

SCHICHTWERK · WERKSTOFFWERK

FDM / FFF

Ingenieurswerk Kunststofftechnik

Grundlagen · Materialwissenschaft · Kennzahlen · Nachbearbeitung · Veredelung · Oberflächengüte

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

Band I von II (FDM) · Version 1.0 · März 2026

Keine Zusammenarbeit mit Waffen-, Militär- oder Rüstungsindustrie · Lohnfertiger

Inhalt

Teil 1 · Verfahrensgrundlagen FDM/FFF.....	3
1.1 Funktionsprinzip.....	3
1.2 Prozesskette.....	3
1.3 Maschinenkinematik.....	3
Teil 2 · Materialwissenschaft der Thermoplaste.....	4
2.1 Polymerklassen.....	4
2.2 Mechanische Kennwerte (Richtwerte XY).....	4
2.3 Faserverstärkung & Compounds.....	4
2.4 Feuchtigkeit & Alterung.....	4
Teil 3 · Prozesskennzahlen & Parameter.....	5
3.1 Schlüsselparameter und ihre Wirkung.....	5
3.2 Anisotropie quantifiziert.....	5
3.3 Reproduzierbarkeit & Prozessfähigkeit.....	5
Teil 4 · Nachbearbeitung.....	6
4.1 Stützstrukturentfernung.....	6
4.2 Mechanische Nachbearbeitung.....	6
4.3 Chemische & thermische Glättung.....	6
Teil 5 · Veredelung & Oberflächengüte.....	7
5.1 Oberflächenkennzahlen.....	7
5.2 Treppenstufeneffekt.....	7
5.3 Beschichtung & Lackierung.....	7
5.4 Funktionale Veredelung.....	7
Teil 6 · Fehlerbilder & Abhilfe.....	8
Teil 7 · Anwendungsklassen & Materialwahl.....	9

Inhaltsverzeichnis in Word per Rechtsklick und „Felder aktualisieren“ aktualisieren.

Teil 1 · Verfahrensgrundlagen FDM/FFF

1.1 Funktionsprinzip

Beim Fused Deposition Modeling (FDM), normfrei auch Fused Filament Fabrication (FFF), wird ein thermoplastisches Filament durch eine beheizte Düse extrudiert und schichtweise auf einer Bauplattform abgelegt. Das Material wird oberhalb seiner Glasübergangs- bzw. Schmelztemperatur verarbeitet, verschmilzt mit der darunterliegenden Schicht und erstarrt beim Abkühlen. Die Bauteilfestigkeit entsteht durch intermolekulare Diffusion (Reptation) an den Schichtgrenzen.

1.2 Prozesskette

Phase	Schritt	Kritische Größe
Vorbereitung	CAD → STL/3MF → Slicing	Toleranz, Auflösung, Orientierung
Materialhandling	Trocknung, Lagerung	Restfeuchte (hygroskopische Polymere)
Extrusion	Aufschmelzen, Förderung	Düsentemperatur, Volumenstrom
Schichtaufbau	Ablage, Verschmelzung	Schichthaftung (Z-Festigkeit)
Abkühlung	Erstarrung, Schwindung	Verzug (Warping), Eigenspannungen
Nachbearbeitung	Stützentfernung, Finish	Oberflächengüte, Maßhaltigkeit

1.3 Maschinenkinematik

- Kartesisch (Bettschlepper / Portal): verbreitetste Bauform, robust.
- CoreXY: hohe Geschwindigkeiten bei geringer bewegter Masse.
- Delta: schnell, rund, hohe Bauhöhe.
- Bettbewegt vs. fliegender Druckkopf: Einfluss auf Beschleunigung und Ringing.

Teil 2 · Materialwissenschaft der Thermoplaste

2.1 Polymerklassen

Thermoplaste gliedern sich in amorphe (kein definierter Schmelzpunkt, Glasübergang T_g) und teilkristalline (Schmelzpunkt T_m , Kristallisationsneigung) Werkstoffe. Diese Einteilung bestimmt das Verarbeitungs- und Schwindungsverhalten.

