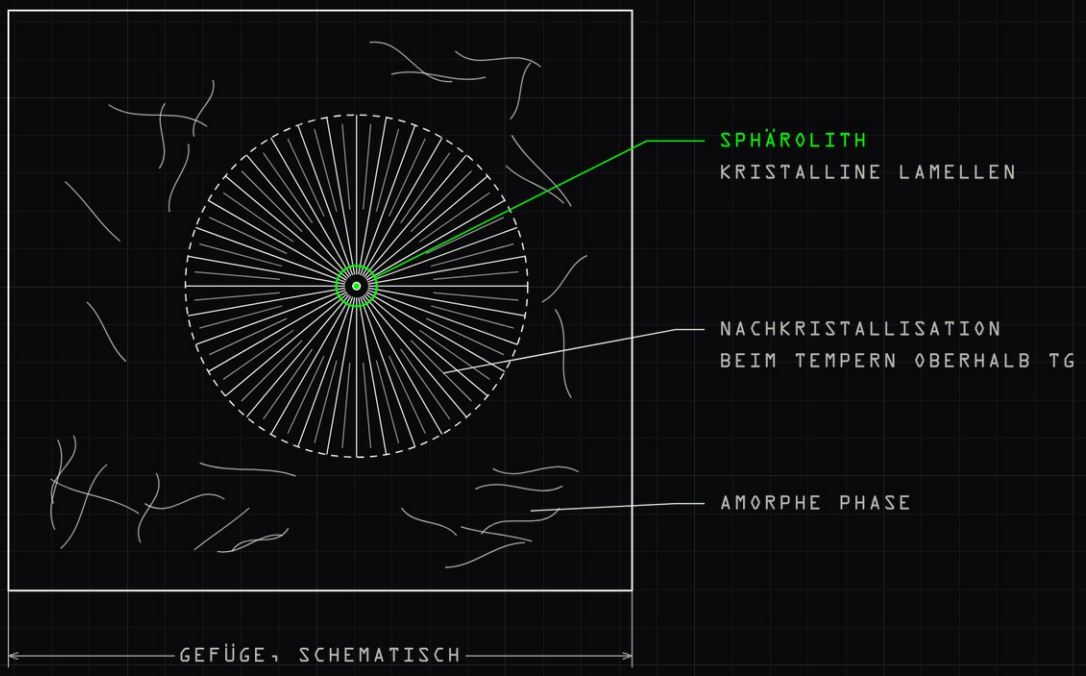
FIBERTHREE

DETAIL A . GEFÜGE NACH DEM TEMPERN



WHITE PAPER . WP003

TEMPERN UND NACHBEHANDLUNG

Wie werden FFF-Bauteile aus Polyamid nach dem Druck getempert, konditioniert und bearbeitet, damit sie ihre Datenblattwerte erreichen?

DOKUMENT
WP003
FIBERTHREE WHITE PAPER

STAND
11.2026
VERSION 1.0

INHALT

01 Ausgangslage 4
02 Was beim Tempern passiert 5
Messdaten zu F3 PA Pure Pro 5
03 Tempern in der Praxis 7
Ausrüstung 7
Ablauf 7
Schrumpf und Verzug vorhalten 8
Polyamid im Ofen 8
04 Empfehlungen je Materialfamilie 9
Was die Studien zeigen 10
05 Konditionieren von Polyamid 11
Konditionieren in der Praxis 11
Worauf achten 12
06 Mechanische Nachbearbeitung 13
Stützstrukturen entfernen 13
Bohren, Fräsen, Gewinde schneiden 13
Gewindeeinsätze einschmelzen 14
Arbeitsschutz bei Faserstaub 14
07 Oberflächen 15
08 Leitlinien für die Nachbehandlung 16
09 Experimentelle Daten 17
10 Fazit 18
Quellen 18
Über Fiberthree 19
White-Paper-Reihe 19

00 . EXECUTIVE SUMMARY

FFF-Bauteile aus Polyamid kommen mit niedriger Kristallinität und eingefrorenen Spannungen aus dem Drucker. Tempern holt die Kristallisation nach, baut Spannungen ab und macht die Eigenschaften reproduzierbar.

Messungen des DLR an F3 PA-CF Pro zeigen: Gedruckt liegt der Kristallisationsgrad je nach Drucker und Position im Bauteil zwischen 17,8 und 28,7 %. Nach 24 Stunden bei 75 °C erreichen alle Proben 30,1 bis 30,8 %. Dafür genügt der Trockenschrank, der nach WP002 ohnehin für das Filament bereitsteht.

Dieses Paper gibt Temperaturen und Haltezeiten für alle Fiberthree-Materialfamilien an und beschreibt, wie Schrumpf vorgehalten wird. Es zeigt außerdem, warum Polyamid nach dem Tempern konditioniert werden sollte. Ergänzend behandelt es Gewindeeinsätze, Zerspanung und Oberflächen und fasst alles in einer Prozessreihenfolge zusammen.

