

FDM-Polymere

Ein technisches Nachschlagewerk

Polymerchemie, mechanische und thermische Eigenschaften, Kalibrierungshinweise, Grenzen der Nachbearbeitung und Markenübersichten für die Polymerfamilien, die in der additiven Fertigung mit FFF/FDM für technische Anwendungen vorherrschen.

Autor	hyiger
Erstellt	Mai 2026
Hardware-Parameter	Prosumer-FFF: Düse bis ~350 °C, Bett bis ~120 °C, Kammer bis ~65 °C, gehärtete Düse (abriebfest)
Anwendungsbereich	Polyester, Polyolefine, Polyamide, Polycarbonat-Blends, Styrolkunststoffe, Elastomere, hochleistungsfähige Spezialpolymere
Kenntnisstand	Technischer Fachmann; setzt FDM-Grundkenntnisse voraus
Lizenz	CC BY-NC-ND 4.0 – kostenlose, nicht-kommerzielle Nutzung; siehe Anhang E

Inhaltsverzeichnis

Vorspann

Inhaltsverzeichnis	2
Vorwort	3

Teil I – Grundlagen

1. Umfang, Methodik und Hinweise zu den Daten	5
2. FDM-Polymer-Taxonomie und das Kennzeichnungsproblem	7
3. Allen FDM-Polymeren gemeinsame Prozessphysik	9
4. Hardware-Anforderungsstufen	12
5. Sicherheit, Emissionen und Nachhaltigkeit	14

Teil II – PLA

6. PLA-Familie	17
----------------	----

Teil III – Polyester

7. PETG und die Copolyester-Familie	20
8. PCTG – Ein tiefer Einblick	22
9. PET und verstärkte PET-Typen	28

Teil IV – Styrolkunststoffe

10. Styrolkunststoffe: ABS, ASA, HIPS	32
---------------------------------------	----

Teil V – Polyolefine

11. Polypropylen (PP) – Ein tiefer Einblick	38
12. Polyethylen (PE) und andere Polyolefine	45

Teil VI – Polyamide

13. Aliphatische Nylons (PA6, PA66, PA12, PA612, PA11)	47
14. PPA / semi-aromatische Polyamide – vertiefender Einblick	53

Teil VII – Polycarbonate

15. PC und PC-Mischungen – Ein tiefer Einblick	63
--	----

Teil VIII – Spezial- und Hochleistungskunststoffe

16. TPU, TPEE, PEBA und geschäumte Elastomere	73
17. PMMA, POM, PVDF	79
18. PPS, PSU, PPSU, PEI	82
19. PAEK-Familie (PEEK, PEKK)	85
20. Lösliche Stützpolymere (PVA, BVOH, firmeneigen)	87
21. Nischenprodukte im Bereich biologisch abbaubarer Kunststoffe (PHA, PCL, PVB)	89

Teil IX – Übergreifende Arbeitsabläufe

22. Entscheidungsrahmen für die Materialauswahl	92
23. Kalibrierungs-Workflow (vereinheitlicht)	94
24. Strategie zur Bettadhäsion nach Polymerfamilie	97
25. Drucken mit mehreren Materialien und zwei Hotends	103
26. Nachbearbeitungsstrategien	105
27. Kosten- und Beschaffungslandschaft	107
28. Tribologische Filamente	109

Anhänge

A. Vergleich der Eigenschaften von Master-Kreuzpolymeren	113
B. Beispiele für kalibrierte Filamentprofile	117
C. Markenverzeichnis	119
D. Zusammengefasste Literaturhinweise	121
E. Lizenz und Nutzungsbedingungen	124
Index	126

Vorwort

Dieser Band ist ein umfassendes technisches Nachschlagewerk zu den im technischen FFF/FDM-3D-Druck verwendeten Polymeren und deckt die Standard-, technische und Hochleistungsproduktfamilien ab, mit denen Fachleute in der Praxis voraussichtlich konfrontiert werden. Er verwendet durchgehend ein einheitliches Nummerierungsschema, einen einheitlichen Begriffsbestand und ein einheitliches Literaturverzeichnis. Inhalt, der allen Polymerfamilien gemeinsam ist – Prozessphysik, Hardware-Stufen und Emissionssicherheit – ist in Teil I (Grundlagen) und Teil IX (Übergreifende Arbeitsabläufe) zusammengefasst, sodass er nur einmal erwähnt und nicht wiederholt wird. Die polymerfamilienspezifischen Inhalte sind in den Teilen II–VIII organisiert, wobei jedes Kapitel dem gleichen Aufbau folgt (Chemie → Eigenschaftsprofil → Markenlandschaft → Druckverfahren → Anwendungstauglichkeit → Nachbearbeitung), sofern das zugrunde liegende Material dies zulässt.

Die Reihenfolge der Polymerfamilien folgt der groben Achse von Standard- zu Spezialmaterialien, die Praktiker tatsächlich durchlaufen: zuerst Standardpolymere (PLA, PETG, PCTG) und Styrole (ABS, ASA, HIPS), dann technische Polyolefine (PP), Polyamide (aliphatische Nylons und PPA) sowie Polycarbonat-Blends, dann die Hochleistungs-Spezialklasse (PPS, PSU/PPSU/PEI, PAEK) und schließlich die Nischenbereiche Elastomere, Stützmaterialien und biologisch abbaubare Kunststoffe. Dies ist keine Rangfolge nach Leistungsfähigkeit – es handelt sich um eine Einstufung danach, wie ein typischer technischer Fertigungsprozess vom Prototyping bis zum funktionalen Einsatz verläuft.

Drei redaktionelle Grundsätze gelten durchgehend. Erstens stammen die Datenwerte aus den technischen Datenblättern der Hersteller, sofern nicht ausdrücklich anders angegeben; Werte von gedruckten Proben werden den Werten von Granulat bevorzugt, wenn Anbieter beide offenlegen, und Datenpunkte für Granulatqualitäten werden bei Verwendung gekennzeichnet. **Zweitens** werden Marketingaussagen der Anbieter (insbesondere zu Höchstwerten der Hitzebeständigkeit, Konformität mit Lebensmittelkontaktvorschriften und Emissionen) als solche ausgewiesen und relativiert, wenn die empirische Grundlage schwach ist. **Drittens** sind die vom Autor selbst am Prüfstand gemessenen Kalibrierungswerte für bestimmte Filament- und Düsenkombinationen in Anhang B als Anwendungsbeispiele für eine repräsentative Prosumer-Konfiguration enthalten – diese sind als gemessen und nicht als vom Hersteller bereitgestellt gekennzeichnet und sollten als Ausgangspunkte und nicht als allgemeingültige Werte betrachtet werden.

Was dieses Dokument *nicht* ist: Es ist kein Tutorial für FFF/FDM-Anfänger, kein umfassender Leitfaden zur Fehlerbehebung bei Druckfehlern, keine Empfehlungsmaschine für bestimmte Projekte und kein Ersatz für die Kalibrierung pro Spule auf der tatsächlichen Maschine. Die angegebenen Kalibrierungswerte sind Ausgangspunkte. Markenübersichten spiegeln die öffentliche Verfügbarkeit von technischen Datenblättern (TDS) Stand Anfang 2026 wider und werden veralten; die Grundlagen der Polymerchemie und die Prinzipien der Prozessphysik hingegen nicht.

Zwei Polymerfamilien, die technisch gesehen in den Anwendungsbereich fallen, werden weniger ausführlich behandelt, als sie es verdienen. PPS (Polyphenylensulfid), das in CF-gefüllten Typen von Bambu, Polymaker Fiberon und Flashforge erhältlich ist, wird auf Familienebene in Kapitel 18 zusammengefasst, verfügt jedoch über keine eigene Markenübersicht. Die PAEK-Familie (PEEK, PEKK, PEKK-CF) wird in Kapitel 19 in ähnlicher Weise zusammengefasst. Beide werden hier auf Familienebene behandelt, anstatt einer eigenen Markenübersicht zu erhalten.