Polymer	Struktur	T_g (°C)	T_m (°C)	Schwindung	Verzugsneigung
PLA	amorph/teilkrist.	55–65	150–160	gering	niedrig
PETG	amorph	78–85	—	gering	niedrig
ABS	amorph	105	—	mittel	hoch
ASA	amorph	100–110	—	mittel	hoch
PA6 (Nylon)	teilkristallin	45–60	215–220	hoch	hoch
PC	amorph	145–150	—	mittel	hoch
PP	teilkristallin	-10	160–165	sehr hoch	sehr hoch
TPU	Elastomer	-30 bis -50	—	gering	niedrig

2.2 Mechanische Kennwerte (Richtwerte XY)

Material	Zugfest. MPa	E-Modul GPa	Bruchdehn. %	Schlagz. kJ/m ²	HDT °C
PLA	45–65	3,5–4,0	2–6	3–8	52–60
PETG	50–65	2,0–2,8	8–20	6–12	70–80
ABS	40–60	1,8–2,4	6–20	8–15	88–98
ASA	45–65	1,8–2,5	6–18	8–15	90–100
PA6-CF	80–120	5,0–8,0	2–5	6–14	120–180
PC	55–75	2,0–2,4	8–15	25–45	110–135
TPU 95A	30–50	0,01–0,05	300–600	kein Bruch	65–75

2.3 Faserverstärkung & Compounds

Kurzfaserverstärkte Filamente (CF/GF, typ. 10–30 Gew.-%) erhöhen Steifigkeit und Maßhaltigkeit, senken aber Bruchdehnung und Schlagzähigkeit. Sie sind abrasiv und erfordern gehärtete Düsen (Hartmetall, Rubin). Endlosfaserverstärkung (Continuous Fiber) erreicht metallnahe Steifigkeiten, ist aber anlagenspezifisch.

2.4 Feuchtigkeit & Alterung

Hygroskopie – kritischer Praxisfaktor

PA (Nylon), PC, PVA, TPU nehmen Luftfeuchte stark auf → Blasen, Strähnenbildung, Festigkeitsverlust.

Trocknung vor dem Druck: PA 70–80 °C/6–12 h, PC 80–100 °C/4–6 h, PETG 60–65 °C/4 h.

Lagerung in Trockenbox mit Silikagel; Restfeuchte < 0,2 % anstreben.

UV- und Thermooxidation: PLA versprödet, ABS vergilbt; ASA und PC-Blends sind UV-stabiler.

Teil 3 · Prozesskennzahlen & Parameter

3.1 Schlüsselparameter und ihre Wirkung

Parameter	Typ. Bereich	Wirkung auf ...	Zielkonflikt
Schichthöhe	0,08–0,30 mm	Oberfläche, Z-Auflösung, Zeit	fein ↔ schnell
Düsentemperatur	oberes Herstellerband	Schichthaftung, Z-Festigkeit	Festigkeit ↔ Strähnen/Oozing
Druckgeschwindigkeit	40–300 mm/s	Zeit, Oberfläche, Genauigkeit	schnell ↔ Qualität
Wandanzahl (Perimeter)	2–4+	Festigkeit, Dichtigkeit	fest ↔ Material/Zeit
Infill-Dichte	15–100 %	Gewicht, Festigkeit	leicht ↔ fest
Infill-Muster	Gyroid, Grid, Honeycomb	Isotropie, Last	isotrop ↔ schnell
Kühlung	0–100 %	Überhang, Schichthaftung	Detail ↔ Z-Festigkeit
Flow / Extrusionsmultipl.	0,95–1,05	Maßhaltigkeit, Dichte	über-/unterextrudiert

3.2 Anisotropie quantifiziert

FDM-Bauteile sind richtungsabhängig. Die Festigkeit in Z-Richtung (zwischen Schichten) erreicht typischerweise nur 40–70 % der XY-Festigkeit, da hier die Schichtenanbindung über Diffusion und nicht über die Polymermatrix erfolgt. Höhere Düsentemperatur, geringere Kühlung und dünnere Schichten verbessern die Z-Anbindung.

