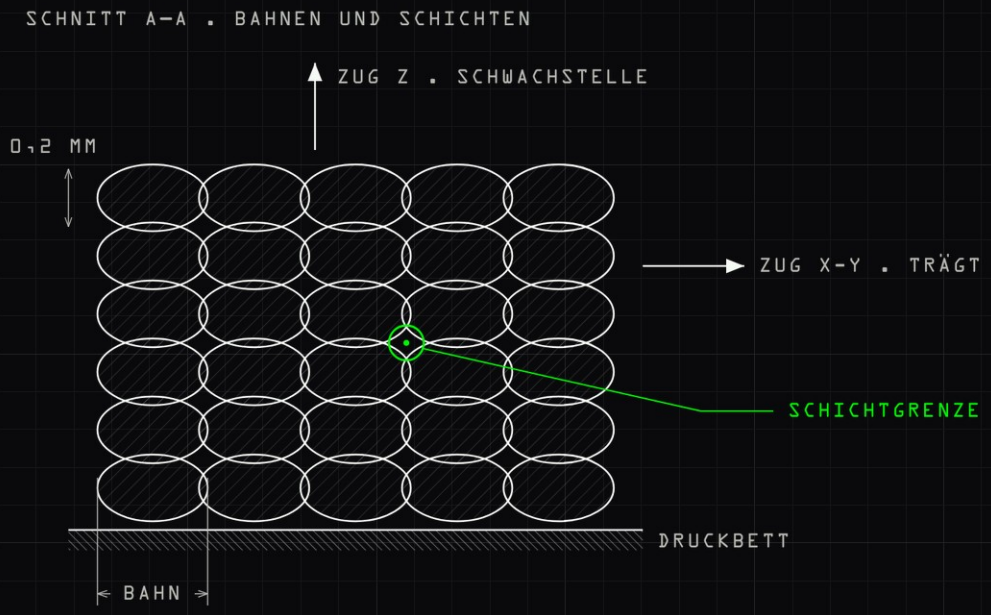
FIBERTHREE



WHITE PAPER . WP004

FERTIGUNGSGERECHT KONSTRUIEREN

Wie werden Bauteile so ausgelegt, dass sie sich zuverlässig drucken lassen und im Einsatz ihre Leistung bringen?

DOKUMENT
WP004
FIBERTHREE WHITE PAPER

STAND
11.2026
VERSION 1.0

INHALT

01	Ausgangslage	4
02	Anisotropie	5
03	Bauteilausrichtung im Bauraum	8
	Nach dem Lastpfad ausrichten	8
	Zielkonflikte abwägen	10
04	Wände, Konturen und Füllung	12
	Konturen vor Füllung	12
	Rippen statt Masse	13
05	Überhänge, Brücken, Stützen	16
	Die 45-Grad-Regel	16
	Waagerechte Bohrungen	17
	Brücken	18
	Wenn Stützen nötig sind	19
06	Bohrungen, Passungen, Toleranzen	20
	Spiel vorhalten	20
	Präzise Maße nachbearbeiten	21
	Erste Schicht	22
	Maße ändern sich nach dem Druck	23
07	Verbindungen	24
	Gewindeeinsätze und Schraubdome	24
	Muttern in Taschen	25
	Schnapphaken	26
08	Verzug vermeiden	27
	Konstruktiv gegensteuern	27
	Material und Prozess	28
09	Faserverstärkte Filamente	30
	Bahnen nach der Last führen	30
	Düse und Detailgröße	31
	Werkstoff passend zur Aufgabe wählen	32
10	Konstruktions-Checkliste	33
11	Fazit	34
	Quellen	34
	Über Fiberthree	35
	White-Paper-Reihe	35

00 . EXECUTIVE SUMMARY

Wie stark ein FFF-Bauteil ist, hängt von der Richtung ab. Messungen des DLR an F3 PA-CF Pro zeigen 115,7 MPa Zugfestigkeit in Bahnrichtung, 63,6 MPa quer dazu und nur 21 bis 29 MPa in Aufbaurichtung. Fertigungsgerechtes Konstruieren heißt deshalb vor allem: Lasten in die Bauebene legen und die Schwachstellen des Prozesses aus dem Lastpfad halten.

Dieses Paper fasst die Regeln zusammen, die dafür nötig sind:

Eine Checkliste am Ende fasst alles für die Freigabe zusammen.

AUF EINEN BLICK

- **Ausrichtung:** Hauptlast in x-y, kein Zug über Schichtgrenzen
- **Wände:** Vielfache der Bahnbreite, lieber mehr Konturen als mehr Füllung
- **Überhänge:** 45°-Regel, Fasen an Unterkanten, Tropfenform für waagerechte Bohrungen
- **Passungen:** Spiel vorhalten, Präzisionsmaße nachbearbeiten, Schrumpf durch Tempern einplanen
- **Verbindungen:** Gewindeeinsätze für häufige Montage, Schnapphaken liegend
- **Verzug:** Ecken verrunden, faserverstärkte Typen nutzen

Empfehlung: Lasten in die Bauebene legen und die Schwachstellen des Prozesses aus dem Lastpfad halten.

115,7 MPa	63,6 MPa	21–29 MPa
Zugfestigkeit in Bahnrichtung, F3 PA-CF Pro	quer zur Bahn, DLR	in Aufbaurichtung z, DLR

01 AUSGANGSLAGE

Ob ein FFF-Bauteil hält, entscheidet sich zum größten Teil im CAD. Material und Drucker setzen den Rahmen, aber Geometrie und Ausrichtung bestimmen, wie viel davon im Bauteil ankommt.

FFF baut Bauteile Bahn für Bahn und Schicht für Schicht auf. Daraus ergeben sich Regeln, die es im Spritzguss oder beim Fräsen nicht gibt:

- Die Festigkeit hängt von der Richtung ab, besonders bei faserverstärkten Filamenten.
- Überhänge brauchen Stützen, Brücken haben eine Grenzlänge.
- Wandstärken sollten zur Bahnbreite der Düse passen.
- Maße verändern sich durch Schwindung, Tempern und Feuchte.

Dieses Paper ist Teil unserer Whitepaper-Reihe (Übersicht in WP001). WP002 behandelt die Feuchtigkeit im Filament, WP003 die Nachbehandlung der Bauteile. WP004 setzt davor an: Es zeigt, wie Bauteile so konstruiert werden, dass sie sich zuverlässig drucken lassen und im Einsatz ihre Leistung bringen. Die Regeln folgen der Gestaltungsrichtlinie VDI 3405 Blatt 3.4 für Materialextrusion und unseren Erfahrungen aus über 30 Druckern in der Lohnfertigung.

Die folgenden Kapitel gehen in der Reihenfolge vor, in der die Entscheidungen im Entwurf fallen: zuerst die Richtung der Lasten und die Ausrichtung im Bauraum, dann Wände, Überhänge und Passungen, zuletzt Verbindungen, Verzug und die Besonderheiten faserverstärkter Filamente.

ABB. 1: SCHEMASKIZZE

SCHNITT A–A . BAHNEN UND SCHICHTEN

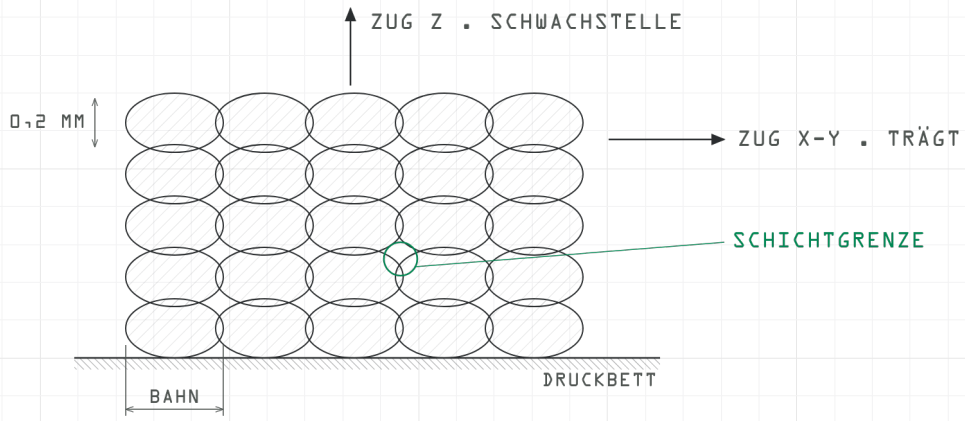


ABB. 1 Gestapelte Bahnen im Schnitt mit Zug in x-y und z, schematisch, nicht maßstäblich.

02 ANISOTROPIE

Ein FFF-Bauteil ist kein homogener Werkstoff. Entlang der Bahnen trägt das Material voll, quer dazu und zwischen den Schichten deutlich weniger. Bei faserverstärkten Filamenten ist dieser Unterschied am größten, weil sich die Fasern beim Extrudieren in Bahnrichtung ausrichten.

Das DLR hat die Zugfestigkeit der Fiberthree-Polyamide mit Bahnen in Lastrichtung (0°) und quer dazu (90°) gemessen. Für F3 PA-CF Pro kamen Proben in Aufbaurichtung (z) von drei Druckern hinzu:

ABB. 2: ANISOTROPIE

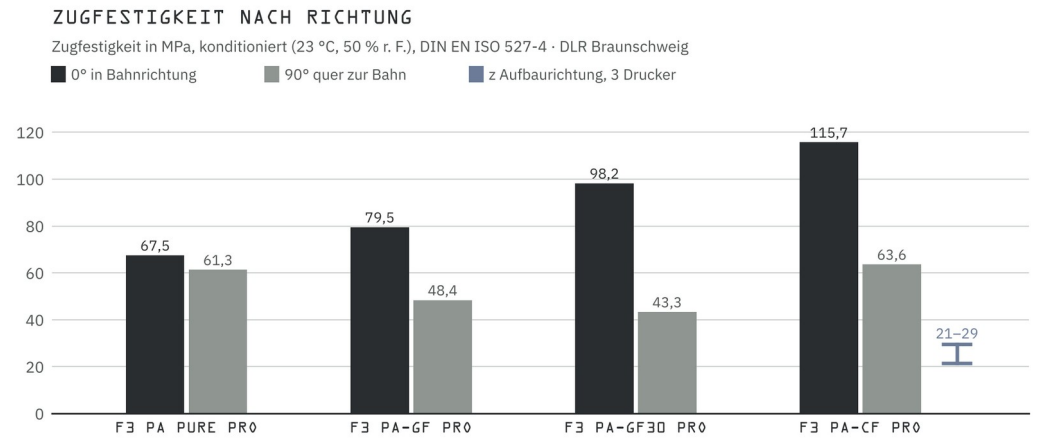


ABB. 2 DLR Braunschweig, Projekt EmpowerAX: Materialcharakterisierung Fiberthree-Polyamidfilamente (2023), Zugversuche

Beim ungefüllten F3 PA Pure Pro liegen 0° und 90° nah beieinander. Je mehr Fasern, desto stärker steigt die Festigkeit längs, während sie quer sogar sinkt. Beim F3 PA-CF Pro trägt die z-Richtung nur noch etwa ein Fünftel der Last, die längs möglich ist.

ABB. 3: ANISOTROPIE

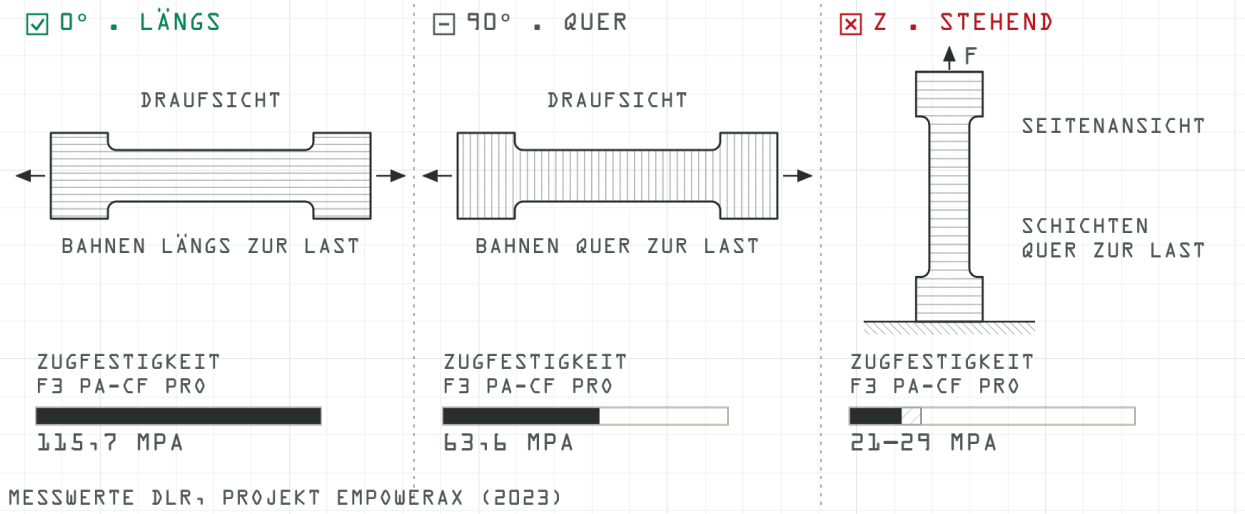


ABB. 3 Gleiches Material, drei Ausrichtungen: Bahnen in Lastrichtung tragen am meisten, Zug über die Schichtgrenzen am wenigsten (F3 PA-CF Pro, DLR).

