

WISSENSCHAFTLICHE MONOGRAFIE · PREPRINT

Open Access · CC BY 4.0

Kunststofftechnik der additiven Fertigung

Werkstoffwissenschaftliche und prozesstechnische Grundlagen der Schmelzschicht- (FDM/FFF) und Photopolymerverfahren (SLA/DLP/MSLA): Theorie, Materialverhalten, Kennzahlen und Reproduzierbarkeit

Thomas [Nachname]

Schichtwerk, Wien, Österreich

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

Publikationsmetadaten

Typ: Monografie / Preprint · Version 1.0 · Sprache: Deutsch

Lizenz: CC BY 4.0 · DOI: bei Zenodo-Upload · März 2026

Fachgebiete: Polymerwissenschaft · Additive Fertigung · Werkstofftechnik · Fertigungstechnik

Begleitband zum SICHERHEITSWERK-Kompodium. Behandelt die werkstoff- und prozesstechnische Seite; gesundheits- und arbeitssicherheitsbezogene Aspekte siehe separate Abhandlung.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
1. Einleitung.....	4
2. Polymerphysikalische Grundlagen.....	4
2.1 Thermoplaste: amorph und teilkristallin.....	4
2.2 Glasübergang und Kettenbeweglichkeit.....	4
2.3 Photopolymere: Vernetzungsstruktur.....	4
3. Bindungsmechanismus der Schmelzschichtung.....	4
3.1 Phasen der Bahnverschweißung.....	4
3.2 Reptationstheorie.....	4
3.3 Bindungsgrad und Schweißzeit.....	5
3.4 Einflussfaktoren auf die interlaminaire Bindung.....	5
4. Bindungsmechanismus der Photopolymerisation.....	5
4.1 Radikalische Kettenpolymerisation.....	5
4.2 Durchhärtungsgrad (Degree of Conversion).....	5
4.3 Eindringtiefe und Auflösung.....	5
5. Mechanische Kennwerte und Anisotropie.....	5
5.1 Kennwerte im Vergleich.....	5
5.2 Anisotropie der Schmelzschichtung.....	6
5.3 Isotropie der Photopolymerisation.....	6
6. Prozess-Eigenschafts-Beziehungen.....	6
6.1 FDM: Parameterwirkung.....	6
6.2 SLA: Parameterwirkung.....	6
6.3 Tempern als Nachbehandlung.....	6
7. Reproduzierbarkeit und Prozessfähigkeit.....	6
7.1 Einflussgrößen.....	6
7.2 Prozessfähigkeit.....	7
8. Schlussfolgerung.....	7
Erklärungen.....	7
Interessenkonflikt.....	7
Datenverfügbarkeit.....	7
Empfohlene Zitierweise.....	7
Literaturverzeichnis.....	8

In Word per Rechtsklick → „Felder aktualisieren“.

Zusammenfassung

Hintergrund. Die additive Fertigung polymerer Bauteile erreicht in zwei Verfahrensfamilien – der Schmelzschichtung (FDM/FFF) und der Vat-Photopolymerisation (SLA/DLP/MSLA) – industrielle Relevanz. Beide Verfahren erzeugen Werkstoffe, deren Eigenschaften sich grundlegend von urgeformten (spritzgegossenen) Pendants unterscheiden.

Zielsetzung. Diese Monografie stellt die werkstoffwissenschaftlichen und prozesstechnischen Grundlagen beider Verfahren systematisch und vergleichend dar, mit Schwerpunkt auf den die Bauteileigenschaften bestimmenden physikalisch-chemischen Mechanismen, den relevanten Kennzahlen und den Bedingungen reproduzierbarer Fertigung.

Kernaussagen. Die Festigkeit von FDM-Bauteilen wird durch die interlaminare Diffusion (Reptation) an den Schichtgrenzen bestimmt und ist daher anisotrop; die Z-Festigkeit erreicht typischerweise 40–70 % der XY-Festigkeit. SLA-Bauteile sind aufgrund durchgehender kovalenter Vernetzung weitgehend isotrop, ihre Eigenschaften jedoch stark vom Durchhärtungsgrad (Degree of Conversion) abhängig. Reproduzierbarkeit erfordert in beiden Verfahren die Kontrolle definierter Einflussgrößen.

