
EMISSIONEN VON FEINEN UND ULTRAFEINEN PARTIKELN SOWIE GASFÖRMIGEN STOFFEN AUS 3D-DRUCKERN - UMWELTRELEVANZ UND REGELUNGSOPTIONEN

*Stefan Seeger, Duangkamol Yenying Dietrich, Olaf Wilke
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Fachbereich 4.2 - Materialien und Luftschadstoffe*

stefan.seeger@bam.de

Was ist 3D-Drucken, was ist Additive Manufacturing?

“Process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer” (ASTM)

Synonyme: additive fabrication, additive processes, additive techniques, additive layer manufacturing, layer manufacturing, freeform fabrication und einige mehr ...

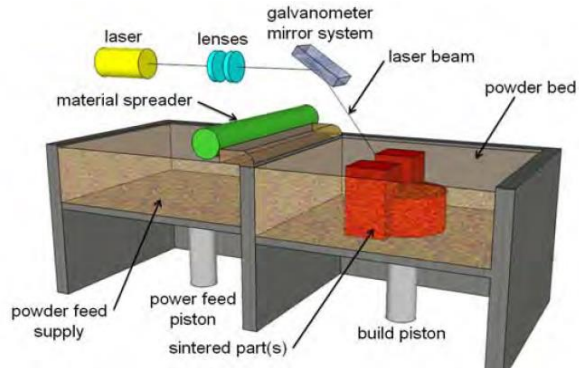
Vielzahl technischer Prozesse und Materialien, sehr unterschiedliche Arbeitsprinzipien und Funktionsweisen.

	Luftfahrt	Energie	Mobilität	Medizin	Design/ Konstruk- tion	Ausbildung	Hobby
Designoptionen	hoch	keine	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Produktionseffizienz	hoch	wenig	hoch	hoch	hoch	wenig	keine
Produktanpassung, Individualisierung	keine	wenig	keine	hoch	hoch	keine	keine
Materialausnutzung, Energieverbrauch	hoch	wenig	wenig	keine	wenig	keine	wenig

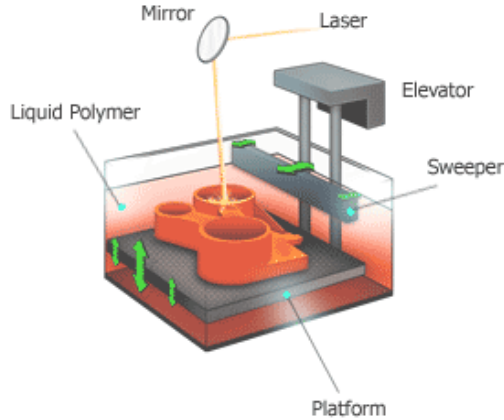
hoch	mittel	wenig	keine
------	--------	-------	-------

AM-Verfahren: Emissionsrisiken

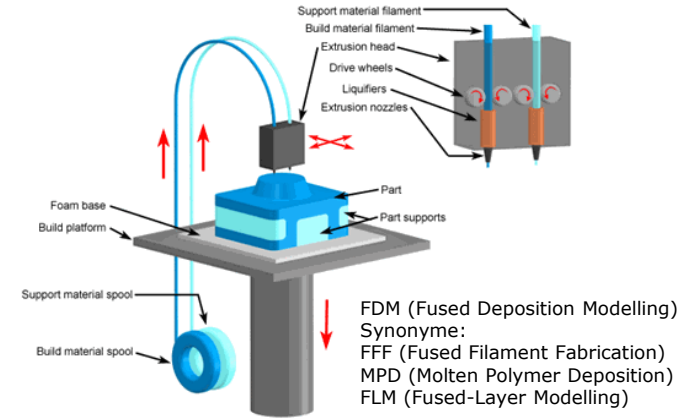
Powder bed Fusion (PBF) / Selective Laser Melting (SLM)



