# Glühen, Sintern, Tempern

Thomas Schüller · Syntagma Forschung · ORCID 0009-0003-9799-6747 · Fachbuch Fassung 1.0 · 09.11.2026 · Alle Rechte vorbehalten

# Glühen, Sintern, Tempern

### Wärmenachbehandlung in der additiven Fertigung — ein Fachbuch

#### Annealing, Sintering, Tempering — Post-Process Heat Treatment in Additive Manufacturing

---

**Fassung / Version:** v1.0 **Datum / Date:** 2026-11-09 **Strang / Track:** FORSCHUNG — Thomas Schüller · Syntagma Forschung · Wien **Autor / Author:** Thomas Schüller (Forscher / researcher), ORCID 0009-0003-9799-6747 **Lizenz / Licence:** CC BY 4.0 **Sprachen / Languages:** Deutsch (Haupttext) + English (chapter summaries, tables bilingual) **Begleitwerkzeug / Companion tool:** GLÜHWERK — GLW-0001 (neutrale Edition) / GLW-0002 (interne Edition) **Querverweis / Cross-reference:** FORSCH-PROV0467 „Naht und Parametersatz" (3D-Druck und Metalltechnik)

**Offenlegung / Disclosure:** Dieses Werk wurde unter Einsatz eines KI-Sprachmodells als Schreib- und Strukturierungswerkzeug erstellt. Fachliche Festlegung, Auswahl und Verantwortung liegen beim Autor. Alle Temperatur-, Zeit- und Schwindungsangaben sind Orientierungswerte aus offener Fachliteratur und Herstellerunterlagen; sie ersetzen kein Werkstoffdatenblatt und keine eigene Qualifizierung.

**Abgrenzung / Scope note:** Werkstattspezifische Parametersätze, Kalibrierdaten der eigenen Anlagen, Lieferantenkonditionen und der Kern-Quellcode des Begleitwerkzeugs sind **nicht** Teil dieses Werks. Sie liegen in der internen Fassung (GLW-0002, Ordner `3_doku/intern`).

---

### Inhaltsverzeichnis / Table of Contents


| Kap. | Titel DE | Title EN |
|---|---|---|
| 1 | Begriffsordnung | Terminology |
| 2 | Werkstoffkunde der Wärmebehandlung | Metallurgy of heat treatment |
| 3 | Sintertheorie | Sintering theory |
| 4 | Wärmeschritte je AM-Verfahren | Heat steps per AM process |
| 5 | Ofenführung: Rampen, Haltezeiten, Atmosphären | Furnace schedules and atmospheres |
| 6 | Schwindung und Aufmaßkompensation | Shrinkage and compensation |
| 7 | Lagerung, Setzer, Stützkonzepte | Setters, supports, part placement |
| 8 | Werkstoffkarten Metall | Metal material cards |
| 9 | Polymer-Tempern | Polymer annealing |
| 10 | Keramik und Pastendruck | Ceramics and paste extrusion |
| 11 | Fehlerbilder und Diagnose | Defect catalogue and diagnosis |
| 12 | Prüfung, Qualifizierung, Dokumentation | Verification, qualification, documentation |
| A | Anhang: Formeln | Appendix: formulae |
| B | Anhang: Anlagen- und Bezugsquellenübersicht | Appendix: equipment and sourcing overview |
| C | Anhang: Versuchsplan Kalibrierkörper | Appendix: calibration-coupon test plan |
| D | Quellen | References |


---

# 1 Begriffsordnung / Terminology

Die Sprache der Wärmebehandlung ist älter als die additive Fertigung und wird in ihr regelmäßig falsch verwendet. Drei Verwechslungen treten besonders häufig auf.

**Erstens: Glühen ist kein Sammelbegriff für „heiß machen".** Jedes Glühverfahren hat ein definiertes Ziel und einen definierten Temperaturbereich, der sich an den Umwandlungspunkten des Werkstoffs orientiert — beim Stahl an Ac1 und Ac3. Spannungsarmglühen, Weichglühen, Normalglühen, Rekristallisationsglühen und Lösungsglühen sind fünf verschiedene Verfahren mit fünf verschiedenen Gefügewirkungen.