Schlüsselwörter: *additive Fertigung; FDM; FFF; Stereolithografie; Reptation; interlaminare Bindung; Anisotropie; Photopolymerisation; Durchhärtungsgrad; Reproduzierbarkeit; Werkstoffkennwerte*

1. Einleitung

Additive Fertigungsverfahren bauen Bauteile schichtweise aus einem Ausgangsmaterial auf und ermöglichen geometrische Freiheiten, die mit ur- oder umformenden Verfahren nicht erreichbar sind. Im Bereich polymerer Werkstoffe dominieren zwei physikalisch grundverschiedene Prinzipien: die thermisch getriebene Schmelzschichtung und die lichtinduzierte Photopolymerisation.

Während die Schmelzschichtung auf der Verfestigung eines aufgeschmolzenen Thermoplasts und der Verschweißung benachbarter Bahnen durch molekulare Interdiffusion beruht, basiert die Photopolymerisation auf der kovalenten Vernetzung flüssiger Monomere unter Lichteinwirkung. Aus diesen unterschiedlichen Bindungsmechanismen resultieren grundverschiedene Eigenschaftsprofile, insbesondere hinsichtlich der Richtungsabhängigkeit (Anisotropie) der mechanischen Kennwerte.^[1]

Diese Monografie verfolgt das Ziel, die werkstoffwissenschaftliche Basis beider Verfahren in vergleichbarer Tiefe darzustellen. Kapitel 2 behandelt die Polymerphysik der eingesetzten Werkstoffe; Kapitel 3 und 4 die verfahrensspezifischen Bindungsmechanismen; Kapitel 5 die mechanischen Kennwerte und ihre Richtungsabhängigkeit; Kapitel 6 die Prozess-Eigenschafts-Beziehungen; Kapitel 7 die Reproduzierbarkeit und Prozessfähigkeit.

2. Polymerphysikalische Grundlagen

2.1 Thermoplaste: amorph und teilkristallin

Thermoplaste lassen sich nach ihrer Ordnungsstruktur in amorphe und teilkristalline Werkstoffe unterteilen. Amorphe Polymere (z. B. ABS, PETG, PC) besitzen keine Fernordnung und erweichen oberhalb der Glasübergangstemperatur T_g kontinuierlich. Teilkristalline Polymere (z. B. PLA in Teilen, PA, PP) weisen kristalline Domänen mit definiertem Schmelzpunkt T_m auf, was höhere Schwindung und Verzugsneigung bedingt.

Werkstoff	Struktur	T_g (°C)	T_m (°C)	Schwindung
PLA	amorph/teilkrist.	55–65	150–160	gering
PETG	amorph	78–85	—	gering
ABS	amorph	105	—	mittel
PA6	teilkristallin	45–60	215–220	hoch
PC	amorph	145–150	—	mittel
PP	teilkristallin	–10	160–165	sehr hoch

2.2 Glasübergang und Kettenbeweglichkeit

Oberhalb von T_g gewinnen die Molekülketten signifikante Beweglichkeit und können über Grenzflächen hinweg diffundieren. Diese Kettenbeweglichkeit ist die Voraussetzung für die Ausbildung der interlaminaeren Bindung in der Schmelzschichtung; ohne ausreichende Temperatur und Verweilzeit bleibt die Verschweißung unvollständig.^[2]

2.3 Photopolymere: Vernetzungsstruktur

Photopolymere sind reaktive Gemische aus Monomeren, Oligomeren, Photoinitiatoren und Absorbern. Unter UV-Licht bildet sich ein dreidimensionales kovalentes Netzwerk (Duromer-artig). Im Gegensatz zu Thermoplasten ist dieses Netzwerk nach der Aushärtung nicht reversibel aufschmelzbar; die Eigenschaften werden durch die Netzwerkdichte und den Durchhärungsgrad bestimmt.

