

SCHICHTWERK · WERKSTOFFWERK

SLA / DLP / MSLA

Ingenieurswerk Kunststofftechnik

Photopolymere · Materialwissenschaft · Kennzahlen · Nachbearbeitung · Veredelung · Oberflächengüte

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

Band II von II (SLA) · Version 1.0 · März 2026

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

Inhalt

Teil 1 · Verfahrensgrundlagen der Photopolymerisation.....	3
1.1 Funktionsprinzip.....	3
1.2 Verfahrensvarianten.....	3
1.3 Prozesskette.....	3
Teil 2 · Materialwissenschaft der Photopolymere.....	4
2.1 Aufbau eines Photopolymers.....	4
2.2 Harzklassen & Kennwerte.....	4
2.3 Härtungschemie & Durchhärtung.....	4
Teil 3 · Prozesskennzahlen & Parameter.....	5
3.1 Schlüsselparameter.....	5
3.2 Auflösung & Isotropie.....	5
3.3 Reproduzierbarkeit.....	5
Teil 4 · Nachbearbeitung.....	6
4.1 Waschen (Cleaning).....	6
4.2 Nachhärten (Post-Curing).....	6
4.3 Stützentfernung & Finish.....	6
Teil 5 · Veredelung & Oberflächengüte.....	7
5.1 Oberflächengüte.....	7
5.2 Lackierung & Beschichtung.....	7
5.3 Funktionale Aspekte.....	7
Teil 6 · Fehlerbilder & Abhilfe.....	8
Teil 7 · Anwendungsklassen & Harzwahl.....	9

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

Teil 1 · Verfahrensgrundlagen der Photopolymerisation

1.1 Funktionsprinzip

Bei der Vat-Photopolymerisation wird flüssiges Photopolymerharz schichtweise durch Licht selektiv ausgehärtet. Ein Photoinitiator absorbiert UV-Licht (typisch < 405 nm) und startet eine radikalische Kettenpolymerisation der Acrylat-/Methacrylatmonomere, die zu einem vernetzten Festkörper führt. Die Bauplattform hebt das Bauteil schichtweise aus dem Harzbad.

1.2 Verfahrensvarianten

Variante	Lichtquelle	Belichtung	Eigenschaft
SLA (Laser)	UV-Laser + Galvospiegel	punktweise	hohe Detailtreue, langsamer bei Fläche
DLP	Projektor (DMD-Chip)	ganze Schicht auf einmal	schnell, Pixelraster (Voxel)
MSLA	LCD-Maske + UV-LED-Array	ganze Schicht maskiert	kostengünstig, hohe Auflösung, verbreitet

1.3 Prozesskette

Phase	Schritt	Kritische Größe
Vorbereitung	CAD → STL → Stützen + Slicing	Orientierung, Hohlraum, Entlüftung
Belichtung	schichtweise Härtung	Belichtungszeit, Lichtleistung
Grünteil	Bauteil aus Bad	Anhaftung, Saugkräfte (Peel)
Reinigung	Waschen (IPA/wasserbasiert)	Restharz-Entfernung
Nachhärtung	UV-Postcuring	Durchhärtungsgrad, Eigenschaften
Finish	Stützentfernung, Schleifen	Oberfläche, Maßhaltigkeit

Teil 2 · Materialwissenschaft der Photopolymere

2.1 Aufbau eines Photopolymers

Komponente	Funktion	Einfluss auf
Monomere (reaktiver Verdünner)	Viskosität, Vernetzung	Sprödigkeit, Schwindung
Oligomere (Urethanacrylat etc.)	Rückgrat, mech. Eigenschaften	Zähigkeit, Festigkeit
Photoinitiator (z.B. TPO)	Start der Polymerisation	Härtungsgeschwindigkeit
Absorber/Farbstoff	Eindringtiefebegrenzung	Auflösung, Überhärtung
Additive/Füllstoffe	Funktion (zäh, temp, ESD)	Spezifische Eigenschaften

2.2 Harzklassen & Kennwerte

Harztyp	Zugfest. MPa	E-Modul GPa	Bruchdehn. %	Shore	Charakter
Standard	45–65	2,5–3,5	2–5	D80–85	fein, spröde
Tough/ABS-like	45–70	2,0–2,8	8–20	D75–82	zäher, schlagfester
Engineering	55–80	2,5–4,0	4–12	D78–86	funktional
Hochtemperatur	50–80	3,0–4,5	1–3	D85–92	HDT bis ~180 °C
Flexibel/Elastisch	5–25	0,005–0,1	50–200+	A30–80	gummiartig
Dental/Medical*	80–120	3,5–5,0	3–8	D82–88	zertifiziert*

* Medizin-/Dentalharze nur bei entsprechender Zulassung und unter validiertem Prozess; eigene regulatorische Anforderungen (siehe SICHERHEITSWERK).