Schließlich wird auf drei Datensätze und Tools verwiesen, die in diesem Band als Grundlage dienen, jedoch nicht wiedergegeben werden: eine umfangreiche Sammlung unabhängiger Filamenttests durch Dritte, die Zugfestigkeit, Schichthaftung und thermische ; die vom Autor veröffentlichte statistische Analyse von Community-Threads zur Fehlerbehebung (~910 Threads, Klassifikator mit 15 Kategorien); sowie die auf Printables veröffentlichte Kalibrierungsmethodik des Autors. Diese finden sich in den Referenzen in Anhang D, wo einzelne Datenpunkte daraus entnommen wurden.

Teil I Grundlagen

Umfang und Methodik, Polymertaxonomie, Prozessphysik, die für jedes FDM-Polymer gilt, Stufen der Hardwareanforderungen sowie Sicherheits- und Emissionsaspekte – einmal beschrieben, durchgehend referenziert.

1. Umfang, Methodik und Hinweise zu den Daten

Die Fused-Filament-Fabrication – auch als FFF oder FDM bezeichnet – ist überwiegend ein thermoplastischer Prozess: Ein Polymer wird geschmolzen, durch eine Düse extrudiert und verfestigt sich wieder als geschweißte Raupe, die mit der vorherigen Schicht verbunden ist. Nahezu jeder Thermoplast, der zu einem stabilen Filament gezogen und innerhalb des Temperaturbereichs eines Druckers wieder geschmolzen werden kann, ist einsetzbar; in der Praxis gruppiert sich der kommerzielle Filamentmarkt in neun Polymerfamilien, die in diesem Band behandelt werden.

1.1 Behandelte Polymerfamilien

- **PLA:** das Standardmaterial; ein aliphatischer Polyester (siehe Kapitel 9, warum es eine eigene Familie bildet).
- **Polyester und Copolyester:** PETG, PET, PCTG, CPE, nGen, t-glase, AthenaX.
- **Styrole:** ABS, ASA, HIPS.
- **Polyolefine:** PP und PE (ungefüllt, GF-verstärkt, CF-verstärkt).
- **Polyamide:** aliphatische Nylons (PA6, PA66, PA12, PA612, PA11) und die PPA-Familie.
- **Polycarbonat und PC-Blends:** PC/ABS, PC/PBT, PC-CF, PC-GF, PC-PTFE, ESD-PC, FR-PC.
- **Elastomere:** TPU, TPE, TPEE.
- **Hochleistungsspezialmaterialien:** PMMA, POM, PVDF, PPS, PSU, PPSU, PEI, PAEK (PEEK, PEKK).
- **Unterstützung und Nischenprodukte:** PVA, BVOH, PVB, PHA, PCL.

1.2 Was bewusst nicht berücksichtigt wird

Harzbasierte Verfahren (SLA, DLP, LCD, MSLA), Pulverbettverfahren (SLS, MJF, MJ), Metall-AM und industrielles FGF mit Granulatbeschickung werden nicht behandelt. Der technische Inhalt hier gilt für die Desktop- und Prosumer-FFF/FDM-Hardwareklasse (typische maximale Düsentemperatur 350 °C, Bett 120 °C, optionale beheizte Kammer bis 65 °C). Die Abschnitte zu den ultrahochtemperaturbeständigen Materialien PAEK und PEI in den Kapiteln 18–19 gehen über diesen Rahmen hinaus und benennen die erforderliche Hardware.

1.3 Datenhierarchie und Zitierpraxis

Die Eigenschaftsdaten in diesem Band folgen einer strengen Quellenhierarchie. **Stufe 1** sind technische Datenblätter (TDS) der Hersteller speziell für Filamente (nicht Granulat/Harz), mit Werten für gedruckte Proben, sofern diese im TDS ausdrücklich angegeben sind. **Ebene 2** sind die TDS des Harzherstellers für das zugrunde liegende Basispolymer (Eastman, BASF, Covestro, DuPont, Solvay), die herangezogen werden, wenn das Filament-TDS keine Angaben zu einer relevanten Eigenschaft enthält und das Filament

eindeutig auf diesem Harz basiert. Stufe 3 umfasst begutachtete Fachliteratur und unabhängige Tests von Druckmustern durch Dritte

. Wenn die Marketingaussagen des Anbieters im Widerspruch zu den Werten im Datenblatt stehen, hat das Datenblatt Vorrang; wenn die Werte im Datenblatt im Widerspruch zu unabhängigen Tests stehen, werden beide angegeben und die Diskrepanz vermerkt.

1.4 Wichtige Vorbehalte, die der Leser beachten sollte

Anisotropie ist strukturell bedingt. FFF-Teile sind mechanisch anisotrop. Die angegebenen Zug- und Schlagfestigkeiten beziehen sich auf eine Belastung in XY-Richtung (die stärkste Richtung), sofern nicht ausdrücklich die Z-Richtung angegeben ist. Die Werte in Z-Richtung betragen bei ungefüllten Polymeren üblicherweise 40–60 % der Werte in XY-Richtung und bei den zähesten CF-verstärkten Typen 60–85 % der Werte in XY-Richtung. Eine Konstruktion, die den Druck in Z-Richtung belastet, ohne dass zuvor Tests mit Halterungen auf der tatsächlichen Maschine durchgeführt wurden, ist reine Spekulation.

Die TDS-Werte des Harzes übertreiben die gedruckte Leistung. Die Zugfestigkeit eines Polymers im Spritzguss liegt unter guten Bedingungen typischerweise 10–30 % über der FDM-gedruckten Zugfestigkeit desselben Polymers und unter typischen Bedingungen sogar noch deutlicher. Die Lücke bei der Kerbschlagzähigkeit ist größer: FDM-Teile mit Schichtbindung können 50–70 % der Izod-Werte des Harztyps einbüßen. Wenn in einem Filament-TDS der Harzwert anstelle eines

Wert für gedruckte Proben, ist dies in der Regel an der angegebenen Prüfmethode erkennbar (ISO 527 für „Prüfstäbe“ statt für gedruckte Proben) und wird in den Kapiteln zu den Polymeren entsprechend gekennzeichnet.

HDT, T_g , Vicat und Dauergebrauchstemperatur sind nicht austauschbar. Die Wärmeformbeständigkeitstemperatur (HDT) variiert je nach Belastung: HDT@0.45 MPa ist ein großzügiger, marketingfreundlicher Wert, HDT@1.8 MPa entspricht eher an der technischen Realität. Die Vicat-Erweichungstemperatur gibt ein völlig anderes Phänomen wieder (Nadelpenetration). Glasübergang (T_g) und Schmelzpunkt (T_m) sind die Anker der Polymerphysik. Bei amorphen Polymeren (PETG, PCTG, ABS, ASA, PC) wird die Einsatztemperatur durch T_g begrenzt – Teile kriechen bei anhaltender Belastung oberhalb dieser Temperatur. Bei teilkristallinen Polymeren (PA, PP, PE, PPS, PEEK) bestimmt die Kristallinität das tatsächliche Wärmeverhalten, und ein gedrucktes Teil mit geringer Kristallinität verformt sich weit unterhalb der HDT des Kunststoffes.

Feuchtigkeit ist eine Variable erster Ordnung. Polyamide, lösliche Stützstrukturen, PCTG-CF, PP-GF (obwohl das Polymer nicht hygroskopisch ist) und die meisten Hochleistungspolymere verlieren bei Nässe an Druckqualität und mechanischer Leistungsfähigkeit. Aktive Trocknung ist eine Hardware-Anforderung, keine optionale Annehmlichkeit. In den Kapiteln zu den Polymeren wird aufgezeigt, welche Materialien fehlertolerant sind (PLA, PP, PCTG ohne Füllstoff) und welche nicht (PA6, PVA, PEI, PEEK).