3. Bindungsmechanismus der Schmelzschichtung

3.1 Phasen der Bahnverschweißung

Die Verschweißung benachbarter Bahnen verläuft in drei Phasen: (1) Oberflächenkontakt der Bahnen, (2) Halsbildung (neck growth) getrieben durch Oberflächenspannung, und (3) molekulare Diffusion und Verschlaufung (entanglement) über die Grenzfläche. Erst die dritte Phase stellt die mechanische Tragfähigkeit der Bindung her.^[3]

3.2 Reptationstheorie

Die molekulare Interdiffusion wird durch die Reptationstheorie nach de Gennes und Doi–Edwards beschrieben. Eine Polymerkette bewegt sich darin wie in einer Schlauchumgebung („Röhre“) der Nachbarketten. Die charakteristische Reptationszeit τ bestimmt, wie schnell sich Ketten über die Grenzfläche verschlaufen. Sie ist stark temperaturabhängig:

$$\tau(T) = \tau_0 \cdot \exp(E_a / R \cdot T) \quad (3.1)$$

mit der Aktivierungsenergie E_a , der Gaskonstante R und der absoluten Temperatur T . Mit steigender Düsen- bzw. Grenzflächentemperatur sinkt τ , die Diffusion läuft schneller und vollständiger ab.

3.3 Bindungsgrad und Schweißzeit

Der Bindungsgrad (degree of bonding) wird als Verhältnis der erreichten zur maximal möglichen Grenzflächenfestigkeit definiert. Modelle koppeln die reptationsbasierte Interdiffusion mit der äquivalenten isothermen Schweißzeit, die sich aus dem Zeit-Temperatur-Verlauf der Grenzfläche durch numerische Integration ergibt. Bei teilkristallinen Werkstoffen überlagert sich die Kristallisationskinetik.^[4]

3.4 Einflussfaktoren auf die interlaminare Bindung

Experimentelle Studien identifizieren als wesentliche Stellgrößen die Düsentemperatur, die Druckgeschwindigkeit (Verweilzeit), die Schichthöhe und die Kühlung. Auxiliäre Heizsysteme (Vorheizung, Infrarot, Ultraschall) erhöhen die Diffusion gezielt; Ultraschallanregung steigerte die interlaminare Festigkeit von ABS um bis zu 10 %.^[5]

Neuere Grenzflächenanalysen mittels XPS zeigen, dass die Bindung nicht allein physikalisch (Diffusion, Verschlaufung) erfolgt, sondern auch chemisch beeinflusst wird: Oxidation, Kettenspaltung und materialspezifische Grenzflächensignaturen tragen zur beobachteten Anisotropie und reduzierten Z-Festigkeit bei.^[6]

4. Bindungsmechanismus der Photopolymerisation

4.1 Radikalische Kettenpolymerisation

Der Photoinitiator absorbiert Photonen geeigneter Wellenlänge (typisch $< 405 \text{ nm}$) und zerfällt in Radikale, die die Kettenpolymerisation der Acrylat-/Methacrylatgruppen starten. Es entsteht ein vernetztes Netzwerk. Da die Vernetzung kontinuierlich über Schichtgrenzen hinweg erfolgt, sind SLA-Bauteile weitgehend isotrop – ein fundamentaler Unterschied zur Schmelzschichtung.

4.2 Durchhärtungsgrad (Degree of Conversion)

Der Durchhärtungsgrad (DoC) bezeichnet den Anteil der reagierten reaktiven Gruppen. Frisch gedruckte Grünteile besitzen einen unvollständigen DoC; die Nachhärtung (Post-Curing) erhöht ihn. Der DoC bestimmt Festigkeit, Härte, Glasübergang und Restmonomergehalt:

$$DoC = (C_0 - C_t) / C_0 \quad (4.1)$$

mit der Ausgangskonzentration reaktiver Gruppen C_0 und der verbleibenden Konzentration C_t . Ein zu niedriger DoC bedeutet weiche Bauteile und hohen Restmonomergehalt; ein zu hoher DoC führt zu Versprödung und Vergilbung.

4.3 Eindringtiefe und Auflösung

Die Härtungstiefe pro Belichtung folgt näherungsweise einer logarithmischen Beziehung zur Belichtungsdosis (Jacobs-Gleichung der Stereolithografie): die gehärtete Tiefe wächst mit dem Logarithmus der Energiedichte, skaliert über die materialspezifische Eindringtiefe D_p . Absorber begrenzen D_p gezielt und erhöhen so die Z-Auflösung.^[7]

$$C^d = D_p \cdot \ln(E / E_c) \quad (4.2)$$

mit der Härtungstiefe C^d , der Eindringtiefe D_p , der Belichtungsdosis E und der kritischen Energie E_c (Gelpunkt).

