich zum A350 ausgedehnt.



Optimierung eines Bauteiles für die Luftbranche / © Airbus

<https://www.3d-grenzenlos.de/magazin/thema/airbus-3d-druck/>

<https://www.3dnatives.com/de/airbus-muenchen-3d-druck-110420161/#!>

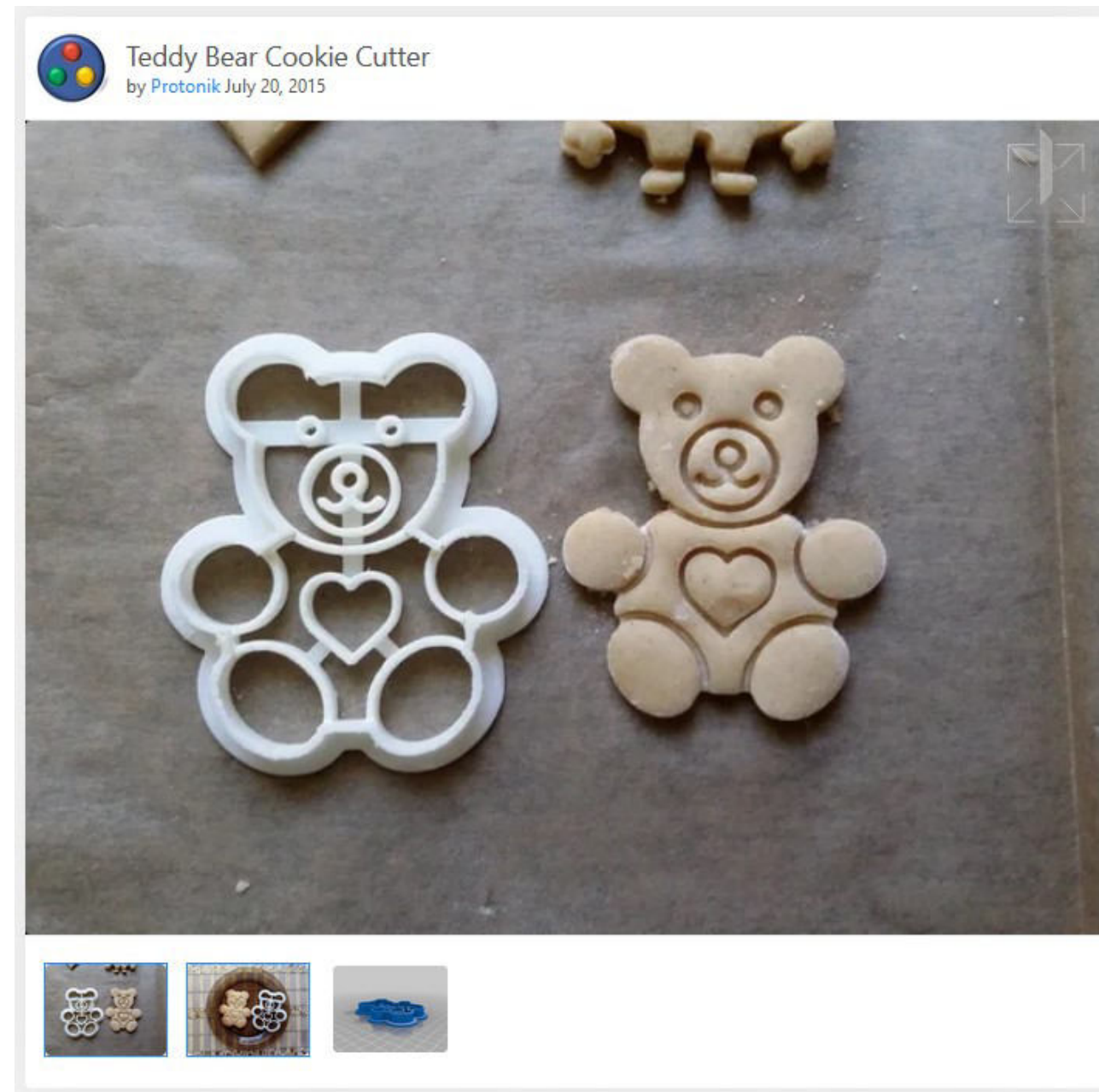
3D Druck - Anwendungsbeispiele



Individuelle Anfertigung in der Medizin

Photo by Tom Claes on <https://unsplash.com/photos/mNVh70d9zUU>

3D Druck - Anwendungsbeispiele



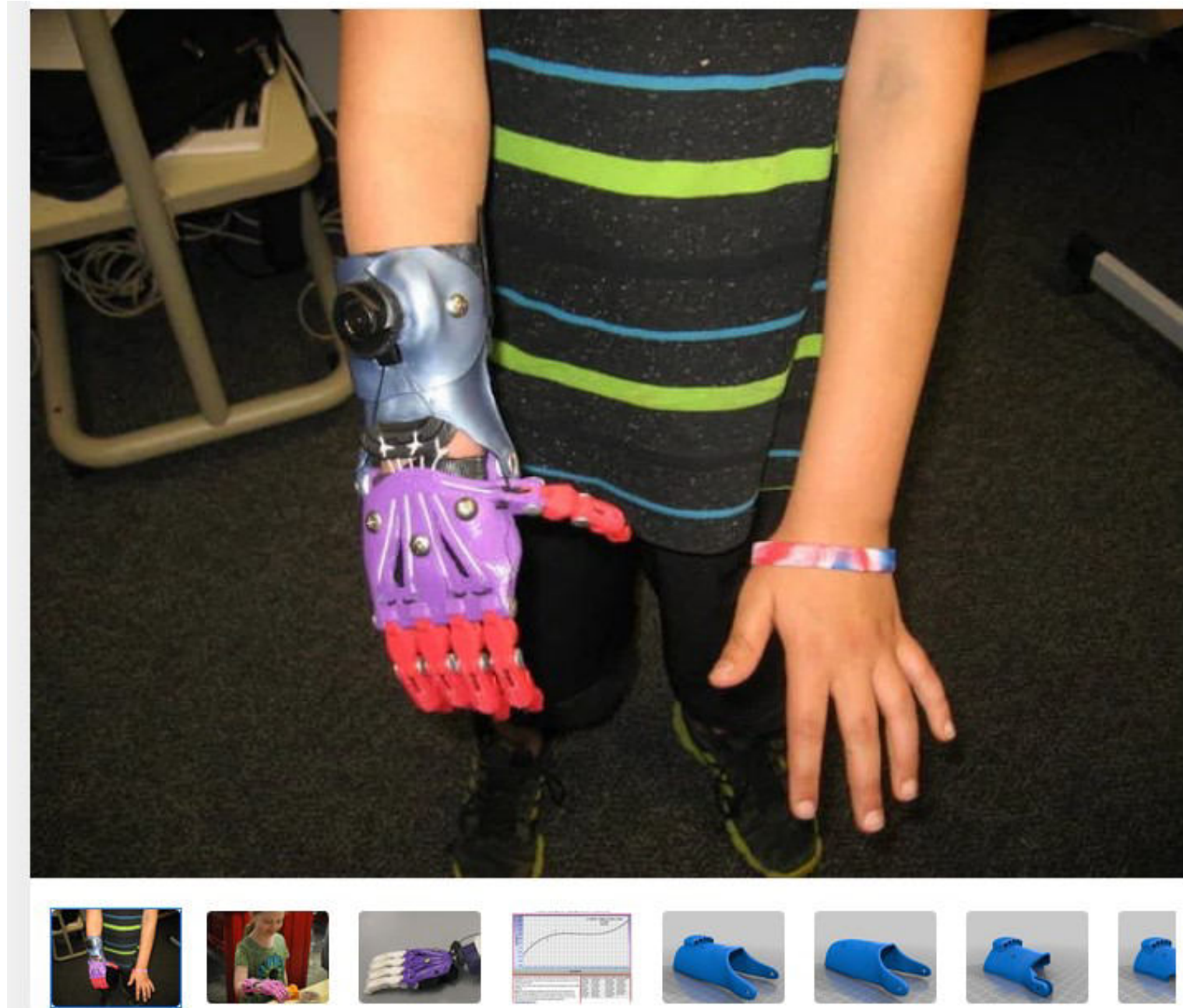
Source: <https://www.thingiverse.com>

3D Druck - Anwendungsbeispiele



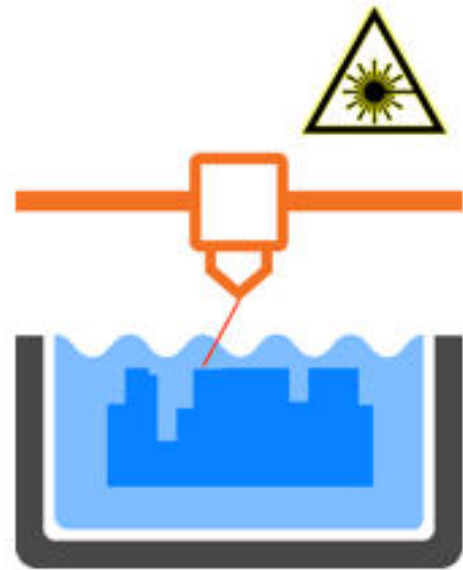
Source: <https://www.thingiverse.com>

3D Druck - Anwendungsbeispiele



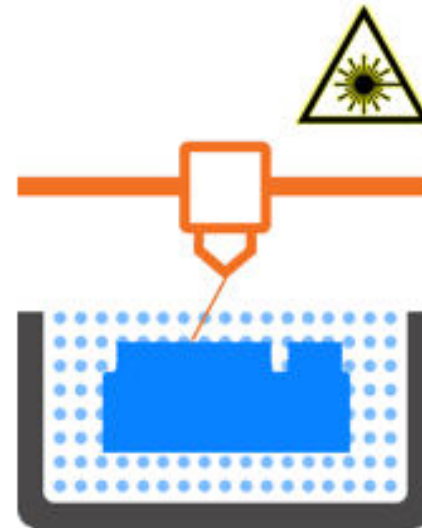
Source: <https://www.thingiverse.com>

Verschiedene 3D Druck Arten



Flüssigkeit

- Mittels eines UV-Lasers wird fotosensitives Material an den definierten Stellen ausgehärtet.
- Erstes Additives Verfahren
- Stereolithografie (SLA)