Die Steifigkeit verhält sich ähnlich. Der E-Modul von F3 PA-CF Pro beträgt längs 11.423 MPa und quer 4.829 MPa, in z je nach Drucker 1.813 bis 2.479 MPa. Auch die Wärmeausdehnung ist in z rund fünfmal so groß wie längs (siehe WP003).

Die Fachliteratur zeigt denselben Effekt auch bei ungefüllten Kunststoffen und an ganzen Bauteilen. Hambali et al. haben einen Winkel aus ABS in drei Ausrichtungen gedruckt und bis zum Bruch belastet [2]. Dieselbe Geometrie versagte je nach Lage im Bauraum bei 17 kg oder erst bei 31 bis 32 kg, also bei fast doppelter Last. An den Brüchen ist die Ursache zu sehen: Die Risse liefen um die Schraubenbohrung oder entlang der Schichten. Auch der E-Modul der zugehörigen Zugproben unterschied sich je nach Richtung (1.822 bis 2.228 MPa).

Eine Simulation ersetzt den Versuch dabei nicht. Eine lineare FEM-Rechnung mit richtungsabhängigen Kennwerten traf die gemessene Verformung nur für eine der drei Ausrichtungen (1,65 mm gerechnet zu 1,80 mm gemessen). Für eine andere lag sie bei 2,95 mm statt 6,28 mm [2]. Den Ort des Versagens zeigte die Rechnung dagegen gut. FEM eignet sich also, um kritische Stellen zu finden; Lasten und Verformungen eines FFF-Bauteils sollten an einem gedruckten Muster geprüft werden.

Daraus folgt die wichtigste Konstruktionsregel: Lasten in Bahnrichtung legen, Zug in Aufbaurichtung vermeiden. Wie das gelingt, beschreiben die Kapitel 03 und 09. Wie sich die Festigkeit in Aufbaurichtung über Düsentemperatur und Druckgeschwindigkeit verbessern lässt, zeigt WP009.

ABB. 4: ANISOTROPIE

SCHNITT . KRÄFTE IN AUFBAURICHTUNG

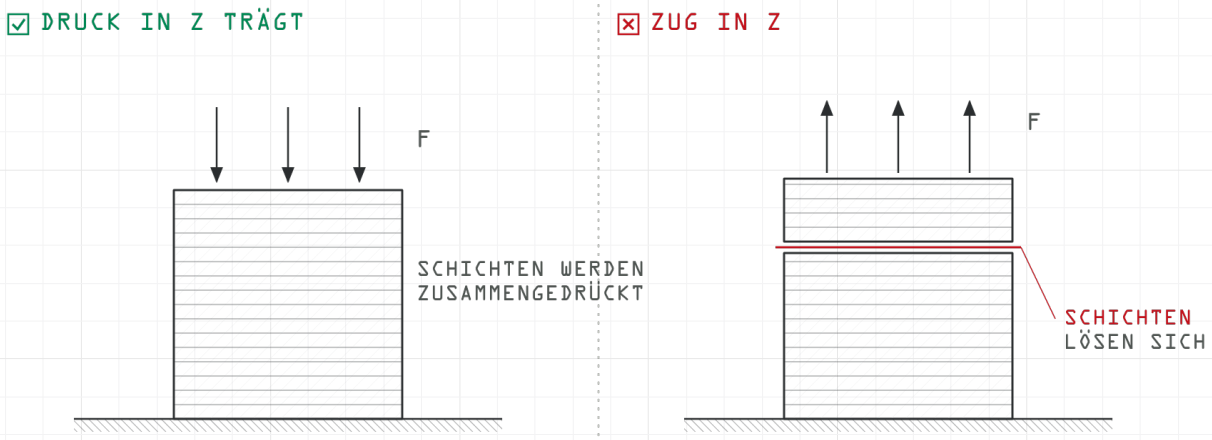


ABB. 4 Druck senkrecht zu den Schichten trägt, Zug in Aufbaurichtung trennt die Schichten.

03 BAUTEILAUSRICHTUNG IM BAURAUM

Die Ausrichtung im Bauraum ist die erste Konstruktionsentscheidung, nicht die letzte Einstellung im Slicer. Sie legt fest, wo die Schichtgrenzen liegen, wie viel Stützmaterial nötig ist und welche Flächen gut aussehen.

NACH DEM LASTPFAD AUSRICHTEN

- **Zug und Biegung in der Bauebene (x-y).** Hauptlasten sollen entlang der Bahnen laufen, nicht über die Schichtgrenzen.
- **Kerben und Querschnittssprünge nicht in z.** Ein Absatz, der quer zur Aufbaurichtung liegt, wird zur Sollbruchstelle zwischen zwei Schichten.
- **Schraub- und Druckkräfte dürfen in z wirken.** Druck senkrecht zu den Schichten trägt FFF gut, Zug nicht.
- **Dauerlast mitdenken.** Unter Druck ist die Steifigkeit fast richtungsunabhängig: Bei ABS-Zylindern, unter 0°, 45° und 90° gedruckt, unterschied sich der E-Modul nur um etwa 4 %. Unter konstanter Verformung baute die schräg (45°) gedruckte Probe aber die meiste Spannung ab, nach 30 Minuten im Mittel auf 19,6 MPa gegenüber 22,0 MPa bei 90° [3]. Bauteile unter Dauerlast, etwa Klemmungen oder verschraubte Flansche, deshalb nicht schräg im Bauraum anordnen.
- **Schnapphaken und Federelemente liegend drucken,** sodass sie in der Bauebene biegen. In z verliert ein Biegebalken etwa die Hälfte seiner Bruchdehnung.

ABB. 5: NACH DEM LASTPFAD AUSRICHTEN

ANSICHT . WINKEL UNTER LAST

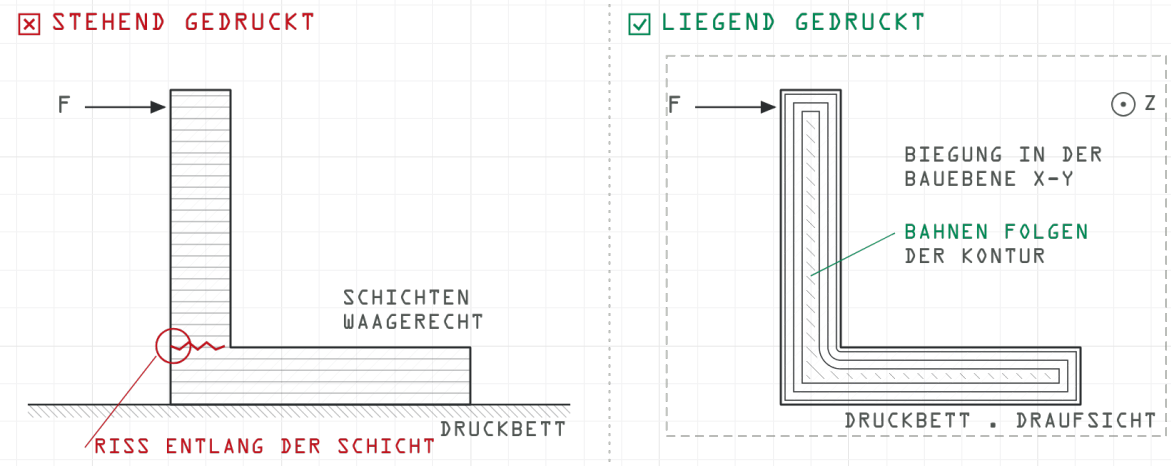


ABB. 5 Derselbe Winkel stehend und liegend gedruckt: Liegend biegt er in der Bauebene, stehend reißt er an der Schichtgrenze.

ABB. 6: NACH DEM LASTPFAD AUSRICHTEN

SCHNITT . QUERSCHNITTSSPRUNG

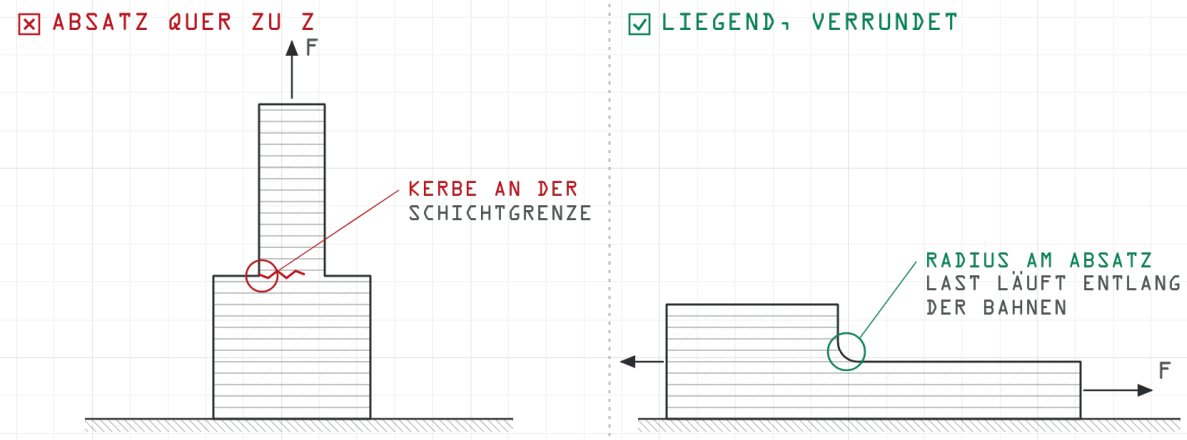


ABB. 6 Ein Absatz quer zur Aufbaurichtung wird zur Kerbe zwischen zwei Schichten. Liegend und mit Radius läuft die Last entlang der Bahnen.

ZIELKONFLIKTE ABWÄGEN

Nicht jede Anforderung lässt sich mit einer Ausrichtung erfüllen. Diese Reihenfolge hat sich bei uns bewährt:

01	**Festigkeit:** Hauptlast in die Bauebene
02	**Maßhaltigkeit:** Passbohrungen und Funktionsflächen möglichst senkrecht zur Bauplatte, damit sie rund und ohne Stützen entstehen
03	**Stützmaterial:** so wenig wie möglich, besonders auf Funktionsflächen
04	**Optik:** sichtbare Flächen nach oben oder seitlich, nie auf Stützen
05	**Druckzeit:** flach ist meist schneller als hoch

ABB. 7: ZIELKONFLIKTE ABWÄGEN

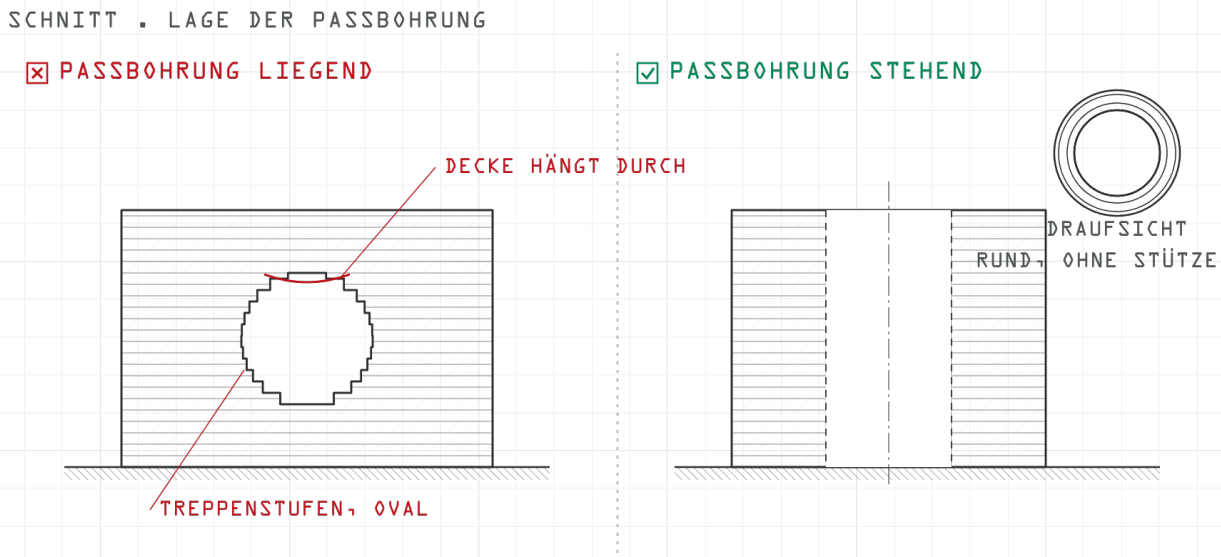


ABB. 7 Passbohrungen senkrecht zur Bauplatte werden rund und brauchen keine Stütze.