**Zweitens: Anlassen ist nicht Tempern.** *Anlassen* bezeichnet im Stahlbau ausschließlich das Nachwärmen eines gehärteten, also martensitischen Gefüges, um Zähigkeit zurückzugewinnen. Der analoge Schritt bei teilkristallinen Thermoplasten heißt *Tempern* und hat einen anderen physikalischen Mechanismus: Nachkristallisation und Spannungsrelaxation statt Martensitzerfall. Die englische Sprache trennt das klarer — *tempering* für Stahl, *annealing* für Polymere — und verwirrt dafür an anderer Stelle, weil *annealing* im Metallbereich das Glühen bezeichnet.

**Drittens: „Sintern" im Namen eines AM-Verfahrens bedeutet nicht, dass gesintert wird.** Beim selektiven Lasersintern (SLS) von Polyamid liegt das Pulverbett knapp unter der Schmelztemperatur, und der Laser schmilzt das Pulver lokal vollständig auf; es überwiegt Schmelzen, nicht Festphasensintern. Beim direkten Metall-Lasersintern (DMLS) wird das Metallpulver vollständig aufgeschmolzen — der Name ist historisch, das Verfahren ist Laser-Pulverbettschmelzen (LPBF). Echtes Sintern findet in der additiven Fertigung nur dort statt, wo ein Grünteil über eine Entbinderung in ein Braunteil und von dort in einen gesinterten Körper überführt wird: Metal FFF, Binder Jetting, keramischer Schlicker- und Pastendruck.

## 1.1 Die Verfahren im Überblick

| Verfahren (DE) | EN | Werkstoff | Typ. Temperatur | Zweck | Wirkung im Gefüge |
|---|---|---|---|---|---|
| Spannungsarmglühen | Stress relief annealing | Stahl, Al, Ti | Stahl 550–650 °C; AlSi10Mg ~300 °C; Ti6Al4V 650–800 °C | Eigenspannungen abbauen | Kaum Gefügeänderung, Versetzungsumlagerung |
| Weichglühen | Soft annealing / spheroidising | Stahl | ~680–720 °C (um Ac1) | Zerspanbarkeit, Umformbarkeit | Kugeliger Zementit |
| Normalglühen | Normalising | Stahl | 30–50 K über Ac3 | Feines, gleichmäßiges Korn | Umkörnung über Austenit |
| Rekristallisationsglühen | Recrystallisation annealing | kaltverformte Metalle | ~550–700 °C (Stahl) | Kaltverfestigung aufheben | Neubildung von Körnern |
| Lösungsglühen | Solution annealing | austenit. Stahl, Al, Ni-Basis | 316L 1000–1100 °C; Al 500–540 °C | Ausscheidungen lösen | Übersättigter Mischkristall |
| Härten | Hardening (quench) | Stahl | austenitisieren 800–900 °C, dann abschrecken | Härte | Martensit |
| Anlassen | Tempering | gehärteter Stahl | niedrig 150–250 °C, hoch 500–650 °C | Zähigkeit, Sprödigkeit senken | Martensitzerfall, Carbidausscheidung |
| Vergüten | Quench and temper | Stahl | Härten + Hochanlassen | Festigkeit bei Zähigkeit | Vergütungsgefüge |
| Sintern | Sintering | Metall-, Keramik-, Polymerpulver | ~0,7–0,9 · Tm (in K); 316L ~1300–1380 °C | Pulver zu dichtem Körper verbinden | Diffusion, Halsbildung, Porenschwund |
| HIP | Hot isostatic pressing | Metalle, Keramik | Ti6Al4V ~920 °C / 100 MPa / 2 h | innere Poren schließen | Verdichtung nahe 100 % |
| Tempern (Polymer) | Annealing (polymer) | teilkristalline Thermoplaste | zwischen Tg und Tm | Kristallinität, Wärmeformbeständigkeit | Nachkristallisation, Relaxation |