Pulver

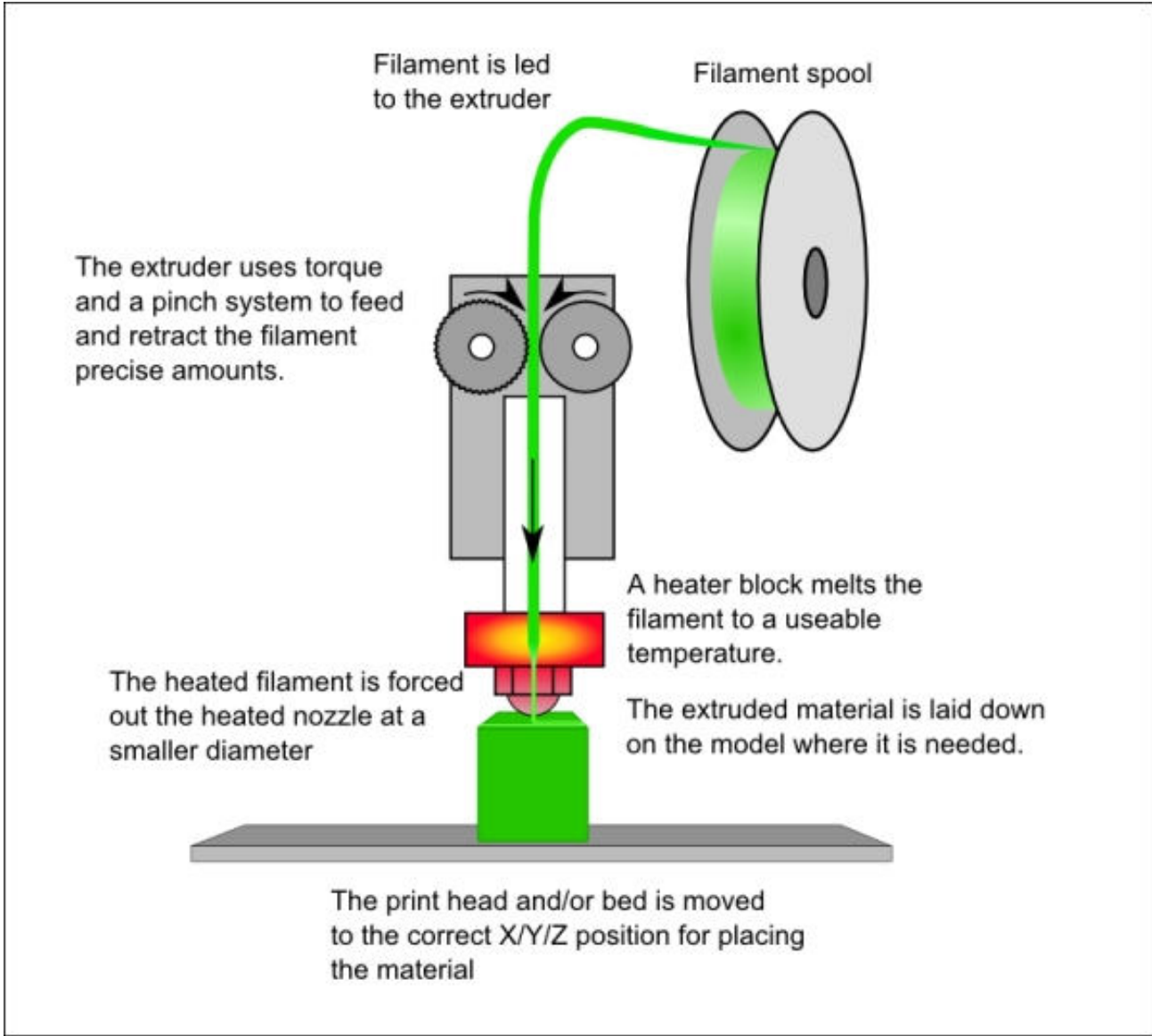
- Kunststoff oder Metall Pulver wird mit Laser geschmolzen
- Selective Laser Sintering (SLS)



Filament/Kunststoffstrang

- Thermoplastik Strang wird geschmolzen und Schicht für Schicht aufgetragen
- Günstigste Methode
- Meist genutzt bei Verbrauchern
- **Fused Filament Fabrication (FFF)** oder Fused Deposition Modeling (FDM) genannt

Fused Filament Fabrication (FFF)



M.S. Shukri et al. (2016) Quality Parts of Portable FDM Machine used in Direct Investment Casting, International Journal of Engineering and Technology

Große Auswahl an Filamenten

Kunststoffe:

- **PLA** (Polylactide)
- **ABS** (Acrylnitril-Butadien-Styrol)
- **PET, PETG**
(Polyethylenterephthalat, -Glykol)
- **Nylon** (Polyamid)
- ...

Additive:

- Metall (Kupfer, Stahl, Aluminium,...)
- Holz
- Graphen, Carbon Fasern und Carbon Nanotubes (CNTs)
- ...

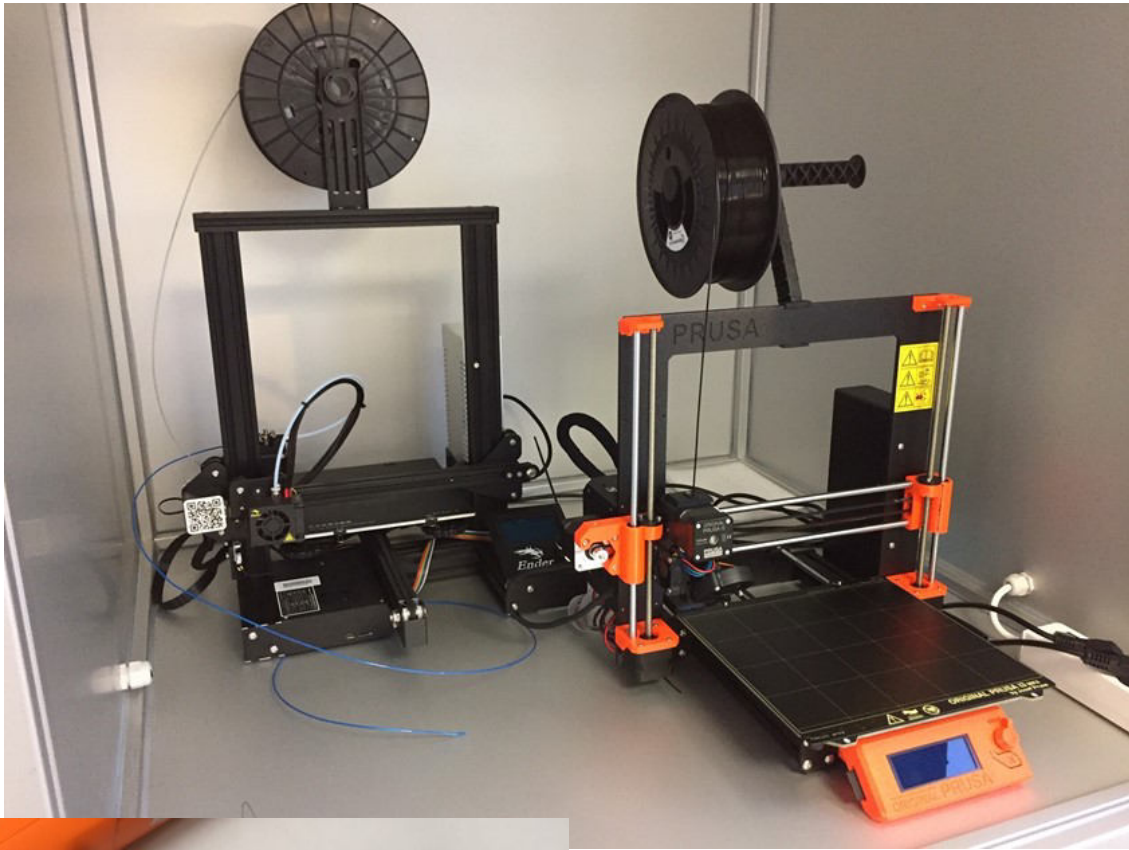
 <p>Technikoa – Filafresh Duftfilament – TPU 96A – Vanilla Muffin – 1.75 mm – 0,5 kg</p> <p>39,90 €</p>	 <p>Technikoa – Filafresh Duftfilament – TPU 96A – Wild Strawberry – 1.75 mm – 0,5 kg</p> <p>39,90 €</p>	 <p>Formfutura – StoneFil – PLA Filament – Pottery Clay Töpferton – 1.75 mm – 0,5 kg</p> <p>34,90 €</p>	 <p>Formfutura – CarbonFil – Carbon Filament – Schwarz – 1.75 mm – 0,5 kg</p> <p>39,90 €</p>
 <p>Copper 3D – MDFlex – TPU Filament – 98A – Rot – 2.85 mm – 0,5 kg</p> <p>79,90 €</p>	 <p>Copper 3D – PLActive Filament – Blau (Sky Blue) – 1.75 mm – 0,75 kg</p> <p>79,90 €</p>	 <p>TCPoly – Ice9 wärmeleitend – ESD-Nylon Filament – Grau – 1.75 mm – 0,5 kg</p> <p>99,90 €</p>	 <p>Copper 3D – PLActive Filament – Grün (Apple Green) – 1.75 mm – 0,75 kg</p> <p>79,90 €</p>

