

# Technisches Regelwerk für keramische SLA/DLP-Resinherstellung

## 1 Materialzusammensetzung des Resins

Ein hochgefülltes, stabil dispersiertes Photopolymer-Resin ist die Grundlage für qualitativ hochwertige keramische 3D-Drucke. Die Materialzusammensetzung beeinflusst direkt die Druckbarkeit (Viskosität, Sedimentationsstabilität) und die Eigenschaften des Grünteils sowie des Endbauteils. Wichtig sind dabei der Keramik-Füllgrad und die sorgfältige Auswahl der organischen Komponenten (Monomere/Oligomere, Photoinitiatoren) sowie Additive (Dispergier- und Rheologiehilfsmittel). Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über typische Komponenten und ihre Funktionen:

### 1.1 Keramikanteil (Volumen- vs. Massenprozent)

In der Regel wird ein maximal hoher Feststoffgehalt angestrebt, um die Grünlingsdichte zu erhöhen und den späteren Sinterschrumpf zu minimieren. Maßgeblich ist das Volumenprozent der Keramik (denn dieses bestimmt die Packungsdichte im Grünteil); je nach Dichte der Keramik entspricht das etwa dem 1,5–2-fachen Wert in Gewichtsprozent. Typische Formulierungen liegen bei 50–60 Vol.-% (z.B. 75–85 Gew.-% bei Oxidkeramiken) Feststoff. Solch hohe Füllgrade führen zu einem vergleichsweise dicht gepackten Grünteil, das beim Entbinden und Sintern um z.B. nur 12–15% linear schrumpft, statt > 20% bei niedrigeren Füllungen. Niedrige Feststoffgehalte (< 40 Vol.-%) ergeben zwar dünnflüssigere Harze, führen aber zu hohen Schrumpfungen und erhöhter Rissgefahr in späteren Phasen. Außerdem kann ein geringerer Keramikanteil die UV-Durchhärtung erleichtern, jedoch auf Kosten der Maßhaltigkeit. Umgekehrt erschwert ein sehr hoher Keramikanteil (> 60 Vol.-%) die Verarbeitung: Die Viskosität steigt nicht-linear an und das Gemisch wird pastös oder thixotrop, was die Selbstnivellierung im Drucker verlangsamt. Als Richtwert gilt, dass ein SLA/DLP-Resin eine Viskosität < 3000 mPa·s besitzen sollte, um vom Beschichtungs rakel gleichmäßig verteilt werden zu können. Deshalb werden oft reaktive Verdüner (monomere Diluents) eingesetzt, um bei hohen Pulverfrachten die Viskosität im fließfähigen Bereich zu halten. Ferner ist sicherzustellen, dass die Suspension langzeitstabil ist (keine Sedimentation oder Phasentrennung) – Dispergiermittel und ggf. leichte Thixotropie sind hier entscheidend.

### 1.2 Zusammenhang Viskosität – UV-Durchlässigkeit – Schichtauflösung

Der Keramikgehalt und die Additive beeinflussen das optische Verhalten des Harzes. Hohe Partikelfracht bedeutet: vermehrte Streuung und Absorption von UV-Licht an den Keramikpartikeln. Die effektive Lichtdurchdringungstiefe nimmt ab, was zu dünneren Härtungsschichten pro Belichtung führt. Vorteil: Dadurch lässt sich eine feine Schichtdicke einhalten (hohe vertikale Auflösung), ohne dass tiefere Schichten versehentlich mitgehärtet werden. Nachteilig ist jedoch, dass bei sehr geringer Durchdringungstiefe die Schichthaftung leiden kann – wenn pro Schicht nur z.B. < 50 µm ausgehärtet werden, besteht

Tabelle 1: Typische Bestandteile eines keramischen SLA/DLP-Resins und ihre Funktionen.

| Komponente         | Beispiele / Anteil  | Funktion und Einfluss  |
|--------------------|---|--|
| Keramikpulver      | z.B. $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{ZrO}_2$ , SiC; 40–60 Vol.-% ( $\approx$ 70–85 Gew.-%)       | Hauptbestandteil des Grünteils. Hoher Feststoffanteil ( $\geq$ 50 Vol.-%) sorgt für hohe Grünteildichte und verringert das Schrumpfen beim Entbinden/Sintern. Ein zu geringer Keramikgehalt führt zu übermäßigem Volumenschrumpf und Verzug beim Sintern. Allerdings steigen mit höherem Pulvergehalt auch die Viskosität und die Lichtstreuung, was die Durchhärtungstiefe reduziert.   |
| Monomere           | z.B. Acrylate (HDDA, TMP-TA), Methacrylate; niedermolekular                                       | Reaktive Verdüner: Monomere haben geringe Viskosität und reduzieren die Gesamtviskosität der Suspension. Sie polymerisieren unter UV zu einem Netzwerk und bestimmen mit die Polymerisationsschwindigkeit. (Meth)Acrylat-Monomere härten radikalisch sehr schnell aus (hohe Reaktivität, aber höherer Schrumpf), während epoxidische Monomere kationisch langsamer polymerisieren (geringerer Schrumpf, aber feuchtigkeitssensibel). Monomere werden gezielt gewählt, um eine Balance aus geringer Viskosität und ausreichender Vernetzungsdichte zu erreichen.  |
| Rheologie-Additive | z.B. pyrogene Kieselsäure ( $\text{SiO}_2$ -Nanopulver), spezielle Thixotropiermittel; 0–3 Gew.-% | Dienen zur Viskositäts- und Fließverhaltensanpassung. Fügen der Suspension eine leichte Thixotropie hinzu: Im Ruhezustand hohe Viskosität (verhindert Entmischung/Sedimentation), unter Scherung dünnflüssiger (erleichtert das Beschichten). Fumed Silica (hochdisperse $\text{SiO}_2$ ) ist ein häufig verwendetes Mittel, das sich zu einem partikulären Netzwerk im Harz verbindet und so eine Strukturviskosität erzeugt. Vorsicht: Die Menge muss optimiert werden – zu wenig bewirkt keine Stabilisierung, zu viel erhöht die Viskosität und Fließgrenze drastisch, was die Beschichtung erschweren kann. |

Risiko von unzureichender Überlappung mit der vorherigen Lage. Ein Extremfall sind dunkel eingefärbte bzw. nicht-UV-transparente Keramiken (z.B. SiC,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ): Hier kann die