AUF EINEN BLICK

- **Tempern** holt die Kristallisation nach, baut Spannungen ab und macht die Eigenschaften reproduzierbar.
- **F3 PA-CF Pro:** gedruckt 17,8 bis 28,7 % Kristallisationsgrad, nach 24 Stunden bei 75 °C 30,1 bis 30,8 % (DLR).
- **Dafür genügt der Trockenschrank,** der nach WP002 ohnehin für das Filament bereitsteht.
- **Konditionieren** nach dem Tempern stellt die Zähigkeit von Polyamid für den Einsatz ein.

Empfehlung: Polyamid-Bauteile tempern, dann bearbeiten und erst zum Schluss konditionieren.

17,8–28,7 %	30,1–30,8 %	24 h
Kristallisationsgrad gedruckt, DLR	nach 24 h Tempern im Trockenschrank	Haltezeit für F3 PA-CF Pro

01 AUSGANGSLAGE

Ein FFF-Bauteil ist nach dem letzten Layer noch nicht fertig. Wer die Werte aus dem Datenblatt im Einsatz erreichen will, muss das Bauteil nach dem Druck gezielt behandeln.

Der Grund liegt im Prozess selbst. Jede Bahn wird bei 270 bis 300 °C abgelegt und kühlt innerhalb von Sekunden auf Bauraumtemperatur ab. Teilkristalline Kunststoffe wie Polyamid haben dabei kaum Zeit zu kristallisieren. Gleichzeitig frieren Eigenspannungen ein, weil jede neue Bahn auf einer bereits erkalteten Unterlage schrumpft.

WP002 hat gezeigt, wie stark Feuchtigkeit die Druckbarkeit bestimmt. Dieses Paper setzt danach an: Es behandelt, was mit dem Bauteil nach dem Druck passiert. Dazu gehören:

- **Tempern:** gezielte Wärmebehandlung, um Kristallinität zu erhöhen und Eigenspannungen abzubauen
- **Konditionieren:** kontrollierte Feuchteaufnahme bei Polyamid, um die Zähigkeit für den Einsatz einzustellen
- **Mechanische Nachbearbeitung:** Stützen entfernen, Bohren, Gewinde, Gewindeeinsätze
- **Oberflächen:** Schleifen, Färben, Lackieren, Versiegeln

Die Empfehlungen sind nach Fiberthree-Materialfamilien geordnet. Sie richten sich an alle, die mit unseren Filamenten arbeiten, vom ersten Prototyp bis zur Kleinserie.

ABB. 1: SCHEMASKIZZE

DETAIL A . GEFÜGE NACH DEM TEMPERN

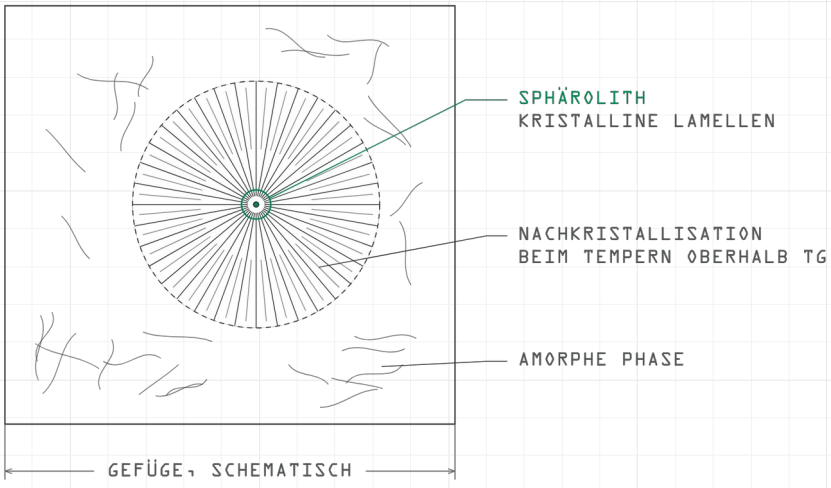


ABB. 1 Gefüge mit Sphärolith in amorpher Phase nach dem Tempern, schematisch, nicht maßstäblich.

02 WAS BEIM TEMPERN PASSIERT

Tempern heißt: Das Bauteil wird über die Glasübergangstemperatur (Tg), aber deutlich unter die Schmelztemperatur (Tm) erwärmt und dort gehalten. Dabei laufen zwei Vorgänge ab, die sich nicht trennen lassen.

Nachkristallisation. Teilkristalline Kunststoffe wie PA6, PA12 und PP bestehen aus geordneten (kristallinen) und ungeordneten (amorphen) Bereichen. Im FFF-Druck kühlt die Schmelze so schnell ab, dass kaum Kristalle wachsen. Oberhalb von Tg werden die Ketten wieder beweglich und ordnen sich nach. Höhere Kristallinität bedeutet höhere Steifigkeit, bessere Wärmeformbeständigkeit und geringere Feuchteaufnahme.