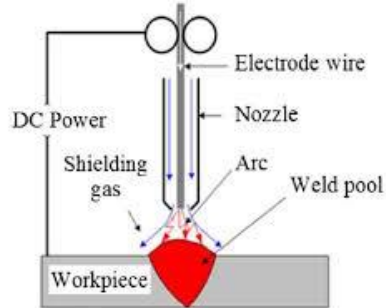
Stereolithografie (SLA)



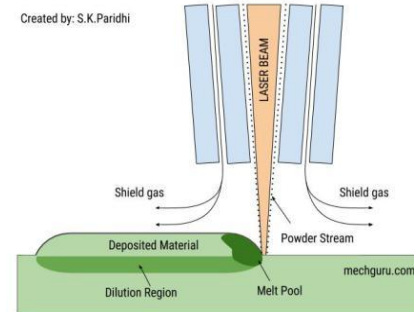
Material Extrusion / FDM / „3D-Drucken“



Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

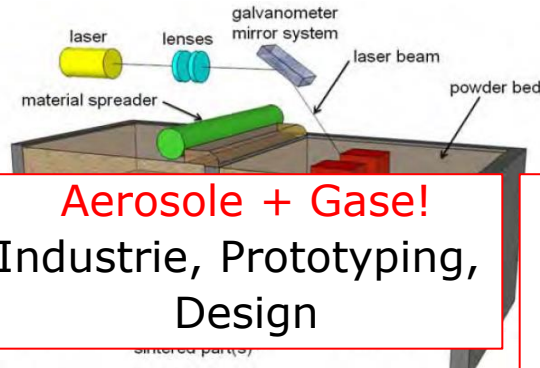


Laser Pulver Auftragsschweißen / Laser Cladding (LC)



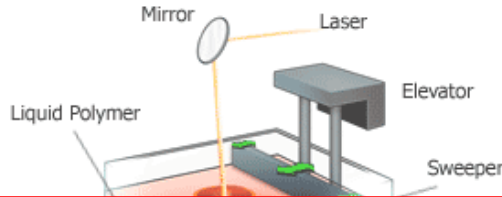
AM-Verfahren: Emissionsrisiken

Powder bed Fusion (PBF) / Selective Laser Melting (SLM)



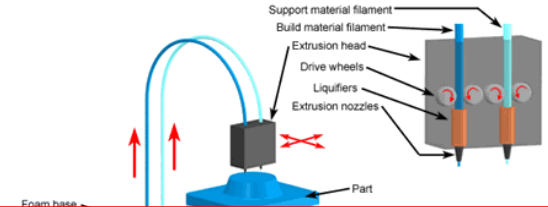
Aerosole + Gase!
Industrie, Prototyping,
Design

Stereolithografie (SLA)



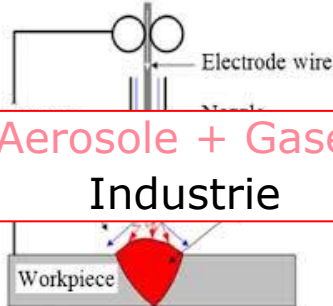
Aerosole + Gase (!)
Industrie, Prototyping
Design, Kleinproduktion,
Privatanwender

Material Extrusion / FDM / „3D-Drucken“



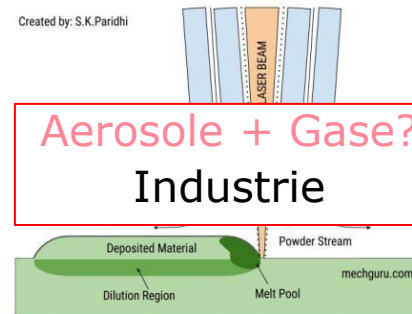
Aerosole + Gase!
populärstes AM-Verfahren
Ausbildung, Design,
Privatanwender

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)



Aerosole + Gase?
Industrie

Laser Pulver Auftragsschweißen / Laser Cladding (LC)



Aerosole + Gase?
Industrie

Polymere

ABS (acrylonitrile butadiene styrene)
PLA (polylactide), soft PLA)
PC (polycarbonate)
Polyamide (nylon)
PVA (polyvinyl alcohol)
Biopolymers
Laywood™
polymere + andere Additive
Farben
u.v.m....