Härtungstiefe ohne Maßnahmen  $< 50 \mu\text{m}$  liegen, was zu schwacher Interlayer-Bindung und Neigung zu Rissen/Poren führt. Um dies auszugleichen, müssen Belichtungsenergie und Schichtdicke sorgfältig angepasst werden (siehe Abschnitt 2). Niedrige Partikelfrachten hingegen erhöhen die UV-Durchlässigkeit: Das Harz wird „tiefer“ und breiter durchhärtbar (größerer depth of cure  $D_p$ ). Dies kann zwar ermöglichen, dickere Schichten in einem Belichtungsschritt zu härten, jedoch steigt die Gefahr des Überhärtens (Bleeding): Licht dringt seitlich und tief in ungeplante Bereiche ein und polymerisiert Harz über die Sollkonturen hinaus. Die Folge sind verwaschene Details und geringere Maßhaltigkeit in xy- und z-Richtung. Daher ist bei transparenten, niedrig viskosen Harzen die Belichtungs-dosis strikt zu kontrollieren. Ein gewisses Maß an Lichtabsorption/-streuung durch die Keramik wirkt tatsächlich positiv, da es die Lateralausbreitung der Belichtung begrenzt und schärfere Konturen ermöglicht. Optimale Auflösung erzielt man, indem Harz-Rezeptur und Belichtungsparameter so aufeinander abgestimmt sind, dass die durchhärtende Schichtdicke etwa der gewünschten Schichtdicke entspricht. Zusammengefasst: Hohe Füllgrade verbessern Grünteildichte und reduzieren Endschrumpf, erfordern aber höhere Belichtungsenergie und dünnere Schichten für präzise Ergebnisse. Niedrige Füllgrade erleichtern die Belichtung (größere Härtungstiefe), bringen jedoch höhere Schrumpfung und potenziell schlechtere Auflösung mit sich.

## 2 Druckprozess (SLA/DLP/LCD)

Der Druckprozess muss an die Eigenschaften des keramischen Resins angepasst werden. Unterschiedliche Keramikanteile und Viskositäten erfordern angepasste Druckparameter, um optimale Bauteilqualität zu erzielen. Im Folgenden werden Empfehlungen für Druckeinstellungen sowie Anforderungen an die Druckumgebung gegeben.

- **Schichtdicke und Belichtungszeit:** Wählen Sie die Schichtdicke abhängig vom Keramikgehalt und der Lichtdurchdringung. Bei hohem Keramikanteil (50–60 Vol.-%) ist die Härtungstiefe geringer, daher sind dünnere Schichten (typisch  $25\text{--}50 \mu\text{m}$ ) sinnvoll, um sicherzustellen, dass jede Schicht voll durchgehärtet und an die vorherige gebunden wird. Entsprechend muss die Belichtungszeit/Belichtungsenergie höher angesetzt werden, um trotz der Streuung ausreichend Polymerisation zu erreichen. Beispiel: Ein hochgefülltes  $\text{ZrO}_2$ -Harz erfordert evtl. die doppelte Belichtungsdauer eines wenig gefüllten Harzes für dieselbe Schichtdicke. Bei niedrigerem Keramikanteil (30–40 Vol.-%) kann man tendenziell dickere Schichten ( $50\text{--}100+ \mu\text{m}$ ) verwenden, da das UV-Licht tiefer eindringen kann. Hier ist jedoch Vorsicht geboten: Die Belichtungsenergie ist so zu dosieren, dass nicht deutlich mehr als die nominelle Schichtdicke ausgehärtet wird ( $\rightarrow$  Überhärtung vermeiden). Als Richtlinie gilt die Arbeitskurve: Für jedes Resin lässt sich experimentell ein kritischer Belichtungswert  $E_c$  und eine Halbwerts-Durchdringtiefe  $D_p$  bestimmen. Die zugeführte Energie pro Schicht sollte etwa so bemessen sein, dass Tiefe  $\approx$  Schichtdicke + 10–20% Überlapp (für gute Bindung) erreicht wird.
- **Belichtungsenergie und Bauteilqualität:** Die Bauteilqualität (Genauigkeit, Oberflächenauflösung, Grünteil-Stabilität) reagiert empfindlich auf Änderungen der Belichtung:
  - Zu geringe Belichtung führt zu Unterhärtung – die Schichten bleiben teilweise flüssig oder gummiartig. Das Grünteil ist weich, Verzug kann bereits beim Entnehmen auftreten und die Schichten können sich lösen. Mikrostrukturell bleiben Poren zwischen den nur unvollständig vernetzten Bereichen zurück, was später Defekte verursachen kann.