Spannungsabbau. Jede Bahn schrumpft beim Abkühlen auf einer bereits erstarrten Unterlage. Die daraus entstehenden Eigenspannungen werden beim Tempern abgebaut. Das gilt auch für amorphe Kunststoffe wie PC, die nicht kristallisieren.

MESSDATEN ZU F3 PA PURE PRO

Die Universität der Bundeswehr München hat 2026 das thermische Verhalten unseres ungefüllten F3 PA Pure Pro untersucht (Klingenbeck, Lion, Johlitz, Polymers 18(8), 981). Die Ergebnisse zeigen, warum Tempern bei Polyamid wirkt:

KENNWERT	GEDRUCKTES BAUTEIL	NACH WÄRMEBEHANDLUNG BIS 140 °C
Kristallinität (DSC)	7,5–12 %, nahezu amorph	ca. 18 %
Glasübergang Tg	ca. 75 °C	–
Kaltkristallisation	Peak bei ca. 110 °C	verschwunden
Schmelzpeak Tm	ca. 235 °C	–

TAB. 1 Messdaten zu F3 PA Pure Pro.

Die gedruckten Proben waren so amorph wie in Eiswasser abgeschreckte Proben. Beim ersten Aufheizen zeigte die thermomechanische Analyse zwei Schrumpfstufen: bei etwa 70 °C (Spannungsabbau am Glasübergang) und bei etwa 100 °C (Kaltkristallisation). Ab dem zweiten Aufheizen trat kein Schrumpf mehr auf.

Fasern verändern dieses Bild. Sie wirken als Kristallisationskeime: Im carbonfaserverstärkten F3 PA-CF Pro hat das DLR schon im gedruckten Zustand 18 bis 29 % Kristallinität gemessen (Kapitel 09). Auch dort steigt sie durch Tempern noch einmal deutlich.

Für die Praxis heißt das: Ein gedrucktes PA6-Bauteil wird beim ersten Erwärmen über etwa 70 °C schrumpfen, ob im Ofen oder später im Einsatz. Wer kontrolliert tempert, legt diesen Schrumpf vor die Endkontrolle statt in die Anwendung.

Für die Praxis heißt das: Tempern ist kein Feinschliff, sondern ein Prozessschritt mit messbarem Effekt. Es gleicht aus, was der Druck nicht leisten kann, und macht Bauteile vergleichbar, die auf verschiedenen Druckern oder an verschiedenen Stellen im Bauraum entstanden sind.

Wie stark der Effekt ausfällt, hängt vom Werkstoff ab. Teilkristalline Kunststoffe gewinnen vor allem durch die Nachkristallisation, amorphe Kunststoffe vor allem durch den Spannungsabbau. Die Empfehlungen in Kapitel 04 berücksichtigen beides.

03 TEMPERN IN DER PRAXIS

Gutes Tempern braucht keinen Industrieofen, aber eine stabile Temperatur, Geduld beim Abkühlen und ein Bauteil, das dafür vorbereitet ist.

AUSRÜSTUNG

- **Umluftofen oder Wärmeschrank** mit einer Temperaturkonstanz von ± 3 K. Der Trockenschrank aus WP002 eignet sich, wenn er die nötige Temperatur erreicht.
- **Unabhängiges Thermometer** im Bauraum. Die Anzeige vieler Öfen weicht um 5 bis 10 K ab.
- **Unterlage** aus Metall oder Glas, plan und sauber. Dünne, lange Bauteile können in trockenem Sand oder Salz eingebettet werden, damit sie sich nicht verziehen.

Küchenöfen sind nur bedingt geeignet: Die Temperatur schwankt stark, und Kunststoffdämpfe haben in Lebensmittelgeräten nichts zu suchen.

ABLAUF

01 **Bauteil vorbereiten.** Stützstrukturen bleiben dran, sie halten Überhänge in Form. Das Bauteil liegt flach auf der größten Auflagefläche.

02 **Langsam aufheizen.** Mit dem Bauteil zusammen aufheizen, nicht in den heißen Ofen legen. Richtwert: 20 bis 30 K pro Stunde. Bei Polyamid hilft eine Zwischenstufe 20 bis 30 K unterhalb der Zieltemperatur.

03 **Halten.** Die Haltezeit beginnt, wenn das Bauteil durchgewärmt ist, nicht wenn der Ofen die Temperatur anzeigt. Faustregel: zusätzlich 1 Stunde je 10 mm Wandstärke.

04 **Im Ofen abkühlen lassen.** Ofen ausschalten, Tür geschlossen lassen. Ziel: unter 30 K pro Stunde bis unter die Glasübergangstemperatur. Schnelles Abkühlen baut neue Spannungen auf.