## 1.2 Begriffsfeld Grünteil, Braunteil, Sinterteil

| Zustand | Definition | Festigkeitsträger | Handhabung |
|---|---|---|---|
| Grünteil (green part) | wie gedruckt, Binder vollständig vorhanden | Primär- und Sekundärbinder | robust genug für Entstützen |
| Braunteil (brown part) | Primärbinder entfernt | nur Sekundärbinder, offene Porosität | extrem bruchempfindlich |
| Sinterteil (sintered part) | gesintert, verdichtet | metallische bzw. keramische Bindung | belastbar, maßgeschwunden |

Der Übergang Grünteil → Braunteil ist der Punkt, an dem die meisten Teile in der Praxis verloren gehen — nicht weil die Chemie schwierig ist, sondern weil ein Braunteil beim Umsetzen in den Sinterofen in der Hand bricht.

**Summary EN.** Three terminological confusions dominate AM practice. *Annealing* in metals is not a generic word for heating: stress relief, soft, normalising, recrystallisation and solution annealing are five distinct processes defined against the alloy's transformation points. *Tempering* strictly means reheating a hardened martensitic steel; the analogous step for semi-crystalline polymers is called annealing and works by recrystallisation and stress relaxation, not martensite decomposition. And "sintering" in a process name does not mean sintering occurs: SLS melts the polymer powder locally, LPBF/"DMLS" melts metal powder fully. True sintering in AM happens only along the green → brown → sintered chain of metal FFF, binder jetting and ceramic/paste printing. The green-to-brown transition is where most parts are physically lost, because a brown part has only secondary binder holding it together.

# 2 Werkstoffkunde der Wärmebehandlung / Metallurgy of Heat Treatment

## 2.1 Warum additiv gefertigte Gefüge anders reagieren

Wärmebehandlungsvorschriften aus dem Knetwerkstoffbereich lassen sich nicht ungeprüft auf additiv gefertigte Teile übertragen. Vier Unterschiede sind maßgeblich:

**Abkühlrate.** Beim Laser-Pulverbettschmelzen liegen die Abkühlraten im Schmelzbad bei $10^5$ bis $10^7$ K/s. Das erzeugte Gefüge ist extrem fein, oft zellular-dendritisch, und bei manchen Legierungen bereits härter und fester als der wärmebehandelte Knetwerkstoff. Eine klassische Ausscheidungshärtung kann dieses Gefüge auflösen und die Festigkeit **senken**.

**Textur und Anisotropie.** Die Erstarrung folgt dem Temperaturgradienten, also im Wesentlichen der Aufbaurichtung. Korngröße, Kornform und Kennwerte unterscheiden sich zwischen XY und Z. Wärmebehandlung mindert die Anisotropie, beseitigt sie aber nicht vollständig.

**Metastabile Phasen.** Inconel 718 bildet im AM-Prozess Laves-Phasen, die Nb binden und damit der späteren γ''-Ausscheidung entziehen. Ohne Homogenisierung bei 1080–1180 °C erreicht das Teil die Katalogfestigkeit nicht. 17-4PH weist nach dem Druck oft deutlich mehr Restaustenit auf als der Knetwerkstoff, weshalb ein Auslagern ohne vorheriges Lösungsglühen nicht die Soll-Härte liefert.

**Gasgehalt und Porosität.** Prozessporen (Gaseinschlüsse, Lack-of-fusion) sind der dominierende Ermüdungsinitiator. Keine Glühbehandlung schließt sie; dafür braucht es heißisostatisches Pressen.