- Zu hohe Belichtung führt zu Überhärtung – die Polymerisationszone reicht über die beabsichtigten Grenzen hinaus. Bauteilkanten werden unscharf und Details verlaufen. Außerdem steigt der Polymerisationsschrumpf innerhalb jeder Schicht, was zu Eigenspannungen führen kann. Starke Überbelichtung kann sich auch als „Elefantenfuß“ (am Schichtanfang verbreiterte Basis durch übermäßige Belichtung der ersten Schichten) äußern. Daher sollten Belichtungszeit und -intensität nach Möglichkeit empirisch optimiert werden (Belichtungsreihe), um das Fenster zwischen Unter- und Überhärtung einzuhalten.
- **Tipp:** Große Volumenbereiche belichtet man besser in leicht unterteilten Belichtungsintervallen als in einem Schritt, um Spannungsspitzen zu vermeiden. Beispielsweise kann ein Schichtbild in zwei oder mehr aufeinanderfolgende Belichtungen mit kurzer Zwischennachbelichtungs-Pause aufgeteilt werden. Diese intervallartige Belichtung reduziert nachweislich Schrumpfspannungen und verringert die Neigung zu Verzug oder Schichtrissen im Grünling.
- **Druckgeschwindigkeit und Recoating:** Hochviskose, stark gefüllte Harze benötigen oft längere Zeit zum Selbstnivellieren nach jeder Schicht. Stellen Sie gegebenenfalls eine Z-Wartezeit ein (z.B. 20–30 s) bevor die nächste Belichtung beginnt, damit die frische Schicht gleichmäßig ist. Einige Drucker verwenden einen Rakel oder eine beschichtete Klinge zum gleichmäßigen Verteilen. Bei sehr zähen Harzen kann es helfen, die Beschichtergeschwindigkeit zu reduzieren und den Anpressdruck zu erhöhen, um Luftblasen und Riefen zu vermeiden. Achten Sie darauf, dass die Scherkräfte beim Rakeln nicht zu hoch sind – das Harz sollte möglichst newtonsch fließen (gleichmäßig ohne drastische Verdickung bei niedriger Scherrate). Thixotrope Harze erfordern eine mechanische Anregung (Rühren oder Rakelbewegung), um zu fließen; planen Sie dafür ggf. einen periodischen Rührvorgang ein, falls die Maschine das erlaubt.
- **Anforderungen an die Druckumgebung:** Für reproduzierbare Druckergebnisse ist eine kontrollierte Umgebung essentiell:
  - **Temperatur:** Halten Sie die Druckkammer und das Harz auf einer konstanten Temperatur (typ. 25–35 °C). Eine moderate Erwärmung des Harzbehälters auf ~ 30–40 °C senkt die Harzviskosität deutlich und verbessert das Fließ- und Nivellierverhalten. Zudem vermindert ein temperierter Bauraum thermische Spannungen während der Belichtung: Bei zu kalter Umgebung (z.B. 15 °C) beobachtet man, dass die durch die UV-Energie entstehende lokale Erwärmung im Bauteil zu Verzug führen kann. Versuche zeigen, dass bei beheizter Kammer (~ 40 °C) kein Warpage im Grünteil auftrat, welches bei Raumtemperatur noch deutlich sichtbar war. Viele industrielle DLP-Anlagen verfügen über eine Heizfunktion für die Harzwanne oder einen beheizten Bauraum. Auch das Beschichter-Werkzeug lässt sich teils beheizen; beispielsweise konnte durch einen 70 °C warmen Rakel die Planarität einer sehr hochviskosen Suspension (25.000 mPa·s) erst gewährleistet werden. Zu hohe Temperaturen (> 50–60 °C) sollten allerdings vermieden werden, da sonst Photoinitiatoren oder Harzkomponenten vorzeitig altern oder Lösemittelkomponenten verdampfen könnten. Empfehlung: ~ 30–40 °C Kammer- und Harztemperatur bieten einen guten Kompromiss aus niedriger Viskosität und Materialsicherheit.
  - **Luftfeuchtigkeit:** Halten Sie die relative Luftfeuchte im Arbeitsraum möglichst konstant und eher niedrig (z.B. < 50%). Zwar ist die direkte Feuchtigkeitseinwirkung auf radikalische Acrylatpolymerisation gering, doch kationische Pho-

topolymere (Epoxide) reagieren empfindlich auf Umgebungsfeuchte – bereits normale Luftfeuchte kann die Kettenpolymerisation verlangsamen oder abbrechen. Außerdem können sehr hygroskopische Pulver (manche Keramiken oder Additive) Feuchtigkeit ziehen, was beim Belichten zu Mikroporen (durch verdampfendes Wasser) führen könnte. Eine trockene Umgebung (klimatisierter Raum) erhöht die Prozessstabilität. Zudem verhindert ein sauberes, staubarmes Umfeld, dass Schmutzpartikel in die Harzwanne gelangen und dort evtl. Lichtstreuungen oder Druckfehler verursachen.

- **Lichtschutz:** Stellen Sie sicher, dass kein Fremd-UV-Licht in die Anlage gelangt (direktes Sonnenlicht, UV-Lampen etc.), um ein vorzeitiges Aushärten des Harzes in der Wanne zu verhindern. Arbeiten Sie bevorzugt unter gelbem Licht oder geschlossenen Bedingungen.

Durch ein angepasstes Parameter-Setup – dünne Schichten und kräftige Belichtung bei hochgefüllten Harzen, vs. dickere Schichten und gemäßigte Belichtung bei niedrig gefüllten – sowie eine kontrollierte Umgebung (Temperatur, Feuchte) lassen sich präzise, verzugsarme Grünlinge herstellen. Es ist ratsam, für jede neue Resin-Formulierung eine Parameterstudie (Belichtungstest, Viskositätstest bei Temperatureinflüssen etc.) durchzuführen, um das ideale Prozessfenster zu ermitteln.

### 3 Nachbearbeitung und Entbinderung

Nach dem Druck wird das gefertigte Grünteil (ein Verbund aus Polymermatrix und Keramikpartikeln) nachbearbeitet. Ziel ist es, restliches flüssiges Harz zu entfernen (Reinigung), das Bauteil vollständig auszuhärten (evtl. UV-Nachbelichtung) und anschließend den organischen Binder kontrolliert auszuschleusen (Entbinderung), bevor das reine Keramikgerüst gesintert wird. Jeder dieser Schritte muss sorgfältig durchgeführt werden, um Risse, Verzug oder Defekte zu vermeiden.

#### 3.1 Reinigung des Grünteils

Unmittelbar nach dem Drucken haftet meist eine Schicht aus unvernetztem Harz an der Bauteiloberfläche. Diese muss entfernt werden, da sie sonst beim Entbindern zu lokalen Spannungen oder Flecken führt. Übliche Methoden sind:

- **Lösemittelreinigung:** Abspülen oder Eintauchen in ein geeignetes Lösungsmittel (oft Isopropanol, Ethanol oder spezielle Reinigungsfüssigkeiten). Das Bauteil wird typischerweise für einige Minuten im Bad geschwenkt oder mit einer Sprühflasche abgespült. Wichtig: Keine überlange Einwirkzeit! Harze (bes. Acrylate) können durch längeren IPA-Kontakt aufquellen oder spröde werden, was feine Details beschädigt. Beobachtungen zeigen, dass zu aggressive Lösungsmittel oder zu lange Bäder die oberste, bereits leicht gehärtete Schicht aufweichen und ablösen können. Daher die Teile nur so lange wie nötig spülen, bis überschüssiges Harz entfernt ist.
- **Ultraschallbad:** Ein kurzes Ultraschallbad (in Alkohollösungen oder im schonenderen Wasser/Spülmittel-Gemisch) kann helfen, Harz aus engen Spalten und Hohlräumen zu entfernen. Allerdings ist Vorsicht mit Ultraschall geboten: Die Kavitation und Vibrationen können filigrane Strukturen des Grünteils schädigen oder abbrechen. Untersuchungen zeigen, dass Ultraschall zwar kleinste Bohrungen am effektivsten reinigt, aber auch die stärksten Strukturschäden am Grünling verursacht. Ein Kompromiss ist, nur sehr kurze Ultraschallstöße (wenige Sekunden) anzuwenden oder empfindliche Teile gar nicht ultraschallzubaden.