} Filamente
(FDM)
Pulver
(SLM)

photoreaktive Monomere
Epoxydharze
Acrylate
...

} flüssige
Werkstoffe
(SLA)

Metalle

Stähle
Titaniumlegierungen Ti6Al4V
Co/Cr/Mo Legierungen, Co28Cr6Mo
Aluminium AlSi10mg
Gold und Silber
...

} Pulver,
(LC)
Draht
(WAAM)

Keramiken

Silica/Glass
Porzellan
Silicon-Carbide
...

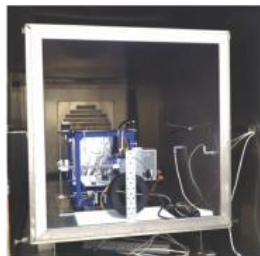
} Pulver (SLM)
Schlicker (PBF)



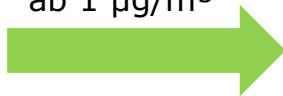
Sicherheit? Arbeitsschutz? Produkthaftung? Verbraucherschutz?

Interdisziplinäre BAM-Plattform zur Emissions- charakterisierung

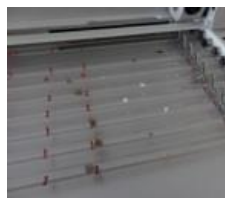
Testkammern (20, 5, 1 m³)
alternativ in-situ Messung



Sampling
ab 1 µg/m³



Gasanalytik



Tenax-Sampling
Thermodesorption
Gaschromatographie/
Massenspektrometrie
Flüssigkeitschromatographie

chemische Aerosolanalytik



größendifferenziertes Sampling
Kaskadenimpaktoren 5 nm – 30 µm
Mikroskopie ESEM, TEM (Form)
EDX, XRF, ICPMS (Elemente)
Thermodesorption (Organik)

Online-Monitoring
Zeitauflösung ab 0,1 s/Spektrum

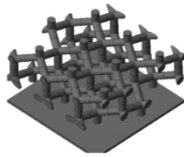


Aerosolspektroskopie (DMAS, OPC, Fast Sizer)

Größenbereich 2,5 nm – 100 µm
Anzahlkonzentration 0,1 bis 10⁸ Partikel/cm³

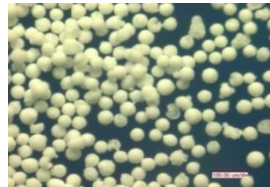
Emissionen aus AM - Ansatzpunkte der BAM