Wenn sich Festigkeit und Geometrie nicht vereinbaren lassen, hilft oft eine Teilung. Zwei Teile, jeweils optimal ausgerichtet und verschraubt oder verklebt, sind häufig stabiler als ein Teil mit schlechter Ausrichtung.

ABB. 8: ZIELKONFLIKTE ABWÄGEN

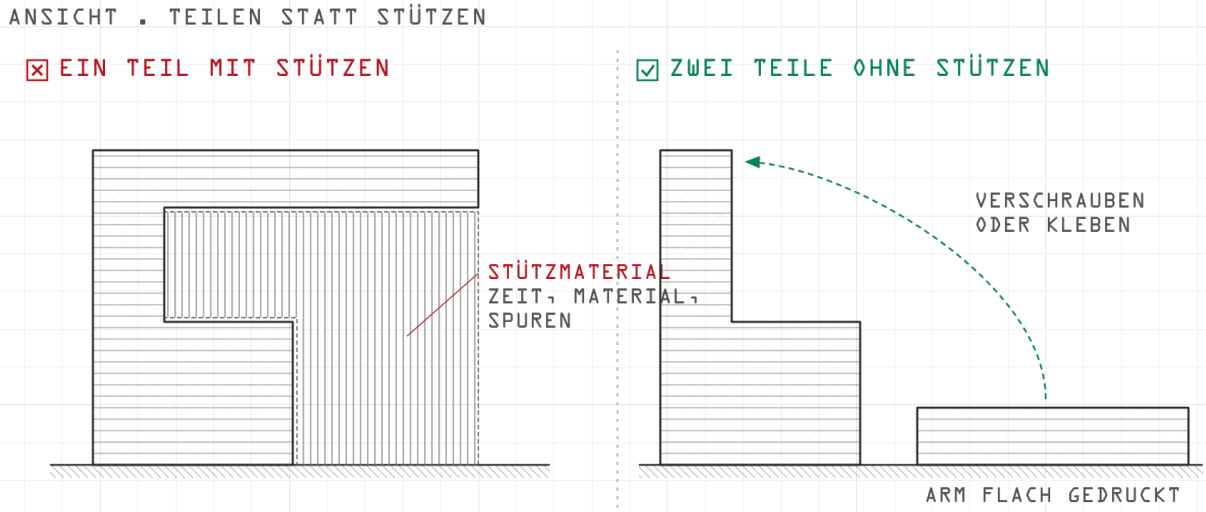


ABB. 8 Teilen statt stützen: Zwei flach gedruckte Teile, verschraubt oder verklebt, sparen Stützmaterial und tragen oft mehr.

04 WÄNDE, KONTUREN UND FÜLLUNG

Wandstärken sollten ein ganzzahliges Vielfaches der Bahnbreite sein. Sonst füllt der Slicer die Lücke mit schmalen Zwischenbahnen oder lässt sie offen, und genau dort beginnt später der Riss.

DÜSE	BAHNBREITE (TYPISCH)	MINDESTWAND	EMPFOHLENE TRAGENDE WAND
0,4 mm	0,45 mm	0,9 mm (2 Bahnen)	1,8 mm (4 Bahnen)
0,6 mm	0,65 mm	1,3 mm (2 Bahnen)	2,6 mm (4 Bahnen)
0,8 mm	0,85 mm	1,7 mm (2 Bahnen)	3,4 mm (4 Bahnen)

TAB. 1 Wände, Konturen und Füllung.

Die Bahnbreite hängt von Slicer und Profil ab. Die Werte sind Richtwerte, die genaue Bahnbreite zeigt der Slicer.

ABB. 9: WÄNDE, KONTUREN UND FÜLLUNG

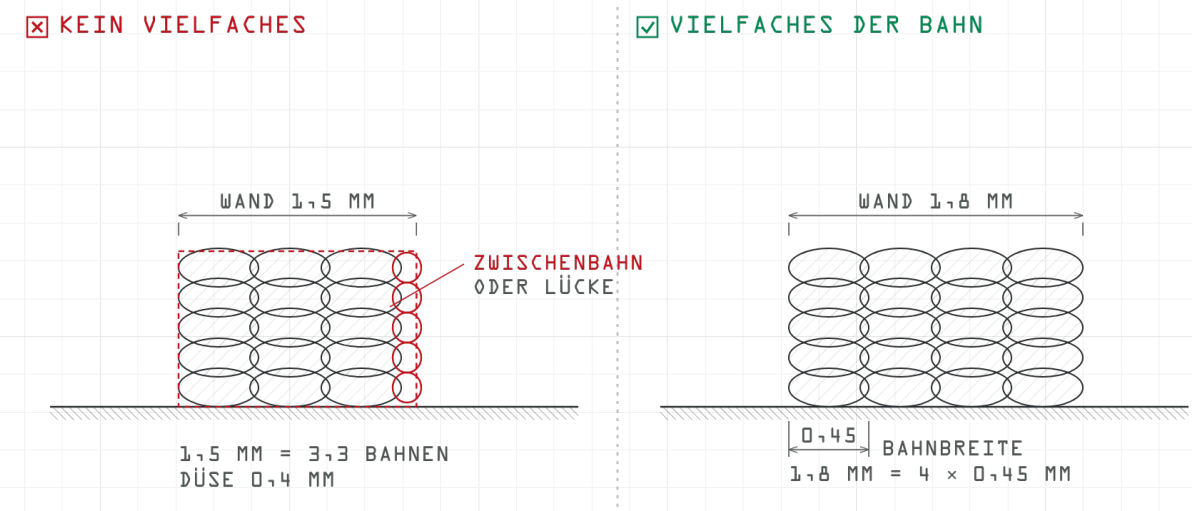


ABB. 9 Wandstärke als Vielfaches der Bahnbreite: 1,8 mm sind vier saubere Bahnen, 1,5 mm hinterlassen eine Lücke oder eine schmale Zwischenbahn.

KONTUREN VOR FÜLLUNG

Die Außenkonturen tragen den größten Teil der Biege- und Torsionslast, denn dort sitzt das meiste Material am Rand des Querschnitts. Mehr Konturen bringen daher in der Regel mehr als mehr Füllung.

- **Tragende Bauteile:** 4 bis 6 Konturen, 30 bis 50 % Füllung

- **Bauteile zum Tempern:** mindestens 3 bis 5 Konturen und 50 % Füllung (WP003)
- **Dichte Bauteile für Flüssigkeiten oder Gase:** 100 % Füllung oder versiegeln
- **Füllmuster:** Gyroid oder Kubisch verteilen die Last in alle Richtungen gleichmäßiger als Linien

ABB. 10: KONTUREN VOR FÜLLUNG

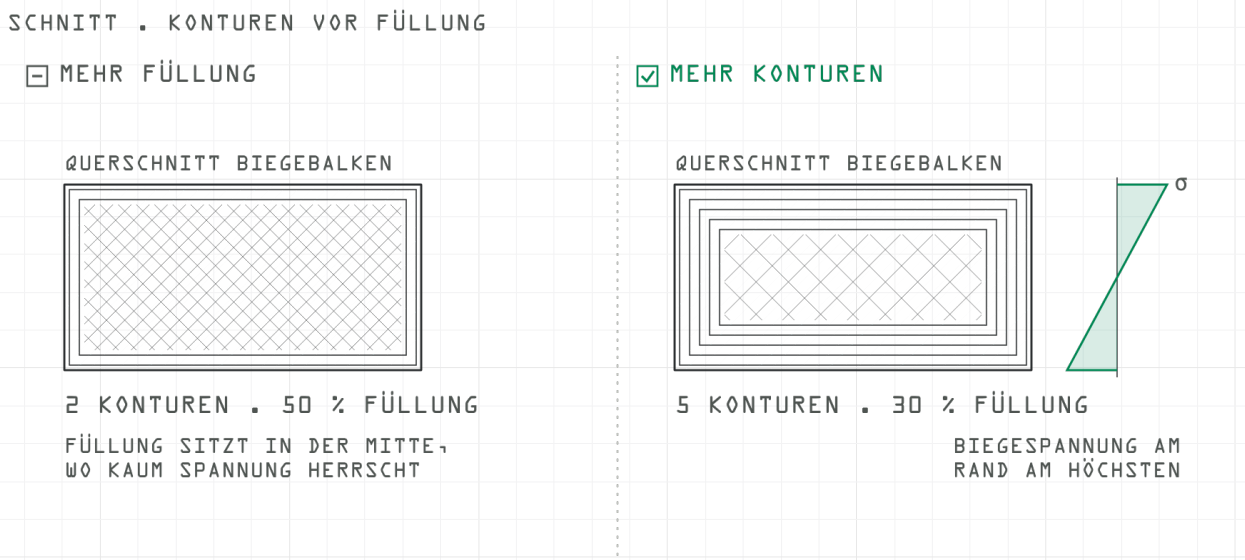


ABB. 10 Unter Biegung sitzt die Spannung am Rand. Mehr Konturen bringen dort Material hin, mehr Füllung nur in die Mitte.

RIPPEN STATT MASSE

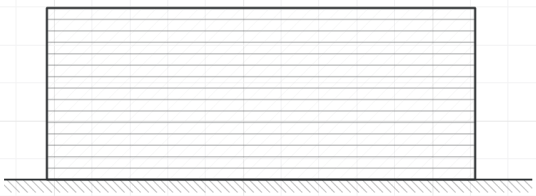
Große Volumen sind im FFF teuer, langsam und verziehen sich. Steifigkeit entsteht besser über die Geometrie:

- Lange, dünne Wände mit Rippen quer zur Wand aussteifen. Die Rippe ist 50 bis 75 % so dick wie die Wand.
- Zwischen zwei Bohrungen und zwischen Bohrung und Bauteilrand mindestens das 1,5- bis 2-Fache der Wandstärke lassen.
- Wandstärken möglichst gleichmäßig halten. Dicke neben dünnen Bereichen kühlen unterschiedlich ab und erzeugen Verzug.

ABB. 11: RIPPEN STATT MASSE

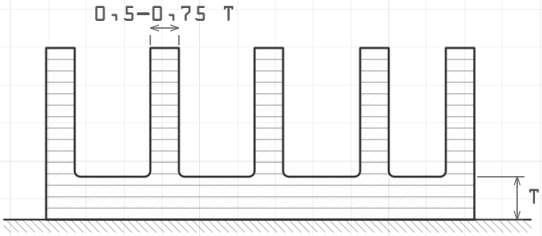
SCHNITT . RIPPEN STATT MASSE

☒ STEIFIGKEIT DURCH MASSE



MASSIV: LANGE DRUCKZEIT,
VIEL MATERIAL, VERZUG

☑ STEIFIGKEIT DURCH FORM



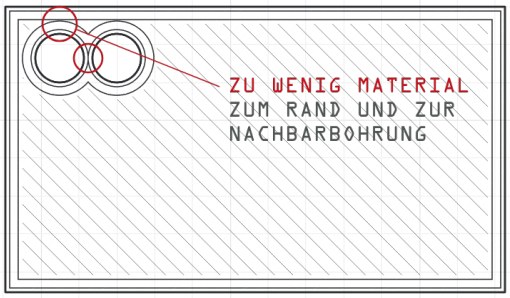
DÜNNE WAND MIT RIPPEN:
GLEICHE STEIFIGKEIT, WENIGER MASSE

ABB. 11 Steifigkeit durch Form statt durch Masse: Rippen mit 50 bis 75 % der Wandstärke.