## 2.2 Eigenspannungen

Eigenspannungen entstehen beim LPBF durch die steilen Temperaturgradienten im und um das Schmelzbad. Das Muster ist regelhaft: Zug an der Oberfläche, Druck im Kern.

| Ursache | Wirkung | Gegenmaßnahme |
|---|---|---|
| Steile Gradienten im Schmelzbad | Zug außen, Druck innen | Bauplattformheizung, Scanstrategie |
| Lange gerade Scanvektoren | richtungsabhängige Spannung | Inselstrategie, Schichtrotation (z. B. 67°) |
| Große Querschnittssprünge | lokale Spannungsspitzen, Risse | konstruktive Anpassung, Stützstrategie |
| Abtrennen von der Plattform ohne Glühen | Verzug schlägt beim Trennen durch | **immer vor dem Trennen spannungsarmglühen** |

Die praktisch wichtigste Regel des gesamten Werks steht in der letzten Zeile: Das Spannungsarmglühen erfolgt **auf der Bauplattform**, vor dem Drahterodieren oder Sägen. Ein vorher abgetrenntes Teil ist in der Regel nicht mehr maßhaltig zu retten, weil die Verformung sich beim Lösen der Einspannung einstellt und nicht reversibel ist.

## 2.3 Diffusion als gemeinsamer Mechanismus

Sintern, Homogenisieren, Ausscheiden und Rekristallisieren beruhen auf Diffusion. Diffusion folgt einer Arrhenius-Abhängigkeit, also exponentiell von der Temperatur und nur linear von der Zeit. Daraus folgt eine für die Praxis zentrale Asymmetrie: **Temperatur ist der starke Hebel, Zeit der schwache.** 20 K zu heiß wirken stärker als eine verdoppelte Haltezeit — in beide Richtungen. Deshalb sind Übersinterung und Kornwachstum typische Folgen von Temperaturfehlern, nicht von Zeitfehlern.

Die Diffusionslänge skaliert mit der Wurzel der Zeit: $x \approx \sqrt{(D \cdot t)}$. Eine viermal so lange Haltezeit verdoppelt die Diffusionslänge. Das erklärt, warum Haltezeiten nach Wandstärke und nicht nach Teilevolumen bemessen werden.

**Zur homologen Temperatur.** Die übliche Faustregel setzt das Sintern bei $T_h = T/T_m \approx 0{,}7–0{,}9$ (in Kelvin) an. Sie beschreibt den Regelfall, nicht jeden Werkstoff. Drei Rechenbeispiele aus dem Begleitskript zeigen die Spannweite:

| Werkstoff | T_Sinter | T_m (ca.) | T_h | Einordnung |
|---|---|---|---|---|
| 316L | 1365 °C | ~1400 °C | 0,98 | nahe Solidus — das Prozessfenster ist eng, wenige Kelvin entscheiden über Formverlust |
| $Al_2O_3$ | 1600 °C | 2072 °C | 0,80 | im Regelbereich |
| $ZrO_2$ (3Y-TZP) | 1450 °C | 2715 °C | 0,58 | unter dem Regelbereich — feines Pulver und Yttrium-Dotierung senken den Temperaturbedarf |

Die praktische Folge betrifft vor allem 316L: Weil hier dicht an der Solidustemperatur gesintert wird, ist die Toleranz der Ofenregelung keine Komfortfrage. Eine Ofenabweichung von 20 K, die bei $Al_2O_3$ folgenlos bliebe, führt bei 316L zu Anschmelzen und Formverlust. Eine Gegenmessung mit unabhängigem Thermoelement gehört deshalb zur Inbetriebnahme jedes Ofens, der für diesen Werkstoff verwendet wird.

> **Summary EN.** AM microstructures do not respond to wrought-material heat-treatment specifications. LPBF cooling rates of $10^5$–$10^7$ K/s produce extremely fine, often cellular-dendritic structures that can already exceed heat-treated wrought properties, so a textbook precipitation treatment may lower strength instead of raising it. Solidification follows the thermal gradient, so properties are anisotropic between XY and Z; heat treatment reduces but does not remove this. AM-specific metastable phases must be addressed: Laves phases in Inconel 718 tie up niobium and require homogenisation at 1080–1180 °C; retained austenite in 17-4PH means ageing without prior solution treatment misses target hardness. Process porosity is the dominant fatigue initiator and no annealing closes it — only HIP does. Residual stress in LPBF is tensile at the surface, compressive in the core, and the single most important practical rule in this book is that stress relief must happen **on the build plate**, before wire EDM or sawing. All these processes are diffusion-driven, and diffusion depends exponentially on temperature but only linearly on time: temperature is the strong lever, time the weak one.