CAD Design und
3D Bilderfassung



3D Model

Feedstock,
Material



Beispiel: fließfähiges Pulver

Fertigungs-
prozesse



Beispiel: 3D-FDM-Drucker

Fertigungs-
schritte



Beispiel: Werkstückentnahme
aus Pulverbett

Nachbearbeitung



OF Behandlung

Verwendung



Degradation

Recycling

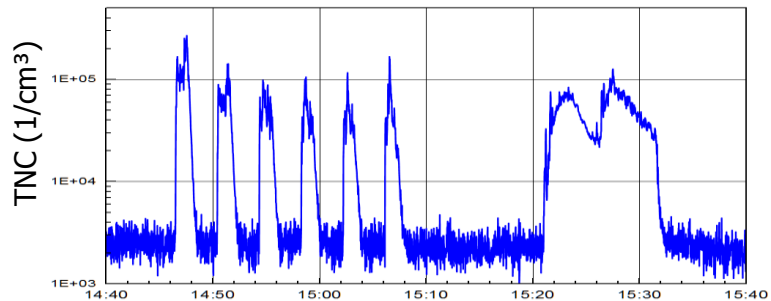
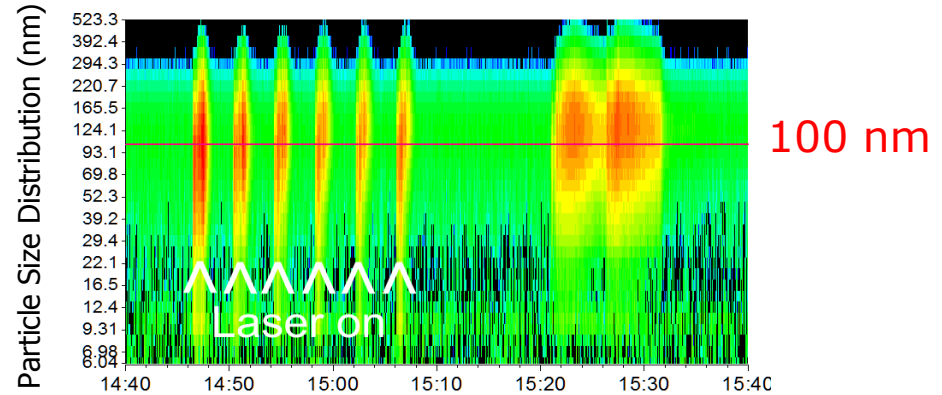
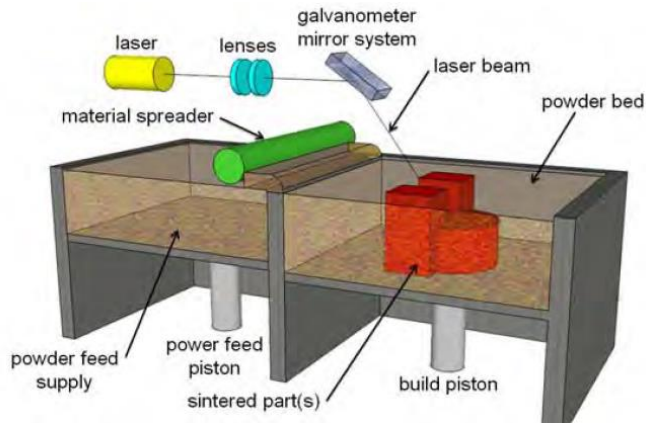


Mülltrennung

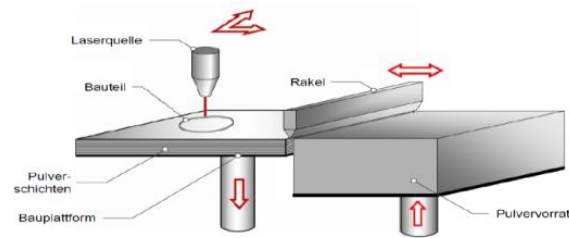
End of Use



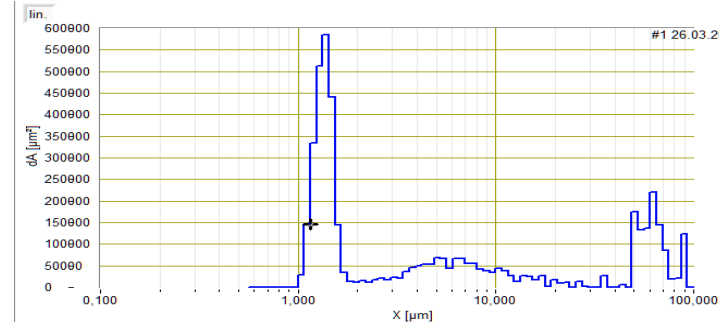
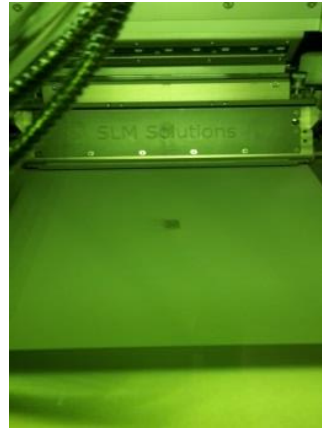
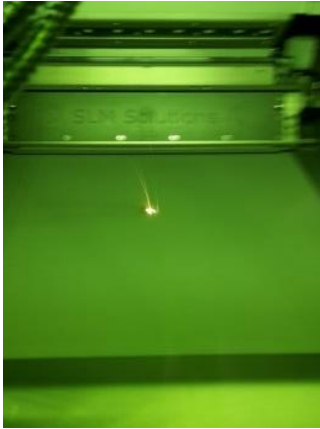
wie und wo