5. Mechanische Kennwerte und Anisotropie

5.1 Kennwerte im Vergleich

Werkstoff/Verfahren	Zugfest. MPa	E-Modul GPa	Bruchdehn. %	Charakter
FDM PLA	45–65	3,5–4,0	2–6	steif, spröde
FDM PETG	50–65	2,0–2,8	8–20	zäh
FDM ABS	40–60	1,8–2,4	6–20	schlagzäh
FDM PA-CF	80–120	5,0–8,0	2–5	steif, fest
SLA Standard	45–65	2,5–3,5	2–5	fein, spröde
SLA Tough	45–70	2,0–2,8	8–20	zäh

5.2 Anisotropie der Schmelzschichtung

FDM-Bauteile zeigen ausgeprägte mechanische Anisotropie: Die Festigkeit in Aufbaurichtung (Z) ist gegenüber der Druckebene (X/Y) reduziert, da die Z-Festigkeit allein durch die interlaminare Diffusion getragen wird, während in der Ebene die durchgehende Bahn die Last überträgt. Typische Z-Werte liegen bei 40–70 % der XY-Werte. ^[8]

Orientierung	Rel. Zugfestigkeit	Tragmechanismus
XY (in der Ebene)	100 % (Referenz)	durchgehende Bahn
XZ / on-edge	oft maximal	Bahn + günstige Lastrichtung
Z (Aufbaurichtung)	40–70 %	nur Grenzflächendiffusion

5.3 Isotropie der Photopolymerisation

SLA/DLP/MSLA-Bauteile sind aufgrund der durchgehenden kovalenten Vernetzung annähernd isotrop. Die verbleibende geringe Richtungsabhängigkeit resultiert aus Belichtungsgradienten und der schichtweisen Nachhärtung, nicht aus einer schwachen Grenzfläche wie bei FDM.

6. Prozess-Eigenschafts-Beziehungen

6.1 FDM: Parameterwirkung

Parameter	Wirkung auf Z-Festigkeit	Mechanismus
Düsentemperatur ↑	steigt	τ sinkt, mehr Diffusion
Druckgeschwindigkeit ↑	sinkt	kürzere Verweilzeit
Schichthöhe ↓	steigt leicht	mehr Grenzflächen, besserer Kontakt
Kühlung ↑	sinkt	schnelleres Unterschreiten von T _g
Tempern (Annealing)	steigt	Nachkristallisation, Spannungsabbau

6.2 SLA: Parameterwirkung

Parameter	Wirkung	Mechanismus
Belichtungszeit ↑	DoC ↑ bis Sättigung	mehr Radikale, mehr Vernetzung
Nachhärtung ↑	Festigkeit/Härte ↑	DoC-Erhöhung
Harztemperatur ↑	Reaktivität ↑	schnellere Kinetik
Absorbergehalt ↑	Z-Auflösung ↑	D _p sinkt

6.3 Tempern als Nachbehandlung

Bei teilkristallinen FDM-Werkstoffen erhöht Tempern oberhalb T_g die Kristallinität und damit Steifigkeit und Wärmeformbeständigkeit; gleichzeitig werden Eigenspannungen abgebaut. Lokalisierte Verfahren (Mikrowellen-, Induktions-, Ultraschallschweißen) verbessern gezielt die interlaminare Bindung und reduzieren die Anisotropie. ^[9]

7. Reproduzierbarkeit und Prozessfähigkeit

7.1 Einflussgrößen

Reproduzierbare Eigenschaften erfordern die Kontrolle aller signifikanten Einflussgrößen. Diese unterscheiden sich verfahrensspezifisch:

FDM	SLA
Filamenttoleranz, Restfeuchte	Harzcharge, Alterung, Sedimentation
Düsenverschleiß (CF/GF)	FEP-Folientrübung/-verschleiß
Bettkalibrierung (Mesh)	LCD-Display-Alterung (Transmission)
Umgebungstemperatur	Harztemperatur, Raumklima
Profil-/Chargenverwaltung	Belichtungsvalidierung je Charge

7.2 Prozessfähigkeit

Für serielle Fertigung empfiehlt sich die statistische Erfassung der Prozessfähigkeit (C_p/C_{pk}) über kritische Maße und Stichproben. Die Erstbemusterung (First Article Inspection) je neuem Bauteil sowie die Archivierung von Druckprotokollen (Profil, Charge, Maschine, Datum) sind Voraussetzung für Nachvollziehbarkeit und Qualitätsnachweis.