Produkte auf: www.filamentworld.de

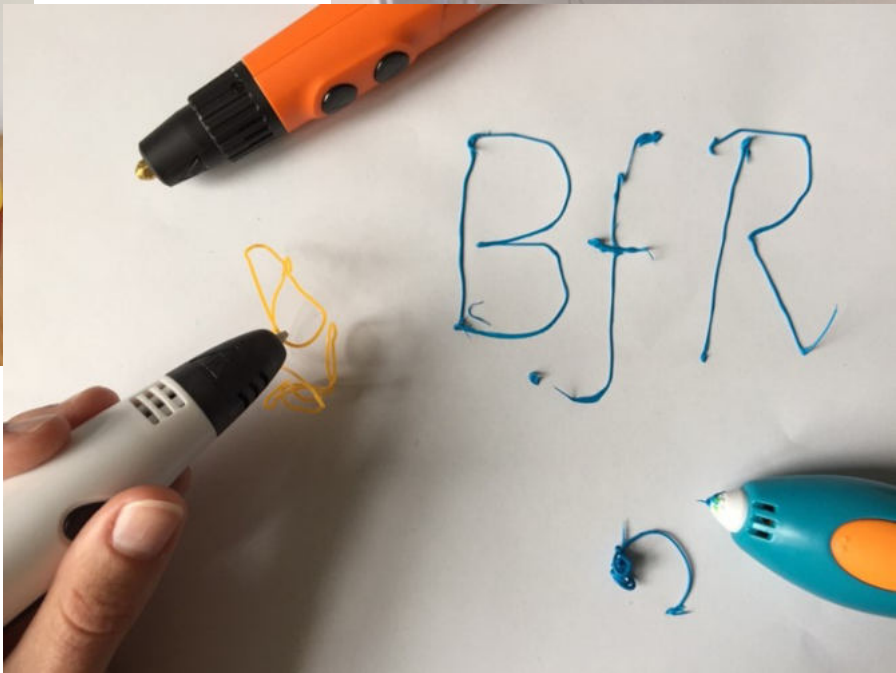
Geräte am BfR



250€



200-800€



~40€

Gliederung

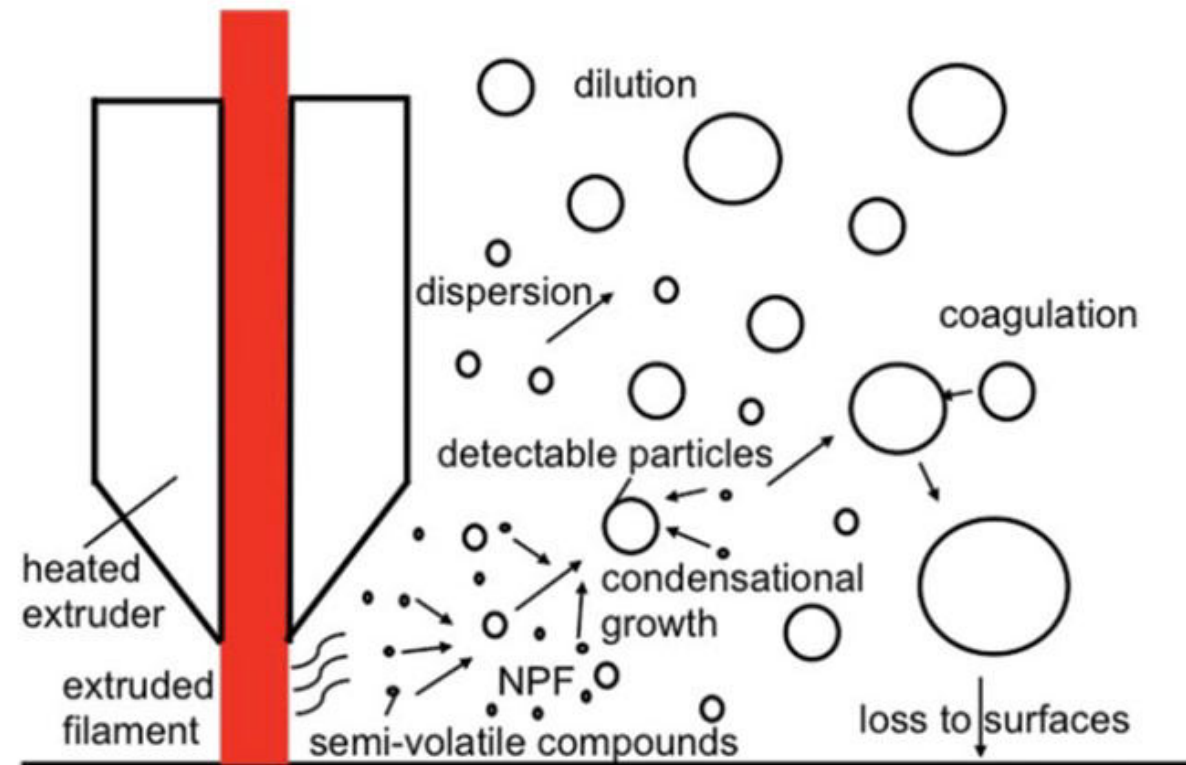
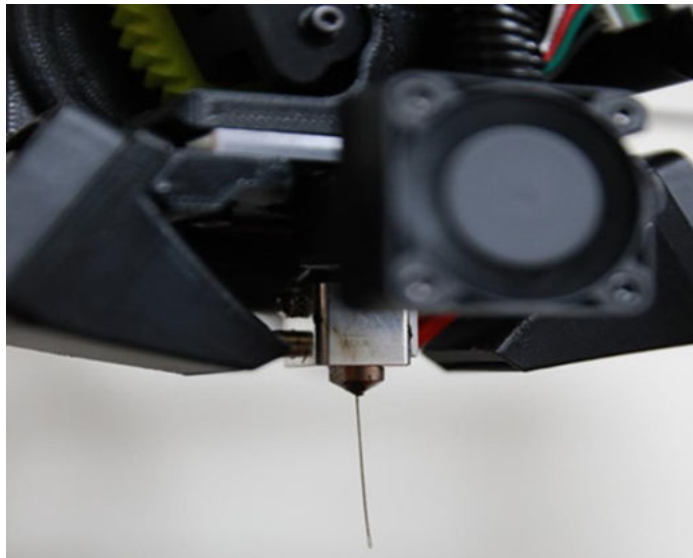
1. 3D Druck – Was steckt dahinter?

2. Mögliche Risiken

3. Stand der Forschung

4. Ausblick

2. Mögliche Risiken: Hitze, Partikel und VOC-Freisetzung



Qian Zhang, Jenny P. S. Wong, Aika Y. Davis, Marilyn S. Black & Rodney J. Weber (2017) Characterization of particle emissions from consumer fused deposition modeling 3D printers, *Aerosol Science and Technology*, 51:11, 1275-1286, DOI: 10.1080/02786826.2017.1342029

2. Mögliche Risiken: Nah am Prozess



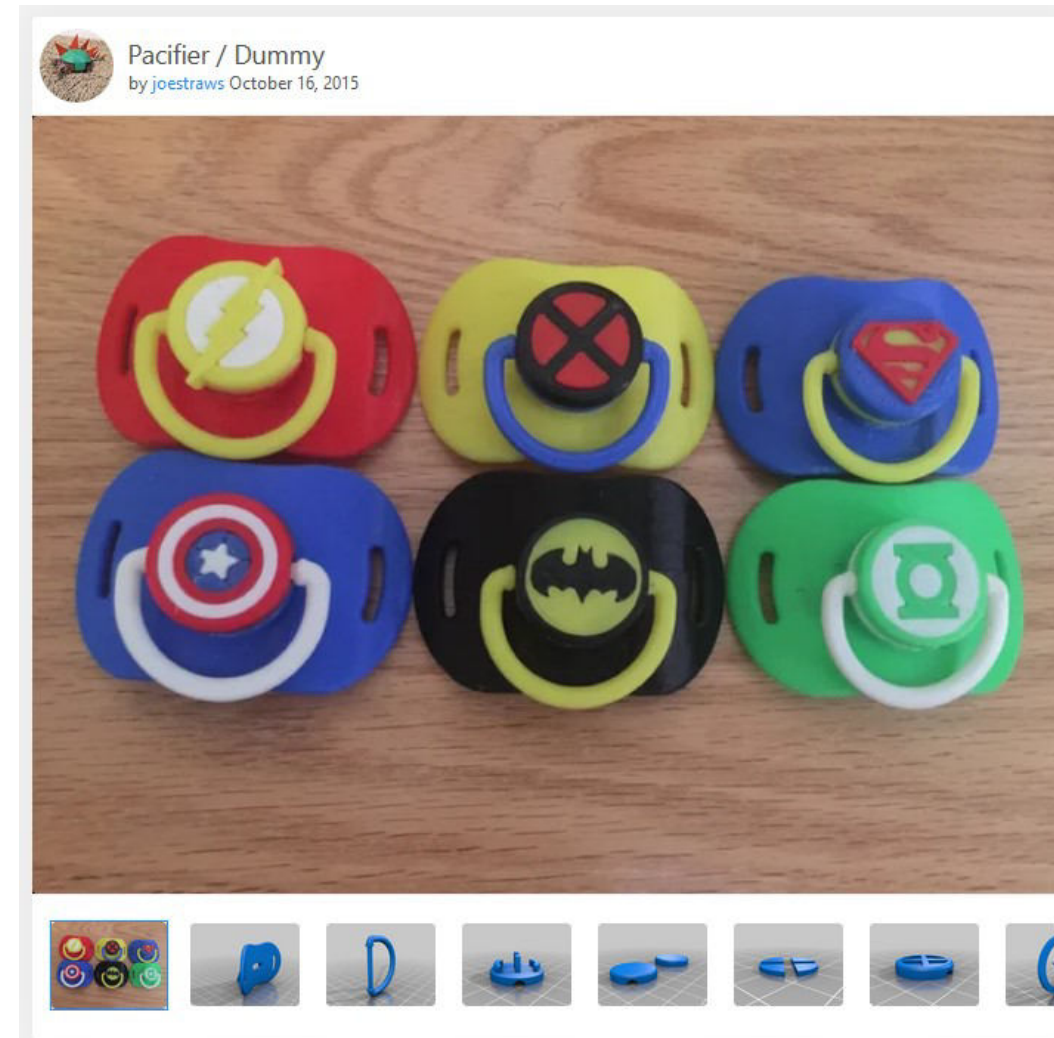
Kinder sind nah am Druckprozess

<https://pixabay.com/de/photos/kinder-hobby-kreativ%C3%A4t-3d-stift-5987444/>

2. Mögliche Risiken: gedruckte Teile



Teller, Besteck, Becher



Schnulleraufsatz

Source: <https://www.thingiverse.com/thing:1075795>

Gliederung

1. 3D Druck – Was steckt dahinter?

2. Mögliche Risiken

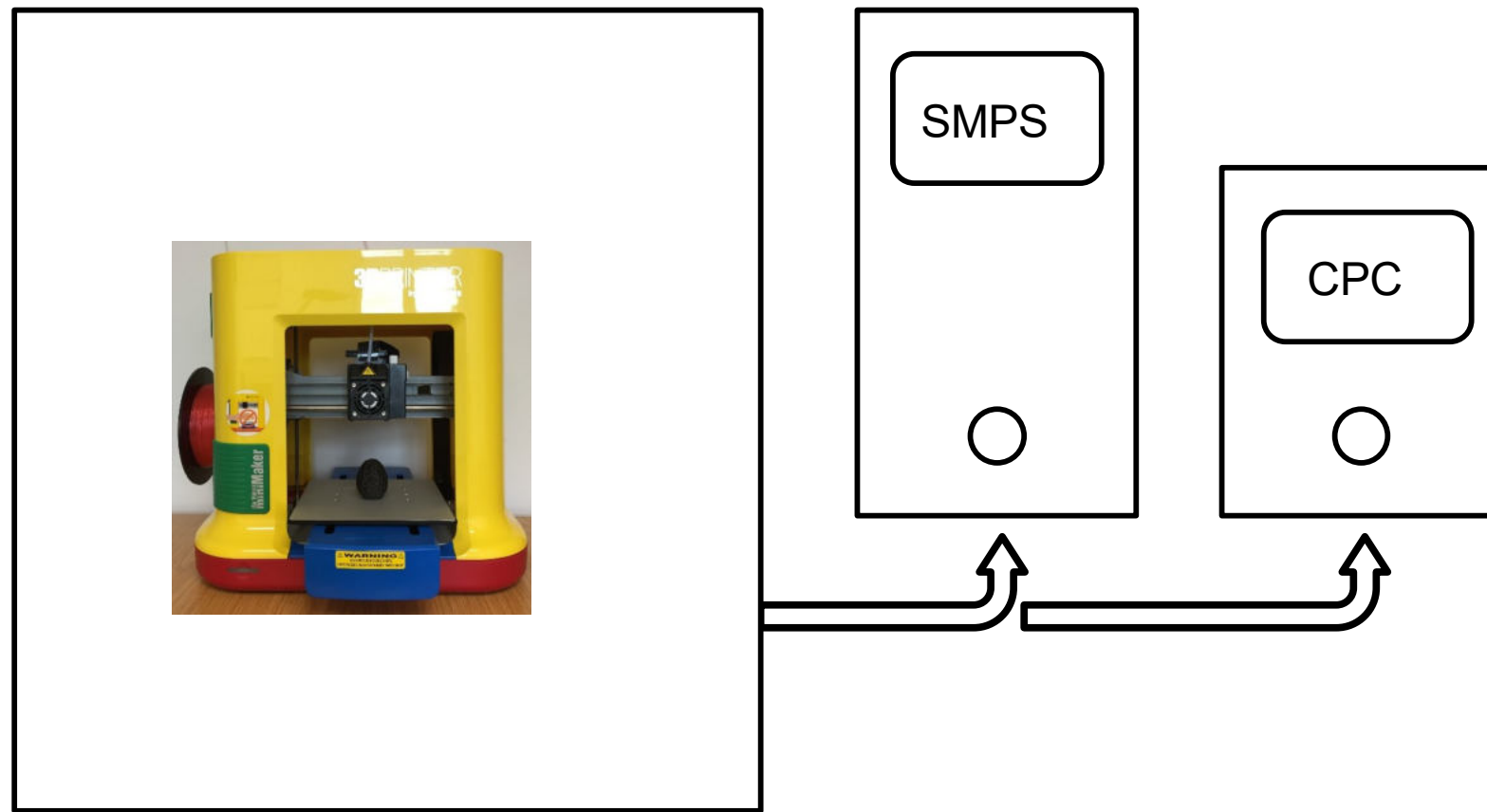
3. Stand der Forschung

- Partikel-Emission
- Filamente mit Additive
- VOC-Emission
- Gesundheitliche Bewertung