- **Sprüh- und Druckreinigung:** Alternativ kann man das Teil mit einem kräftigen Lösemittelstrahl (z.B. aus einer Spritzflasche oder Drucksprüngerät) abspülen. Diese Sprühreinigung entfernt Harz von Oberflächen ohne die intensiven mechanischen Schockwellen des Ultraschalls. Studien empfehlen z.B. für komplexe Geometrien eine Kombination: zuerst kurze Ultraschallreinigung für tiefe Hohlräume, dann Abspülen unter Druck, um Restharz zu entfernen – so wird die Beschädigungsgefahr minimiert.

Nach dem Reinigen sollte das Bauteil vorsichtig mit Druckluft oder Papiertüchern getrocknet werden. Kein Erhitzen im Ofen vor der vollständigen Entbinderung! (Gefahr des vorzeitigen Aushärtens oder Verziehens durch partielle Bindererwärmung).

Gegebenenfalls erfolgt nun eine UV-Nachbelichtung: Viele Harze erreichen nach dem Druck noch nicht 100% Konversion. Um die Festigkeit des Grünteils zu maximieren, kann es in einer UV-Nachhärtungskammer (mehrere Minuten unter UV-Lampen) vollständig durchgehärtet werden. Dies verbessert die Handhabungsstabilität und vermeidet klebrige Oberflächen. Insbesondere wenn das Bauteil für die weitere Verarbeitung (Entbinderung) stabil genug sein muss, empfiehlt sich dieser Schritt. (Hinweis: Bei sehr dicken oder lichtundurchlässigen Bereichen dringt das UV-Licht der Nachhärtung u.U. nicht überall hin; dort verbleibt die Polymerisation unvollständig, was beim Entbindern berücksichtigt werden muss.)

### 3.2 Entbinderung (Binderentfernung)

Ist das Grünteil vollständig gereinigt und ausgehärtet, folgt die Entfernung der organischen Matrix, sodass ein reiner „Braunkörper“ aus Keramik entsteht. Dies ist ein kritischer Schritt – Fehler beim Entbindern sind die häufigste Ursache für Risse und Verzug. Man unterscheidet thermisches Entbinden (langsames Ausheizen im Ofen) und ggf. lösungsmittelbasiertes Entbinden (chemisches Herauslösen bestimmter Binderanteile). In der Praxis wird bei UV-gehärteten Systemen meist ausschließlich thermisch entbunden, da die Polymere stark vernetzt und unlöslich sind.

- **Thermisches Entbindern:** Führen Sie das Bauteil in einem Ofen langsam an Temperatur heran, um die organischen Bestandteile abzubauen. Typische Vorgehensweise:
  - Langsames Aufheizen von Raumtemperatur auf ca. 200–250 °C mit sehr geringer Rate (z.B. 1 K min<sup>-1</sup>). In diesem Bereich zersetzen sich viele Polymere (Acrylatnetzwerke, Binder) und werden flüchtig. Ist der Anstieg zu schnell, bauen sich im Inneren Druck und Spannungen auf, was zu Rissen oder einem „Aufblähen“ des Teils führen kann. Daher können auch Haltezeiten (z.B. 2 h bei 250 °C) eingelegt werden, um dem Binder ausreichend Zeit zum Austreten zu geben.
  - Weiterer Temperaturanstieg auf ~ 400–600 °C mit mäßiger Rate. Hier verbrennen die Rückstände kohlenstoffhaltiger Binder in Präsenz von Sauerstoff vollständig. Viele Prozesse wechseln in diesem Stadium auf eine Luft-Atmosphäre, sofern der Ofen inert begonnen hat – der Sauerstoff stellt sicher, dass kein Kohlenstoff zurückbleibt und alle organischen Rückstände oxidiert werden. Ein sauberer Ausbrand ist wichtig, da verbleibender Kohlenstoff die Sinteraktivität der Keramik reduziert (Kornwachstum wird gehemmt, Teile bleiben porös und schwach) und in z.B. Elektroanwendungen zu Leitfähigkeiten führen kann.

- Über  $\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$  hinaus sind i.d.R. keine organischen Komponenten mehr vorhanden – das Teil besteht nun aus gesinterten Primärteilchen, hält aber noch nicht zusammen. Meist schließt man daher nahtlos den Sinterprozess an (siehe Abschnitt 4), anstatt das Teil abkühlen zu lassen.

Wichtig ist, während des gesamten Entbinderungslaufs für ausreichende Gasabfuhr zu sorgen. Organische Zersetzungsprodukte (Gase, Dämpfe) müssen aus dem Ofen entweichen können – eine leichte Spülung mit Luft oder inertem Trägergas kann helfen. Andernfalls können sich die Zersetzungsprodukte im Porensystem des Teils stauen und zu internen Explosionseffekten führen. Auch Vakuumphasen werden teilweise eingesetzt, um das Ausgasen zu erleichtern. Manche Prozesse fahren zweistufig: erst im Vakuum oder unter inertem Schutzgas entbinden, um sanft die meisten Binder zu entfernen, dann zum Schluss etwas Luftsauerstoff zulassen, um verbleibende Kohlenstoffreste zu verbrennen. Diese „hybride“ Entbinderung kann Rissbildung minimieren und gleichzeitig eine saubere Polymerentfernung gewährleisten.

- **Lösungs-Entbindern (optional):** In wenigen Fällen enthält die Resin-Formulierung einen Anteil an herauslösbarem Binder (z.B. Wachs, thermoplastische Komponenten) neben dem UV-Harz. Dann kann vor dem thermischen Schritt ein Lösebad eingesetzt werden, um diese Komponenten schonend zu entfernen. Für SLA-Grünlinge ist dies selten, da das Netzwerk unlöslich ist. Sollte ein solcher Prozess vorgesehen sein (z.B. Herauslösen von Wachs aus einem UV-gehärteten Wachs/Harz-Hybrid), so muss das Lösungsmittel das Polymer nicht quellen lassen. Oftmals ist die Temperatur dabei gering ( $50\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) und die Dauer lang (mehrere Stunden bis Tage). Insgesamt ist diese Methode für photopolymere Harze unüblich, daher Schwerpunkt auf dem thermischen Entbindern.