05 **Maße prüfen.** Erst nach vollständigem Abkühlen messen und mit den Werten vor dem Tempern vergleichen.

SCHRUMPF UND VERZUG VORHALTEN

Tempern verändert die Maße. Teilkristalline Kunststoffe werden dichter und schrumpfen, meist in der Bauebene (x-y) stärker als in Aufbaurichtung (z). Bei PLA sind etwa 2 % Schrumpf in x-y und bis zu 1 % Längung in z bekannt. Faserverstärkte Typen schrumpfen in Faserrichtung deutlich weniger.

Wie stark die Richtung zählt, zeigen Messungen des DLR an F3 PA-CF Pro. Die Wärmeausdehnung hängt dort extrem von der Richtung ab:

RICHTUNG	AUSDEHNUNG 20–60 °C	AUSDEHNUNG 100–150 °C
Druckrichtung	19 µm/(m·K)	21 µm/(m·K)
90° zur Druckrichtung	60 µm/(m·K)	102 µm/(m·K)
Aufbaurichtung (z)	98 µm/(m·K)	249 µm/(m·K)

TAB. 2 Schrumpf und Verzug vorhalten.

In Aufbaurichtung dehnt sich das Material im Temperbereich also mehr als zehnmal so stark wie entlang der Fasern. Die Ausrichtung im Druck bestimmt deshalb, wo ein Bauteil sich beim Tempern bewegt.

Daraus folgen drei Regeln:

- **Probekörper zuerst.** Einen Würfel oder ein Referenzteil gleicher Wandstärke mittempern und den Schrumpf je Achse messen. Den Wert im CAD oder Slicer als Skalierung vorhalten.
- **Funktionsmaße nach dem Tempern herstellen.** Passbohrungen, Gewinde und Gewindeeinsätze kommen erst nach dem Tempern (Kapitel 06).
- **Geometrie stützen.** Mindestens 3 bis 5 Außenkonturen und mindestens 50 % Füllung. Hohle und dünnwandige Bauteile verziehen sich deutlich stärker.

POLYAMID IM OFEN

Polyamid trocknet beim Tempern vollständig aus. Direkt nach dem Ofen ist es daher spröder als im Einsatz. Wie sich die Zähigkeit gezielt zurückholen lässt, beschreibt Kapitel 05. Bei Temperaturen ab etwa 120 °C an Luft kann sich ungefärbtes Polyamid gelblich verfärben. Wo die Optik zählt, unter Stickstoff oder bei niedrigerer Temperatur mit längerer Haltezeit tempern.

04 EMPFEHLUNGEN JE MATERIALFAMILIE

Am stärksten profitieren die Polyamide vom Tempern, weil sie fast amorph aus dem Drucker kommen. PC wird nur entspannt, und PP braucht in der Regel keine Wärmebehandlung.

MATERIALFAMILIE	FIBERTHREE-FILAMENTE	ZIEL	TEMPERATUR	HALTEZEIT	WICHTIG
PA6 gefüllt	F3 PA-CF Pro, F3 PA-GF Pro, F3 PA-GF30 Pro	Kristallinität, Steifigkeit, Spannungsabbau	75 °C (im Trockenschrank)	24 h	Für PA-CF Pro vom DLR gemessen (Abschnitt 3.8). Schneller: 120 °C, 2–6 h. Bei Glasfaser keine langen Haltezeiten über 150 °C
PA6 ungefüllt	F3 PA Pure Pro, F3 PA ESD	Kristallinität, Maßstabilität	120 °C	4–6 h	Kaltkristallisation erst ab ca. 110 °C (Abschnitt 3.1). ESD-Wert nach dem Tempern prüfen
PA6 transparent	F3 PA Ortho	nur Spannungsabbau	nicht ohne Rücksprache	–	Kristallisation kann die Transparenz trüben
PA12	F3 PA-CF Lite, F3 PA Pure Lite	Kristallinität, Biegesteifigkeit	120–135 °C	3–6 h	Nicht über 150 °C
PC	F3 PC CF 150	nur Spannungsabbau (amorph)	20–30 K unter Tg	1–2 h	Direkt nach dem Druck tempern, sehr langsam abkühlen
PP	F3 PP GF 25	–	in der Regel nicht nötig	–	PP kristallisiert schon im Druck schnell
PLA	F3 PLA GF	Wärmeformbeständigkeit	80–90 °C	1 h	Starker Schrumpf, Bauteil im Sand einbetten

MATERIALFAMILIE	FIBERTHREE-FILAMENTE	ZIEL	TEMPERATUR	HALTEZEIT	WICHTIG
TPU	F3 TPU 80A, F3 TPU 98A	–	nicht nötig	–	–

TAB. 3 Empfehlungen je Materialfamilie.

Die Empfehlungen stützen sich auf Messungen des DLR an F3 PA-CF Pro sowie auf die unten zitierten Studien und Herstellerangaben. Ab welcher Temperatur sich ein konkretes Bauteil verzieht, hängt von Geometrie, Füllung und Wandstärke ab. Ein Probekörper vor der Serie lohnt sich daher immer.