4. Ausblick

3. Stand der Forschung: Partikel-Emission Messtechniken

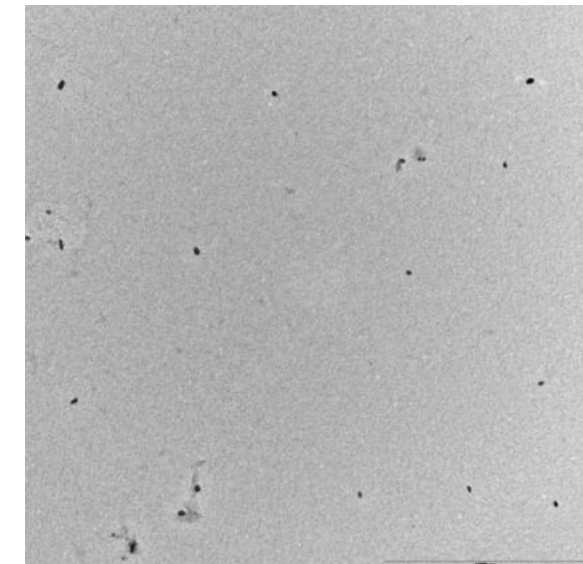
Online



Kammer/Raum

Offline

TEM/SEM Aufnahme



3. Stand der Forschung: Partikel-Emission Ergebnisse

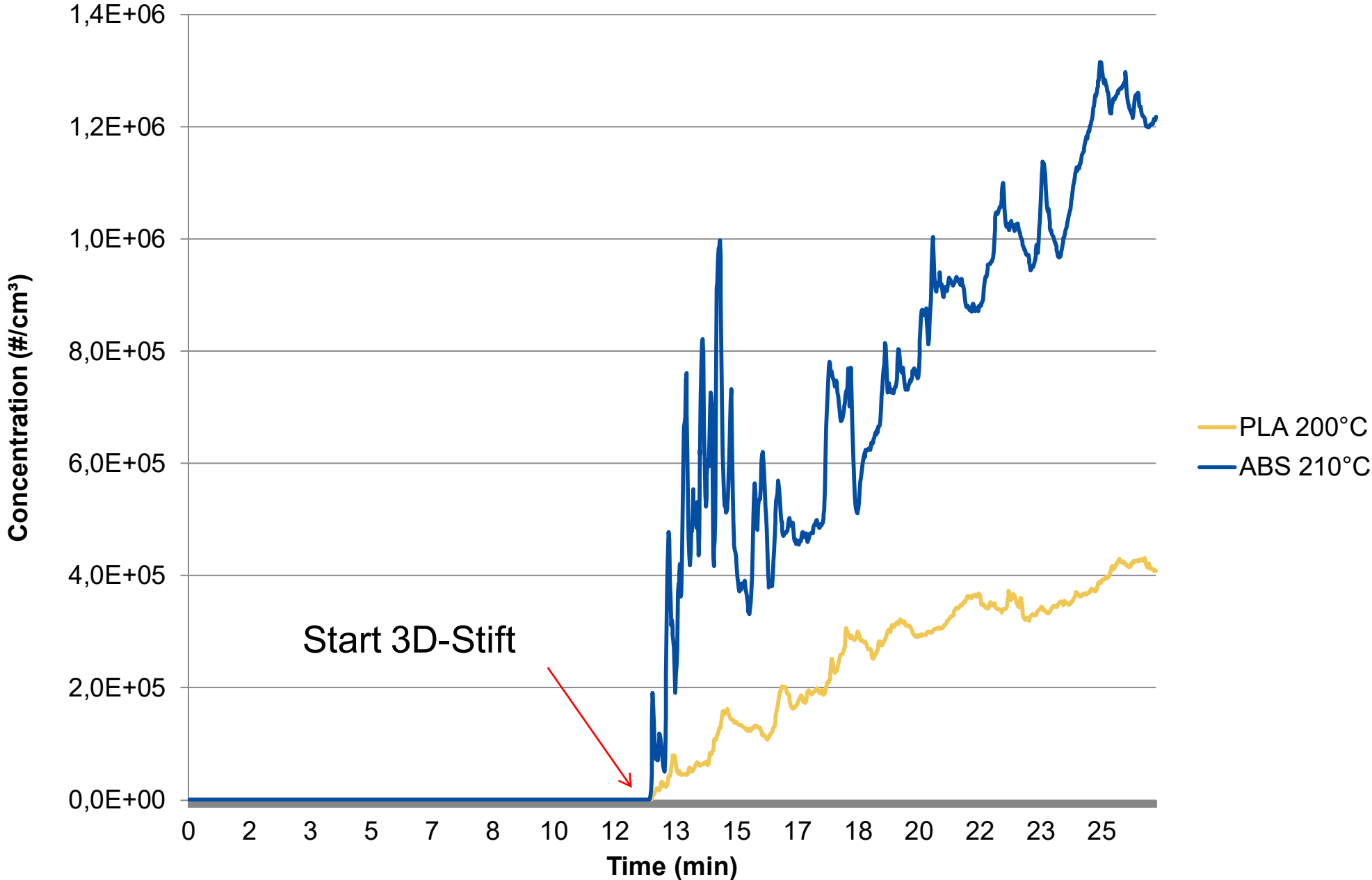
- Konzentrationen: $10^3 - 10^6 \text{ \#/cm}^3$
- Emissionsrate: $10^7 - 10^{12} \text{ \#/min}$

- Partikelgröße: $< 100 \text{ nm}$
- Höhere Temp. → Höhere Emission
- ABS vs PLA → Höhere Emission



"<https://www.freepik.com/photos/technology>">Technology photo created by jannoon028