2.3 Härtungschemie & Durchhärtung

Der Durchhärtungsgrad (Degree of Conversion, DoC) bestimmt die finalen mechanischen Eigenschaften und den Restmonomergehalt. Frisch gedruckte Grünteile sind nur teilweise vernetzt; die Nachhärtung (Post-Curing) erhöht DoC, Festigkeit und Härte, kann aber Sprödigkeit und Vergilbung verstärken. Über- wie Unterhärtung sind Qualitätsrisiken.

DoC – der zentrale Qualitätsparameter

Unterhärtung: weiches Bauteil, hoher Restmonomergehalt (toxikologisch + mechanisch ungünstig).

Optimale Härtung: max. Festigkeit bei vertretbarer Sprödigkeit.

Überhärtung: Versprödung, Mikrorisse, Vergilbung, Maßänderung.

Einflussgrößen: UV-Wellenlänge (< 405 nm), Dauer, Temperatur, Bauteilgeometrie/Schichtdicke.

Teil 3 · Prozesskennzahlen & Parameter

3.1 Schlüsselparameter

Parameter	Typ. Bereich	Wirkung	Zielkonflikt
Schichthöhe	0,025–0,10 mm	Z-Auflösung, Zeit	fein ↔ schnell
Belichtungszeit/Schicht	1,5–4 s (MSLA)	Härtung, Detail	Haftung ↔ Überhärtung
Bottom-Layer-Belichtung	20–60 s	Plattformhaftung	Haftung ↔ Elephant Foot
Lift-Geschw./-höhe	gerätespezifisch	Peel-Kräfte, Detail	schnell ↔ Ablösung
Anti-Aliasing/Grauwerte	0–8	Kantenglättung	Glättung ↔ Detailverlust
Harztemperatur	25–35 °C	Viskosität, Härtung	Fluss ↔ Reaktivität

3.2 Auflösung & Isotropie

Die laterale Auflösung (XY) ergibt sich bei MSLA/DLP aus der Pixelgröße des Displays/Projektors (typisch 18–50 µm), bei SLA aus dem Laserspotdurchmesser. Die Z-Auflösung entspricht der Schichthöhe. Anders als bei FDM ist die Schichtanbindung chemisch (durchgehende Vernetzung), weshalb SLA-Bauteile weitgehend isotrop sind.

3.3 Reproduzierbarkeit

Einflussgrößen auf Reproduzierbarkeit (SLA)

Harzcharge & Alterung (Reaktivität ändert sich, Sedimentation bei Füllstoffharzen).

FEP-/nFEP-Folie: Trübung und Verschleiß ändern Lichtdurchlass → Belichtung anpassen.

LCD-Display-Alterung: sinkende Transmission über Lebensdauer (Belichtungszeit driftet).

Harztemperatur & Raumklima: Viskosität und Härtung temperaturabhängig.

Validierung: Belichtungstest (z.B. Validierungsobjekte) je Charge/Material.

Teil 4 · Nachbearbeitung

4.1 Waschen (Cleaning)

Das Grünteil ist mit unausgehärtetem Harz benetzt, das vor der Nachhärtung vollständig entfernt werden muss. Reinigungsmedien: Isopropanol (IPA 99,9 %), wasserbasierte Reiniger oder bei wasserwaschbaren Harzen Wasser. Ultraschall- oder Tauchbäder mit Bewegung verbessern die Reinigung in Hohlräumen.

- Hohlräume und Sacklöcher mit Entlüftungs-/Ablauflöchern konstruieren.
- Reinigungsmedium altert (Harzsättigung) → rechtzeitig wechseln.
- Nach dem Waschen vollständig abtrocknen vor der Nachhärtung.

4.2 Nachhärten (Post-Curing)

Methode	Wellenlänge	Hinweis
UV-Härtekammer	365/405 nm	kontrollierte Dosis, dreh-/wendbar
Wasserbad + UV	405 nm	Sauerstoffinhibierung reduziert → bessere Oberfläche
Sonnenlicht	variabel	unkontrolliert, nicht reproduzierbar (Unterhärtung)

4.3 Stützentfernung & Finish

- Stützen im Grünzustand leichter entfernbar, aber: unausgehärtetes Harz = Schutzhandschuhe.
- Kontaktpunkte (Support-Marks) verschleifen: Körnung 400→2000, nass.
- Spachteln mit UV-Harz + punktuelle Härtung für nahtlose Reparatur.