### 3.3 Einfluss auf Rissbildung und Verzug

Das Entbindern birgt hohe Risiken für das Bauteil:

- **Rissbildung:** Schnell ansteigende Temperatur oder zu dicke Querschnitte können zu inneren Rissen führen, da sich im Kern des Bauteils Gase bilden, die nicht schnell genug entweichen. Der Druck sprengt dann Mikrorisse ins Material. Diese Risse bleiben im später gesinterten Teil als schwere Defekte bestehen. Daher: immer langsame Aufheizraten im kritischen Zersetzungsbereich und lieber längere Haltephasen einplanen. Auch bereits beim Design kann vorgebeugt werden – gleichmäßige Wandstärken und massive Vollbereiche vermeiden, oder diese mit Entlüftungsbohrungen versehen. Delamination (Schichtablösung) kann auftreten, wenn zwischen den gedruckten Schichten unzureichend gebundenes Material war; beim Entbindern trennen sich diese Ebenen dann. Das ist ein Zeichen, dass im Druckprozess nicht genug Überhärtung/Bindung erreicht wurde.
- **Verzug (Warping):** Während des Entbinderns schrumpft das Bauteil bereits merklich (die Polymermatrix schwindet/verschwindet). Wenn dieser Schrumpfung ungleichmäßig verläuft, verformt sich das Bauteil. Ursachen: inhomogene Temperaturverteilung im Ofen, zu schnelle Aufheizung außen vs. innen, oder anisotrope Grünteildichte. Beispielsweise können flache, tellerförmige Grünlinge sich an den Rändern heben oder senken. Um Verzug zu minimieren, sollte das Teil möglichst spannungsfrei gelagert werden – kleine, leichte Teile kann man auf Pulverbetten oder Keramik-Wabenplatten entbindern, sodass sie bei Erweichung nicht einsinken. Große flache Teile erfordern eventuell Haltevorrichtungen (Setter), um Durchbiegung zu

verhindern. Dennoch lässt sich gewisser Verzug kaum vermeiden; er wird später beim Sintern teilweise wieder ausgeglichen (die Schwerkraft und die Sinterkräfte können ein verzogenes Teil manchmal wieder etwas begradigen, aber darauf sollte man sich nicht verlassen).

- **Entbinderungsatmosphäre:** Wie erwähnt, beeinflusst die Atmosphäre auch die Riss-/Verzugs-Problematik. In Luft verlaufen die Zersetzung und Oxidation zumeist exotherm, was lokal Hitze erzeugen kann – dies erfordert noch vorsichtigeren Temperaturführung, kann aber dafür sorgen, dass am Ende wirklich kein Restbinder da ist (somit weniger Ungleichmäßigkeiten im Teil). In inertem Gas/Vakuum verläuft die Zersetzung eher endotherm und schonender, allerdings bleibt am Ende womöglich etwas Kohlenstoff zurück, der dann im Sinterprozess noch abbrennen muss (was dort Risse verursachen könnte). Studien an  $\text{Al}_2\text{O}_3$  zeigen, dass Luft-entbundene Teile tendenziell etwas bessere mechanische Eigenschaften hatten als argon-entbundene, vermutlich wegen der vollständigen Ausbrandrate. Unabhängig von der Atmosphäre gilt: Das Entbindern ist meist der heikelste Schritt – hier kann bei falschen Parametern das Bauteil unwiederbringlich zerstört werden. Daher empfehlen sich standardisierte Entbinderungszyklen (z.B. nach Bauteilmasse und -dicke skalierte Haltezeiten) und ggf. eine Überwachung (z.B. durch Massenverlust-Aufzeichnung mittels Thermowaage bei der Entwicklung).

Nach dem Entbindern bleibt ein Braunkörper aus keramischen Partikeln mit  $\sim 40\text{--}60\%$  Porosität zurück. Dieser ist sehr fragil (lässt sich mit der Hand zerdrücken) und sollte möglichst ohne mechanische Belastung dem Sinterprozess zugeführt werden.

## 4 Sinterprozess

Im Sinterprozess wird der Braunkörper zu einem dichten Keramikbauteil gesintert, d.h. durch Hochtemperaturbehandlung erfolgt die Diffusion und Bindung der Partikel zu einem festen Gefüge. Die Sinterparameter hängen stark vom Keramikmaterial ab. Im Folgenden werden Temperaturprofile, der Zusammenhang zwischen Keramikanteil und Schrumpfung sowie der Einfluss der Atmosphäre beschrieben.

### 4.1 Temperaturprofile nach Keramiktyp

Jede Keramik besitzt eine optimale Sintertemperatur bzw. -programm, um eine hohe Dichte bei minimalem Kornwachstum zu erzielen. Tabelle 2 gibt Orientierungswerte für gängige Keramiken:

Hinweis: Die exakten Sinterparameter sollten für jede Materialcharge empirisch ermittelt werden (Dichte- und Festigkeitsmessungen), da Pulverqualität und Korngröße einen Einfluss haben.

### 4.2 Schrumpfung und Dichte

Während des Sinterns schrumpft das Teil weiter, da die Poren schließen und die Partikel zu dichterem Verband zusammenwachsen. Die Größe der Schrumpfung hängt maßgeblich vom Keramikanteil im Grünling ab:

- Ein hoher Keramikvolumenanteil (dichte Packung) führt zu geringerer Schrumpfung, da weniger Hohlraum durch Binder vorlag. Z.B. schrumpfen hochgefüllte Formulierungen ( $\sim 55\%$  Vol.-% Keramik) typischerweise linear  $15\text{--}20\%$ , was etwa  $40\text{--}50\%$  Volumenschrumpfung entspricht.

- Ein geringer Feststoffanteil (lockere Packung) führt zu entsprechend größerem Sinterzug: 30 Vol.-% Keramik können > 25% linear schrumpfen (d.h. > 60% Volumenverlust). Dies geht oft mit verstärkter Anisotropie einher – d.h. die Schrumpfung in XY-Richtung vs. Z-Richtung kann unterschiedlich ausfallen, wenn die Schichtstruktur des Grünteils sich bemerkbar macht. Durch hohe Füllgrade kann man also die Schwindung besser vorhersagen und geringer halten, was für maßhaltige Bauteile wichtig ist.

Konstruktiver Hinweis: Das CAD-Modell muss den erwarteten Sinterschrumpf als Skalierungsfaktor berücksichtigen (häufig 15–20% größer drucken als Endmaß, je nach ermitteltem Schwindmaß).