Orientierung	Relative Zugfestigkeit	Anwendungsempfehlung
XY flach (entlang Schicht)	100 % (Referenz)	Standard für die meisten Lastfälle
XZ / on-edge (hochkant)	oft höchste UTS	Hohe Zuglast in Schichtrichtung
Z aufrecht (über Schichten)	40–70 %	Z-Last vermeiden, kritisch bei Gewinden

3.3 Reproduzierbarkeit & Prozessfähigkeit

Reproduzierbarkeit erfordert die Kontrolle aller Einflussgrößen: Filamentcharge (Toleranz $\pm 0,02$ mm), Restfeuchte, Düsenverschleiß, Bettkalibrierung (Mesh-Leveling), Umgebungstemperatur. Für serielle Fertigung empfiehlt sich die Erfassung der Prozessfähigkeit (Cp/Cpk) über Stichproben kritischer Maße.

Maßnahmen für reproduzierbare Ergebnisse

Filament chargenweise verwalten, Trockenstatus dokumentieren.
 Düse als Verschleißteil führen (CF/GF: häufiger Wechsel).
 Erstbemusterung (First Article Inspection) je neuem Bauteil.
 Kalibrierobjekte (Flow, Temperatur, Retraction) je Material pflegen.
 Druckprotokoll: Profil, Charge, Maschine, Datum archivieren.

Teil 4 · Nachbearbeitung

4.1 Stützstrukturentfernung

- Lösliche Stützen (PVA, BVOH, HIPS): wasser- bzw. limonenlöslich, ideal für komplexe Geometrien.
- Bruchstützen (gleicher Werkstoff): mechanisch entfernen, Nachbearbeitung der Kontaktflächen nötig.
- Stützschnittstelle (Interface): Abstand und Dichte bestimmen Ablösbarkeit und Narbenbildung.

4.2 Mechanische Nachbearbeitung

Verfahren	Eignung	Hinweis
Schleifen (Trocken/Nass)	alle Thermoplaste	Nass bevorzugt (Staubreduktion); Körnung 200→2000
Spachteln/Füllern	PLA, PETG, ABS	Schichtlinien füllen vor Lackierung
Fräsen/Bohren	PC, PA, ABS	Scharfes Werkzeug, langsam, Wärmeentwicklung beachten
Gewindeschneiden	alle (Wandstärke!)	Besser: Gewindeeinsätze (Heat-Set Inserts)
Tumbling/Gleitschliff	Kleinteile	Serienglättung in Trommel mit Medien

4.3 Chemische & thermische Glättung

Methode	Material	Wirkung	Sicherheit
Aceton-Dampf	ABS, ASA	glänzende, geschlossene Oberfläche	explosiv! nur Abzug/Freien
Tempern (Annealing)	PLA, PA, PET	Kristallinität ↑, HDT ↑, Festigkeit ↑	Verzug möglich, Schwindung einplanen
Heißluft/Flammpolitur	begrenzt	punktueller Glättung	Brand-/Verformungsrisiko

Tempern – Werkstoffeffekt

PLA: bei 80–110 °C steigt die Wärmeformbeständigkeit deutlich (Kristallisation), Zugfestigkeit leicht höher.
Bauteil in Sand/Gips einbetten reduziert Verzug beim Tempern.
Maßänderung durch Schwindung vorab durch Testkörper bestimmen.

Teil 5 · Veredelung & Oberflächengüte

5.1 Oberflächenkennzahlen

Die Oberflächengüte wird über die Rauheit (Ra, Rz) beschrieben. FDM-Oberflächen zeigen prozessbedingt eine periodische Welligkeit (Schichtlinien) sowie den Treppenstufeneffekt an schrägen Flächen, dessen Ausprägung von Schichthöhe und Flächenwinkel abhängt.

Oberfläche	Schichthöhe	Ra (Richtwert)	Schichtlinien
FDM grob	0,30 mm	Ra 20–35 µm	stark sichtbar
FDM Standard	0,20 mm	Ra 10–25 µm	sichtbar
FDM fein	0,12 mm	Ra 6–15 µm	schwach
FDM ultrafein	0,08 mm	Ra 3–10 µm	kaum
nach Glättung/Lack	—	Ra < 1–3 µm	nicht sichtbar

5.2 Treppenstufeneffekt

An geneigten Flächen entsteht durch die Schichtung eine Stufung. Die effektive Rauheit hängt vom Winkel zur Bauebene ab: flache Überhänge (nahe horizontal) zeigen die stärkste Stufung. Adaptive Schichthöhen (variable layer height) reduzieren den Effekt gezielt an kritischen Flächen.