Markenunterschiede innerhalb einer einzigen Polymerklasse. „PETG“ von einem Anbieter und „PETG“ von einem anderen sind streng genommen nicht dasselbe Material – sie haben zwar die gleiche Grundstruktur, aber Additivpakete, Schlagzähmodifikatoren, Farbstoffe und die Qualität des Basis-Harzes variieren so stark, dass sich die Zugfestigkeit um 20 %, die Dehnung um 100 % und die Druckbarkeit erheblich verändern. Die Markenübersichten in jedem Kapitel dokumentieren diese Abweichungen, sofern die TDS-Daten der Anbieter dies belegen.

2. FDM-Polymer-Taxonomie und das Problem der Kennzeichnung

Marketingbezeichnungen für Filamente sind keine chemischen Bezeichnungen. Drei hartnäckige Verwechslungen dominieren die FDM-Materiallandschaft und sind die häufigste Ursache für Fehlkäufe.

2.1 Das PETG-/PCTG-/PCT-Kontinuum

Alle drei sind Terephthalat-Copolyester, die aus Terephthalsäure (TPA) und einer Glykollmischung aufgebaut sind. Das vorherrschende Glykol bestimmt den Namen. Bei einem Anteil von weniger als 50 Mol-% 1,4-Cyclohexandimethanol (CHDM) in der Diolfraction handelt es sich um PETG; bei einem CHDM-Anteil von über 50 Mol-% um PCTG; reines TPA + CHDM ohne Ethylenglykol ergibt PCT, einen teilkristallinen Polyester mit einem Schmelzpunkt von 285 °C, der für Desktop-FDM ungeeignet ist. Eastman Tritan, das als Polycarbonat-Ersatz vermarktet wird, ist technisch gesehen ein Terpolymer aus TPA + CHDM + Tetramethylcyclobutandiol (TMCD); Filamente, die als „PCTG“ auf Basis von Tritan-Harz vermarktet werden, unterscheiden sich chemisch von generischem CHDM-reichem Copolyester „PCTG“, auch wenn beide die gleichen drei Buchstaben tragen.

2.2 PP, PPA, PPS – drei nicht miteinander verwandte Familien mit denselben Initialen

PP (Polypropylen) ist ein Polyolefin-Standardkunststoff, T_m unterhalb der Raumtemperatur, T_g bei ca. 160 °C, Shore D um 70, hydrophob, niedrige Oberflächenenergie. **PPA** (Polyphthalamid) ist ein halbaromatisches Polyamid – ein Nylon mit Phthalsäure im Grundgerüst – T_g 120–140 °C, T_m 290–320 °C, hygroskopisch. **PPS** (Polyphenylensulfid) ist ein aromatischer technischer Kunststoff mit nahezu universeller chemischer Beständigkeit und Dauereinsatztemperaturen über 200 °C. Die Polymere, Verarbeitungsfenster, Hardwareanforderungen, mechanischen Eigenschaften und Anwendungen haben im Wesentlichen nichts gemeinsam; lediglich die Anfangsbuchstaben stimmen überein.

2.3 Das Durcheinander um PAHT / HTN / PPA

„PAHT“ (Polyamid High-Temperature) ist eine Marketingkategorie, keine chemische Bezeichnung. Ursprünglich bezog sich der Begriff auf PPA-basierte Filamente um 2020–2022, wurde jedoch auch auf modifiziertes PA6, modifiziertes PA12 und PA6/66-Copolymere angewendet. Siraya Tech Fibreheart PAHT (vor 2024) war echte PPA-Chemie und wurde Ende 2024 in Fibreheart PPA umbenannt; Bambu Lab PAHT-CF basiert auf PA12, nicht auf PPA; BCN3D PAHT CF15 ist eine nicht näher bezeichnete Hochtemperatur-PA-Mischung; Qidi kennzeichnet sein Produkt auf der Verpackung selbst als „PAHT (PPA)“ und bestätigt damit die chemische Zusammensetzung. „HTN“ (High-Temperature Nylon), das von 3DXTech für die CarbonX HTN+CF-Produktlinie verwendet wird, ist auf chemischer Ebene funktional gleichbedeutend mit PPA. Das Ergebnis ist, dass Filamente mit den Bezeichnungen PAHT, HTN, PA-HT und PPA vier verschiedene Basispolymere umfassen; das technische Datenblatt, nicht der Produktname, ist der einzige verlässliche Identifikator.

2.4 „PC“ ist fast immer eine Legierung oder ein Verbundwerkstoff

Reines, unmodifiziertes Polycarbonat ist bei handelsüblichen Filamenten selten. Der PC-Markt im FDM-Bereich unterteilt sich in **Polymerlegierungen** (PC, gemischt mit einem anderen Polymer, um Verziehen zu reduzieren oder das mechanische Gleichgewicht zu verändern – am häufigsten PC/ABS oder PC/PBT) und **PC-Verbundwerkstoffe** (PC, gemischt mit Kohlefaser, Glasfaser, PTFE, leitfähigen Additiven oder flammhemmenden Paketen). Wenn ein Filament als „PC“ verkauft wird, geht aus dem TDS in der Regel hervor, dass es sich um eines dieser Produkte handelt – und die Eigenschaftsbandbreite, das Verarbeitungsfenster sowie die Druckbarkeit hängen alle davon ab, welche Legierungs- oder Compoundierungsstrategie verwendet wurde. Prusament PC Blend, Bambu PC und PolyMax PC sind die am besten dokumentierten „Allzweck-PC“-Produkte und sind allesamt Legierungen mit nicht näher bezeichneten Partnerpolymeren.

2.5 Bezeichnungen und Angaben zum Füllstoffgehalt

Der Verstärkungsgrad durch Carbon- und Glasfasern wird in der Regel als Gewichtsprozent angegeben, aber selten bestätigt: Eine „PC-CF“-Spule kann zwischen 10 % und 25 % geschnittene Carbonfasern enthalten, und der mechanische Leistungsbereich verschiebt sich innerhalb dieses Bereichs erheblich. Spectrum, Prusament, Fiberlogy, 3DXTech und Polymaker geben in der Regel den Faseranteil an (z. B. bedeutet Spectrum PCTG-CF10 10 % CF; Polymaker PA6-CF20 bedeutet 20 % CF). Bambu und mehrere Marken auf dem asiatischen Markt geben diesen nicht an. Wenn der Gehalt nicht angegeben ist, gilt als Faustregel, dass Modulwerte der gedruckten Proben im Bereich von 5–7 GPa auf etwa 15–20 % CF hindeuten; ein Modul über 9 GPa deutet auf 20 % oder mehr CF hin; ein Modul unter 4 GPa deutet auf weniger als 15 % CF hin (oder auf einen erheblichen Faserverlust während der Compoundierung).

3. Allen FDM-Polymeren gemeinsame Prozessphysik

Jeder FDM-Druck stößt unabhängig von der Polymerfamilie auf dieselben wenigen grundlegenden physikalischen Probleme. Wenn man diese einmal verstanden hat, lassen sich die polymerspezifischen Kapitel als Variationen gemeinsamer Themen lesen und nicht als fünf voneinander getrennte Regelwerke.

3.1 Schichtverschweißung und Anisotropie

Die Schicht-zu-Schicht-Haftung bei FDM wird durch die Interdiffusion von Polymerketten über die Grenze zwischen einer extrudierten Schmelzperle und der darunter liegenden, zuvor aufgetragenen Schmelzperle angetrieben. Der Diffusionsprozess erfordert Temperaturen oberhalb der Glasübergangstemperatur des Polymers (bei amorphen Polymeren) oder nahe/oberhalb des Schmelzpunktes (bei teilkristallinen Polymeren), ausreichend Zeit, bevor die Grenzfläche unter diese Schwellenwerte abkühlt, sowie einen angemessenen Druck (gesteuert durch den Extrusionsmultiplikator und die Linienbreite).