ABB. 12: RIPPEN STATT MASSE

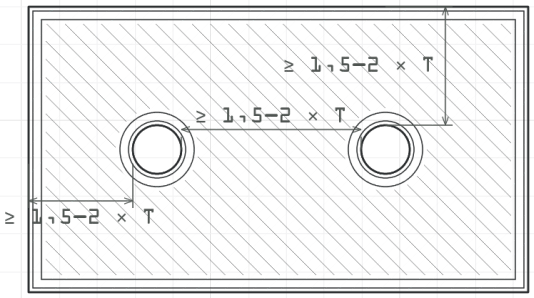
DRAUFSICHT . ABSTAND VON BOHRUNGEN

☒ BOHRUNGEN ZU NAH



DRAUFSICHT

☑ GENUG FLEISCH



DRAUFSICHT

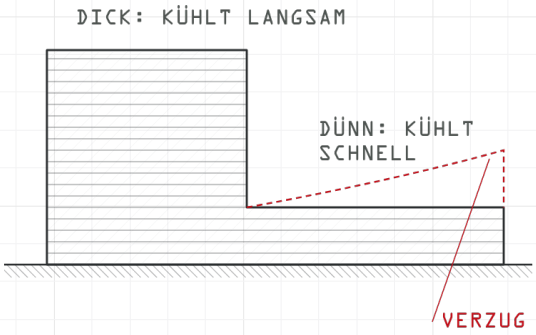
T = WANDSTÄRKE

ABB. 12 Zwischen Bohrungen und zum Bauteilrand mindestens das 1,5- bis 2-Fache der Wandstärke lassen.

ABB. 13: RIPPEN STATT MASSE

SCHNITT . GLEICHMÄSSIGE WANDSTÄRKEN

☒ DICK NEBEN DÜNN



☑ GLEICHMÄSSIGE WÄNDE

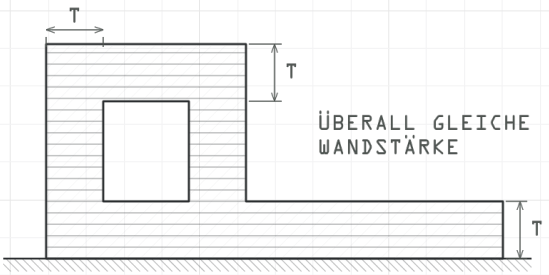


ABB. 13 Dicke neben dünnen Bereichen kühlen unterschiedlich ab und verziehen sich. Gleichmäßige Wände vermeiden das.

Füllung und Konturen sollten deshalb nicht pauschal, sondern nach der Aufgabe des Bauteils gewählt werden: Für Biegung und Torsion zählen vor allem die äußeren Konturen, für Druck und Dichtheit eine hohe Füllung. Wer beides braucht, kombiniert mehrere Konturen mit einer mittleren Füllung und verstärkt gezielt die Bereiche, in denen Kräfte eingeleitet werden.

Ein einfacher Test hilft bei der Abstimmung: Wandstärken im CAD so wählen, dass der Slicer in der Vorschau nur ganze Bahnen zeigt. Zwischenbahnen und Lücken sind in der Schichtvorschau gut zu erkennen und lassen sich meist mit wenigen Zehnteln Millimeter Änderung vermeiden.

05 ÜBERHÄNGE, BRÜCKEN, STÜTZEN

Jede Stützstruktur kostet Material und Zeit, hinterlässt Spuren auf der Oberfläche und muss entfernt werden. Bei Polyamid ist das wegen der Zähigkeit besonders mühsam. Die beste Stütze ist daher die, die man wegkonstruiert.

DIE 45-GRAD-REGEL

Eine Wand, die mindestens 45° gegen die Bauplatte geneigt ist, trägt sich selbst: Jede neue Schicht liegt noch zur Hälfte auf der vorherigen auf. Flachere Überhänge brauchen Stützen oder eine andere Geometrie.

ABB. 14: DIE 45-GRAD-REGEL

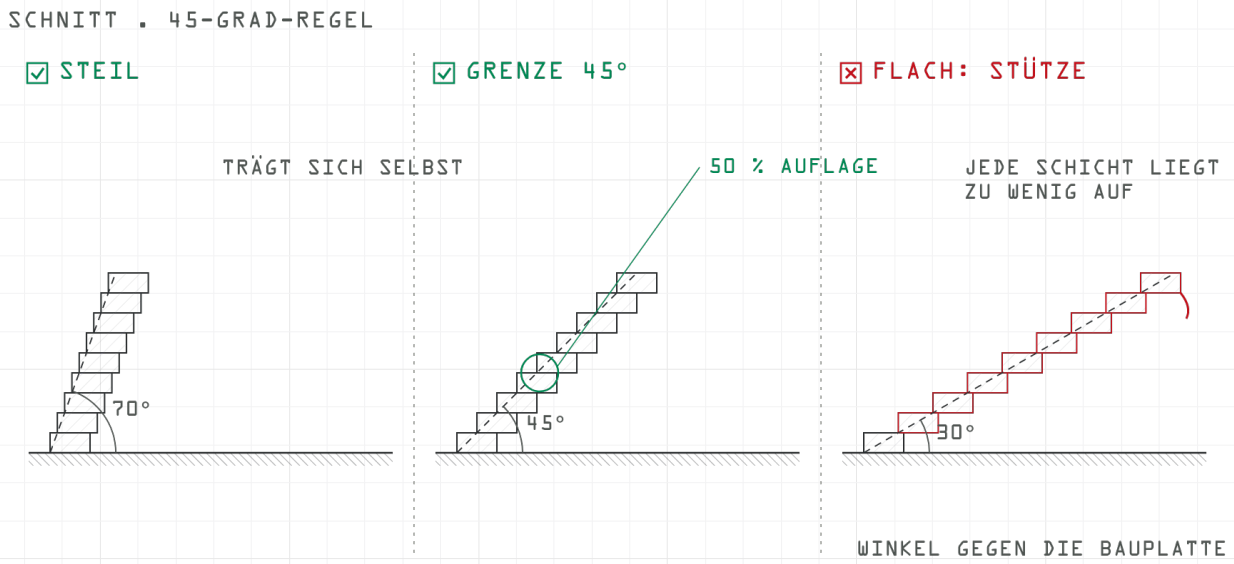


ABB. 14 Bei 45° liegt jede Schicht noch zur Hälfte auf der vorherigen. Flachere Wände brauchen Stützen.

- **Fasen statt Radien an Unterkanten.** Eine 45°-Fase druckt sauber, ein Radius läuft unten flach aus und hängt durch.
- **Radien an Oberkanten und senkrechten Kanten** sind dagegen kein Problem und senken Spannungsspitzen.
- **Knapp unter der Grenze nachbessern:** Eine Fläche mit 40° zur Bauplatte braucht Stützen, mit 46° oft nicht mehr.

ABB. 15: DIE 45-GRAD-REGEL

SCHNITT . FASE ODER RADIUS AN KANTEN

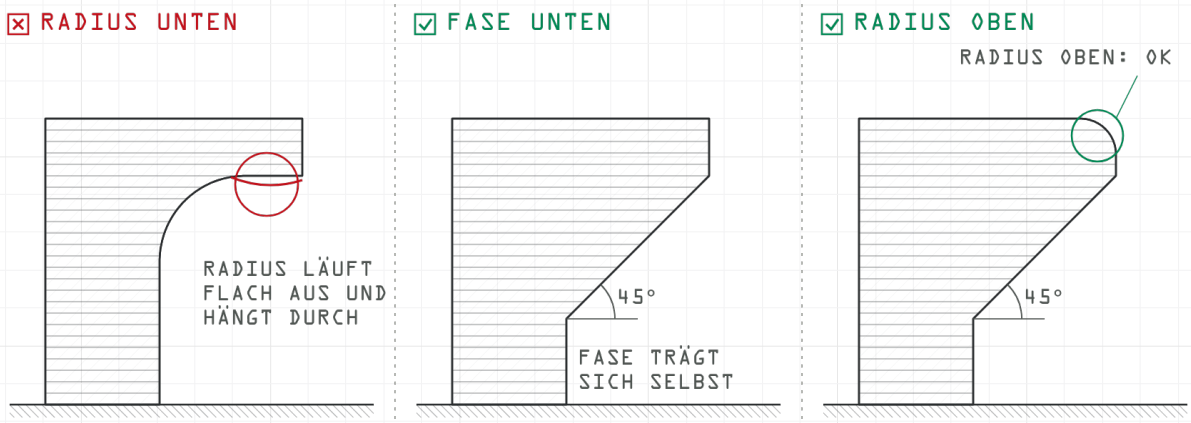


ABB. 15 An Unterkanten trägt sich eine 45°-Fase selbst, ein Radius läuft flach aus. An Oberkanten sind Radien unproblematisch.

WAAGERECHTE BOHRUNGEN

Eine runde Bohrung, deren Achse parallel zur Bauplatte liegt, hat oben eine flache Decke, die durchhängt. Abhilfe:

- **Tropfenform:** die Bohrung oben mit 45° zu einer Spitze auslaufen lassen. So druckt sie ohne Stütze, in nahezu jedem Durchmesser.
- **Rautenform** für Kanäle, mit verrundeten Ecken gegen Kerbwirkung.
- **Passbohrungen** lieber senkrecht zur Bauplatte legen oder nachträglich bohren (Kapitel 06).

ABB. 16: WAAGERECHTE BOHRUNGEN

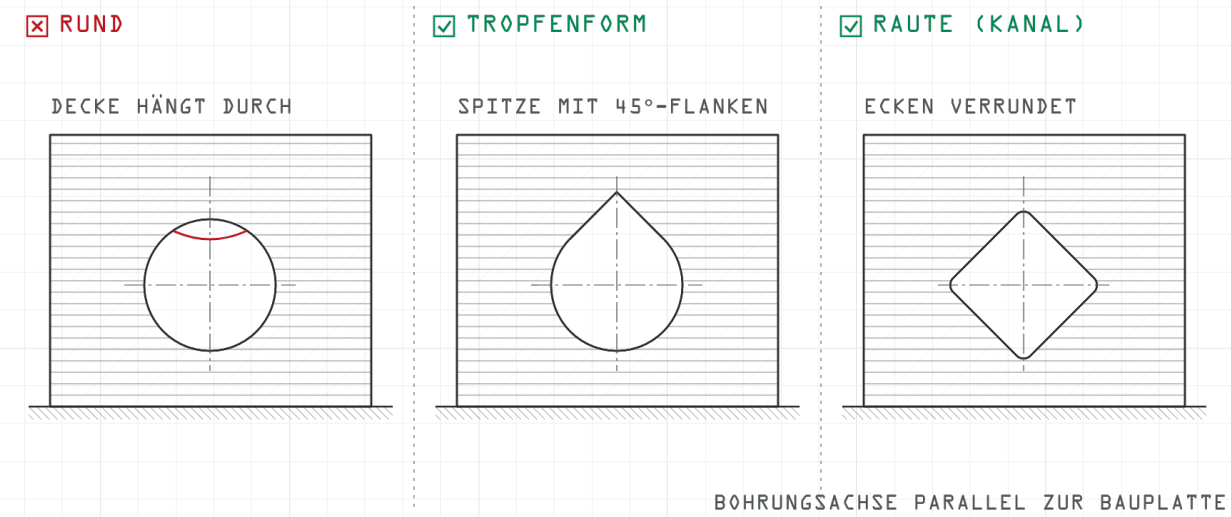


ABB. 16 Waagerechte Bohrungen: Rund hängt die Decke durch, Tropfen- und Rautenform drucken ohne Stütze.

BRÜCKEN

Zwischen zwei Stützpunkten kann eine Bahn frei gespannt werden. Bis etwa 5 mm gelingt das zuverlässig, bei gut eingestellter Kühlung auch mehr. Polyamid wird mit wenig Lüfter gedruckt und hängt deshalb bei langen Brücken stärker durch als PLA. Lange Spannweiten daher in Bogenform konstruieren oder in kurze Abschnitte teilen.