WAS DIE STUDIEN ZEIGEN

- **PA6-CF:** Tempern steigerte die Zugfestigkeit um bis zu 16,7 % und den Zug-E-Modul um bis zu 35 %. Die Bruchdehnung sank dabei um bis zu 35 %. Das Optimum lag bei 170 °C und damit nahe der Erweichung, mit Verzugsrisiko. Bei niedrigeren Temperaturen änderten sich die Zugkennwerte in dieser Studie nicht (Tujmer & Pilipović 2025).
- **PA6-CF und PA6-GF30 im Vergleich:** Bei 180 °C gewann ein carbonfaserverstärktes PA6 nach 30 Minuten rund 18 % Zugfestigkeit, danach nichts mehr. PA6-GF30 verlor dagegen mit jeder Minute: nach 100 Minuten rund 32 % (Boszorádová et al. 2026). Deshalb empfehlen wir für glasfaserverstärkte Typen moderate Temperaturen.
- **In Aufbaurichtung (z):** Bei kurzfaserverstärktem PA6 verdreifachte sich der E-Modul in z-Richtung, die Zugfestigkeit stieg um 50 % (RMIT). Tempern hilft also gerade dort, wo FFF-Bauteile am schwächsten sind.
- **PA12:** Getempert wurde bei 135 bis 165 °C für 3 bis 18 Stunden. Kurzfaserverstärktes PA12 legte rund 11 % an Festigkeit und Steifigkeit zu. Bei 165 °C fielen die Werte wegen Materialabbau (Ferreira et al. 2020).
- **PC:** Polycarbonat wird knapp unter Tg entspannt, typisch 1 Stunde und mit 10 bis 30 K pro Stunde abgekühlt. Wird Tg überschritten, verformt sich das Bauteil. Die Glasübergangstemperatur von F3 PC CF 150 steht im technischen Datenblatt.

05 KONDITIONIEREN VON POLYAMID

Trockenes Polyamid ist steif, aber spröde. Seine typische Zähigkeit erhält es erst durch aufgenommenes Wasser. Feuchtigkeit, die beim Filament stört (WP002), ist beim fertigen Bauteil also gewollt, nur eben kontrolliert.

Konditionieren heißt: Das Bauteil wird so lange gelagert, bis es mit der Umgebung im Feuchtegleichgewicht ist. Bezugsgröße ist das Normklima mit 23 °C und 50 % relativer Luftfeuchte. PA6 nimmt dabei bis zu 3,5 % Wasser auf. Festigkeit und Steifigkeit sinken, Bruchdehnung und Schlagzähigkeit steigen.

Wie groß der Unterschied ist, zeigen die Datenblattwerte eines ungefüllten Spritzguss-PA6:

KENNWERT	TROCKEN	KONDITIONIERT (23 °C / 50 % R. F.)
Zug-E-Modul	3.100 MPa	1.000 MPa
Streckspannung	80 MPa	40 MPa
Charpy-Kerbschlagzähigkeit 23 °C	5,5 kJ/m²	60 kJ/m²

TAB. 4 Konditionieren von Polyamid.

Faserverstärkte Typen reagieren schwächer, weil die Fasern kein Wasser aufnehmen. PA12 (F3 PA Lite) nimmt deutlich weniger Feuchte auf als PA6 (F3 PA Pro) und verändert sich entsprechend weniger. Die Datenblätter von Fiberthree weisen den Einfluss der Feuchteaufnahme je Material aus.

KONDITIONIEREN IN DER PRAXIS

- **Passiv:** Bauteil bei Raumklima lagern. Das ist einfach, dauert aber: Bei 2 bis 3 mm Wandstärke kann der Ausgleich mehrere Monate brauchen.
- **Beschleunigt:** Lagerung bei erhöhter Temperatur und Feuchte, zum Beispiel nach DIN EN ISO 1110 oder bei 80 °C und 60 % r. F. Damit wird in Tagen ein ähnlicher Feuchtegehalt erreicht wie im Normklima (Bosch / IPF Dresden, Polymers 2023).
- **Im Wasserbad:** Schnell, aber es führt zu Überkonditionierung. Das Bauteil nimmt mehr Wasser auf als im Einsatz und muss danach an Luft nachkonditionieren.

WORAUF ACHTEN

- **Maße ändern sich.** Polyamid quillt bei Wasseraufnahme. Passmaße immer im Zustand prüfen, in dem das Bauteil eingesetzt wird.
- **Die Reihenfolge zählt:** erst tempern, dann konditionieren. Tempern trocknet das Bauteil vollständig aus.
- **Einsatzbedingungen definieren.** Ein Bauteil in einem klimatisierten Labor bleibt trockener als eines im Freien. Die Auslegung sollte vom ungünstigsten Zustand ausgehen: trocken für Schlag, feucht für Steifigkeit.