### 4.3 Temperaturführung und Atmosphären-Einfluss

Im Vergleich zum Entbindern kann beim Sintern mit schnelleren Aufheizraten gearbeitet werden, da keine plötzlichen Gasfreisetzungen mehr auftreten – der Braunkörper ist offenporig und die Diffusionsprozesse verlaufen kontrolliert. Typisch sind  $3\text{--}10\text{ K min}^{-1}$ , außer es sind Sinteradditive vorhanden, die spezielle Heizstufen erfordern. Die Haltezeittemperatur wird so gewählt, dass eine hohe Dichte erreicht wird, aber das Gefüge nicht übermäßig grob wird. Eine zu hohe Sintererhitze kann zu abnormalem Kornwachstum führen: große Körner auf Kosten kleinerer, was die mechanischen Eigenschaften (insb. Zähigkeit) verschlechtern kann. Ebenso können bei Überhitzen Poren durch Kornkoaleszenz eingeschlossen werden (Restporosität). Eine Studie zu ZTA (Zirkonoxid-Verstärktem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) zeigte z.B., dass die Dichte bis  $1600\text{ °C}$  zunimmt, bei höheren Temperaturen aber wieder abfällt – ein Indiz für optimales Sinterende bei  $\sim 1600\text{ °C}$ . Zu niedrige Temperaturen hingegen lassen Restporosität im Material: die theoretische Dichte wird nicht erreicht, Poren bleiben offen. Porositäten von nur 2–5% (relativ) können die Festigkeit schon um > 50% reduzieren. Daher ist meist lieber etwas Überhitze in Kauf zu nehmen, als unterzusintern.

Die Sinteratmosphäre beeinflusst insbesondere chemisch reaktive Materialien:

- **Oxidkeramiken** ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ , etc.) werden meistens in Luft oder  $\text{O}_2$ -Atmosphäre gesintert, um eine vollständige Oxidationsumgebung zu haben. Inerten Atmosphären wären hier nur nötig, falls das Material flüchtige Bestandteile hätte (bei  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$  nicht der Fall). Allerdings gibt es Berichte, dass in vakuumgesinterten  $\text{Al}_2\text{O}_3$  andere Gefügestände auftreten (z.B. reduziertes  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mit Sauerstoffvacanzen), was die Eigenschaften ändern kann. Generell liefert Luft sintern von Oxiden zuverlässige Ergebnisse und maximale Dichte.
- **Nichtoxidkeramiken** müssen unter Inertgas oder Vakuum gesintert werden. Beispielsweise zersetzt sich  $\text{Si}_3\text{N}_4$  in Luft oder bildet eine Oxidschicht;  $\text{SiC}$  oxidiert ab ca.  $800\text{ °C}$  zu  $\text{SiO}_2$ , was das Sintern stört. Zudem reagieren einige Nichtoxide mit Kohlenstoff – etwa kann in carbidhaltigen Atmosphären eine Aufkohlung passieren. Argon ist ein gängiges Sintergas; für Nitridkeramiken nimmt man auch Stickstoff (um die Atmosphäre gesättigt zu halten und Zersetzung zu vermeiden).
- Die Atmosphäre kann auch die Gefügekinetik beeinflussen: In reduzierenden Atmosphären können sich gewisse Phasen stabilisieren oder das Kornwachstum beschleunigen. Beispielsweise sintert  $\text{ZrO}_2$  in Argon etwas anders (es können oxygen vacancies entstehen), was die Schwindung leicht anisotrop machte in Experimenten.

- **Druckunterstütztes Sintern:** In industriellen Anwendungen (außerhalb des reinen SLA-Prozesses) kommen teils Heißisostatisches Pressen (HIP) nach dem Sintern zum Einsatz, um letzte Poren zu schließen. Dies sprengt den Rahmen dieses Regelwerks, sei aber erwähnt, da Atmosphären (Argon unter hohem Druck) hier kombiniert mit Temperatur genutzt werden.

Zusammenfassend ist für jeden Keramiktyp ein spezifisches Sinterprofil zu fahren, das zu hoher Dichte ohne übermäßigen Verzug führt. Das im Grünling realisierte keramische Packungsvolumen bestimmt dabei wesentlich, wie viel das Teil noch schrumpfen muss – daher müssen alle vorigen Schritte (Füllgrad, Entbindern) optimal sein, um im Sinterprozess ein verzugsfreies und dichtes Bauteil zu erhalten.

## 5 Eigenschaften des gesinterten Endbauteils

Nach dem erfolgreichen Sintern erhält man das Endbauteil aus Keramik, dessen Eigenschaften von der gesamten Prozesskette beeinflusst wurden. Wichtige Kennwerte sind etwa die mechanische Festigkeit (Biegefestigkeit, Druckfestigkeit), die Härte, die Dichte (Relative Dichte im Vergleich zum Theoretikum) sowie die Porosität und Mikrostruktur. Idealerweise erreicht ein gesintertes Teil eine ähnliche Dichte und Festigkeit wie konventionell hergestellte Keramik. Im Folgenden wird beschrieben, wie die Prozessparameter auf diese Endeigenschaften durchschlagen und welche typischen Werte erreichbar sind.