Das Ergebnis: Die Teile sind mechanisch anisotrop. Die Zugfestigkeit in XY-Richtung (Belastung parallel zur Bauplatte) ist am höchsten. Die Zugfestigkeit in Z-Richtung (Belastung senkrecht zu den Schichten) wird maßgeblich von der Qualität der Schichtverbindungen bestimmt und ist durchweg geringer. Bei ungefüllten, niedrigkristallinen Materialien wie PLA und PETG unter guten Druckbedingungen beträgt die Z-Festigkeit 60–85 % der XY-Festigkeit. Bei faserverstärkten Polymeren vergrößert sich der Abstand, da sich die Fasern in Druckrichtung ausrichten und nichts zur Z-Festigkeit beitragen: Z-Werte können bei PA6-CF oder PPA-CF 40–60 % der XY-Festigkeit betragen. Bei hochtemperaturbeständigen, teilkristallinen Polymeren wie PEEK, die unterhalb der für die vollständige Kristallisation erforderlichen Kammertemperatur gedruckt werden, kann die Z-Festigkeit unter 30 % der XY-Festigkeit fallen.

Praktische Konsequenzen: Konstruktionsbelastung tragender Teile so, dass die Hauptspannung in XY-Richtung ausgerichtet ist; erhöhen Sie die Anzahl der Wandschichten (3–5 Perimeter statt der üblichen 2), um die Schwäche der Zwischenlagen in den Wänden auszugleichen; erhöhen Sie die Drucktemperatur in Richtung des oberen Endes des empfohlenen Bereichs des Polymers für Teile, die in Z-Richtung belastet werden; reduzieren oder vermeiden Sie die Teilekühlung bei Polymeren, bei denen die Schichthaftung gering ist (PP, PC, PEEK, PPS); im Zweifelsfall testen Sie die tatsächliche Belastungsgeometrie mit Halterungen.

3.2 Verzug: Kristallisationsschrumpfung vs. thermische Kontraktion

Verziehen hat zwei unterschiedliche Mechanismen, die oft verwechselt werden. **Thermische Kontraktion** tritt bei jedem Polymer auf, wenn es vom Schmelzzustand auf Raumtemperatur abkühlt; die Maßänderung ist gering (0,4–1 % bei amorphen Polymeren) und reversibel, wenn das Teil wieder erwärmt wird. **Kristallisationsschrumpfung** tritt nur bei teilkristallinen Polymeren (PP, PE, PA, PPS, PEEK) auf, da sich beim Abkühlen geordnete kristalline Bereiche bilden; sie ist irreversibel (die Polymerketten verriegeln sich) und die Volumenänderung ist groß – 1,5–2,5 % bei Polypropylen, 2–3 % bei einigen Nylonsorten. Wenn sich diese Schrumpfung bei einem FFF-Druck Schicht für Schicht summiert, zieht die Komponente in der Ebene jeder Schicht nach innen und konzentriert die Spannung an den Kanten des Teils.

Dies erklärt, warum amorphe Polymere (ABS, PC, ASA) allein durch thermische Kontraktion verziehen – ihre absolute Schrumpfung ist gering, aber die Spannung konzentriert sich über große flache Flächen –, während teilkristalline Polymere (PP, PA) bei einer gegebenen Teilgröße weitaus stärker verziehen. Dies erklärt auch, warum Faserverstärkungen das Verziehen so effektiv reduzieren: Glas- und Kohlefasern kristallisieren nicht, schrumpfen thermisch nicht im gleichen Maße und schränken die Schrumpfung der Matrix physikalisch ein. Ein zu 30 % mit Glas gefülltes PP weist in Druckrichtung etwa ein Drittel der linearen Schrumpfung von ungefülltem PP auf; die Verformungsneigung verringert sich entsprechend von „praktisch nicht druckbar bei Teilen, die größer als einige Zentimeter sind“ auf „routinemäßig druckbar auf einem 250-mm-Bett“.

3.3 Bettadhäsion als Problem der Grenzflächenchemie

Die Bettadhäsion beruht im Wesentlichen auf Benetzung und intermolekularer Anziehung zwischen dem geschmolzenen Polymer der ersten Schicht und der Bauoberfläche. Polare Polymere (PLA, PETG, PCTG, ABS, PC, PA) weisen Wasserstoffbrückenakzeptoren und Dipole auf, die Wechselwirkungen mit polaren Bauoberflächen eingehen können – PEI (Polyetherimid, Oberflächenenergie

~40 mN/m) ist die vorherrschende Bauoberfläche, da sie diese gesamte Familie erfasst. Glas und pulverbeschichteter Stahl funktionieren über ähnliche polare Mechanismen mit etwas geringerer Energie.

Unpolare Polymere – allen voran Polypropylen mit einer Oberflächenenergie von etwa 30 mN/m – können keine polaren Gruppen für diese Wechselwirkungen aufweisen. PEI, Glas, Spiegel und pulverbeschichteter Stahl haften alle nicht an PP, unabhängig von der Betttemperatur. Die praktischen Lösungen lassen sich auf dasselbe Prinzip zurückführen: Bringe eine Polypropylen-kompatible Oberfläche auf dem Druckbett an und lass die Selbsthaftung von PP auf PP den Druck tragen. Aus diesem Grund haben sich Druckerhersteller und die breitere PP-Community auf spezielle PP-beschichtete Druckplatten, PP Verpackungsklebeband und PP-spezifische Klebstoffe (Magigoo PP). Siehe Kapitel 24, für die zusammengefasste Übersicht nach Polymerfamilien
Leitfaden zur Haftung.

3.4 Feuchtigkeit: Welche Polymere sind anfällig und warum

Die Feuchtigkeitsempfindlichkeit von Polymeren im FDM-Verfahren hat zwei deutliche Folgen: eine Verschlechterung der Druckqualität (Fadenbildung, Auslaufen, Oberflächenrauheit, Blasenbildung, Mikroporen im Druckprofil) und eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften (Verlust der Steifigkeit, da Wasser die Amidbindungen in Polyamiden plastifiziert; hydrolytische Kettenspaltung bei einigen Polyestern bei erhöhten Temperaturen).

Stark hygroskopisch (aktive Trocknung zwingend erforderlich): PA6 (Sättigungsabsorption 8–10 %), PVA und BVOH (lösliche Stützmaterialien – beide sind von Natur aus hydrophil), PEI (nominal 1,25 %, aber die relevanten Teile werden bei fast 400 °C gedruckt und jegliche Feuchtigkeit verdampft katastrophal), PEEK und PEKK (geringe absolute Aufnahme, aber extreme Drucktemperaturen verstärken jegliche Feuchtigkeit).

Mäßig hygroskopisch (Trocknung vor anspruchsvollen Drucken dringend empfohlen): PA12 (gesättigt ~1,5 %), PA612 (~3 %), PPA (~2,5 %; weniger als PA6, aber dennoch problematisch), PCTG und PETG (0,1–0,4 %; kosmetischer Effekt bei Drucken mit hoher optischer Klarheit, mäßiger mechanischer Effekt), PC und PC-Mischungen (0,3–0,5 %), die meisten TPU-Formulierungen.

Nicht hygroskopisch (Trocknen im Allgemeinen nicht erforderlich): Polypropylen (gesättigt <0,05 %), Polyethylen, PVDF, PPS, PLA unter normalen Lagerbedingungen (PLA kann bei feuchter Lagerung über Monate hinweg genügend Feuchtigkeit aufnehmen, um optische Probleme zu verursachen, die mechanische Leistung bleibt jedoch weitgehend unbeeinträchtigt).