Konditionieren ist besonders dann wichtig, wenn ein Bauteil Schläge, Biegung oder häufige Montage aushalten muss. Ein frisch getempertes, trockenes Polyamid ist steif, aber spröder als im Einsatzzustand. Erst mit der Feuchte aus der Umgebung erreicht es die Zähigkeit, für die Polyamid geschätzt wird.

Für Passungen gilt dasselbe wie beim Tempern: Maße im Zustand prüfen, in dem das Bauteil eingesetzt wird. So fallen Quellung und Schrumpf nicht erst bei der Montage auf.

06 MECHANISCHE NACHBEARBEITUNG

Faserverstärkte Filamente lassen sich gut zerspanen, aber die Fasern verlangen passendes Werkzeug und Schutz vor Staub.

STÜTZSTRUKTUREN ENTFERNEN

- Stützen erst **nach** dem Tempern entfernen, damit Überhänge in Form bleiben.
- Polyamid ist zäh. Stützen lassen sich am besten mit Seitenschneider und Entgratwerkzeug lösen, nicht durch Abbrechen.
- Wird das Bauteil vorher konditioniert, lösen sich die Stützen leichter, weil das Material zäher und weniger spröde ist.

BOHREN, FRÄSEN, GEWINDE SCHNEIDEN

- **Werkzeug:** Für Carbon- und Glasfaser Hartmetall statt HSS. Die Fasern wirken abrasiv und machen HSS-Schneiden schnell stumpf.
- **Passbohrungen** im Druck 0,2 bis 0,3 mm kleiner vorsehen und nach dem Tempern auf Maß aufbohren oder reiben.
- **Schnittdaten:** hohe Drehzahl, geringer Vorschub, keine Hitzestauung. Bei Polyamid schmiert die Schneide sonst zu.
- **Gewinde** direkt in den Kunststoff nur für selten gelöste Verbindungen. Für häufige Montage sind Gewindeeinsätze die bessere Wahl.

GEWINDEEINSÄTZE EINSCHMELZEN

Gewindeeinsätze aus Messing geben dem Bauteil ein metallisches Gewinde, das viele Montagezyklen aushält.

01 **Reihenfolge:** erst tempern, dann einschmelzen. Sonst schrumpft die Bohrung um den Einsatz, und es entstehen Spannungen.

02 **Konstruktion:** Bohrungsdurchmesser nach Angabe des Einsatzherstellers, im Slicer 4 bis 6 Konturen um die Bohrung.

03 **Temperatur:** Lötkolben 10 bis 20 °C über der Drucktemperatur des Materials. Bei F3 PA-CF Pro mit 270 bis 285 °C Düsentemperatur also etwa 290 bis 300 °C.

04 **Einsetzen:** gerade einführen, nur etwa 90 % der Länge einschmelzen und den Rest mit einem kalten, flachen Werkzeug bündig drücken. So bleibt die Oberfläche plan.

ARBEITSSCHUTZ BEI FASERSTAUB

Beim Schleifen, Bohren und Fräsen faserverstärkter Kunststoffe entsteht feiner Staub. Carbonstaub ist zudem elektrisch leitfähig.

- Mit Absaugung arbeiten, bevorzugt nass schleifen.
- Atemschutz mindestens FFP2 tragen, bei längeren Arbeiten FFP3.
- Elektronik und offene Geräte vom Arbeitsplatz fernhalten.
- Hinweise im Sicherheitsdatenblatt des jeweiligen Filaments beachten.

07 OBERFLÄCHEN

Die matte Oberfläche der faserverstärkten Filamente ist für viele Funktionsbauteile schon das Endergebnis. Wo Optik, Dichtheit oder Farbe gefragt sind, helfen die folgenden Verfahren.

VERFAHREN	GEEIGNET FÜR	HINWEISE
Schleifen	alle	Nass schleifen, Körnung schrittweise steigern. Bei Carbon und Glas legt Schleifen Fasern frei, die Oberfläche wird rauer statt glatter. Danach füllen oder grundieren.
Färben im Tauchbad	ungefülltes PA, z. B. F3 PA Pure Pro	Polyamid nimmt Säure- und Textilfarbstoffe in heißem Wasser gut auf. Das Bauteil konditioniert dabei gleich mit (Abschnitt 3.4). Danach Maße prüfen.
Lackieren	PA, PC, PLA	Entfetten, anschleifen, Haftgrund für Kunststoffe verwenden. 2K-Lacke halten auf Polyamid besser als 1K-Sprühlack.
Lackieren PP	F3 PP GF 25	PP hat eine sehr geringe Oberflächenenergie. Ohne Spezial-Haftvermittler oder Vorbehandlung (Beflammen, Plasma) hält kaum ein Lack.
Versiegeln	alle	Dünnflüssiges Epoxidharz schließt Poren und macht Bauteile dicht gegen Flüssigkeiten und Gase. Erhöht zugleich die Oberflächenhärte.