Bedingungen reproduzierbarer Fertigung (Synthese)

Definierte, dokumentierte Parameterprofile je Werkstoff und Maschine.

Chargenverwaltung des Ausgangsmaterials inkl. Trocknungs- bzw. Alterungsstatus.

Regelmäßige Validierung (Belichtungstest bei SLA, Kalibrierobjekte bei FDM).

Verschleißteilmanagement (Düse, FEP-Folie, LCD).

Statistische Prozesskontrolle kritischer Maße (C_{pk}).

8. Schlussfolgerung

Die beiden dominierenden Verfahren der polymeren additiven Fertigung beruhen auf grundverschiedenen Bindungsmechanismen: thermisch getriebene Interdiffusion (FDM) versus lichtinduzierte kovalente Vernetzung (SLA). Daraus resultieren ihre charakteristischen Eigenschaftsprofile – die ausgeprägte Anisotropie der Schmelzschichtung gegenüber der weitgehenden Isotropie der Photopolymerisation. Das Verständnis dieser Mechanismen ist die Grundlage für werkstoffgerechte Konstruktion, gezielte Parameterwahl und reproduzierbare Fertigung. Wesentliche Stellgrößen sind bei FDM die Grenzflächentemperatur und Verweilzeit, bei SLA der Durchhärungsgrad.

Erklärungen

Interessenkonflikt

Der Autor betreibt mit Schichtwerk ein Dienstleistungsunternehmen im Bereich der additiven Fertigung. Diese Arbeit wurde ohne externe Förderung erstellt und gibt den publizierten Stand der Technik wieder.

Datenverfügbarkeit

Die Arbeit basiert auf publizierter Literatur und Herstellerangaben; es wurden keine neuen Primärdaten erhoben. Kennwerte sind Richtwerte und ersetzen keine werkstoffspezifische Prüfung im Einzelfall.

Empfohlene Zitierweise

[Nachname] T. *Kunststofftechnik der additiven Fertigung: Werkstoffwissenschaftliche und prozesstechnische Grundlagen*. Preprint, Version 1.0. Zenodo; 2026.

Literaturverzeichnis

Vancouver-Stil, nummeriert in Zitationsreihenfolge.

- [1] Ngo TD, Kashani A, Imbalzano G, Nguyen KTQ, Hui D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Compos Part B Eng.* 2018;143:172–196.
- [2] Coogan TJ, Kazmer DO. Bond and part strength in fused deposition modeling. *Rapid Prototyp J.* 2017;23(2):414–422.
- [3] Sun Q, Rizvi GM, Bellehumeur CT, Gu P. Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyp J.* 2008;14(2):72–80.
- [4] Barocio E, Brenken B, Favaloro A, Pipes RB. Interlayer fusion bonding of semi-crystalline polymer composites in extrusion deposition additive manufacturing. *Compos Sci Technol.* 2022;230:109334.
- [5] Tofangchi A, Han P, Izquierdo J, Iyengar A, Hsu K. Effect of ultrasonic vibration on interlayer adhesion in FFF 3D printed ABS. *Polymers.* 2019;11(2):315.
- [6] Advances in interlayer bonding in fused deposition modelling: a comprehensive review. *Virtual Phys Prototyp.* 2025;20:e2522951.
- [7] Jacobs PF. *Rapid Prototyping & Manufacturing: Fundamentals of StereoLithography.* Dearborn: SME; 1992.
- [8] Chacón JM, Caminero MA, García-Plaza E, Núñez PJ. Additive manufacturing of PLA structures using FDM: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Mater Des.* 2017;124:143–157.
- [9] Interlayer enhancement of 3D printed CF/PLA composites via localized microwave welding and annealing-induced crystallization. *Compos Part A Appl Sci Manuf.* 2024;184:108270.
- [10] Quan Z, Wu A, Keefe M, et al. Additive manufacturing of multi-directional preforms for composites. *Mater Today.* 2015;18(9):503–512.
- [11] Bagsik A, Schöppner V. Mechanical properties of fused deposition modeling parts manufactured with Ultem 9085. *ANTEC Proc.* 2011;1294–1298.
- [12] Gibson I, Rosen D, Stucker B, Khorasani M. *Additive Manufacturing Technologies.* 3rd ed. Cham: Springer; 2021.