---

# 3 Sintertheorie / Sintering Theory

## 3.1 Triebkraft

Ein Pulverhaufen hat eine enorme spezifische Oberfläche und damit eine hohe Oberflächenenergie. Sintern ist der Abbau dieser Energie durch Materialtransport: Oberfläche wird zu Korngrenze, Korngrenzfläche wird kleiner, Poren verschwinden. Die Triebkraft ist proportional zur Krümmung, also umgekehrt proportional zum Partikelradius. Feineres Pulver sintert deshalb bei tieferer Temperatur und schneller — neigt aber stärker zu Agglomeration, hat eine schlechtere Fließfähigkeit und zeigt im Endstadium stärkeres Kornwachstum.

## 3.2 Die drei Stadien

| Stadium | Dichte | Vorgang | Dominanter Mechanismus | Schwindung |
|---|---|---|---|---|
| Initial | bis ~65 % | Halsbildung zwischen Partikeln | Oberflächendiffusion | gering |
| Intermediate | ~65–92 % | Porenkanäle schrumpfen, Korngrenzen wandern | Korngrenzendiffusion | Hauptanteil |
| Final | > 92 % | isolierte Poren, Kornwachstum | Volumendiffusion | gering, aber Kornwachstum |

Im Endstadium wird die Verdichtung zäh: Isolierte Poren enthalten eingeschlossenes Gas, das nur durch Diffusion durch das Gitter entweichen kann. Deshalb ist die Restporosität von 1–3 % durch bloße Verlängerung der Haltezeit praktisch nicht zu beseitigen; dafür ist heißisostatisches Pressen das Mittel.

## 3.3 Festphasen- und Flüssigphasensintern

| Merkmal | Festphasensintern | Flüssigphasensintern |
|---|---|---|
| Mechanismus | Diffusion im Feststoff | niedrigschmelzende Phase benetzt Partikel |
| Beispiele | 316L, 17-4PH, $Al_2O_3$, $ZrO_2$ | Hartmetall (Co-Binder), Fe-Cu-Infiltration |
| Verdichtungsrate | mäßig | hoch |
| Temperaturfenster | breiter | eng, Formverlust bei Übertemperatur |
| Prozesstoleranz | gutmütig | empfindlich |

Beim Flüssigphasensintern ist die Prozessfenstergrenze scharf: Wenige Kelvin zu heiß, und das Teil verliert seine Form, weil der Anteil der Flüssigphase zu groß wird.

## 3.4 Gründichte als Vorentscheidung

Die erreichbare Sinterdichte wird im Wesentlichen schon beim Druck festgelegt. Ein Grünteil mit Lücken zwischen den Extrusionsbahnen sintert nicht zu einem dichten Körper, sondern zu einem Körper mit Nahtporen. Was im Grünteil fehlt, holt der Ofen nicht nach.

| Einflussgröße | Wirkung auf Gründichte | Hebel |
|---|---|---|
| Extrusionsbreite und Überdeckung | Nahtporen | Linienbreite ≥ Düsendurchmesser, Überdeckung einstellen |
| Schichthöhe | Zwischenlagenbindung | niedrige Schichten, höhere Schmelzrate |
| Bauraum-/Kammertemperatur | Bahnverschweißung | beheizte Kammer |
| Pulverfüllgrad des Filaments | Metallanteil im Grünteil | Werkstoffwahl, nicht einstellbar |
| Pulvermischung (bimodal) | Packungsdichte | Materialentwicklung |

Bimodale Pulvermischungen — feines Pulver füllt die Lücken zwischen grobem — erhöhen die Gründichte und senken damit die Gesamtschwindung. Das ist ein Materialentwicklungs-, kein Prozessparameter.