Partikelemission aus Selective Laser Melting (SLM)



Partikelsensor
im Bauraum



4,5 mm²/10 min

	Extrusions- temp. (°C)	Druckgeschwin- digkeit (mm/s)	Bedtemp. (°C)	Bed type
PLA purple	200	25	50	CFK Aluminium
PLA green, regranulated	230	25	40	Aluminium
PLA bronzeFill	220	25	50	Aluminium
ABS green	230	25	100	Aluminium
ABS black, conductive	240	25	100	Aluminium
Nylon	230	25	100	CFK
BioFilaSilk™ biopolymer	190	30	40	Aluminium
Laywood 3D™	200	25	40	Aluminium
PVA	200	25	65	CFK
PC	270	20	100	CFK

Ergebnisse: Gasemissionen aus Filamenten

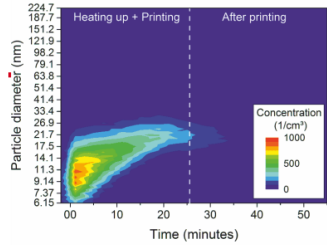
relative Menge Filament	++++	+++	++	+
ABS 1	Styrene	SAN trimer	Not identified	Hexadecanoic acid
ABS 2	Triphenyl phosphate	Phenol	Butyl hydroxytoluol	Hexadecanoic acid
PLA 1	Lactide	Lactic acid		
PLA 2	Lactide	1,6-Dioxacyclododecane-7,12-dione	Lactid acid	not identified
PLA 3	Lactide	Lactid acid	n-Hexadecane	n-Heptadecane
PLA 4	Lactide	Lactic acid	1-Dodecanol	2,6-Di-tert-butyl-p-quinone
PVA	Glycerine	Triethanolamine		
PC	Chlorobenzene	Bisphenol A	Phenol	Diethyl phthalate

gesundheits-
bedenklich

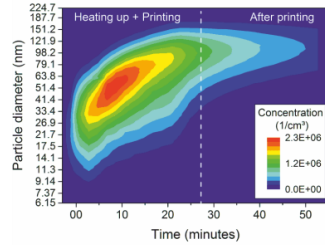
ungewöhnlich
in
Innenräumen

Ergebnisse Partikelemissionen (1)