3.5 Trocknungsprotokolle

Polymerfamilie	Temp (°C)	Zeit (h)	Anmerkungen
PLA	45–55	4–6	Selten erforderlich; nur nach monatelanger Lagerung in feuchter Umgebung
PETG, PCTG	60–70	4–6	Erforderlich für transparente oder optisch klare Drucke
ABS, ASA, HIPS	60–70	4–6	Selten entscheidend, verbessert jedoch die Qualität der ersten Schicht
TPU, TPE	50–65	4–6	Weichere Typen (60A–80A) nutzen den unteren Bereich; Vicat-Wert nicht überschreiten
PA12, PA612	70–80	8–12	Vor jedem ernsthaften Druckvorgang obligatorisch
PA6, PA66	80–90	10–16	Erforderlich; Spule kann sich bei Temperaturen über 90 °C verformen
PPA, PPA-CF, PPA-GF	100–140	8–12	Umluftbackofen bevorzugt; 160 °C nicht überschreiten
PC, PC-Mischungen	80–100	6–8	Fadenbildung ist das häufigste Feuchtigkeitssymptom
PC-CF, PC-GF	90–110	8–10	Die Faserbeschichtung erhöht die Feuchtigkeitsaufnahme und -kapazität
PVA, BVOH	45–60	8–12	Von Natur aus hygroskopisch; direkt aus dem Trockner bedruckbar
PEI (ULTEM-Klasse)	130–150	4–6	Bei diesen Temperaturen ist ein Trockner in Industriequalität erforderlich
PEEK, PEKK	120–130	≥4	Konvektionsofen erforderlich; Trocknung in der Kammer ist in der Regel unzureichend
PP, PE	(nicht erforderlich)	—	Sättigungsabsorption <0,05 %; Trocknen bietet keinen Vorteil

Tabelle 3.1 – Trocknungsprotokolle nach Polymerfamilie. Quelle: Herstellerangaben (TDS); die Zeile zu PEEK/PEKK gibt allgemeine Richtlinien für den Hochtemperatur-Polymerdruck wieder. Konservatives Protokoll für technische Arbeiten: vor jedem Druck trocknen; für Prototypenbau und gelegentliche Nutzung die Ausnahmen unter „selten erforderlich“ nur befolgen, wenn das Filament bei niedriger Luftfeuchtigkeit gelagert wurde.

3.6 Kristallinität und Tempern

Bei amorphen Polymeren baut das Tempern Restspannungen ab, verändert jedoch nicht die Kristallinität (da keine vorhanden ist). Die praktischen Vorteile sind gering: eine geringe Verringerung des Langzeitkriechens, eine leichte Verbesserung der Dimensionsstabilität, keine nennenswerte Verschiebung der HDT. Die Temperntemperatur muss unter T_g bleiben, um Verformungen zu vermeiden; für PCTG

liegt der sichere Bereich bei 60–70 °C für 2–4 Stunden.

Bei teilkristallinen Polymeren ist das Tempern ein grundlegend anderer Vorgang. Der FDM-Prozess kühlt schnell genug ab, sodass die Kristallinität unvollständig ist; eine Wärmebehandlung nach dem Druck oberhalb von T_g aber unterhalb von T_m ermöglicht eine weitere

Kristallisation, was die HDT und die Steifigkeit drastisch verbessert. PLA ist das klassische Beispiel: Das Tempern von PLA bei 90–110 °C für 1–2 Stunden kann die HDT von ~55 °C auf etwa 120 °C verschieben, indem die Kristallinität von unter 5 % auf über 30 % erhöht wird. Der Preis dafür sind Maßänderungen (Schrumpfung während der Kristallisation, typischerweise 1–3 %) und das Risiko der Verformung bei dünnen Wandstärken. PA, PP und PEEK verhalten sich ähnlich; die spezifischen Temperpläne für PPA sind in Kapitel 14 detailliert beschrieben. **Ungefülltes PPA ist die bemerkenswerte Ausnahme:** Siraya rät ausdrücklich davon ab, es zu tempern, da die Verformungsneigung im gedruckten Zustand auch nach dem Ausheizen bestehen bleibt; tempern Sie stattdessen die CF- und GF-Varianten.

4. Hardware-Anforderungsstufen

Die Leistungsfähigkeit des FDM-Druckers bestimmt, welche Polymerfamilien verwendet werden können. Vier praktische Hardware-Stufen, zugeordnet zu den in diesem Band behandelten Polymerfamilien:

Stufe	Leistungsbereich	Verfügbare Polymere	Besondere Merkmale
1 — Basis-Desktop	Düse ≤250 °C, Bett ≤100 °C, offenes oder passives Gehäuse	PLA, PETG, PCTG, HIPS, weiches TPU, PVA, BVOH, PVB, PHA, einfaches PP	Messingdüse, Ein-Extruder, keine Kammerheizung; Einstiegspreisklasse
2 — Technischer Desktop	Düse 260–300 °C, Bett 100–120 °C, geschlossen, keine aktive Kammer	Plus ABS, ASA, PA12, PA612, PC-Mischungen, PP-GF, PP-CF, ESD-PC, PVDF	Geschlossener CoreXY oder Bedslinger mit gehärteter Düsenhalterung und 250+ °C Hotend
3 — Technischer Druck mit aktiver Kammer	Düse bis 350 °C, Bett bis 120 °C, aktive Kammer bis 65 °C, gehärtete/abriebfeste Düsen serienmäßig	Plus PA6, PA6-CF, PA66, PPA, PPA-CF, PPA-GF, PC-CF, PC-GF, PPS-CF	Thermostatgesteuerte Kammer, versiegeltes Gehäuse, integrierte Filamenttrocknung; Obergrenze des Prosumer-Bereichs
4 — Ultrahochtemperatur-Industrie	Düse 380–450 °C, Bett 140–155 °C, Kammer ≥85 °C, kontrollierte Atmosphäre	Plus PEEK, PEEK-CF, PEKK, PEKK-CF, PEI/ULTEM, PSU, PPSU, PPS ungefüllt	Industrieklasse: Hochtemperatur-Hotend, aktiv geregeltes Gehäuse, vom Hersteller bereitgestellte Profile

Tabelle 4.1 – Hardware-Leistungsstufen und Polymerverarbeitbarkeit. Die Übergänge zwischen den Stufen sind nicht diskret: Tier-2-Hardware verarbeitet Tier-3-Materialien bei geringerer Zuverlässigkeit für kleine Teile; Tier-3-Hardware verarbeitet Tier-4-Materialien nur bei kleinen Teilen unter sorgfältiger Kammerverwaltung.

4.1 Düsenmaterialien nach Polymer

- **Messing:** die Standardauswahl – gut geeignet für ungefülltes PLA, PETG, PCTG, ABS, ASA, HIPS, PC-Mischungen, ungefüllte Nylons und TPU; nutzt sich bei faserverstärkten Materialien zu schnell ab.
- **Gehärteter Stahl:** das praktische Minimum für jedes CF- oder GF-verstärkte Filament; hält bei typischen CF-Belastungen Hunderte von Stunden.
- **Rubin und Wolframkarbid:** verlängern die Lebensdauer bei hohen Faserbestückungen (PA-CF, PPA-CF, PPS-CF, PEEK-CF) sowie bei metallgefüllten oder ESD-leitfähigen Filamenten.
- **Polykristalliner Diamant (PCD):** die E3D Diamondback-Familie, die verschleißfesteste verfügbare Option und die erste Wahl für die Produktion mit faserverstärkten Materialien. PCD-Düsen sind nicht leitfähig, sodass induktive Düsenversatzsensoren sie nicht erkennen können – eine kamerabasierte Versatzkalibrierung ist erforderlich.
- **Obsidian:** gehärteter Stahl mit einer eingebetteten Nanobeschichtung; liegt auf der Verschleiß-/Kostenkurve zwischen gehärtetem Stahl und PCD.