5.3 Beschichtung & Lackierung

- Grundieren (Filler/Primer): füllt Mikrorillen, Haftvermittlung.
- Acryl-/2K-Lacke: 2K-PUR für mechanisch/chemisch belastete Oberflächen.
- Galvanik/Metallisierung: Leitlack + galvanische Schicht für metallische Optik/Funktion.
- Hydro-Dipping, Folierung: dekorative Oberflächen ohne Lackieraufwand.
- Lebensmittel-/Medizin: nur zertifizierte Beschichtungssysteme, separate Anforderungen.

5.4 Funktionale Veredelung

Ziel	Methode	Effekt
Dichtigkeit	Epoxid-Imprägnierung, Wandstärke ↑	wasser-/luftdicht
Verschleißschutz	Hartlack, PTFE-Beschichtung	Reibungsreduktion
Leitfähigkeit	Leitlack, CF-Compound	ESD-Schutz, Abschirmung
Hitzebeständigkeit	Tempern, Hochtemperatur-Polymer	HDT-Erhöhung
UV-Schutz	ASA-Wahl, UV-Klarlack	Außenbeständigkeit

Teil 6 · Fehlerbilder & Abhilfe

Fehlerbild	Ursache	Abhilfe
Warping (Verzug)	Schwindung, Bett-/Raumtemp.	beheiztes Bett, Einhausung, Brim/Raft, ASA/ABS langsam
Delamination (Z)	zu kalt, zu schnell, Zugluft	Düsentemp ↑, Kühlung ↓, Einhausung
Stringing (Fäden)	Oozing, Feuchte	Retraction, Trocknung, Temp ↓
Elephant Foot	erste Schicht zu heiß/gequetscht	Z-Offset, erste Lage kühlen, Bett-Temp ↓
Unterextrusion	verstopft, Flow zu gering	Düse reinigen, Flow ↑, Temp ↑
Ghosting/Ringing	Resonanz, Beschleunigung	Beschleunigung ↓, Mechanik steifer, Input Shaping
Schwache Schichthaftung	zu kalt/schnell	Temp ↑, Geschwindigkeit ↓, Linienbreite ↑
Maßabweichung	Flow, Schrumpf, Kalibrierung	Flow kalibrieren, Schwindung kompensieren

Teil 7 · Anwendungsklassen & Materialwahl

Die Anforderungen an Werkstoff, Prozess und Nachweis unterscheiden sich fundamental je nach Anwendung. Ein dekoratives Bauteil und ein technisch oder sicherheitskritisches Bauteil sind nicht vergleichbar.

Anwendungsklasse	Beispiel	Materialempfehlung	Nachweistiefe
Dekoratív	Figuren, Vasen	PLA, PLA-Silk	Sicht, Maß
Funktional unkritisch	Halter, Gehäuse	PETG, ABS	Sicht, Maß, Einbautest
Technisch belastet	Zahnräder, Klemmen	PETG-CF, PA-CF, PC	Lastnachweis, Zugprobe
Outdoor	Schilder, Halterungen	ASA, PC-Blend	UV-/Witterungstest
Hochtemperatur	Motornah, Vorrichtung	PC, PA, PPA	HDT-Nachweis, Tempern
Flexibel/Dämpfung	Dichtung, Puffer	TPU (Shore-Wahl)	Härte-/Funktionstest

Wichtig: Verfahrensgrenzen

Kein Lebensmittelkontakt ohne zertifizierte Beschichtung; Schichttrillen sind Bakterienreservoir.
Kein Einsatz in sicherheitskritischen Lastpfaden ohne Prüfnachweis (siehe SICHERHEITSWERK).
Anwendungsspezifische Regulierung (Medizin, Spielzeug, KFZ) erfordert eigene Konformitätswege.

Verweis

Dieses Ingenieurswerk behandelt die werkstoff- und verfahrenstechnische Seite. Gesundheits-, Arbeits- und Rechtssicherheit sind im SICHERHEITSWERK-Kompodium beschrieben. Band II behandelt das SLA/Harz-Verfahren.