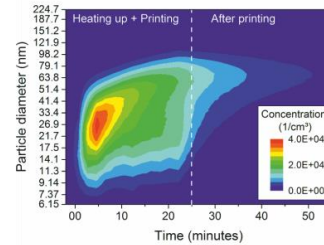
PLA
purple



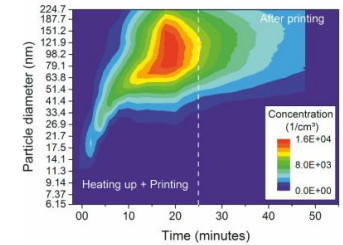
Nylon



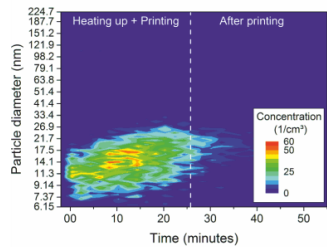
ABS
green



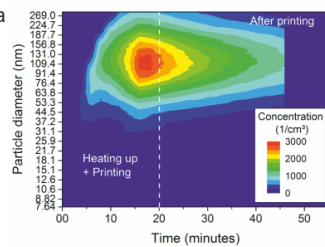
PVA



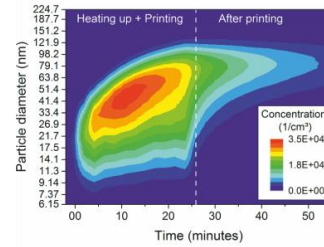
PLA
green



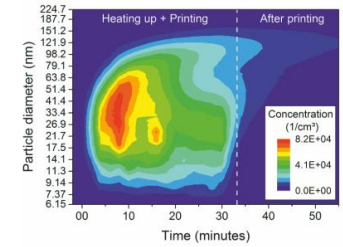
BioFila
Silk™



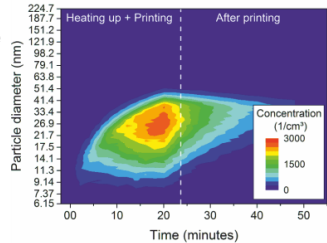
ABS
black



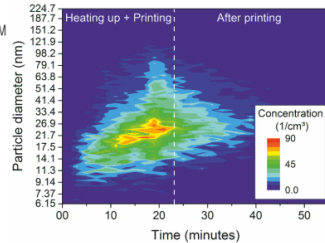
PC



PLA
bronze



Lay-
wood™



uneinheitliche Emissionsspektren

Ergebnisse Partikelemissionen (2)

Filament	T _{ex} (°C)	6 nm – 225 nm			300 nm – 600 nm	
		EM-Rate (1/min)	Anzahl (-)	d _{mean} (nm)	EM-Rate (1/min)	Anzahl (-)
PLA purple	200	1.5×10^9	3×10^{10}	10	below detection limit	
PLA green	230	2×10^8	4×10^9	14	below detection limit	
PLA bronzeFill	220	1×10^{10}	2×10^{11}	27	below detection limit	
ABS green	230	1.5×10^{12}	3×10^{13}	26	4.5×10^5	9×10^6
ABS black	240	2.5×10^{11}	5×10^{12}	50	1×10^7	2×10^8
Nylon	230	1.5×10^{11}	3×10^{12}	50	5×10^7	1×10^9
BioFilaSilk™	190	5×10^9	1×10^{11}	114	2×10^6	4×10^7
Laywood 3D™	200	2.5×10^8	5×10^9	24	below detection limit	
PVA	200	5×10^{10}	1×10^{12}	110	2×10^9	4×10^{10}
PC	270	1×10^{13}	5×10^{11}	40	2×10^8	9×10^6

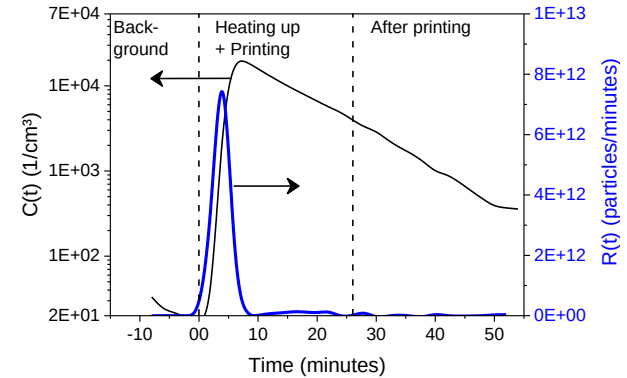
Ergebnisse Partikelemissionen (3)