4.2 Ökosysteme für die Bauoberfläche

- **Glattes PEI:** die in Prosumer-Hardware allgegenwärtige Federstahlplatte; haftet an PLA, PETG, PCTG, ABS, ASA, PC, PA12, PA612 und den meisten TPUs ohne Klebstoffe.
- **Strukturiertes PEI:** die pulverbeschichtete Variante; haftet an denselben Materialien mit etwas geringerer Kraft, erleichtert das Entnehmen der Teile und wird für die Serienfertigung bevorzugt.
- **Glas:** die universelle reibungsarme Oberfläche; eignet sich für Materialien, die über eine Klebeschicht (Packband, Magigoo, Klebestift) statt durch chemische Affinität haften.
- **G10-Garolite:** Bevorzugt bei stark verziehbaren Nylons und langen Drucken aus PC-Blend, bei denen der PEI-Grip die Platte oder das Teil beschädigen kann.
- **Spezielle PP-Platten:** die Option mit der höchsten Reproduzierbarkeit für Polypropylen und am besten geeignet für große PP-Drucke; kleinere PP-Teile haften auch mit PP-Klebeband oder Magigoo PP.

4.3 Strategie für Gehäuse und Kammer

Ein passives Gehäuse (nur Wände und eine Oberseite) erhöht die Umgebungstemperatur um den Druck herum auf etwa 40–50 °C und reduziert den konvektiven Wärmeverlust; ausreichend für ABS, ASA, PC-Mischungen, ungefüllte Nylons und fast alles in Tier 2. Eine aktiv beheizte Kammer (thermostatisch geregeltes Heizelement) ist für PPA, PPS, PEEK, PEKK und PEI erforderlich, da deren Temperaturfenster im Druckprozess so eng sind, dass selbst passive Konvektion die Temperatur der oberen Schicht unter den Kristallisationsbeginn senkt und die Schichthaftung beeinträchtigt.

Die aktive Kammertemperatur stellt selbst eine Einschränkung für die Filamentlagerung in Mehrmaterial-Puffersystemen dar: Feuchtigkeitsempfindliche Filamente in einer Kammer über 45 °C trocknen passiv aus, während andere Filamente im selben Gehäuse erweichen können (TPU, PLA) und es in Extremfällen zu Spulenverformungen kommen kann. Neuere thermisch isolierte Puffersysteme trennen das Lagerfach vom Druckergehäuse, um dies zu mildern.

5. Sicherheit, Emissionen und Nachhaltigkeit

Beim FDM-Druck werden ultrafeine Partikel (UFPs) und flüchtige organische Verbindungen (VOCs) freigesetzt. Die Mengen und chemischen Zusammensetzungen variieren je nach Polymer, Additivpaket und Düsentemperatur. Dieses Kapitel enthält die zusammengefasste Sicherheitsdiskussion; die polymerspezifischen Kapitel verweisen auf diesen Abschnitt, anstatt den Rahmen erneut zu erläutern.

5.1 Was die Literatur tatsächlich zeigt

Mehrere begutachtete Studien und behördliche Leitfäden (NIOSH 2024-103, ANSI/CAN/UL 2904, EPA-Studien) kommen zu einigen fundierten Ergebnissen. **Die UFP-Emissionsraten steigen mit der Düsentemperatur stark an**; der Druck von PEEK und PEI bei über 400 °C erzeugt um Größenordnungen mehr Partikel als PLA bei 210 °C. **ABS emittiert Styrol** als vorherrschenden VOC; dies ist der in der Literatur am konsistentesten nachgewiesene Zusammenhang mit VOCs. **Gefüllte und additivreiche Filamente verändern das Emissionsprofil**: CNT-gefüllte ESD-Typen, flammhemmende Compounds und metallgefüllte ästhetische Filamente erzeugen Partikel mit einer anderen chemischen Zusammensetzung als das Basispolymer. **Quellenkontrolle ist wirksamer als Verdünnung**: Ein belüfteter Raum mit lokaler Absaugung reduziert die Partikelkonzentrationen im Raum laut NIOSH-Messungen um 99 %; eine Erhöhung der Raumlüftungsrate führt zu deutlich geringeren Reduzierungen.

5.2 Praktische technische Kontrollmaßnahmen

Eine Kammer mit aktiver Absaugung ist die wirksamste Maßnahme für den Polymerdruck der Stufen 3 und 4. Viele moderne geschlossene Drucker verfügen über eine HEPA-Filterung plus Aktivkohlefilterung als Teil des Kammerzyklus; dies ist notwendig, reicht jedoch für Materialien mit den höchsten Emissionen nicht aus. Leiten Sie die Abluft der Kammer bei Arbeiten mit PEEK, PEI, PEKK und PPS ins Freie.

Materialspezifischer Zeitplan: Materialien mit hohen Emissionen sollten außerhalb der Arbeitszeiten in belegten Räumen gedruckt werden; der Filterzyklus nach dem Druck (eine Funktion der meisten geschlossenen Drucker) ist in den 5–15 Minuten nach dem Ende der Extrusion am wertvollsten, wenn die Konzentrationen in der Kammer am höchsten sind. Eine materialabhängige Start-/End-G-Code-Vorlage kann den Filterzyklus für Materialien mit höherer Emission auf längere Zeiträume einstellen (typische Werte: 180 s für ABS/ASA/PA/PPA-CF, 300 s für PC, keine für PLA/PETG/PCTG/Standard-TPU) – siehe Anhang B für die Vorlage mit einem Anwendungsbeispiel.

5.3 Materialspezifische Gefahren

POM/Acetal kann bei Überhitzung Formaldehyd freisetzen; mehrere Sicherheitsdatenblätter warnen ausdrücklich vor starker Formaldehydentwicklung bei Temperaturen über 230 °C, und POM sollte nur mit aktiver Belüftung gedruckt werden. **Die Verbrennung von Polypropylen** bei fehlgeschlagenen Drucken erzeugt übliche Kohlenwasserstoff-Verbrennungsprodukte (CO, CO₂, Wasser); dies ist nicht besonders gefährlich, stellt aber ein normales Brandrisiko in einem geschlossenen Drucker dar. **Die Pyrolyse von PC** kann phenolähnliche Verbindungen mit charakteristischem Geruch erzeugen; wenn Sie beim Drucken von PC Phenol riechen, ist die Düse überhitzt. **Fluorpolymere** (PVDF, PTFE-gefülltes PC) können bei extremen Temperaturen Fluorwasserstoff freisetzen (≥315 °C für PVDF; PTFE selbst zersetzt sich oberhalb von 350 °C); vermeiden Sie den Einsatz von PTFE-Schläuchen in Hotend-Bereichen für Filamente, die bei Temperaturen über 280 °C verarbeitet werden.

Die Nachbehandlung mit Lösungsmitteln stellt eine eigene Gefahrenklasse dar. Aceton (verwendet zum Glätten von ABS, ASA, HIPS) ist leicht entzündlich und hat einen niedrigen Flammpunkt; Limonen (Auflösung von HIPS) ist ein Hautsensibilisator; Dichlormethan (Auflösung von PCTG und PC) ist giftig und ein von der OSHA reguliertes Karzinogen. Behandeln Sie die Nachbehandlung mit Lösungsmitteln wie einen Vorgang im Umgang mit Chemikalien: PSA, Belüftung, Kontrolle von Zündquellen, sekundäre

Eindämmung.