- **Dichte und Porosität:** Die erreichbare Relative Dichte ist ein Hauptqualitätsmerkmal. Optimalerweise erzielt man > 95–99% der theoretischen Dichte. Jede verbliebene Porosität (offen oder geschlossen) wirkt als Fehlstelle und reduziert die Festigkeit. Ein zentraler Faktor für hohe Dichte ist der schon erwähnte hohe Keramikfüllgrad im Grünling und eine vollständige Entbinderung. War der Feststoffanteil zu gering oder blieben Binderückstände/Kohlenstoff im Teil, resultiert eine Restporosität auch nach maximaler Sinterung. So hatte z.B. ein mittels Binder Jetting gedrucktes und dann gesintertes  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Teil (nur  $\sim 96\%$  Dichte) eine Vickers-Härte von lediglich  $\sim 1,5 \text{ GPa}$ , etwa 10% der Härte von dichter Keramik. Demgegenüber erreichen SLA-gefertigte Teile mit optimiertem Prozess oft > 98% Dichte – entsprechend steigen Härte und Festigkeit drastisch an. Ein Beispiel ist Zirkonoxid: Bei  $\sim 95\%$  Dichte wurde eine Härte von  $12,2 \text{ GPa}$  gemessen, während gut gesinterte (> 99%) Proben auf  $\sim 14 \text{ GPa}$  und mehr kommen – vergleichbar mit konventionell gepressten Referenzen. Ähnlich bei  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : Gedruckte Proben mit 97,5% Dichte erreichten  $\sim 16,5 \text{ GPa}$  Vickers-Härte (dichte polykristalline  $\text{Al}_2\text{O}_3$  liegt bei  $\sim 17\text{--}18 \text{ GPa}$ ). Porosität verringert also die Härte und Steifigkeit erheblich. Zudem kann sie die Dichtigkeit (bei Flüssigkeits- oder Gasdurchlässigkeits-Anforderungen) beeinflussen. Für strukturelle Bauteile strebt man daher an, die Poren auf < 2% zu reduzieren. Falls geringe Reste an Poren unvermeidlich sind, können Infiltrationstechniken (Imprägnieren mit Harz oder Glasur) in Erwägung gezogen werden, um die Poren zu füllen – dies ist aber ein Zusatzprozess.
- **Mechanische Festigkeit (Biegefestigkeit, Druckfestigkeit):** Diese hängt von Dichte, Kornstruktur und evtl. vorhandenen Rissen ab (Bruchmechanik nach Weibull: die größten Defekte limitieren die Festigkeit). Ein rissfreies, dicht gesintertes Teil kann Festigkeiten erreichen, die an konventionelle Qualität heranreichen oder sie mitunter übertreffen. Beispielsweise wurden für stereolithografisch gedrucktes 3Y-TZP (Zirkonoxid) Biegefestigkeiten um  $1000\text{--}1150 \text{ MPa}$  gemessen – ein Wert im Bereich von isostatisch gepresstem und gesintertem TZP. Alumina-Bauteile erreichen

typischerweise 300–400 MPa Biegefestigkeit, wenn  $\sim 99\%$  dicht und keine größeren Verarbeitungsrisse vorhanden sind. Unvollständige Schichtbindung oder verbleibende Mikrorisse aus schnellem Entbindern wirken jedoch fatal: Bereits ein kleiner Riss senkt die effektive Festigkeit auf einen Bruchteil. Daher ist die Rissprävention in allen vorherigen Prozessschritten so entscheidend. Die Druckfestigkeit (relevant z.B. für Keramiklager) ist weniger empfindlich gegen einzelne Poren, liegt aber bei spröden Keramiken oft ein Vielfaches der Biegefestigkeit (z.B.  $> 2000$  MPa für  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Sie wird ebenfalls durch höhere Dichte und Homogenität verbessert. Frakturzähigkeit (Bruchzähigkeit) wird in diesen Prozessen hauptsächlich durch die Materialwahl bestimmt (z.B. Transformation toughening bei  $\text{ZrO}_2$ ). Die additiv hergestellte Mikrostruktur zeigt hier ähnliche Werte wie konventionell, solange keine groben Defekte vorliegen.

- **Härte:** Die Vickers- oder Knoop-Härte eines gesinterten Teils korreliert stark mit der Dichte und dem Korngefüge. Wie oben erwähnt, erreichen gut gesinterte gedruckte Keramiken praktisch die Referenzhärten: Zirkonoxid  $\sim 12\text{--}14$  GPa, Alumina  $\sim 15\text{--}17$  GPa, SiC  $\sim 25$  GPa (bei  $> 99\%$  Dichte). Interessanterweise gibt es Untersuchungen, die andeuten, dass additiv gefertigte Keramik wegen ihres feineren Gefüges lokal sogar höhere Härte zeigen kann als Standardmaterial. Dies kann durch kleinere Korngrößen oder eine gleichmäßige Mikrostruktur bedingt sein. In jedem Fall nimmt die Härte bei steigender Sinter Temperatur (und damit Dichte) deutlich zu, nähert sich einem Maximum an und fällt ggf. wieder ab, wenn Kornwachstum einsetzt.
- **Gefüge und Anisotropie:** Ein potentieller Nachteil des schichtweisen Aufbaus ist Anisotropie in der Mikrostruktur. Zum einen kann es einen leichten Unterschied zwischen der Schichtebene (XY) und der Aufbaurichtung (Z) geben: Wenn die Schichten nicht 100% dicht aneinandergefügt waren, können nach dem Sintern feine Schichtlinien erkennbar bleiben (etwa als dünne Porenreihen oder Korngrenzenlagen). Dies äußert sich manchmal in etwas geringerer Z-Festigkeit. Gute Prozessführung (genug Überhärtung je Schicht, isotrope Schrumpfung) minimiert dies jedoch. Tatsächlich konnte durch optimale Sinterparameter (lange Haltezeit, hohe Temperatur) die Interlayer-Abstände nahezu eliminiert werden, was die mechanische Integrität zwischen Schichten deutlich erhöht. Im Idealfall ist die Mikrostruktur isotrop und es bestehen keine Vorzugsrichtungen – die Unterschiede in Festigkeit/Härte zwischen den Druckrichtungen liegen dann im einstelligen Prozentbereich. Sollte dennoch eine Anisotropie vorliegen, kann eine Wärmebehandlung (z.B. HIPen) diese weiter ausgleichen.
- **Auswirkungen der Prozesskette:** Alle Schritte beeinflussen letztlich die Eideigenschaften:
  - Ein hoher Keramikfüllgrad und gute Dispersion reduzieren Defekte (Agglomerat-Fehlstellen) und liefern hohe Grün- und Sinterdichten  $\rightarrow$  höhere Festigkeit und Härte.
  - Optimale Druckparameter (genug Belichtung, saubere Schichtbindung) verhindern strukturelle Schwachstellen (z.B. Schichtentrennungen)  $\rightarrow$  homogene Festigkeit im Bauteil.
  - Sorgfältiges Entbindern verhindert Rissbildung  $\rightarrow$  keine großkritischen Defekte, die als Bruchanfänger wirken.
  - Richtiges Sintern (Temperatur, Zeit, Atmosphäre) ergibt maximale Dichte und gewünschtes Gefüge  $\rightarrow$  hohe Festigkeit, Härte, geringe Porosität.

Ist die Prozesskette gut aufeinander abgestimmt, können additiv gefertigte Keramikbauteile Eigenschaften erreichen, die konventionellen Formgebungs-Verfahren (Pressen, Spritzguss) nahekommen oder in Einzelfällen überlegen sind. Beispielsweise wurde berichtet, dass 3D-gedruckte  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Keramikkerne für Gussanwendungen eine Dichte von  $3,88 \text{ g cm}^{-3}$  ( $\sim 97,5\%$ ) und eine Mikrohärtigkeit von 16,5 GPa erreichen konnten. Hochleistungskeramiken wie  $\text{ZrO}_2$  erzielten Bruchzähigkeiten um  $6 \text{ MPa m}^{0.5}$  und Biegefestigkeiten  $> 1000 \text{ MPa}$  – Werte, die für technische Anwendungen absolut tauglich sind.