ABB. 17: BRÜCKEN

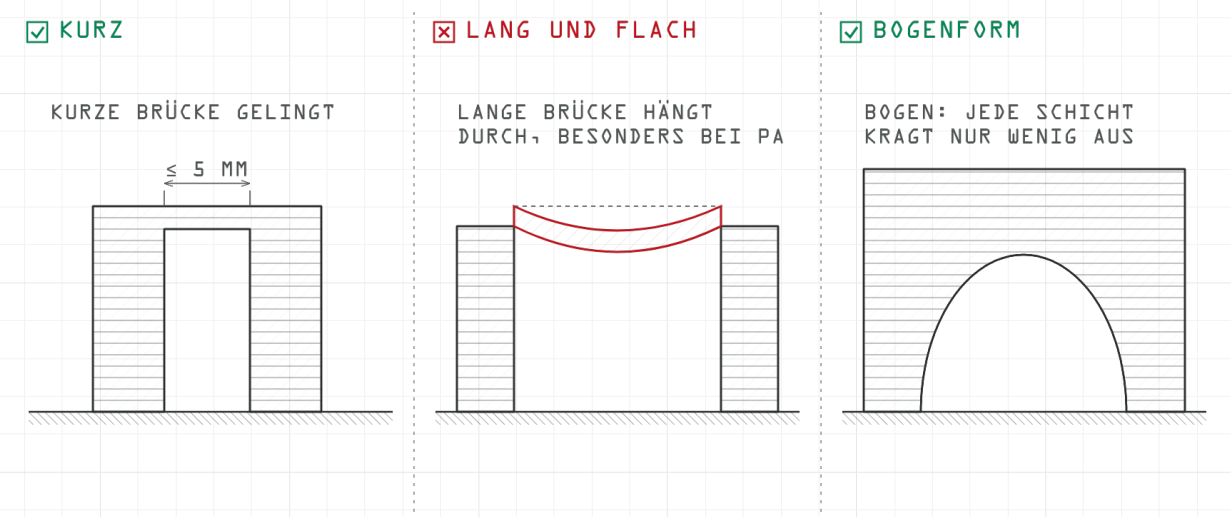


ABB. 17 Kurze Brücken bis etwa 5 mm gelingen zuverlässig. Lange Spannweiten hängen durch, ein Bogen vermeidet das.

WENN STÜTZEN NÖTIG SIND

- Stützen auf Flächen legen, die nicht funktionsrelevant und nicht sichtbar sind.
- Zwischen Stütze und Bauteil einen definierten Spalt im Slicer einstellen, damit sich die Stütze lösen lässt.
- Bei Bauteilen, die getempert werden, Stützen erst nach dem Tempern entfernen (WP003).

ABB. 18: WENN STÜTZEN NÖTIG SIND

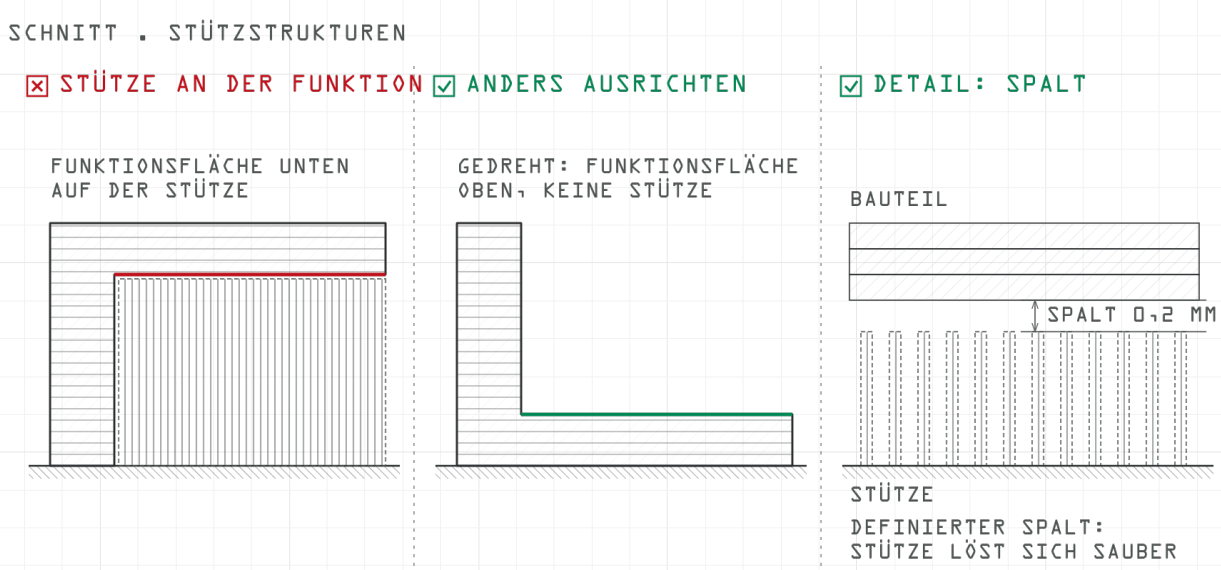


ABB. 18 Stützen gehören auf Nebenflächen, besser noch wird die Funktionsfläche gedreht. Ein definierter Spalt sorgt dafür, dass sich die Stütze löst.

Viele Stützen lassen sich schon im Entwurf vermeiden, wenn Überhänge bewusst gestaltet werden: Fasen statt Radien an Unterkanten, Tropfenform für waagerechte Bohrungen und kurze Brücken. Was übrig bleibt, wird gezielt gestützt, und zwar dort, wo es Funktion und Optik nicht stört.

Bei Polyamid lohnt sich dieser Aufwand besonders, weil Stützen aus zähem Material schwer zu entfernen sind und Spuren hinterlassen.

06 BOHRUNGEN, PASSUNGEN, TOLERANZEN

FFF-Bauteile weichen typisch um einige Zehntel Millimeter vom Nennmaß ab. Bohrungen fallen meist zu klein aus, Außenmaße eher zu groß, weil die Bahn etwas breiter liegt als im Modell.

ABB. 19: BOHRUNGEN, PASSUNGEN, TOLERANZEN

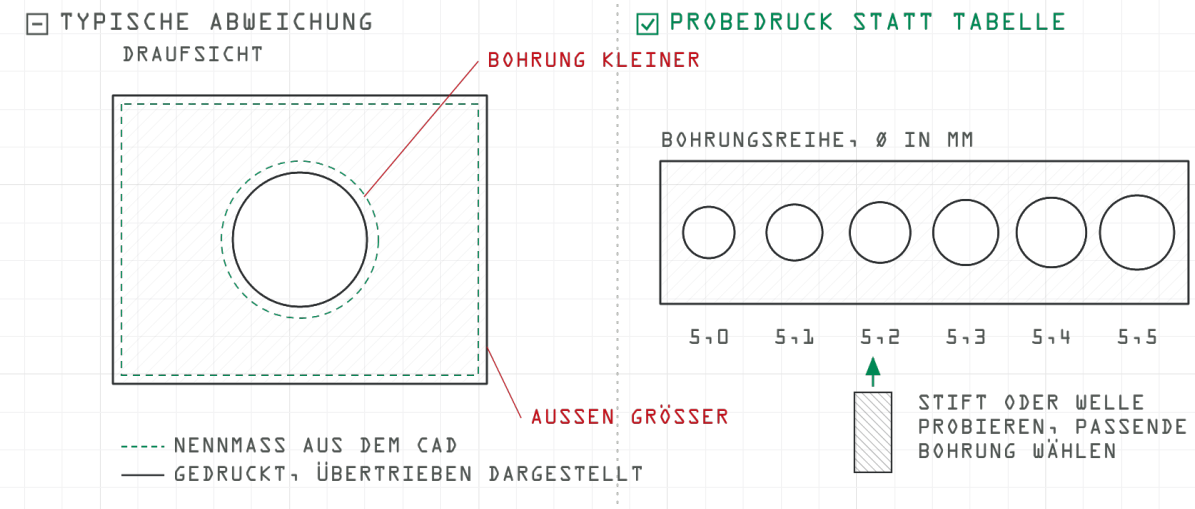


ABB. 19 Bohrungen fallen meist kleiner, Außenmaße größer aus als im CAD. Eine Bohrungsreihe als Probedruck zeigt das passende Spiel.

SPIEL VORHALTEN

Diese Richtwerte gelten für eine 0,4-mm-Düse und ein kalibriertes System. Sie sind auf den Durchmesser bezogen:

PASSUNG	SPIEL IM CAD	BEISPIEL
Pressung	0 bis +0,1 mm	Stifte, Lagersitze
Schiebesitz	+0,2 bis +0,3 mm	Deckel, Führungen
Spielpassung	+0,3 bis +0,5 mm	Wellen, Durchgangsbohrungen
Bewegliche Teile in einem Druck	mind. 0,3 mm	Scharniere, Gelenke

TAB. 2 Spiel vorhalten.

Der genaue Wert hängt von Material, Drucker und Länge der Passung ab. Ein kurzer Probedruck mit einer Bohrungsreihe klärt ihn schneller als jede Tabelle.

ABB. 20: SPIEL VORHALTEN

SCHNITT . SPIEL VORHALTEN

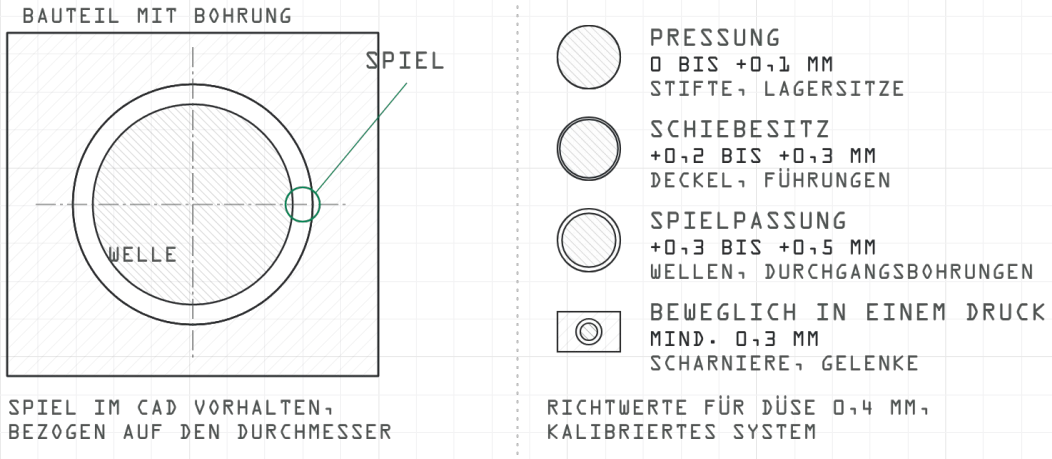


ABB. 20 Spiel im CAD vorhalten: Richtwerte für eine 0,4-mm-Düse, bezogen auf den Durchmesser.

PRÄZISE MASSE NACHBEARBEITEN

Was enger toleriert sein muss als etwa ± 0,2 mm, wird besser nachbearbeitet:

- Passbohrungen 0,2 bis 0,3 mm kleiner drucken und auf Maß reiben oder aufbohren.
- Dichtflächen mit Aufmaß drucken und plan fräsen oder schleifen.
- Bei faserverstärkten Filamenten Werkzeug aus Hartmetall verwenden (WP003).

ABB. 21: PRÄZISE MASSE NACHBEARBEITEN

SCHNITT . PRÄZISE MASSE NACHBEARBEITEN

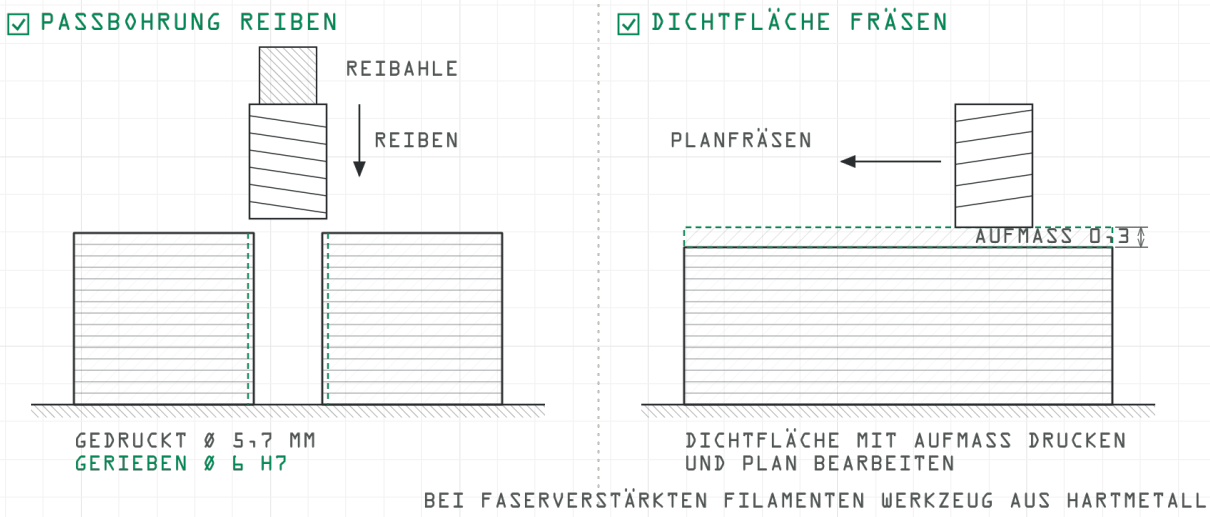


ABB. 21 Was enger als etwa ± 0,2 mm toleriert sein muss, wird mit Unter- oder Aufmaß gedruckt und nachbearbeitet.