5.4 Lebensende und Recyclingfähigkeit

„Recycelbarer Thermoplast“ bedeutet in der Chemie nicht „in der Praxis recycelt“. PLA lässt sich unter industriellen Bedingungen glaubwürdig kompostieren; PETG und PCTG sind Polyester (Harzcode 7 in den meisten Ländern) und theoretisch recycelbar, werden jedoch von der kommunalen Abfallsammlung selten angenommen. ABS und PC sind technisch recycelbar, werden in der Praxis jedoch herunterverwertet. Gefüllte Typen (CF, GF, FR, ESD) sind im Wesentlichen nicht recycelbar, da die Additive eine saubere Schmelzwiederaufbereitung verhindern.

Anbieter mit aktiven Programmen für recycelte Inhaltsstoffe: 3D-Fuel ReFuel (gemahlenes PCTG, mechanisch nicht von Neuware zu unterscheiden), Fiberlogy R PP (100 % Post-Consumer-/Post-Industrial-PP), Braskem FL900PP-CF (100 % recycelter CF-Rohstoff), Polymaker PolyTerra PLA (CO₂-kompensiertes PLA mit Papierspule), Fishy Filaments / Fillamentum Porthcurno (aus dem Meer geborgenes PP-GF). Dies sind echte Fortschritte; betrachten Sie sie als marginale Verbesserungen gegenüber Neuware und nicht als Freibrief für rücksichtsloses Drucken.

Teil II

PLA-Familie

*Die PLA-Familie – das am häufigsten gedruckte Material im FDM-Verfahren und der natürliche Ausgangspunkt.
Einfach zu drucken, grundsätzlich biologisch abbaubar und der Maßstab, an dem die Druckbarkeit jedes anderen Polymers
gemessen wird.*

6. PLA-Familie

PLA (Polymilchsäure) ist das am häufigsten produzierte Biopolymer und das volumenmäßig am meisten verbrauchte FDM-Filament. Es wird aus Mais-basierter Milchsäure gewonnen, lässt sich bei der niedrigsten Temperatur und dem niedrigsten Druck aller handelsüblichen Filamente verarbeiten, druckt zuverlässig ohne Gehäuse und weist das niedrigste Emissionsprofil aller Polymerfamilien auf. Die übliche Kritik, PLA sei „nicht stabil“, verkennt das Material: PLA übertrifft PETG in Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul und entspricht ABS in den meisten nicht schlagfestigkeitsbezogenen Kennwerten. Die

tatsächlichen Schwächen liegen im 55–65 °C) und die Kerbempfindlichkeit, nicht die Zugfestigkeit. thermischen Bereich (T

9

6.1 PLA-Varianten auf dem kommerziellen Markt

Standard-PLA ist das Basispolymer; Zugfestigkeit 50–70 MPa, Dehnung 3–8 %, spröde bei Kerbschlag. **PLA+ / Tough PLA / PolyMax PLA** enthalten Schlagzähmodifikatoren (typischerweise eine flexible Polymerphase oder Kautschuk), um die Kerbschlagzähigkeit zu erhöhen, was jedoch mit einem Verlust von 10–20 % an Zugfestigkeit einhergeht. **HTPLA (Hochtemperatur-PLA)** enthält Nukleierungsmittel zur Beschleunigung der Kristallisation; das frisch gedruckte Teil ist schwach, aber durch Tempern wird die Kristallinität von <5 % auf über 30 % erhöht, wodurch sich die HDT von ~55 °C auf ~120 °C verschiebt. **LW-PLA (Leichtbau-PLA)** enthält chemische Treibmittel, die bei erhöhten Düsentemperaturen aktiv werden und ein Bauteil mit einer um 30–50 % reduzierten Dichte erzeugen; Standard bei RC-Flugzeugen. **PLA/PHA-Mischungen** (colorFabb, Fillamentum) kombinieren PLA mit Polyhydroxyalkanoat für biologische Abbaubarkeit und verbesserte Schichthaftung. **Gefüllte PLAs** (Holz, Metall, Glow, Carbon, Glas) sind PLA-Matrizen mit kosmetischen oder geringfügig funktionalen Additiven.

6.2 Eigenschaftsprofil

Eigenschaft	Standard-PLA	PLA+ / Tough	HTPLA (getempert)	LW-PLA (geschäumt)
Dichte (g/cm ³)	1,24	1,20–1,24	1,24	0,6–0,9
T _m (°C)	150–170	150–170	150–170	150–170
T _g (°C)	55–65	55–65	55–65 (effektive HDT nach dem Tempern ~120)	55–65
Zugfestigkeit (MPa)	50–70	40–60	60–70	20–35
Zugmodul (GPa)	3–4	2–3	3–4	1–2
Bruchdehnung (%)	3–8	10–25	3–6	5–10
Kerbschlagzähigkeit nach Izod (kJ/m)	2–4	6–12	2–4	niedrig
Düse (°C)	200–220	210–230	210–230	220–260*
Bett (°C)	50–60	50–60	50–60	50–60

Tabelle 6.1 – Eigenschaftsbereich der PLA-Familie. *Die LW-PLA-Düsentemperatur ist die Variable zur Steuerung der Schaumbildung: Bei 220 °C erfolgt eine nahezu feste Extrusion; ab 250 °C wird die volle Schaumbildung aktiviert. Eine Kalibrierung der Schaumbildungstemperatur pro Spule ist zwingend erforderlich.

6.3 Verfahren und Kalibrierung

PLA lässt sich mit minimalen Anpassungen auf praktisch jeder FDM-Hardware drucken. Düse 200–220 °C, Bett 50–60 °C, Lüfter 100 % nach Schicht 2 oder 3, Messingdüse für ungefüllte Typen geeignet. Klebestift oder Haarspray auf Glas für die Haftung; glattes PEI haftet ohne Klebstoffe. Holzgefülltes, metallgefülltes und im Dunkeln leuchtendes PLA erfordern gehärtete Düsen; LW-PLA verträgt Messing bei typischen Laufzeiten, da die Schaumbildung den festen Kontakt mit der Düsenbohrung verringert.

Die Kalibrierungsreihenfolge entspricht dem generischen FDM-Workflow: Temperaturanstieg von 190–220 °C in 5-°C-Schritten, maximaler Volumenstrom (typischerweise 12–18 mm³ /s bei Standard-Hotends, bis zu 30 mm³ /s bei High-Flow-Konfigurationen wie CHT oder Bambu HF), Extrusionsmultiplikator über einwandigen Würfel, Druckvorlauf (typischerweise 0,020–0,040), XY-Schrumpfkompensation (Standard 0,3 %). PLA ist die Kalibrierungsbasis für die meisten Drucker.

6.4 Anwendungsbereich

PLA verdankt seinen dominierenden Marktanteil der Tatsache, dass es die richtige Wahl für Prototypen, Ausstellungsmodelle, RC-Flugzeuge (LW-PLA), den 3D-Druck im Bildungs- und Verbraucherbereich sowie für kosmetische Teile ist, die nicht bei Temperaturen über 50 °C eingesetzt werden. Es ist *nicht* die richtige Wahl für Teile, die im Sommer im Fahrzeuginnenraum eingesetzt werden (über 70 °C im Innenraum; PLA kriecht), wiederholten Stoßbelastungen ausgesetzt sind (spröde), im Außenbereich eingesetzt werden (UV-Strahlung und Feuchtigkeit zersetzen ungetempertes PLA) oder unter anhaltender mechanischer Belastung stehen. Getempertes HTPLA erweitert den Temperaturbereich, behebt jedoch nicht das Problem der Schlagzähigkeit.

Teil III

Polyester-Familie

Die Polyester-Familie im FDM-Druck: PETG und PCTG, die glykolmodifizierten Copolyester, die den funktionalen Druck dominieren, sowie PET mit seinen verstärkten PET-CF- und PET-GF-Typen.