Filament	T _{ex} (°C)	6 nm – 225 nm			300 nm – 600 nm	
		EM-Rate (1/min)	Anzahl (-)	d _{mean} (nm)	EM-Rate (1/min)	Anzahl (-)
PLA purple	200	1.5 × 10 ⁹	3 × 10 ¹⁰	10	below detection limit	
PLA green	230	2 × 10 ⁸	4 × 10 ⁹	14	below detection limit	
PLA bronzeFill	220	1 × 10 ¹⁰	2 × 10 ¹¹	27	below detection limit	
ABS green	230	1.5 × 10 ¹²	3 × 10 ¹³	26	4.5 × 10 ⁵	9 × 10 ⁶
ABS black	240	2.5 × 10 ¹¹	5 × 10 ¹²	50	1 × 10 ⁷	2 × 10 ⁸
Nylon	230	1.5 × 10 ¹¹	3 × 10 ¹²	50	5 × 10 ⁷	1 × 10 ⁹
BioFilaSilk™	190	5 × 10 ⁹	1 × 10 ¹¹	114	2 × 10 ⁶	4 × 10 ⁷
Laywood 3D™	200	2.5 × 10 ⁸	5 × 10 ⁹	24	below detection limit	
PVA	200	5 × 10 ¹⁰	1 × 10 ¹²	110	2 × 10 ⁹	4 × 10 ¹⁰
PC	270	1 × 10 ¹³	5 × 10 ¹¹	40	2 × 10 ⁸	9 × 10 ⁶

Ergebnisse Partikelemissionen (4)

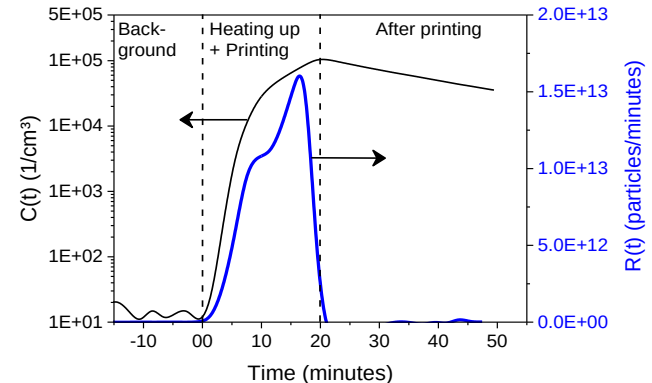
PLA, ABS, Nylon und PC:

- > prompte Emission nach Beginn der Heizung
- > hohe Extrudertemperatur



BioFilaSilk™, Laywood™ und PVA:

- > verzögerte Emission
- > niedrige Extrusionstemperatur



-
- Emissionen aus AM haben hohe Relevanz für Arbeitsschutz, Verbraucherschutz und Innenraumlufthygiene
 - Sehr lange Druckzeiten (im Vergleich zum Laserdrucker)
 - Partikelemissionen liegen im UFP- und unteren FP- Bereich und variieren um mehrere Größenordnungen
 - Bedenkliche Schadgasemissionen
 - Anwenderinfo bisher unzureichend
 - Klassische Zuständigkeiten stehen in Frage
 - ✓ neue Nutzungsszenarien
 - ✓ Verantwortlichkeiten liegen bei Hardware- und Filamentherstellern sowie Anwendern
 - Erste Initiativen zur freiwilligen Regulierung (FDM) gestartet
-

Emissionstreiber für Gase und Partikel:

- Filamentmaterialien + Additive
 - Pyrolyse von Verunreinigungen und Komponenten mit $T_m < T_{ex}$
 - Verdampfung und Rekondensation

Emissionen eines Filamentprodukts sind **nicht repräsentativ** für seine Materialklasse ($ABS_1 \neq ABS_2$)

- Druckerhardware
 - Temperaturkontrolle (Extruder, Bed)
 - Extrusionsrate
 - Extruderkontamination
 - Lüftung / Filterung

Regelungsoptionen:

**Gütezeichen
für Filament-
Produkte?**

**Gütezeichen
für Hardware?**

laufende Projekte:

UFOPLAN 3D (BAM)
ProMoAM (BAM)
STP 2904 (UL, USA)

- Quantifizierung
- Chemische Charakterisierung
- Prozessmonitoring
- Prüfmethoden