3. Stand der Forschung: Partikel-Freisetzung 3D Stift



TEM Aufnahmen: Partikel < 100nm

PLA Partikel ~50nm

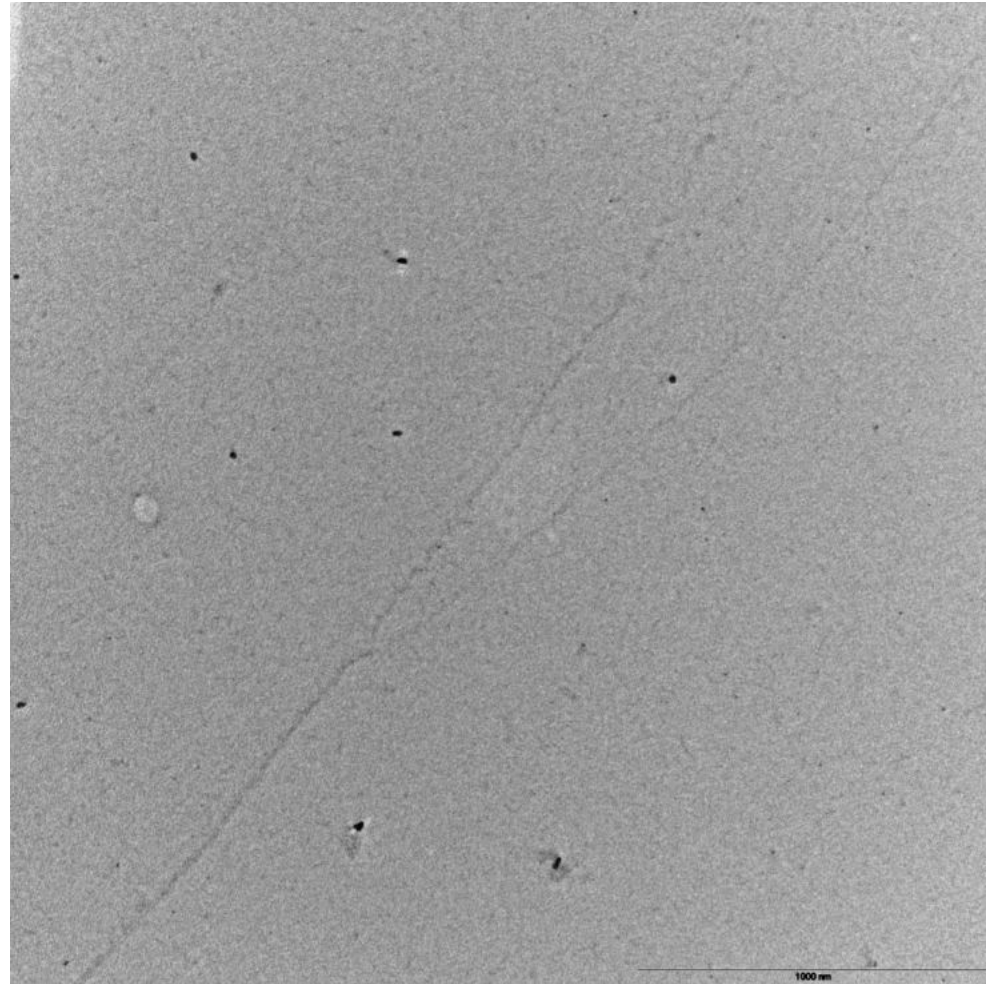


Bild1: PLA Druck mit 3D Stift aufgefangene Partikel 1000nm

ABS Partikel ~100nm

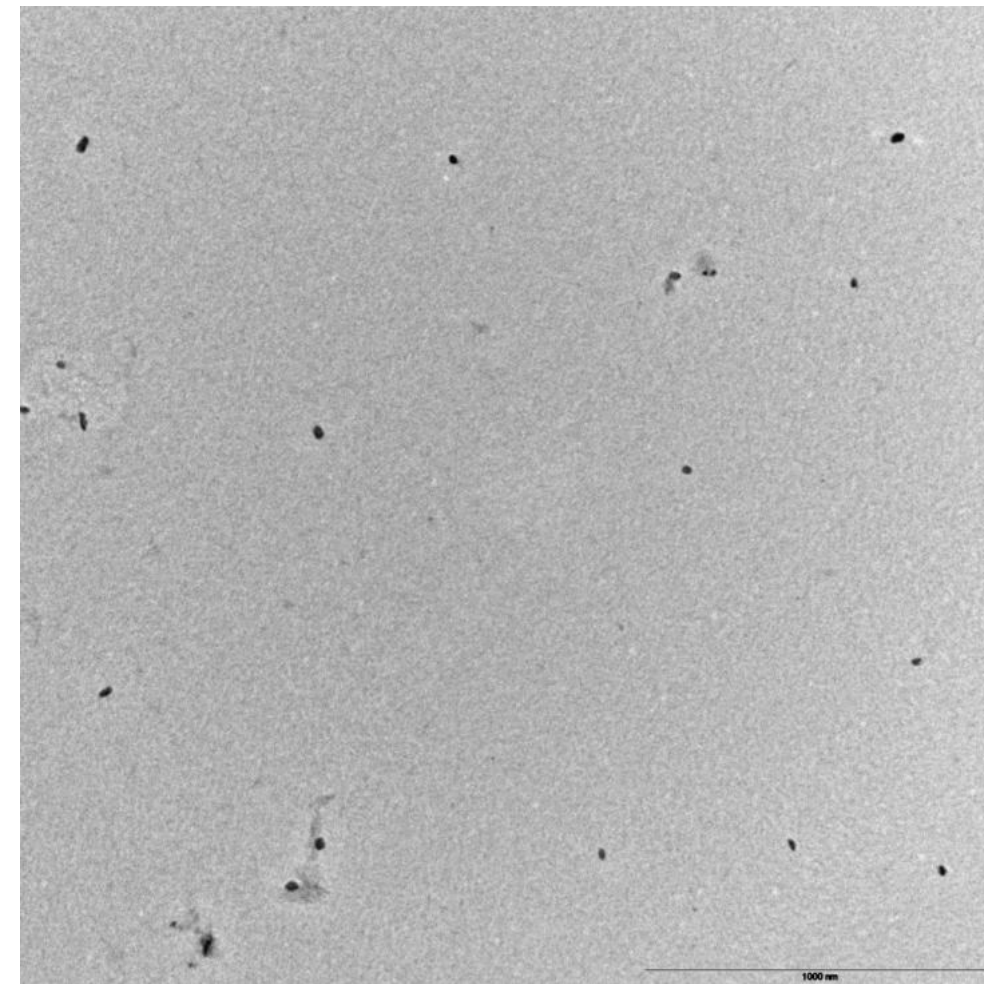


Bild 2: ABS Druck mit 3D Stift aufgefangene Partikel 1000nm

Große Auswahl an Filamenten

Kunststoffe:

- **PLA** (Polylactide)
- **ABS** (Acrylnitril-Butadien-Styrol)
- **PET, PETG**
(Polyethylenterephthalat, -Glykol)
- **Nylon** (Polyamid)
- ...

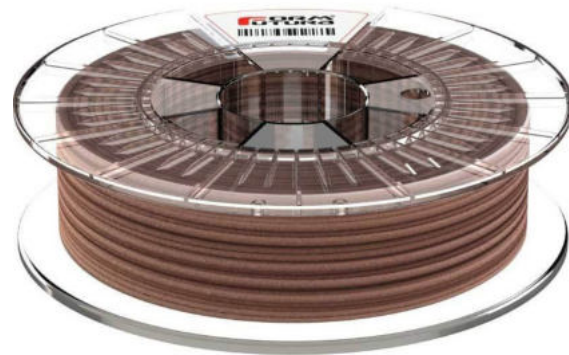
Additive:

- Metall (Kupfer, Stahl, Aluminium,...)
- Holz
- Graphen, Carbon Fasern und Carbon Nanotubes (CNTs)
- ...

 <p>Technikoa – Filafresh Duftfilament – TPU 96A – Vanilla Muffin – 1.75 mm – 0,5 kg</p> <p>39,90 €</p>	 <p>Technikoa – Filafresh Duftfilament – TPU 96A – Wild Strawberry – 1.75 mm – 0,5 kg</p> <p>39,90 €</p>	 <p>Formfutura – StoneFil – PLA Filament – Pottery Clay Töpferton – 1.75 mm – 0,5 kg</p> <p>34,90 €</p>	 <p>Formfutura – CarbonFil – Carbon Filament – Schwarz – 1.75 mm – 0,5 kg</p> <p>39,90 €</p>
 <p>Copper 3D – MDFlex – TPU Filament – 98A – Rot – 2.85 mm – 0,5 kg</p> <p>79,90 €</p>	 <p>Copper 3D – PLActive Filament – Blau (Sky Blue) – 1.75 mm – 0,75 kg</p> <p>79,90 €</p>	 <p>TCPoly – Ice9 wärmeleitend – ESD- Nylon Filament – Grau – 1.75 mm – 0,5 kg</p> <p>99,90 €</p>	 <p>Copper 3D – PLActive Filament – Grün (Apple Green) – 1.75 mm – 0,75 kg</p> <p>79,90 €</p>

Produkte auf: www.filamentworld.de

Metallgehalt in Filamenten



Gewichtsprozent gemessen mit ICP-MS:

Kupfer Filament:
70% Kupfer



Stahl Filament:
30% Fe, 8% Cr and 6% Ni !

3. Stand der Forschung: Filamente mit Additiven

Reine Kunststoff Filamente	Filamente mit Additiven (e.g. CNTs)
Partikel-Emissionen	↗ höhere Emissionen
	+ Partikel mit Additiven
	+ freie Additive

POIKKIMÄKI, M., KOLJONEN, V., LESKINEN, N., NÄRHI, M., KANGASNIEMI, O., KAUSIALA, O. & DAL MASO, M. 2019. Nanocluster aerosol emissions of a 3D printer. Environmental science & technology, 53, 13618-13628.

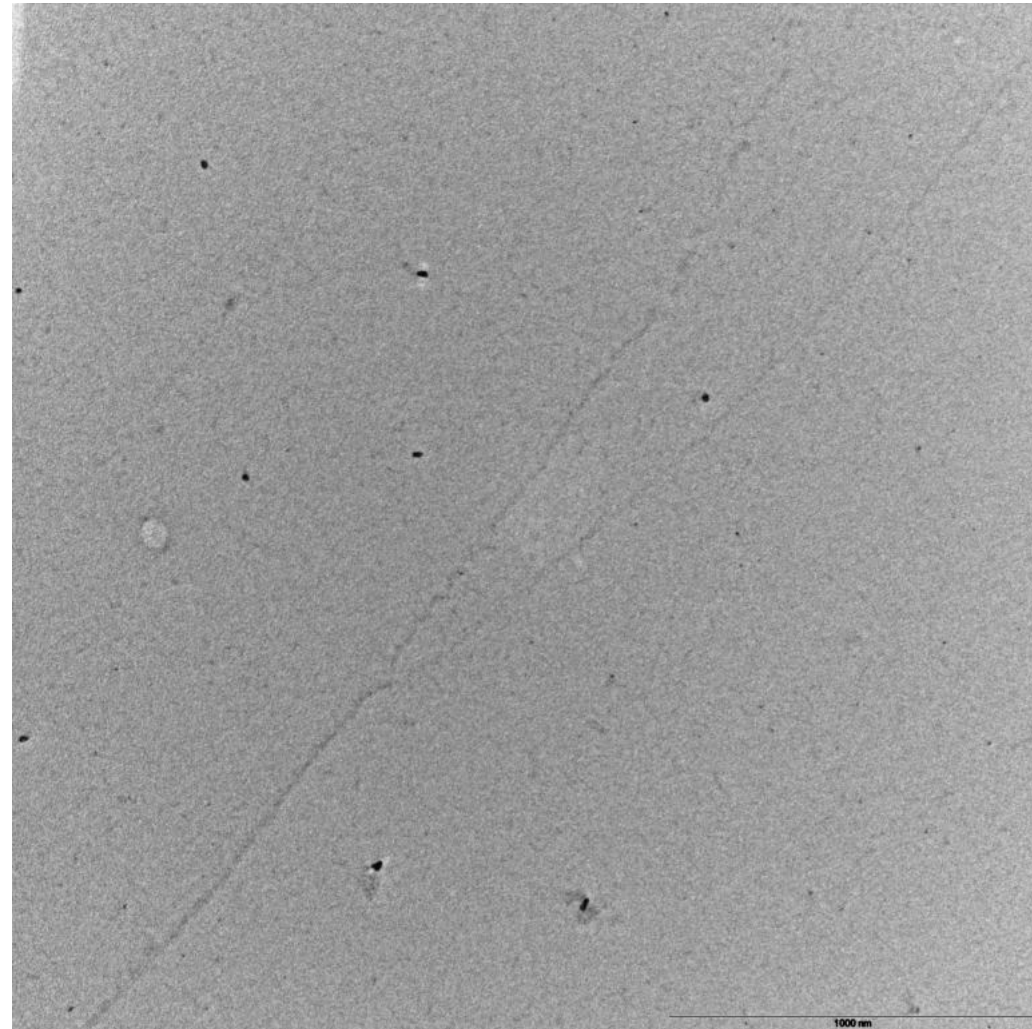
ALBERTS, E., BALLENTINE, M., BARNES, E. & KENNEDY, A. 2021. Impact of metal additives on particle emission profiles from a fused filament fabrication 3D printer. Atmospheric Environment, 244, 117956

STABILE, L., SCUNGIO, M., BUONANNO, G., ARPINO, F. & FICCO, G. 2017. Airborne particle emission of a commercial 3D printer: the effect of filament material and printing temperature. Indoor Air, 27, 398-408.

DUNN, K. L., DUNN, K. H., HAMMOND, D. & LO, S. 2020a. Three-dimensional printer emissions and employee exposures to ultrafine particles during the printing of thermoplastic filaments containing carbon nanotubes or carbon nanofibers. Journal of Nanoparticle Research, 22, 1-13.