TAB. 5 Oberflächen.

Reihenfolge für Polyamid: tempern, mechanisch bearbeiten, dann färben oder lackieren. Lack auf einem Bauteil, das noch nicht getempert ist, kann beim späteren Erwärmen reißen, weil das Bauteil darunter schrumpft.

08 LEITLINIEN FÜR DIE NACHBEHANDLUNG

Wir empfehlen für Polyamid-Bauteile diese Reihenfolge:

01	**Drucken** mit getrocknetem Filament (WP002)
02	**Tempern** mit Stützstrukturen nach Tabelle in Kapitel 04, für F3 PA-CF Pro im Trockenschrank bei 75 °C für 24 Stunden
03	**Stützen entfernen**
04	**Mechanisch bearbeiten:** Passbohrungen, Gewinde, Gewindeeinsätze
05	**Oberfläche** schleifen, färben, lackieren oder versiegeln
06	**Konditionieren** auf den Feuchtegehalt im Einsatz
07	**Endkontrolle** der Maße im Einsatzzustand

FALL	EMPFEHLUNG
Prototyp, Formprüfung	Kein Tempern nötig
Funktionsbauteil, Raumtemperatur	Tempern empfohlen: höhere Steifigkeit, gleichmäßigere Eigenschaften über das ganze Bauteil
Bauteil wird im Einsatz über 70 °C warm	Tempern erforderlich, sonst schrumpft es im Einsatz
Enge Passungen	Tempern, dann Funktionsmaße auf Maß bearbeiten
Schlagbelastung, Schnapphaken	Nach dem Tempern konditionieren
Gleiche Eigenschaften von verschiedenen Druckern	Tempern gleicht Unterschiede aus (Abschnitt 3.8)

TAB. 6 Leitlinien für die Nachbehandlung.

09 EXPERIMENTELLE DATEN

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Braunschweig hat F3 PA-CF Pro im Projekt EmpowerAX auf drei Druckern untersucht: Prusa, Raise3D und Intamsys. Aus jedem Bauteil wurden Proben oben, in der Mitte und unten entnommen und per DSC gemessen (0 bis 280 °C, 10 K/min, unter Stickstoff). Eine weitere Probe wurde 24 Stunden bei 75 °C nachkristallisiert.

ABB. 2: EXPERIMENTELLE DATEN

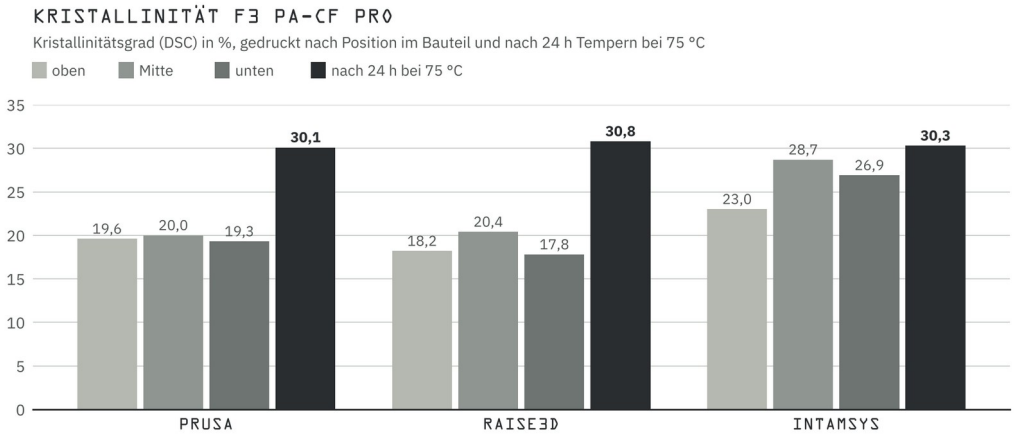


ABB. 2 DLR Braunschweig, Projekt EmpowerAX: Materialcharakterisierung Fiberthree-Polyamidfilamente (2023), DSC-Messung

Der gedruckte Zustand hängt also vom Drucker und von der Position im Bauteil ab. Auf dem Intamsys kristallisierte das Material schon während des Drucks stärker. Nach dem Tempern verschwinden diese Unterschiede: Alle drei Drucker landen bei rund 30 %.

Das ist die wichtigste Aussage für die Praxis. Wer tempert, bekommt reproduzierbare Bauteile, unabhängig davon, auf welchem Drucker sie entstanden sind. Und dafür genügt die Temperatur, mit der in WP002 auch das Filament getrocknet wird.

Im gleichen Projekt hat das DLR gezeigt, wie stark die Druckrichtung zählt. Die Zugfestigkeit von F3 PA-CF Pro liegt in Druckrichtung bei 115,7 MPa. In Aufbaurichtung (z) erreichten die Proben je nach Drucker nur 21 bis 29 MPa. Genau dort setzt Tempern an (Kapitel 04).