Abschließend sei betont, dass die Qualität des Endbauteils nur so gut ist wie der schwächste Glied im Prozess: jede Nachlässigkeit (Klumpen im Pulver, falsche Harzdosierung, zu schnelle Aufheizung etc.) kann Poren oder Risse hinterlassen, welche die Festigkeit drastisch reduzieren. In der industriellen Praxis erfordert die Resinherstellung für keramisches SLA daher eine stringente Qualitätskontrolle entlang der gesamten Prozesskette – von der Materialmischung (Viskositätsprüfung, Partikelanalyse) über den Druck (Testbauteile, Belichtungskalibrierung) bis zur Sinterung (Schwindmaßkontrolle, Dichtsprüfung). Nur so lassen sich reproduzierbar einwandfreie, rissfreie und formtreue Keramikbauteile mit hoher Festigkeit, Härte und Dichte herstellen.

## 6 Referenzen

- Ceramic Resins by Stereolithography Process: A Review, <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/7/3591>
- US6117612A - Stereolithography resin for rapid prototyping of ceramics and metals, <https://patents.google.com/patent/US6117612A/en>
- Effects of Fumed Silica on Thixotropic Behavior and Processing Window by UV-Assisted Direct Ink Writing, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9370837/>
- How to Improve the Curing Ability during the Vat Photopolymerization 3D Printing of Non-Oxide Ceramics: A Review, <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/11/2626>
- Fabrication of 3D Printed Ceramic Part Using PhotoPolymerization Process, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10096816/>
- A Real-Time FTIR Study of the Humidity Effect on ..., <https://www.radtech.org/proceedings/2008/papers/025.pdf>
- Can cleaning SLA prints with IPA cause cracks on my models?, <https://ameralabs.com/blog/can-ipa-cause-cracks-sla-3d-prins/>
- Influence of various cleaning solutions on the geometry, roughness ..., <https://www.nature.com/articles/s41598-024-73109-0>
- Efficient cleaning of ceramic green bodies with complex ..., <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221486042200210X>
- Ceramic 3D printing using Vat photopolymerization, <https://wzr-ceramic.de/en/vat-photopolymerization/>
- Designing alumina-zirconia composites by DLP-based ..., <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0272884221002418>
- Effect of sintering temperature in argon atmosphere on ..., <https://www.sciopen.com/article/10.1007/s40145-020-0362-0?issn=2226-4108>

- Study on surface quality, precision and mechanical properties of 3D ..., [https://www.researchgate.net/publication/319497639\\_Study\\_on\\_surface\\_quality\\_precision\\_and\\_mechanical\\_properties\\_of\\_3D\\_printed\\_ZrO\\_2\\_ceramic\\_components\\_by\\_laser\\_scanning\\_stereo](https://www.researchgate.net/publication/319497639_Study_on_surface_quality_precision_and_mechanical_properties_of_3D_printed_ZrO_2_ceramic_components_by_laser_scanning_stereo)
- Effect of parameters on 3D printing of alumina ceramics ..., <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/21870764.2021.1920159>

Tabelle 2: Beispielhafte Sinterparameter für verschiedene Keramiktypen (Orientierungswerte).

| Keramiktyp  | Sinteratmosphäre   | Typisches Sinterprofil (Aufheizen & Haltezeit)   | Besonderheiten   |
|---|--------------------|--|--|
| Aluminiumoxid (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )                                     | Luft (Oxidation)   | Aufheizen mit 3–5 K min <sup>-1</sup> auf ~1550 °C, Halten ~2 h. Langsame Abkühlung.   | Benötigt hohe Temp. für dichte Sinterung (~99% Theodichte). Über 1600 °C droht Kornwachstum und Verzug.  |
| Zirkoniumdioxid (3Y-TZP)  | Luft               | Aufheizen 5 K min <sup>-1</sup> auf 1400–1500 °C, Halten 1–2 h (je nach Teilgröße).  | Yttrium-stabilisiertes ZrO <sub>2</sub> sintert bei etwas niedrigeren Temperaturen als Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Volle Dichte ~99% bei 1450 °C erreichbar. Höhere T führen zu Körnerwachstum und Phasenumwandlungen. Optimale Temp. ~1450 °C. In Argon sintern möglich, z.B. 1350 °C, um Reduktion zu vermeiden; anisotropes Schrumpfen X/Y vs. Z ca. 3–5%.               |
| Siliziumkarbid (SiC)  | Argon (Inert)      | Aufheizen 5 K min <sup>-1</sup> auf 2000–2100 °C, Halten 1–2 h. (Optional: druckloses Sintern mit Additiven oder Heißpressen bei 1850 °C unter Druck). | Sehr hohe Sintertemperatur nötig (stark kovalente Bindung). Oft werden Sinteradditive (B, C) zugesetzt, die ab ~1800 °C eine Flüssigphasensinterung ermöglichen. Strikte Inertgas-Atmosphäre, da SiC ab ~800 °C in Gegenwart von O <sub>2</sub> oxidiert (SiO <sub>2</sub> -Bildung).  |
| Siliziumnitrid (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )                                    | Stickstoff (Inert) | Aufheizen 5 K min <sup>-1</sup> auf 1650–1750 °C, Halten 1 h. Anschließend kontrolliert abkühlen.  | Benötigt Sinterhilfsmittel (Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) für hohe Dichte (Flüssigphasensintern). N <sub>2</sub> -Atmosphäre verhindert Thermolyse von Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (Zersetzung zu Si und N <sub>2</sub> bei >~1500 °C). Ergibt ein feinkörniges, hochfestes Gefüge bei optimaler Temperatur; zu hohe T → β-Phasenwachstum. |
| Hydroxyapatit (Ca <sub>10</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> (OH) <sub>2</sub> ) | Luft               | Aufheizen 2–5 K min <sup>-1</sup> auf 1200–1300 °C, Halten 1 h (für Vollverdichtung ggf. bis 1300 °C).   | Typische Biokeramik (Knochenersatz). Zersetzt sich bei >1350 °C (Entweichung von OH <sup>-</sup> ), daher mo...  |