3. Stand der Forschung: Freisetzung von Additiven

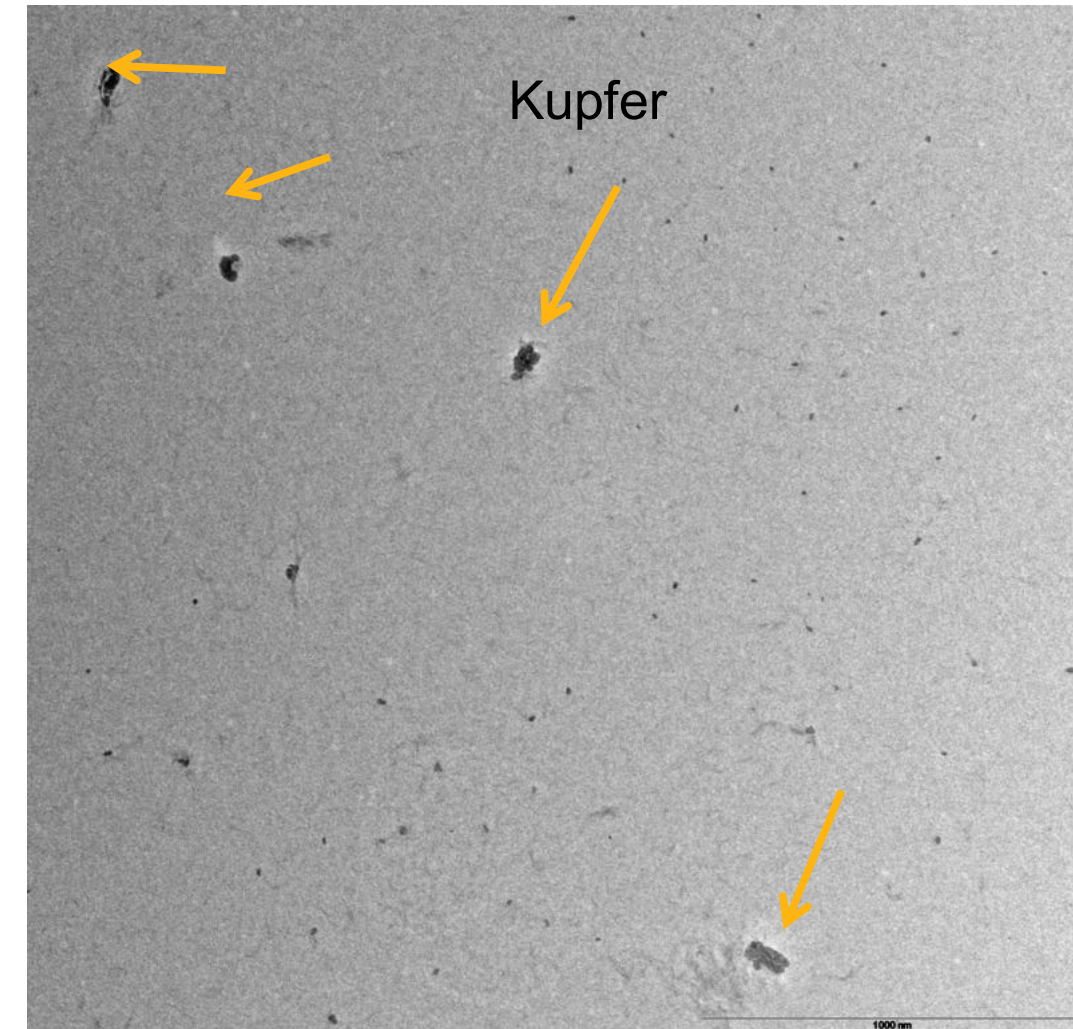
PLA Partikel ~50nm



1000 nm

Bild1: PLA Druck mit 3D Stift aufgefangene Partikel

PLA + Kupfer

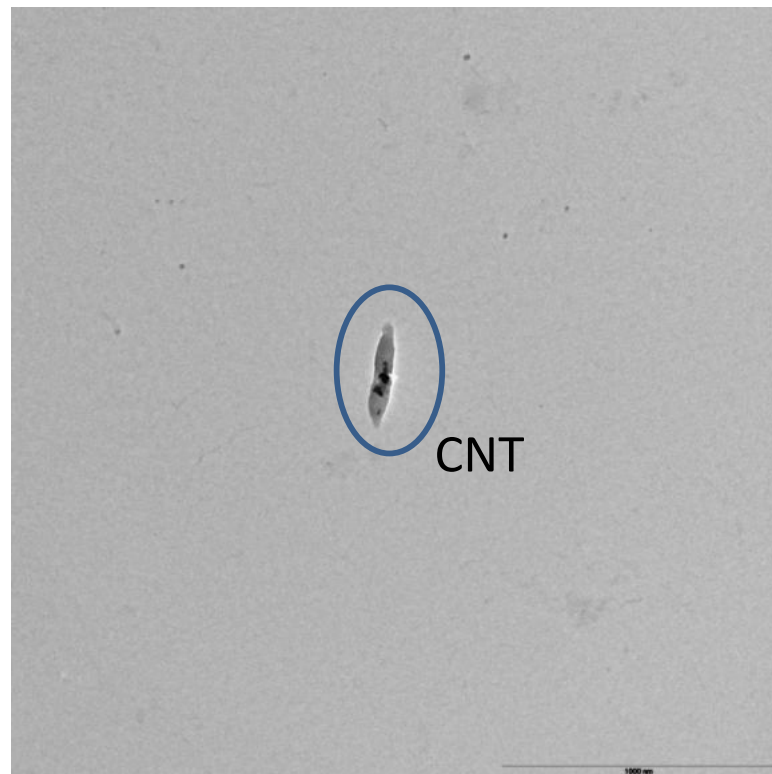


1000 nm

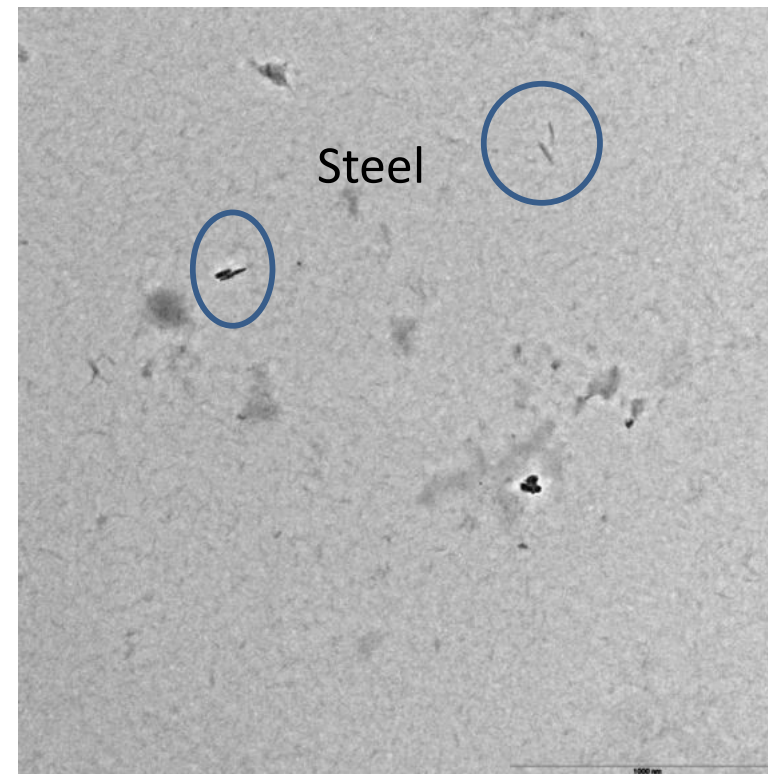
Bild 2: PLA + Kupfer: PLA Partikel (50nm) und Kupfer Kristalle (120-150nm)

3. Stand der Forschung: Freisetzung von Additiven

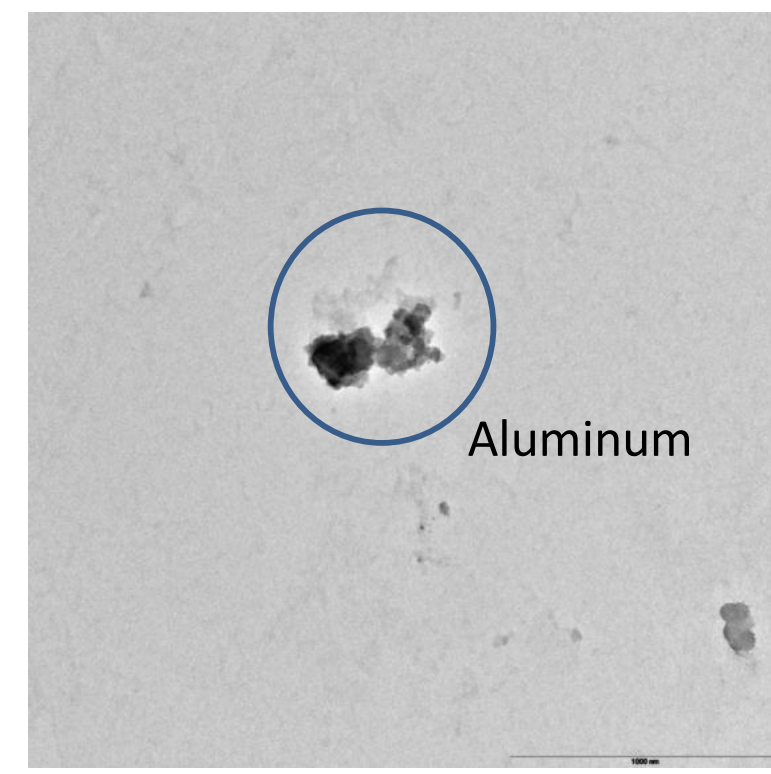
PLA mit CNT, Stahl und Aluminium



1000 nm





1000nm



1000nm

3. Stand der Forschung: Freisetzung VOCs

Freigesetzte VOCs	Karzinogen	Mutagen	Reproduktions-toxizität	Reizung Auge/Haut/ Atemwege
Styrol (ABS)	?!		?!	Auge, Haut , Atemwege
Methacrylsäure-methylester (PLA)				Haut, Atemwege

-  - Bekannt
-  - Wahrscheinlich
- ?! - Verdacht

Source: CLP Daten von <https://echa.europa.eu/>

* WHO: Kogevinas, Manolis, et al. "Carcinogenicity of quinoline, styrene, and styrene-7, 8-oxide." The Lancet Oncology 19.6 (2018): 728-729.

** REACH registration

3. Stand der Forschung: Freisetzung VOCs

Freigesetzte VOCs	Karzinogen	Mutagen	Reproduktions-toxizität	Reizung Auge/Haut/ Atemwege
Styrol (ABS)	?!		?!	Auge, Haut , Atemwege
Methacrylsäure-methylester (PLA)				Haut, Atemwege
Formaldehyd	⚡	?!		Auge, Haut
Caprolactam				Auge, Haut, Atemwege
Acrylnitril	⚡		?!	Auge, Haut , Atemwege
Acetaldehyd	⚡	?!		Auge
Etylbenzol	?!	?!		
Toluol	?!	?!	?!	Haut
Benzol	✖	⚡		Auge, Haut

- ✖ - Bekannt
- ⚡ - Wahrscheinlich
- ?! - Verdacht

Source: CLP Daten von <https://echa.europa.eu/>

* WHO: Kogevinas, Manolis, et al. "Carcinogenicity of quinoline, styrene, and styrene-7, 8-oxide." The Lancet Oncology 19.6 (2018): 728-729.

** REACH registration

3. Stand der Forschung: Gesundheitliche Bewertung

- **Studie mit gesunden Probanden**
 - Keine klinisch relevanten Effekte
 - nur leicht erhöhte FeNO-Werte (allergische Reaktion)

- **Befragung von 3D-Druck Arbeitern**
 - Atembeschwerden
 - respiratorischen Diagnose (z.B. Asthma)

- **Zell- und Tierversuche zeigten**
 - Toxizität

Gümperlein, I. (2019). Mögliche gesundheitliche Effekte inhalierter Nanopartikel, Imu.

Chan, F., et al. (2018). "Health survey of employees regularly using 3D printers." Occupational Medicine 68(3): 211-214.