ERSTE SCHICHT

Die ersten Schichten werden beim Drucken etwas breitgedrückt, damit sie gut auf der Bauplatte haften. Dieser Wulst, oft Elefantenfuß genannt, macht Kanten auf der Bauplatte breiter als im CAD. Wo sie maßhaltig sein müssen, hilft eine kleine Fase von etwa 0,5 mm × 45° an der Unterkante.

ABB. 22: ERSTE SCHICHT

SCHNITT . ERSTE SCHICHT

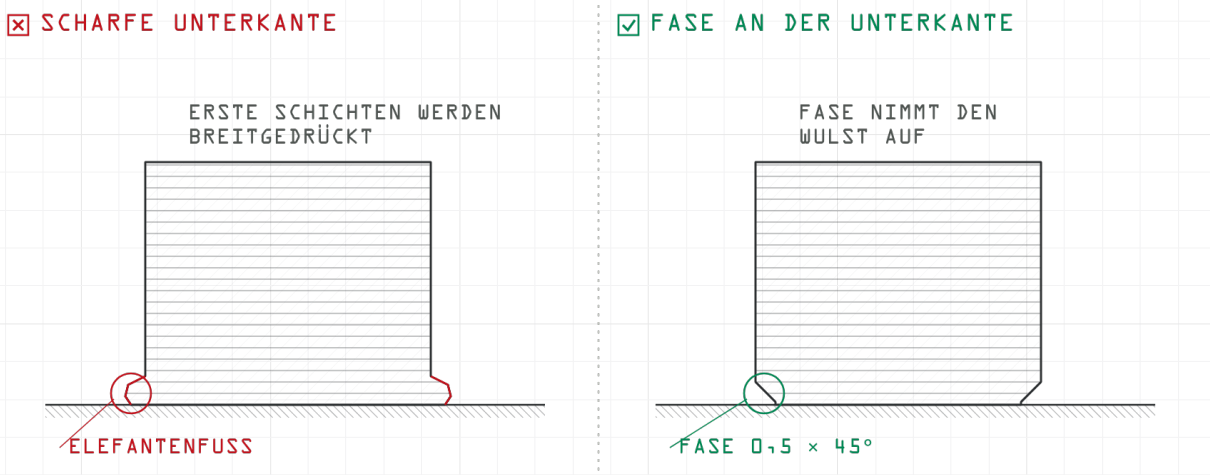


ABB. 22 Die ersten Schichten werden breitgedrückt. Eine kleine Fase an der Unterkante nimmt den Wulst auf.

MASSE ÄNDERN SICH NACH DEM DRUCK

Ein Bauteil hat nach dem Druck noch nicht seine endgültigen Maße:

- **Tempern** lässt Polyamid schrumpfen, stark richtungsabhängig (WP003). Den Schrumpf an einem Probekörper messen und im CAD vorhalten.
- **Feuchteaufnahme** lässt Polyamid quellen. Passungen im Zustand prüfen, in dem das Bauteil eingesetzt wird.
- **Wärmeausdehnung** ist bei F3 PA-CF Pro in Aufbaurichtung rund fünfmal so groß wie in Bahnrichtung (DLR). Kritische Passungen in der Bauebene anordnen.

ABB. 23: MASSE ÄNDERN SICH NACH DEM DRUCK

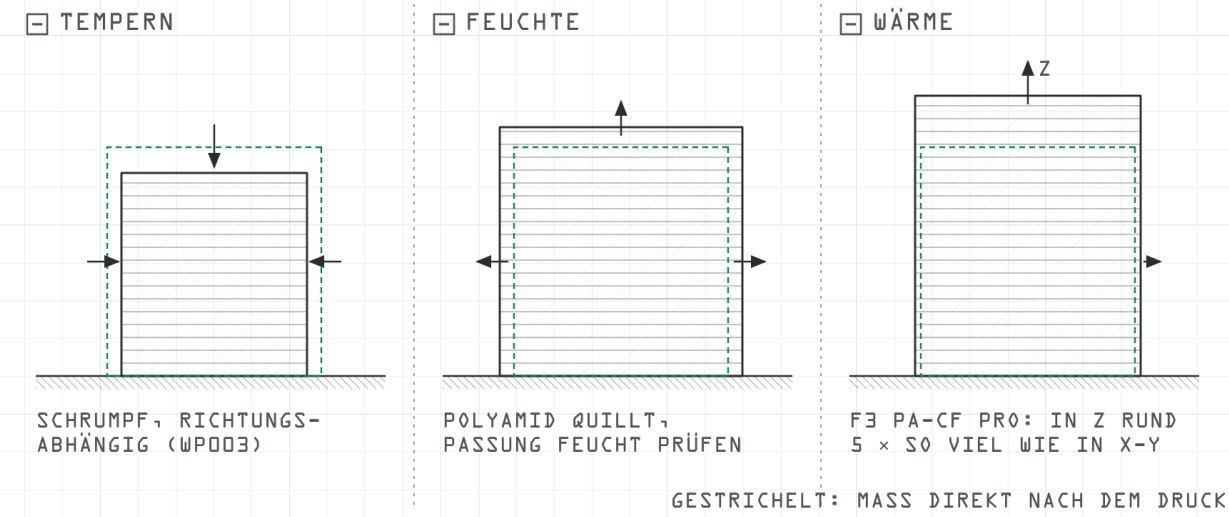


ABB. 23 Nach dem Druck ändern Tempern, Feuchte und Wärme die Maße. Kritische Passungen im Einsatzzustand prüfen.

Ein Probedruck mit einer Reihe von Bohrungen und Zapfen in den geplanten Maßen ist der schnellste Weg zu verlässlichen Passungen. Er zeigt für Material, Drucker und Profil, wie viel Spiel tatsächlich nötig ist, und lässt sich für spätere Projekte wiederverwenden.

Wird das Bauteil getempert oder im feuchten Zustand eingesetzt, sollte der Probekörper denselben Weg gehen. Nur dann zeigen die gemessenen Werte, was im Einsatz zu erwarten ist.

07 VERBINDUNGEN

Die Verbindung ist bei FFF-Baugruppen oft der schwächste Punkt. Welche Verbindung passt, hängt davon ab, wie oft sie gelöst wird und welche Last sie trägt.

VERBINDUNG	GEEIGNET FÜR	MONTAGEZYKLEN
Gewindeeinsatz (Messing)	tragende, oft gelöste Schraubverbindungen	viele
Gewinde direkt im Kunststoff	selten gelöste Verbindungen, kleine Kräfte	wenige
Mutter in Tasche	hohe Kräfte, einfach und billig	viele
Schnapphaken	Deckel, Gehäuse, werkzeuglose Montage	je nach Auslegung
Kleben	dauerhafte Verbindung von Teilbauteilen	einmalig

TAB. 3 Verbindungen.

GEWINDEEINSÄTZE UND SCHRAUBDOME

- Bohrung nach Angabe des Einsatzherstellers, mit kleiner Fase als Einführhilfe.
- Um die Bohrung 4 bis 6 Konturen, damit der Einsatz in vollem Material sitzt.
- Schraubdome mindestens doppelt so dick wie der Außendurchmesser des Einsatzes, am Fuß verrundet und mit Rippen an die Wand angebunden.
- Die Bohrungsachse möglichst in Aufbaurichtung legen. Dann läuft die Auszugskraft über viele Konturen statt über eine Schichtgrenze.
- Einschmelzen erst nach dem Tempern (WP003).

ABB. 24: GEWINDEEINSÄTZE UND SCHRAUBDOME

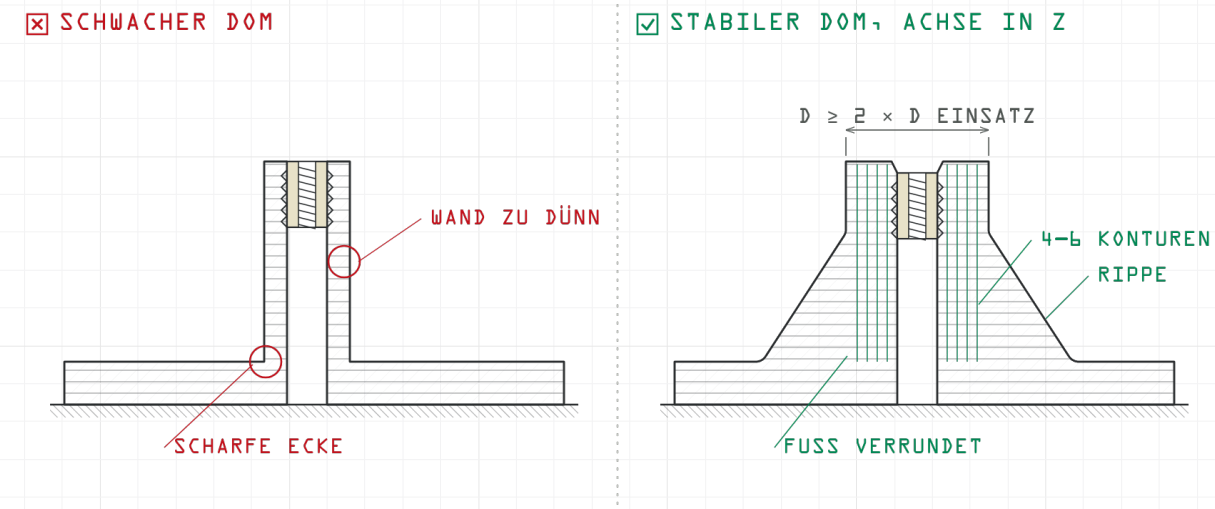


ABB. 24 Ein tragfähiger Schraubdom: Durchmesser mindestens das Doppelte des Einsatzes, viele Konturen, verrundeter Fuß, Rippen zur Wand.

MUTTERN IN TASCHEN

Sechskanttaschen lassen sich ohne Stützen drucken, wenn sie von oben eingelegt werden. Ein kurzer Druckstopp auf der passenden Schichthöhe schließt die Mutter ganz ein. Das ist die günstigste Lösung für hohe Kräfte.

ABB. 25: MUTTERN IN TASCHEN

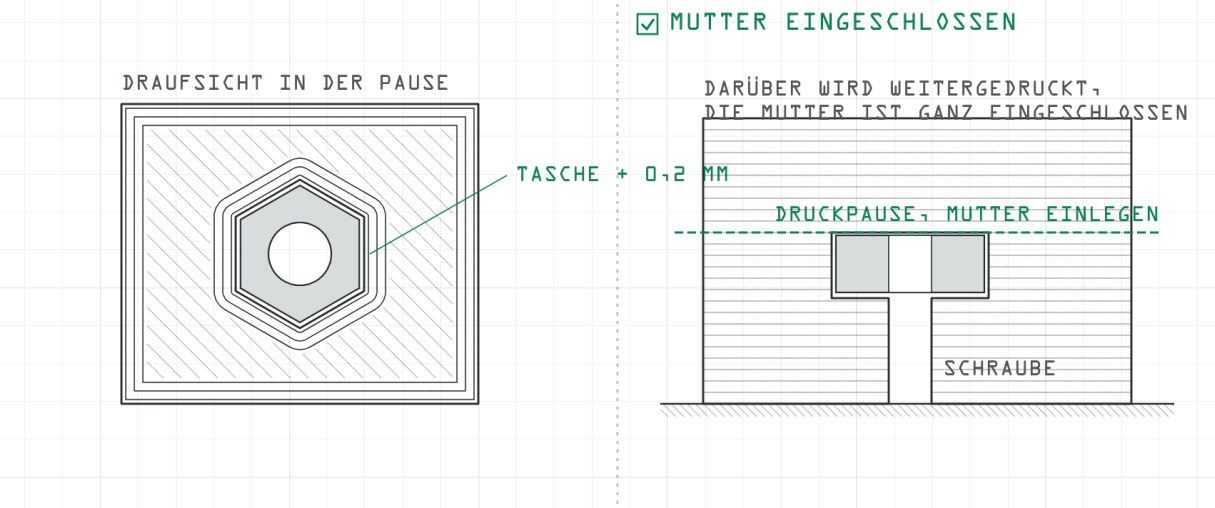


ABB. 25 Mutter in Tasche: Druckpause auf der passenden Schichthöhe, Mutter einlegen, weiterdrucken.