**Summary EN.** Sintering is driven by the reduction of surface energy, with driving force inversely proportional to particle radius: finer powder sinters faster and cooler, but agglomerates and grows grains more. Three stages: neck formation up to ~65 % density (surface diffusion, little shrinkage), pore-channel shrinkage from ~65–92 % (grain-boundary diffusion, most of the shrinkage), and a final stage above 92 % where isolated pores trap gas and grains grow. The last 1–3 % of porosity cannot be removed by longer holds — only HIP does that. Liquid-phase sintering (cobalt in hard metal, copper infiltration in iron) densifies much faster but has a sharp temperature ceiling above which the part loses shape. Most importantly, achievable sintered density is largely decided at print time: gaps between extrusion beads become seam porosity that the furnace cannot repair. Green density is the prerequisite, not an outcome.

---

# 4 Wärmeschritte je AM-Verfahren / Heat Steps per AM Process

| AM-Verfahren | Wärmeschritt | Anmerkung |
|---|---|---|
| FDM/FFF Kunststoff | Tempern | Maßänderung vorhalten; Einbettung in Salz, Sand oder Gips gegen Verzug |
| SLS (PA12, PA11, TPU) | Pulverbett knapp unter Tm, Laser schmilzt lokal | „Sinterfenster" zwischen Kristallisations- und Schmelztemperatur; physikalisch überwiegt Schmelzen |
| LPBF / SLM / DMLS (Metall) | Spannungsarmglühen auf der Plattform, optional HIP, Lösungsglühen und Auslagern | Pulver wird vollständig aufgeschmolzen |
| Metal FFF (Ultrafuse 316L, 17-4PH u. a.) | Grünteil → Entbindern → Braunteil → Sintern | POM-Binder katalytisch mit $HNO_3$-Dampf (~110–120 °C); Sintern unter $H_2$ oder Ar; lineare Schwindung ca. 15–20 %, anisotrop |
| Binder Jetting (Metall/Sand/Keramik) | Aushärten, Entbindern, Sintern, optional Infiltrieren (z. B. Bronze) | Schwindung ~18–20 %, Stützgeometrie im Ofen nötig |
| Keramik (LCM, SLA mit Keramikschlicker, Pastendruck) | Entbindern sehr langsam, dann Sintern 1400–1700 °C | Entbinderungsrampe ist der kritische Schritt |
| Pastendruck Ton/Steingut | Trocknen, Schrühbrand, Glasurbrand | eigene Brennkurvenlogik, siehe Kap. 10 |

## 4.1 Typische Folgen bei Metall-PBF

| Legierung | Folge |
|---|---|
| 316L | Spannungsarmglühen → optional HIP → Lösungsglühen 1040–1100 °C → rasch abkühlen |
| 17-4PH | Spannungsarmglühen → Lösungsglühen ~1040 °C → Auslagern H900/H1025/H1150 |
| Ti6Al4V | Spannungsarmglühen 650–800 °C → HIP ~920 °C/100 MPa → optional Lösungsglühen + Auslagern |
| AlSi10Mg | Spannungsarmglühen ~300 °C; T6 nur nach Prüfung (kann verschlechtern) |
| Inconel 718 | HIP/Homogenisieren 1080–1180 °C → Lösungsglühen 980 bzw. 1065 °C → Auslagern 720 °C/8 h + 620 °C/8 h |

### 4.2 Die Prozesskette Metal FFF im Detail

| Stufe | Vorgang | Kritische Größe | Kontrolle |
|---|---|---|---|
| 1 Druck | Grünteil aus Metall-Polymer-Filament | Gründichte, Nahtbindung | Wandstärken, Extrusionsbreite, Kammertemperatur |
| 2 Grünteil-Handling | Stützen und Trennschicht entfernen | Bruchgefahr | Interface-Layer, saubere Trennflächen |
| 3 Entbindern | katalytisch (POM/$HNO_3$), Lösungsmittel oder thermisch | vollständige Primärbinderentfernung | **Gewichtskontrolle** |
| 4 Braunteil | nur Sekundärbinder hält | extreme Bruchempfindlichkeit | minimale Handhabung, Transportschale |
| 5 Sintern | Schutzgas, Rampen, Setzer | Schwindung, Verzug, Restporosität | Probekörper mitlaufen lassen |
| 6 Nacharbeit | Richten, Schleifen, Wärmebehandlung | Maß, Oberfläche, Gefüge | 3D-Messung, Härte, Schliff |