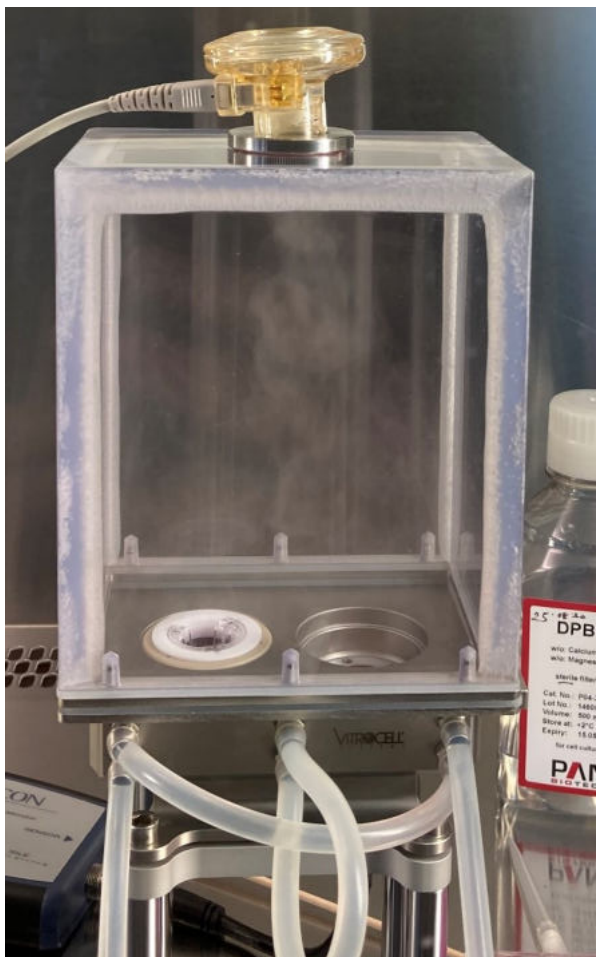
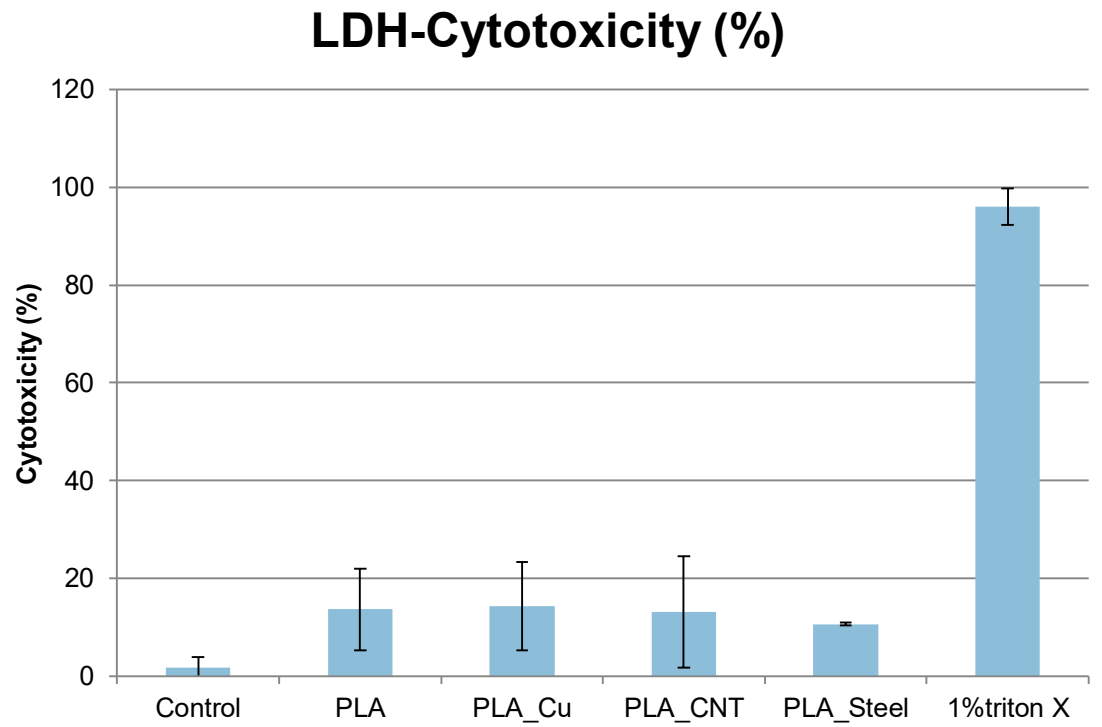
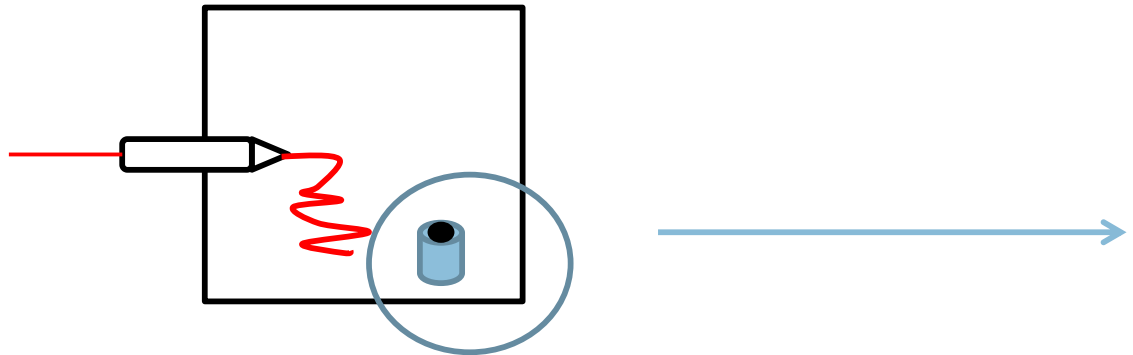
Farcas, M. T., et al. (2020). "Pulmonary and systemic toxicity in rats following inhalation exposure of 3-D printer emissions from acrylonitrile butadiene styrene (ABS) filament." Inhalation Toxicology 32(11-12): 403-418.

Farcas, M. T., et al. (2019). "Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and polycarbonate (PC) filaments three-dimensional (3-D) printer emissions-induced cell toxicity." Toxicology Letters 317: 1-12.

Stefaniak, A., et al. (2017). "Inhalation exposure to three-dimensional printer emissions stimulates acute hypertension and microvascular dysfunction." Toxicology and applied pharmacology 335: 1-5.

Zhang, Q., et al. (2019). "Chemical Composition and Toxicity of Particles Emitted from a Consumer-Level 3D Printer Using Various Materials." Environmental science & technology 53(20): 12054-12061

Toxikologische Messungen am BfR



Zusammenfassung



- Freisetzung von Nanopartikeln
- Metall z.B. Nickel
- Fasern, CNT
- VOCs, z.B. Styrol
- Gesundheitliche Risiken

Gliederung

1. 3D Druck – Was steckt dahinter?
2. Mögliche Risiken
3. Stand der Forschung
- 4. Ausblick**

4. Ausblick

- Wissenslücken
 - weitere Untersuchungen nötig? Standard?
- Wachsende Auswahl an Filamenten
 - Blauer Engel für Filamente?
- Gefahr durch gedruckte Teile?
- SLA Drucker werden günstiger
 - Noch wenig Daten dazu

Empfehlungen für Nutzer:

- Einhausung, Absaugung
- Separater Räume, gut Lüften
- Mit niedrigen Temperaturen drucken
- Besondere Vorsicht bei Filamenten mit Additiven



<https://bit.ly/3tVzvHX>



Danke für Ihre Aufmerksamkeit

Heike Romanowski

Bundesinstitut für Risikobewertung

Abteilung 7: Chemikalien- und Produktsicherheit

Fachgruppe 75: Produktbeschaffenheit und Nanotechnologie

Max-Dohrn-Straße 8-10, 10589 Berlin

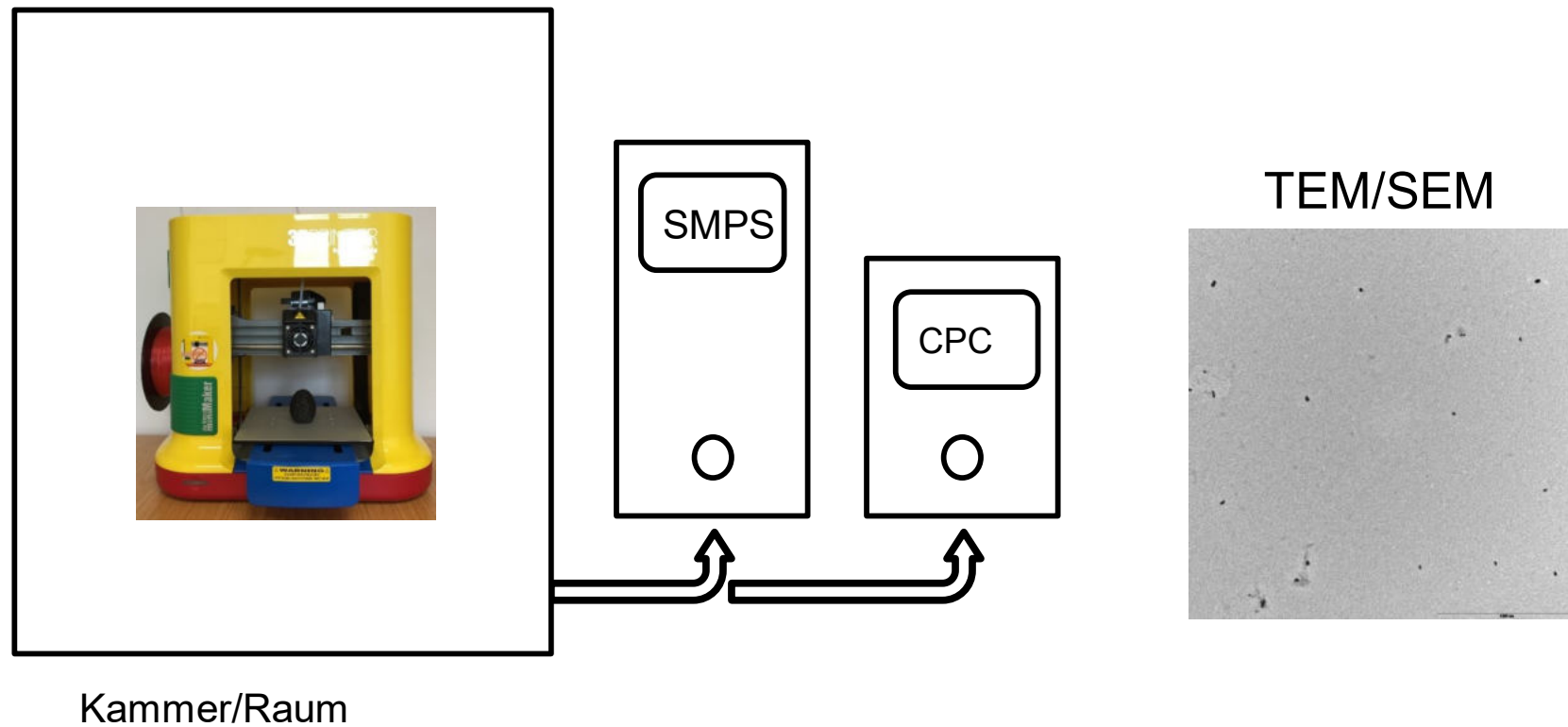
Telefon 030 - 184 12 - 27524

heike.romanowski@bfr.bund.de

BACK-UP

3. Stand der Forschung: Messtechniken

Partikel-Messung



VOC-Messungen

- Photoionisationsdetektor (PID)
- Tenax® + GC-MS
- Pyrolyse / TGA

CLP-Kategorien:

Kategorie 1A: Stoffe, die auf den Menschen bekanntermaßen karzinogen sind. Der Kausalzusammenhang zwischen der Exposition eines Menschen gegenüber dem Stoff und der Entstehung von Krebs ist ausreichend nachgewiesen.