SCHNAPPHAKEN

Polyamid ist für Schnapphaken gut geeignet, weil es zäh ist und viel Dehnung verträgt.

- **Liegend drucken,** sodass der Haken in der Bauebene biegt (Kapitel 03). In z sollte die zulässige Dehnung halbiert werden.
- **Fuß verrunden,** mindestens 1 mm. Scharfe Ecken am Fuß sind die häufigste Bruchstelle.
- **Konisch auslegen:** Ein Haken, der zur Spitze dünner wird, verteilt die Dehnung gleichmäßiger.
- **Spiel:** etwa 0,5 mm zum Gegenstück.
- **Faserverstärkte Typen** sind steifer und dehnen weniger. Für Schnapphaken ist ungefülltes F3 PA Pure Pro oder F3 PA Pure Lite die bessere Wahl.
- **Konditionieren** vor der ersten Montage, weil trockenes Polyamid spröder ist (WP003).

ABB. 26: SCHNAPPHAKEN

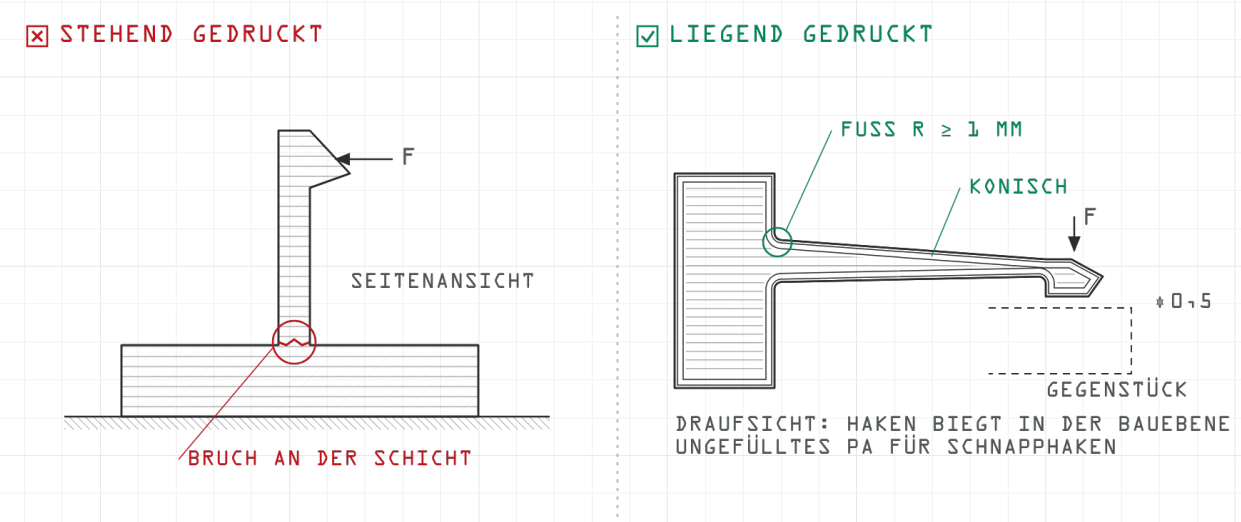


ABB. 26 Schnapphaken liegend drucken, damit sie in der Bauebene biegen; konisch auslegen, Fuß verrunden, Spiel zum Gegenstück vorsehen.

Welche Verbindung gewählt wird, sollte früh feststehen, weil sie die Geometrie um die Verbindungsstelle bestimmt: Gewindeeinsätze brauchen Material und Konturen, Muttern eine Tasche und einen Druckstopp, Schnapphaken eine Ausrichtung in der Bauebene.

08 VERZUG VERMEIDEN

Verzug entsteht, weil jede neue Schicht beim Abkühlen schrumpft und an der darunterliegenden zieht. Die Kräfte summieren sich über die Länge des Bauteils und heben Ecken vom Druckbett. Teilkristalline Kunststoffe wie Polyamid schrumpfen dabei stärker als amorphe.

ABB. 27: VERZUG VERMEIDEN

SCHNITT . WIE VERZUG ENTSTEHT

DIE ZUGKRÄFTE SUMMIEREN SICH ÜBER DIE LÄNGE DES BAUTEILS
UND HEBEN DIE ECKEN VOM DRUCKBETT. POLYAMID SCHRUMPFT
ALS TEILKRISTALLINER KUNSTSTOFF STÄRKER ALS AMORPHE.

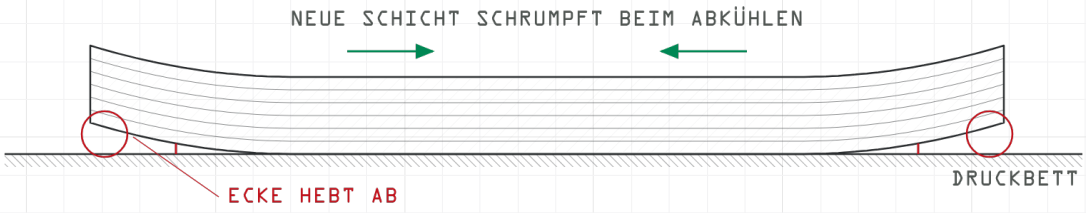


ABB. 27 So entsteht Verzug: Jede neue Schicht schrumpft beim Abkühlen, die Kräfte summieren sich und heben die Ecken vom Druckbett.

KONSTRUKTIV GEGENSTEUERN

- **Ecken verrunden.** In scharfen Ecken konzentrieren sich die Schrumpfkräfte. Schon Radien von 3 bis 5 mm in der Grundfläche helfen deutlich.
- **Große ebene Flächen auf dem Druckbett vermeiden** oder mit Nuten und Aussparungen unterbrechen.
- **Gleichmäßige Wandstärken.** Dicke Bereiche kühlen langsamer und ziehen dünne mit.
- **Lange, schlanke Bauteile** diagonal im Bauraum anordnen oder teilen.
- **Ohren an den Ecken:** kleine, dünne Scheiben an den Ecken der ersten Schicht vergrößern die Haftfläche und werden nach dem Druck abgetrennt.

ABB. 28: KONSTRUKTIV GEGENSTEUERN

DRAUFSICHT . GRUNDFLÄCHE GEGEN VERZUG

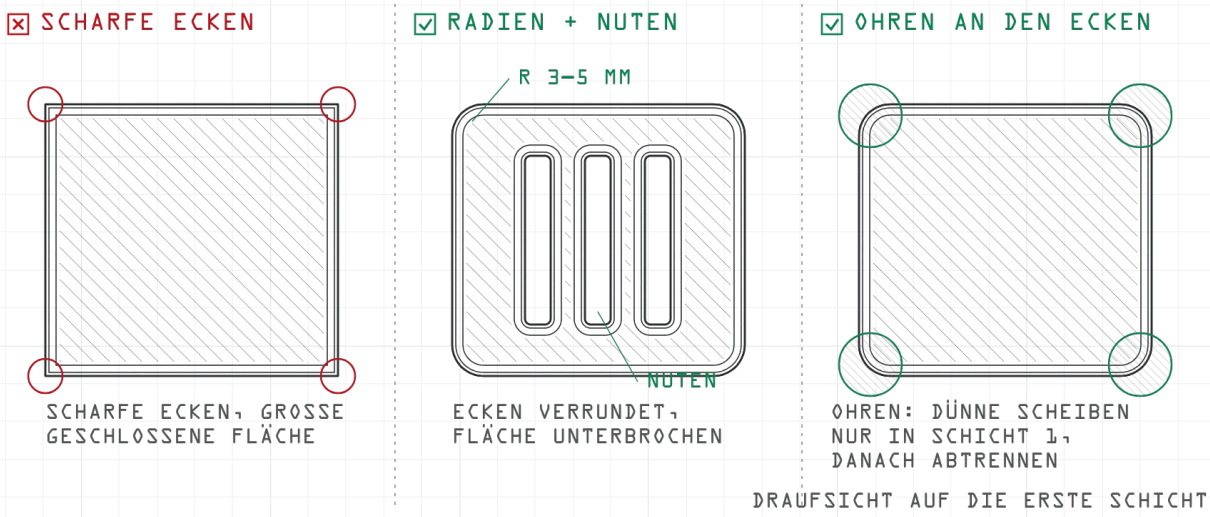


ABB. 28 Gegen Verzug in der Grundfläche: Ecken verrunden, große Flächen unterbrechen, Ohren an den Ecken.

ABB. 29: KONSTRUKTIV GEGENSTEUERN

DRAUFSICHT . LANGE BAUTEILE IM BAURAUM

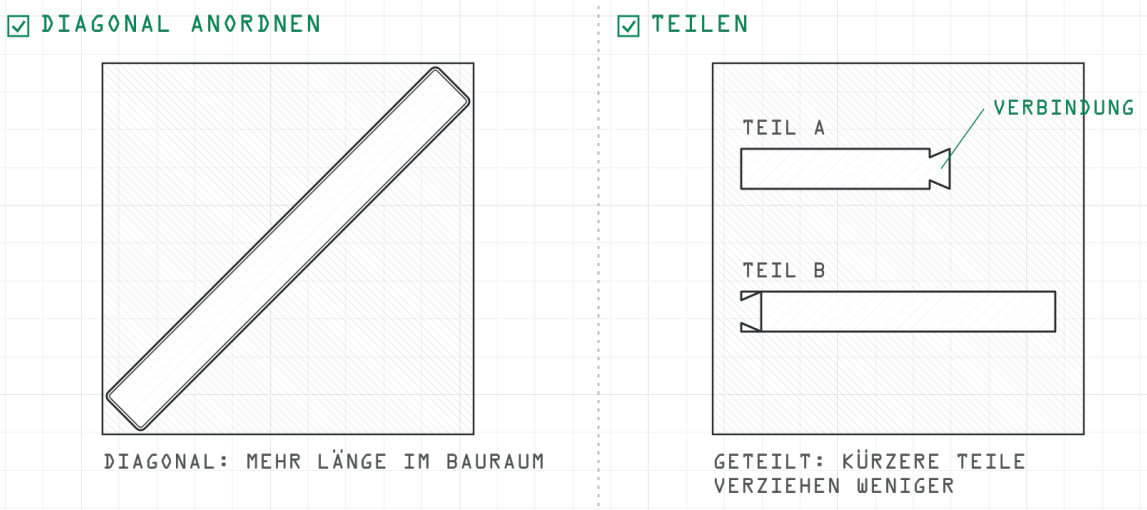


ABB. 29 Lange, schlanke Bauteile diagonal im Bauraum anordnen oder teilen.

MATERIAL UND PROZESS

- **Faserverstärkte Filamente wählen,** wo es die Anwendung erlaubt. Die Fasern behindern den Schrumpf in Bahnrichtung. F3 PA-CF Pro zeigt laut Datenblatt sehr geringen Verzug.
- **Druckbett mit guter Haftung:** Für Polyamid eignen sich Carbon-Druckplatten, wie sie Fiberthree anbietet.

- **Geschlossener, warmer Bauraum** senkt den Temperaturunterschied zwischen frischer und kalter Schicht.
- **Trockenes Filament.** Feuchtes Polyamid druckt mit Blasen und schlechterer Schichthaftung, was Verzug und Risse begünstigt (WP002).

09 FASERVERSTÄRKTE FILAMENTE

Mit Fasern wird die Bahnführung im Slicer zum Konstruktionswerkzeug. Die Fasern richten sich beim Extrudieren entlang der Bahn aus. Wohin die Bahnen laufen, dorthin geht die Festigkeit (Kapitel 02).