Teil 5 · Veredelung & Oberflächengüte

5.1 Oberflächengüte

SLA/DLP-Oberflächen sind prozessbedingt sehr glatt (Ra typ. 0,5–3 µm), an vertikalen und feindetaillierten Flächen oft nahezu druckfertig. Schräge Flächen zeigen abhängig von Schichthöhe eine feine Stufung; durch geringe Schichthöhen (25–50 µm) ist diese minimal.

Oberfläche	Schichthöhe	Ra (Richtwert)	Sichtbarkeit
SLA Standard	0,05 mm	Ra 0,5–3 µm	minimal
SLA fein	0,025–0,035 mm	Ra 0,1–1 µm	kaum
nach Schleifen/Primer	—	Ra < 0,5 µm	spiegelglatt möglich

5.2 Lackierung & Beschichtung

- Hervorragende Lackierbarkeit durch feine Oberfläche; Primer für Haftung empfohlen.
- Klarlack/UV-Schutzlack gegen Vergilbung und UV-bedingte Versprödung (SLA-Teile altern unter UV).
- Metallisierung/Galvanik für Schmuck-Mastermodelle und Funktionsteile.
- Airbrush für Miniaturen/Figuren: feinste Details bleiben erhalten.

5.3 Funktionale Aspekte

Ziel	Maßnahme	Hinweis
UV-Stabilität	Klarlack, UV-stabiles Harz	Standardharze vergilben/verspröden im Licht
Temperaturfestigkeit	Hochtemperaturharz + Nachhärtung	HDT bis ~180 °C möglich
Transparenz	Clear-Harz + Schleifen + Klarlack	mehrstufiges Polieren nötig
Gießerei (Casting)	Castable-Harz (rückstandsfrei)	Schmuck/Dental-Mastermodelle

Teil 6 · Fehlerbilder & Abhilfe

Fehlerbild	Ursache	Abhilfe
Druck löst sich von Platte	Bottom-Belichtung kurz, Platte unkalibriert	Bottom-Layer ↑ , Plattform leveln
Schichtversatz/Layer Shift	Peel-Kräfte, lockere Mechanik	Lift langsamer, Mechanik prüfen
Durchhängende Details	fehlende Stützen, große Fläche	Stützdichte ↑ , Orientierung ändern
Saugnapf-Effekt (Cupping)	Hohlraum ohne Entlüftung	Ablauf-/Entlüftungsloch einfügen
Überhärtung/Detailverlust	Belichtung lang, Absorber gering	Belichtung ↓ , Anti-Aliasing prüfen
Klebrige Oberfläche	Sauerstoffinhibierung, Unterhärtung	Wasserbad-Härtung, Nachhärten ↑
Sprödbbruch	Überhärtung, Standardharz	Tough-Harz, Nachhärtung optimieren
Verzug/Warping	ungleichmäßige Härtung/Schwindung	Orientierung, Stützen, langsam härten

Teil 7 · Anwendungsklassen & Harzwahl

Anwendung	Beispiel	Harzempfehlung	Hinweis
Miniaturen/Figuren	Tabletop, Sammler	Standard, hohe Detailauflösung	Nachhärten + Grundieren
Schmuck-Mastermodell	Guss-Vorlage	Castable (rückstandsfrei)	für Feinguss
Funktionsprototyp	Passteile, Gehäuse	Tough/Engineering	isotrop, belastbar
Hochtemperatur	Vorrichtung, Formen	Hochtemperaturharz	HDT-Nachweis
Flexible Teile	Dichtung, Dämpfer	Flexibel/Elastisch	Shore-Wahl
Dental/Medical	Modelle, Schienen*	zertifiziertes Harz*	nur mit Zulassung*

Wichtig: Verfahrensgrenzen & Sicherheit

Unausgehärtetes Harz ist Gefahrstoff – immer PSA (siehe SICHERHEITSWERK).

Kein Lebensmittelkontakt; Standard-/Engineeringharze sind nicht lebensmittelsicher.

Medizin/Dental: nur zertifizierte Harze unter validiertem, zugelassenem Prozess (MDR).

SLA-Teile altern unter UV – für Dauereinsatz im Licht UV-Schutzlack oder UV-stabiles Harz.

Verweis

Band I behandelt das FDM/FFF-Verfahren. Gesundheits-, Arbeits- und Rechtssicherheit sind im SICHERHEITSWERK-Kompendium beschrieben.