**Die Gewichtskontrolle in Stufe 3 ist das einfachste und belastbarste Werkzeug der ganzen Kette.** Grünteil wiegen, nach der Entbinderung wiegen, die Differenz gegen den Soll-Anteil des Primärbinders aus dem Datenblatt prüfen. Eine Abweichung nach unten heißt: unvollständig entbindert. Wer dieses Teil in den Sinterofen gibt, erhält Blasen, Risse oder einen dunklen Restkohlenstoffkern. Die Messung kostet dreißig Sekunden und eine Laborwaage.

**Summary EN.** Each AM process family carries its own heat sequence. FDM/FFF polymers get optional annealing with dimensional compensation. SLS keeps the bed just below Tm and melts locally. LPBF requires stress relief on the plate, optional HIP, then alloy-specific solution and ageing treatments. Metal FFF and binder jetting run the mandatory green → debind → brown → sinter chain with 15–20 % linear shrinkage. Ceramics need very slow debinding followed by sintering at 1400–1700 °C. Within the metal FFF chain, weighing the part before and after debinding and comparing the loss against the datasheet binder fraction is the cheapest and most reliable process check available: an under-weight loss means incomplete debinding, and that part will blister, crack or retain a dark carbon core in the sintering furnace.

---

# 5 Ofenführung: Rampen, Haltezeiten, Atmosphären / Furnace Schedules and Atmospheres

### 5.1 Rampen und Haltezeiten

| Schritt | Typische Rampe | Haltezeit | Begründung |
|---|---|---|---|
| Aufheizen Polymer-Tempern | 1–3 K/min | 30–120 min je Wandstärke | schneller Anstieg erzeugt Gradienten → Verzug |
| Entbindern thermisch (Metal FFF, BJT) | 0,3–1 K/min in der Zersetzungszone | mehrere Stunden | Binder muss gasförmig abströmen, ohne das Teil aufzublähen |
| Entbindern katalytisch (POM) | isotherm 110–120 °C | ~1–4 h, ca. 1–2 mm/h Abtrag | Depolymerisation ohne Flüssigphase |
| Entbindern Keramik | 0,1–0,5 K/min bis ~600 °C | sehr lang, oft > 24 h | längster Prozessschritt überhaupt |
| Sinteraufheizung | 2–5 K/min, Haltestufen bei Restbinderaustrieb | Endhalt 2–6 h | Diffusion braucht Zeit, nicht nur Temperatur |
| Abkühlen Metall | ofengeführt 2–5 K/min bis < 200 °C | — | Thermoschock und Verzug vermeiden |
| Abkühlen Keramik | 1–3 K/min, bei $ZrO_2$ Umwandlungszone beachten | — | Rissbildung |
| Abkühlen Polymer | im geschlossenen Ofen auslaufen lassen | — | Eigenspannungen nicht neu einfrieren |

**Faustregel Haltezeit:** mindestens 1 h je 25 mm Wandstärke als Untergrenze; bei Entbinderung erheblich mehr. Maßgeblich ist die größte Wandstärke, nicht das Volumen, weil der limitierende Vorgang der Transport durch die Wand ist.

### 5.2 Atmosphären

| Atmosphäre | Einsatz | Wirkung | Anmerkung |
|---|---|---|---|
| Luft | Polymer-Tempern, Oxidkeramik ($Al_2O_3$, $ZrO_2$) | Oxidation unproblematisch | für Metall ungeeignet |
| Stickstoff ($N_2$) | Schutzgas allgemein | Oxidationsschutz | bildet mit Ti und Cr Nitride — für Ti ungeeignet |