BAHNEN NACH DER LAST FÜHREN

- **Konturen folgen der Kontur.** Bei Bauteilen mit Lasten entlang der Außenform tragen zusätzliche Konturen mehr als Füllung, weil ihre Fasern in Lastrichtung liegen.
- **Füllwinkel ausrichten.** Bei flachen, länglichen Bauteilen den Winkel der Füllung in Richtung der Hauptlast legen.
- **Bohrungen umschließen.** Konturen um Bohrungen leiten die Last wie ein Faserring um die Bohrung herum.

ABB. 30: BAHNEN NACH DER LAST FÜHREN

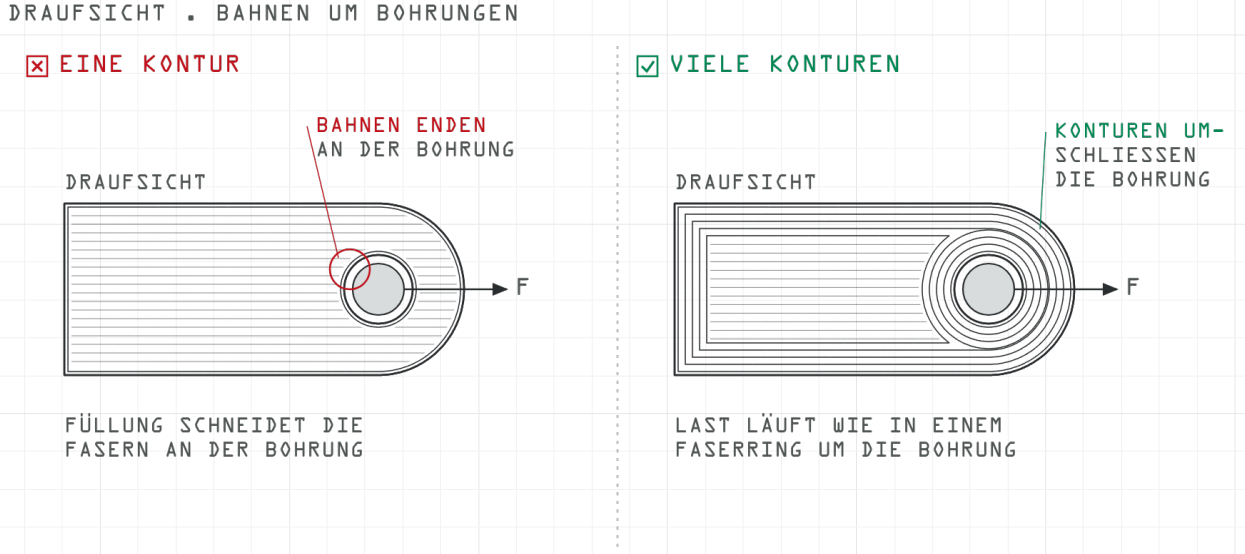


ABB. 30 Mit Fasern trägt, was die Bahnen umschließen: Konturen um eine Bohrung leiten die Last wie ein Faserring.

ABB. 31: BAHNEN NACH DER LAST FÜHREN

DRAUFSICHT . FÜLLWINKEL UND LASTRICHTUNG

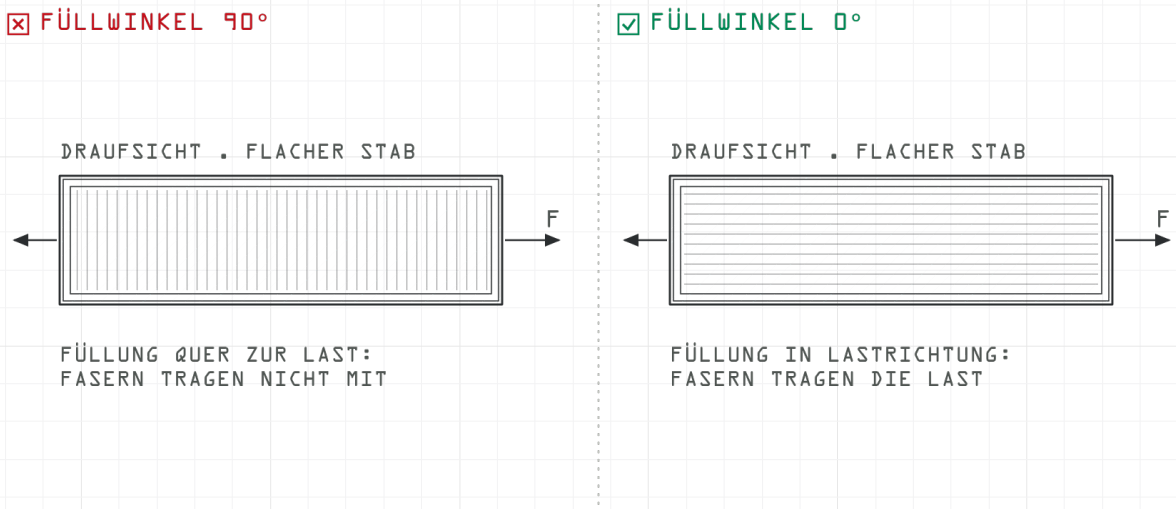


ABB. 31 Bei flachen Bauteilen den Füllwinkel in Richtung der Hauptlast legen.

DÜSE UND DETAILGRÖSSE

- **Verschleißfeste Düse:** Carbon- und Glasfasern schleifen Messingdüsen schnell auf. Gehärteter Stahl ist das Minimum, Hartmetall oder Rubin halten länger.
- **Durchmesser:** Das Datenblatt von F3 PA-CF Pro nennt mehr als 0,25 mm. Für Funktionsbauteile empfehlen wir 0,4 bis 0,6 mm. Die Probekörper im Datenblatt von F3 PA-GF30 Pro wurden mit 0,6 mm gedruckt.
- **Kleinste Details:** Wandstärken und Stege nicht unter zwei Bahnbreiten, Schriften und Gravuren nicht feiner als die Düse.
- **Schichthöhe:** eher größer wählen. Dickere Schichten verbessern den Fluss und die Schichthaftung faserverstärkter Schmelzen.

ABB. 32: DÜSE UND DETAILGRÖSSE

SCHNITT . KLEINSTE DETAILS

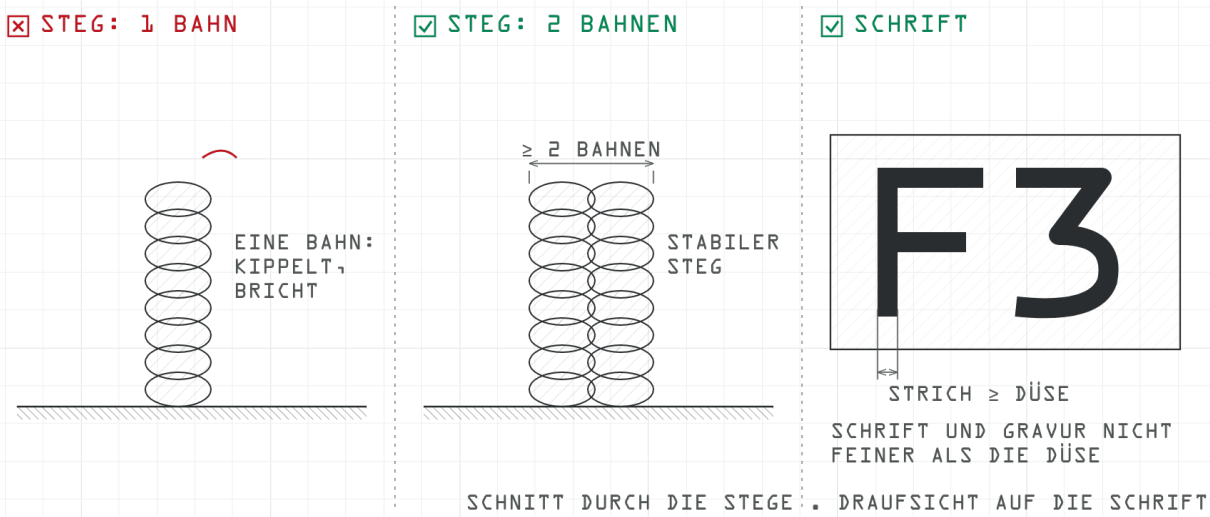


ABB. 32 Stege nicht unter zwei Bahnbreiten, Schriften und Gravuren nicht feiner als die Düse.

WERKSTOFF PASSEND ZUR AUFGABE WÄHLEN

ANFORDERUNG	EMPFEHLUNG
Maximale Steifigkeit und Festigkeit	F3 PA-CF Pro
Hohe Druckfestigkeit, kostengünstig	F3 PA-GF30 Pro
Zähigkeit, Schnapphaken, Scharniere	F3 PA Pure Pro, F3 PA Pure Lite
Geringe Feuchteaufnahme, Maßstabilität	F3 PA-CF Lite (PA12)
Elektrostatisch ableitfähig	F3 PA ESD
Keine Wasseraufnahme, chemisch beständig	F3 PP GF 25

TAB. 4 Werkstoff passend zur Aufgabe wählen.

Die Bahnführung ist bei faserverstärkten Filamenten Teil der Konstruktion. Es lohnt sich, im Slicer die Bahnen in der Vorschau zu prüfen und gezielt anzupassen, statt die Standardeinstellungen zu übernehmen. Oft bringen zusätzliche Konturen oder ein angepasster Füllwinkel mehr als ein steiferes Material.

Für Details gilt die Düse als Grenze: Was feiner ist als zwei Bahnbreiten, lässt sich mit gefüllten Filamenten nicht sauber darstellen.

10 KONSTRUKTIONS-CHECKLISTE

Vor der Freigabe zum Druck:

01	Hauptlast liegt in der Bauebene, kein Zug über Schichtgrenzen
02	Kerben und Querschnittssprünge liegen nicht quer zur Aufbaurichtung
03	Wandstärken sind ein Vielfaches der Bahnbreite, tragende Wände mindestens 4 Bahnen
04	Flächen sind mindestens 45° gegen die Bauplatte geneigt oder bewusst gestützt
05	Unterkanten haben Fasen statt Radien, waagerechte Bohrungen Tropfenform
06	Passungen haben Spiel nach Tabelle, enge Maße werden nachbearbeitet
07	Schrumpf durch Tempern ist vorgehalten (WP003)
08	Gewindeeinsätze haben genügend Material und Konturen
09	Schnapphaken liegen in der Bauebene, mit verrundetem Fuß
10	Ecken in der Grundfläche sind verrundet, große Flächen unterbrochen
11	Werkstoff und Düse passen zur Aufgabe
12	Filament ist getrocknet (WP002)

Wenn Sie unsicher sind, ob ein Bauteil sich so drucken lässt: Unser Engineering passt CAD-Daten an den FFF-Prozess an und prüft die Machbarkeit.

11 FAZIT

Wie stark ein FFF-Bauteil ist, entscheidet sich zum größten Teil im CAD. Wer die Hauptlast in die Bauebene legt, Wände auf die Bahnbreite abstimmt, Überhänge wegkonstruiert und Maßänderungen durch Tempern und Feuchte vorhält, bekommt Bauteile, die sich zuverlässig drucken lassen. Die Checkliste in Kapitel 10 fasst die Regeln für die Freigabe zusammen.

Wenn ein Bauteil sich nicht eindeutig zuordnen lässt, hilft ein Probedruck in der geplanten Ausrichtung. Er zeigt schneller als jede Berechnung, ob Ausrichtung, Wandstärken und Passungen zusammenpassen.

QUELLEN

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

[2] Hambali, R. H.; Celik, H. K.; Smith, P. C.; Rennie, A. E. W.; Ucar, M.: Effect of Build Orientation on FDM Parts: A Case Study for Validation of Deformation Behaviour by FEA. iDECON 2010, International Conference on Design and Concurrent Engineering, Melaka, 2010, S. 224–228

[3] Kozior, T.; Kundera, C.: Evaluation of the influence of parameters of FDM technology on the selected mechanical properties of models. Procedia Engineering 192 (2017), S. 463–468. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.080

[4] VDI 3405 Blatt 3.4: Gestaltungsempfehlungen für die Bauteilfertigung mit Materialextrusionsverfahren (2021). https://vdi.de/richtlinien/details/vdi-3405-blatt-34-additive-manufacturing-processes-design-rules-for-part-production-using-material-extrusion-processes

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. Dazu gehören FFF-gerechte CAD-Anpassungen, Slicer-Einstellungen und Empfehlungen zu Faserverstärkung und Nachbearbeitung.

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	Tempern, Konditionieren, Nachbearbeiten
WP004	**Fertigungsgerechtes Konstruieren für den FFF-Prozess (dieses Paper)**	**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. 5 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