Ausblick: Die mechanischen Kennwerte nach dem Tempern wurden in diesem Projekt nicht gemessen. Zugversuche an getemperten Proben in x-y und z würden den Effekt für F3 PA-CF Pro direkt beziffern; eigene Versuche dazu stehen noch aus.

10 FAZIT

FFF-Bauteile aus Polyamid kommen mit niedriger Kristallinität und eingefrorenen Spannungen aus dem Drucker. Tempern gleicht das aus und macht Bauteile unabhängig vom Drucker reproduzierbar, für F3 PA-CF Pro schon im Trockenschrank bei 75 °C. Danach folgen Bearbeitung, Oberfläche und zum Schluss das Konditionieren auf den Feuchtegehalt im Einsatz.

QUELLEN

[1] DLR Braunschweig, Projekt EmpowerAX: Material characterization Fiberthree polyamide filaments (2023)

[2] Klingenbeck, Lion, Johlitz: Temperature-Dependent Thermal Properties of Nearly Amorphous Polyamide 6. Polymers 18(8), 981, 2026. https://www.mdpi.com/2073-4360/18/8/981

[3] Tujmer, Pilipović: Effect of annealing on tensile properties of carbon fiber reinforced PA 6 manufactured by FDM. European Mechanical Science 9, 2025. https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/4410870

[4] Boszorádová et al.: Effect of Annealing Time on FFF-Manufactured PA6 Composites. Applied Sciences 16(8), 3791, 2026. https://www.mdpi.com/2076-3417/16/8/3791

[5] RMIT: Annealing of chopped and continuous fibre reinforced polyamide 6 produced by FFF. https://research-repository.rmit.edu.au/articles/journal_contribution/Annealing_of_chopped_and_continuous_fibre_reinforced_polyamide_6_produced_by_fused_filament_fabrication/27549204

[6] Ferreira et al.: Study of the annealing influence on the mechanical performance of PA12 and PA12 fibre reinforced FFF printed specimens. Rapid Prototyping Journal 26(10), 2020. https://emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-10-2019-0278/full/html

[7] Polymers 15, 3387, 2023 (Bosch / IPF Dresden): Feuchteaufnahme und Quellung von PA6. https://mdpi-res.com/d_attachment/polymers/polymers-15-03387/article_deploy/polymers-15-03387.pdf

ÜBER FIBERTHREE

Fiberthree entwickelt und produziert technische Filamente für den FFF-Druck in Darmstadt, mit Polyamid als Herzstück des Portfolios. Aus dem Hintergrund als Ingenieurbüro bieten wir darüber hinaus Engineering, Schulungen und Lohnfertigung auf über 30 Druckern an, vom Erstmuster bis zur Kleinserie. Zum Ökosystem gehören Carbon-Druckplatten und die Trockenboxen F3 Safe Light und F3 Safe Long Run.

WHITE-PAPER-REIHE

Alle White Paper finden Sie auf www.fiberthree.com. Wir aktualisieren die Reihe laufend, maßgeblich ist jeweils die neueste Fassung.

NR.	THEMA	HILFT BEI
WP001	Kunststoffe für den FFF-Prozess: Materialübersicht und Verfahrensvergleich	Werkstoff und Verfahren wählen
WP002	Einfluss von Feuchtigkeit auf Polymere im FFF-Prozess	Filament trocknen und trocken halten
WP003	**Tempern und Nachbehandlung von FFF-Bauteilen (dieses Paper)**	**Tempern, Konditionieren, Nachbearbeiten**
WP004	Fertigungsgerechtes Konstruieren für den FFF-Prozess	Bauteile FFF-gerecht auslegen
WP005	Gewindeeinsätze in FFF-Bauteile einschmelzen	Lösbare Schraubverbindungen
WP006	Düsenwahl für gefüllte Filamente	Düsenwerkstoff und -durchmesser
WP007	Druckbett und Haftung	Haftung der ersten Schicht
WP008	Elektrostatisch ableitfähige Bauteile (ESD) im FFF-Druck	ESD-Bauteile drucken und prüfen
WP009	Lagenhaftung in Aufbaurichtung: Düsentemperatur, Druckgeschwindigkeit und Hotend	Festigkeit in z-Richtung

TAB. 7 Übersicht der Fiberthree White Paper.

FIBERTHREE

START WITH THE RIGHT MATERIAL

ANSCHRIFT

DARMSTADT

FIBERTHREE GMBH
OTTO-HESSE-STR. 19
64293 DARMSTADT

KONTAKT

TELEFON

+49 6151 734 75 900 .
FIBERTHREE.COM

QUALITÄT

ISO 9001

DIN EN ISO 9001:2015 .
INKL. LOHNFERTIGUNG