Kategorie 1B: Stoffe, die wahrscheinlich beim Menschen karzinogen sind. Es bestehen hinreichende Anhaltspunkte zu der Annahme, dass die Exposition eines Menschen gegenüber dem Stoff Krebs erzeugen kann. Diese Annahme beruht im Allgemeinen auf Folgendem: geeignete Langzeit-Tierversuche, sonstige relevante Informationen.

Kategorie 2: Stoffe, bei denen ein Verdacht auf eine karzinogene Wirkung beim Menschen besteht. Aus geeigneten Tierversuchen liegen einige Anhaltspunkte vor, die jedoch nicht ausreichen, um einen Stoff in Kategorie 1 einzustufen.

VOC-Emission Beispiel von Azimi 2016:

VOC-Emission Bsp von Azimi 2016:

TVOC:

PLA: 10 µg/min

HIPS: 35 µg/min

ABS: 25 – 175 µg/min

Nylon: ~ 200 µg/min

Estimates of styrene emission rates with ABS and HIPS filaments ranged from ~12 to ~113 µg/min, depending on the printer make and model (Azimi 2016)

Quellen Gesundheitliche Bewertung

Chan, F., et al. (2018). "Health survey of employees regularly using 3D printers." *Occupational Medicine* 68(3): 211-214.

Farcas, M. T., et al. (2020). "Pulmonary and systemic toxicity in rats following inhalation exposure of 3-D printer emissions from acrylonitrile butadiene styrene (ABS) filament." *Inhalation Toxicology* 32(11-12): 403-418.

Farcas, M. T., et al. (2019). "Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and polycarbonate (PC) filaments three-dimensional (3-D) printer emissions-induced cell toxicity." *Toxicology Letters* 317: 1-12.

Gümperlein, I. (2019). Mögliche gesundheitliche Effekte inhalierter Nanopartikel, Imu.

House, R., et al. (2017). "Case report of asthma associated with 3D printing." *Occupational Medicine* 67(8): 652-654.

Stefaniak, A., et al. (2017). "Inhalation exposure to three-dimensional printer emissions stimulates acute hypertension and microvascular dysfunction." *Toxicology and applied pharmacology* 335: 1-5.

Zhang, Q., et al. (2019). "Chemical Composition and Toxicity of Particles Emitted from a Consumer-Level 3D Printer Using Various Materials." *Environmental science & technology* 53(20): 12054-12061

Quellen: Stand der Forschung, Partikel/VOC Freisetzung 3D Druck

- Azimi, Parham, Torkan Fazli, and Brent Stephens. 2017. 'Predicting concentrations of ultrafine particles and volatile organic compounds resulting from desktop 3D printer operation and the impact of potential control strategies', *Journal of Industrial Ecology*, 21: S107-S19.
- Azimi, Parham, Dan Zhao, Claire Pouzet, Neil E Crain, and Brent Stephens. 2016. 'Emissions of ultrafine particles and volatile organic compounds from commercially available desktop three-dimensional printers with multiple filaments', *Environmental science & technology*, 50: 1260-68.
- Davis, Aika Y, Qian Zhang, Jenny PS Wong, Rodney J Weber, and Marilyn S Black. 2019. 'Characterization of volatile organic compound emissions from consumer level material extrusion 3D printers', *Building and Environment*, 160: 106209.
- Deng, Yelin, Shi-Jie Cao, Ailu Chen, and Yansong Guo. 2016. 'The impact of manufacturing parameters on submicron particle emissions from a desktop 3D printer in the perspective of emission reduction', *Building and Environment*, 104: 311-19.
- Dunn, Kevin L, Kevin H Dunn, Duane Hammond, and Samuel Lo. 2020. 'Three-dimensional printer emissions and employee exposures to ultrafine particles during the printing of thermoplastic filaments containing carbon nanotubes or carbon nanofibers', *Journal of Nanoparticle Research*, 22: 1-13.
- Dunn, Kevin L, Duane Hammond, Kevin Menchaca, Gary Roth, and Kevin H Dunn. 2020. 'Reducing ultrafine particulate emission from multiple 3D printers in an office environment using a prototype engineering control', *Journal of Nanoparticle Research*, 22.
- Floyd, Evan L, Jun Wang, and James L Regens. 2017. 'Fume emissions from a low-cost 3-D printer with various filaments', *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 14: 523-33.
- Gu, Jianwei, Michael Wensing, Erik Uhde, and Tunga Salthammer. 2019. 'Characterization of particulate and gaseous pollutants emitted during operation of a desktop 3D printer', *Environment international*, 123: 476-85.
- He, Yong, Guang-huai Xue, and Jian-zhong Fu. 2014. 'Fabrication of low cost soft tissue prostheses with the desktop 3D printer', *Scientific reports*, 4: 6973.
- Jeon, Haejoon, Jihoon Park, Sunju Kim, Kyungho Park, and Chungsik Yoon. 2020. 'Effect of nozzle temperature on the emission rate of ultrafine particles during 3D printing', *Indoor Air*, 30: 306-14.
- Kim, Yuna, Chungsik Yoon, Seunghon Ham, Jihoon Park, Songha Kim, Ohhun Kwon, and Perng-Jy Tsai. 2015. 'Emissions of Nanoparticles and Gaseous Material from 3D Printer Operation', *Environmental science & technology*, 49: 12044-53.
- Kwon, Ohhun, Chungsik Yoon, Seunghon Ham, Jihoon Park, Jinho Lee, Danbi Yoo, and Yoojin Kim. 2017. 'Characterization and control of nanoparticle emission during 3D printing', *Environmental science & technology*, 51: 10357-68.

Quellen: Stand der Forschung, Partikel/VOC Freisetzung 3D Druck

Mendes, Luís, Anneli Kangas, Kirsi Kukko, Bjarke Mølgaard, Arto Säämänen, Tomi Kanerva, Iñigo Flores Ituarte, Marika Huhtiniemi, Helene Stockmann-Juvala, and Jouni Partanen. 2017. 'Characterization of emissions from a desktop 3D printer', *Journal of Industrial Ecology*, 21: S94-S106.

Poikkimäki, Mikko, Ville Koljonen, Niko Leskinen, Mikko Närhi, Oskari Kangasniemi, Oskari Kausiala, and Miikka Dal Maso. 2019. 'Nanocluster aerosol emissions of a 3D printer', *Environmental science & technology*, 53: 13618-28.

Rao, Chengchen, Fu Gu, Peng Zhao, Nusrat Sharmin, Haibing Gu, and Jianzhong Fu. 2017. 'Capturing PM2.5 emissions from 3D printing via nanofiber-based air filter', *Scientific reports*, 7: 10366.

Sigloch, Heike, Frank S Bierkandt, Ajay V Singh, Ashish K Gadicherla, Peter Laux, and Andreas Luch. 2020. '3D Printing-Evaluating Particle Emissions of a 3D Printing Pen', *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*: e61829.

Stabile, Luca, Mauro Scungio, Giorgio Buonanno, Fausto Arpino, and Giorgio Ficco. 2017. 'Airborne particle emission of a commercial 3D printer: the effect of filament material and printing temperature', *Indoor Air*, 27: 398-408.

Stefaniak, Aleksandr B, Lauren N Bowers, Alycia K Knepp, M Abbas Virji, Eileen M Birch, Jason E Ham, JR Wells, Chaolong Qi, Diane Schwegler-Berry, and Sherri Friend. 2018. 'Three-dimensional printing with nano-enabled filaments releases polymer particles containing carbon nanotubes into air', *Indoor Air*, 28: 840-51.

Stefaniak, Aleksandr B, Ryan F LeBouf, Jinghai Yi, Jason Ham, Timothy Nurkewicz, Diane E Schwegler-Berry, Bean T Chen, J Raymond Wells, Matthew G Duling, and Robert B Lawrence. 2017. 'Characterization of chemical contaminants generated by a desktop fused deposition modeling 3-dimensional Printer', *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 14: 540-50.

Steinle, Patrick 2016. 'Characterization of emissions from a desktop 3D printer and indoor air measurements in office settings', *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13: 121-32.

Stephens, Brent, Parham Azimi, Zeineb El Orch, and Tiffanie %J Atmospheric Environment Ramos. 2013. 'Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers', *Atmospheric environment*, 79: 334-39.

Unwin, John, Matthew R Coldwell, Chris Keen, and John J McAlinden. 2013. 'Airborne emissions of carcinogens and respiratory sensitizers during thermal processing of plastics', *Annals of Occupational Hygiene*, 57: 399-406.

Quellen: Stand der Forschung, Partikel/VOC Freisetzung 3D Druck

Vance, Marina E, Valerie Pegues, Schuyler Van Montfrans, Weinan Leng, Linsey C %J Environmental science Marr, and technology. 2017. 'Aerosol emissions from fuse-deposition modeling 3D printers in a chamber and in real indoor environments', Environmental science & technology, 51: 9516-23.

Wojtyła, S, P Klama, K Śpiewak, and T Baran. 2020. '3D printer as a potential source of indoor air pollution', International Journal of Environmental Science and Technology, 17: 207-18.

Yi, Jinghai, Matthew G Duling, Lauren N Bowers, Alycia K Knepp, Ryan F LeBouf, Timothy R Nurkiewicz, Anand Ranpara, Todd Luxton, Stephen B Martin Jr, and Dru A Burns. 2019. 'Particle and organic vapor emissions from children's 3-D pen and 3-D printer toys', Inhalation Toxicology: 1-14.

Yi, Jinghai, Ryan F LeBouf, Matthew G Duling, Timothy Nurkiewicz, Bean T Chen, Diane Schwegler-Berry, M Abbas Virji, and Aleksandr B Stefaniak. 2016. 'Emission of particulate matter from a desktop three-dimensional (3D) printer', Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A, 79: 453-65.

Zhang, Qian, Jenny PS Wong, Aika Y Davis, Marilyn S Black, and Rodney J Weber. 2017. 'Characterization of particle emissions from consumer fused deposition modeling 3D printers', Aerosol Science Technology, 51: 1275-86.

Zontek, Tracy L, Burton R Ogle, John T Jankovic, and Scott M Hollenbeck. 2017. 'An exposure assessment of desktop 3D printing', Journal of Chemical Health & Safety, 24: 15-25.