7. PETG und die Copolyester-Familie

PETG (glykolmodifiziertes Polyethylenterephthalat) ist das Arbeitstier unter den Funktionsfilamenten: Es lässt sich leichter drucken als ABS, ist widerstandsfähiger als PLA, chemisch beständiger gegenüber einem breiteren Spektrum an Lösungsmitteln als beide und bei praktisch jedem Filamenthersteller für 15–25 \$/kg erhältlich. Die Copolyester-Familie geht über reines PETG hinaus und umfasst Varianten, die als CPE, nGen, AthenaX und t-glase vermarktet werden – alle chemisch verwandt, alle amorph, alle CHDM-haltig.

7.1 Chemie

PETG ist Polyethylenterephthalat (PET), bei dem ein Teil des Ethylenglykols durch 1,4-Cyclohexandimethanol (CHDM) ersetzt wurde. Wenn CHDM weniger als 50 Mol-% des Diolanteils ausmacht, wird das Polymer als PETG bezeichnet; das CHDM stört die kristalline Packung so stark, dass das Polymer amorph bleibt (keine schmelzgetriebene Kristallisation, keine Schlieren-Textur, volle optische Transparenz bei klaren Typen), während die Zugfestigkeitseigenschaften der PET-Klasse erhalten bleiben. Eastman Amphora und Eastman Eastar sind die dominierenden Basis-Harze; SK Skygreen und PETG-Äquivalente aus chinesischer Produktion besetzen das untere Preissegment.

7.2 Eigenschaftsprofil

Eigenschaft	Typisches PETG	Anmerkungen
Dichte (g/cm ³)	1,23–1,27	Pigmentabhängig
T _g (°C)	75–80	Betriebshöchsttemperatur ohne Tempern
T _m (°C)	n/a	Kein echtes T _m – amorph; Druck 230–250
HDT bei 0,45 MPa (°C)	70–75	Wert in Filamentform
Zugfestigkeit bei Streckgrenze (MPa)	40–50	ISO 527, XY
Zugmodul (GPa)	1,9–2,1	
Bruchdehnung (%)	8–25	Markenabhängig; zähe Typen höher
Kerbschlagzähigkeit (kJ/m ²)	4–8	Etwa das Doppelte von PLA
Sättigungsfeuchteaufnahme (%)	0,2–0,4	Optische Wirkung auf Drucke
Optische Klarheit	gut	Klare Qualitäten 85–90 % Lichtdurchlässigkeit
UV-Beständigkeit	mäßig	Monate im Außenbereich; Pigmente helfen

Tabelle 7.1 – Typische Eigenschaftsbereiche von PETG. Die Abweichungen zwischen den einzelnen Marken betragen etwa ±15 % bei der Zugfestigkeit und ±50 % bei der Dehnung.

7.3 Verarbeitungsparameter

Düse 230–250 °C (einige schlagzähmodifizierte Typen bis zu 260 °C), Bett 80–90 °C, Teilekühlung 30–60 % (niedriger als bei PLA, höher als bei ABS), Brim empfohlen für Teile mit einer längsten Abmessung von über 60 mm. Druckvorschub typischerweise 0,030–0,060. Maximaler Volumenstrom 10–14 mm³/s bei Standard-Hotends. PETG ist in der Schmelze klebrig und neigt dazu, auf glattem PEI zu stark zu haften: Klebstift auf Glas oder PVP-Beschichtung verwenden oder eine reduzierte Betttemperatur auf strukturiertem PEI akzeptieren, um eine Beschädigung der Folie beim Entfernen des Teils zu verhindern.

7.4 Varianten und die breitere Copolyester-Familie

Tough PETG / PETG+ / co-PETG: schlagzähmodifizierte Typen von Polymaker (PolyMax PETG), Fiberlogy und anderen; Dehnung auf über 100 % bei moderatem Verlust an Zugfestigkeit. Insbesondere PolyMax PETG ist ein PETG mit hohem CHDM-Gehalt und nähert sich dem Verhalten von PCTG an, ohne als solches bezeichnet zu werden. nGen, CPE, CPE+, **Amphora-basiert:** Eastman Amphora-Copolyester-Typen, die unter verschiedenen Markennamen vertrieben werden; funktional ähnlich wie PETG mit etwas höherer T_g und Zähigkeit. t-glase, PETT Taulmans hochtransparenter Copolyester; wird als „zu 100 % recycelbar“ verkauft, obwohl die lokale Infrastruktur dies selten unterstützt. **AthenaX** (FormFutura): in der FormFutura X-Linie als Stufe über ApolloX (ASA) und TitanX (ABS) positioniert; die chemische Zusammensetzung ist nicht bekannt, aber die Eigenschaftsprofile entsprechen der PCTG-Klasse.

7.5 Geeignete Anwendungen

PETG ist die richtige Wahl für: funktionale Prototypen, die die Zähigkeit benötigen, die PLA fehlt; Teile, die gelegentlichen Stößen, aber keinen anhaltenden Belastungen ausgesetzt sind; transparente Gehäuse (in klaren Qualitäten); mechanische Teile für den Innenbereich, die bei bis zu 60 °C eingesetzt werden; Teile, die auf Harzebene (nicht auf der gedruckten Oberfläche) lebensmittelverträglich sein müssen. Es ist *nicht* die richtige Wahl für: Teile, die wiederholten Stürzen oder Stoßbelastungen ausgesetzt sind (verwenden Sie PCTG oder PC-Mischungen), Teile, die bei über 70 °C eingesetzt werden (T_g-Grenzwert), UV-Belastung im Außenbereich von mehr als einigen Monaten (verwenden Sie ASA) oder Präzisionspassungen Baugruppen, bei denen die höhere Feuchtigkeitsempfindlichkeit und Schwankungen beim Schrumpfen eine Rolle spielen.

8. PCTG – im Detail

PCTG nimmt eine nützliche Nische zwischen PETG und PC ein. Das herausragende mechanische Merkmal ist eine um eine Größenordnung verbesserte Kerbschlagzähigkeit gegenüber PETG – typische Izod-Werte von $8\text{--}24 \text{ kJ/m}^2$ gegenüber $4\text{--}8 \text{ kJ/m}^2$ bei PETG, bei gleichbleibenden Verarbeitungsparametern. Während PETG Energie an die Rissausbreitung verliert, absorbiert PCTG diese in plastischer Verformung. Der Preis dafür ist ein Aufschlag von $10\text{--}15 \text{ \$/kg}$ gegenüber PETG und (was noch wichtiger ist) die Tatsache, dass nicht jede als „PCTG“ vermarktete Spule dasselbe Basis-Harz verwendet.

8.1 Polymerchemie: CHDM, TMCD und der Tritan-Vorbehalt

PCTG basiert auf dem gleichen TPA-Glykol-Mischungsgerüst wie PETG, weist jedoch einen CHDM-Anteil von über 50 Mol-% der Diol-Fraktion auf. Der vorherrschende CHDM-Anteil erhöht die Schmelztemperatur leicht ($85\text{--}95 \text{ °C}$ gegenüber $75\text{--}80 \text{ °C}$ bei PETG) und verhindert die Kristallisation (vollständige Transparenz, keine Schlierenstreuung) und sorgt für die Steigerung der Kerbschlagzähigkeit. Drei Monomere definieren den Zusammensetzungsraum:

Monomer	Rolle im Polymer	Wirkung bei Dominanz
Terephthalsäure (TPA)	Aromatisches Disäure-Grundgerüst	Steifigkeit, UV-Absorption, hydrolytischer Anker
Ethylenglykol (EG)	Lineares kurzkettiges Diol	Fördert die Kristallinität; PET-ähnliche Packung
1,4-Cyclohexandimethanol (CHDM)	Voluminöses cycloaliphatisches Diol	Stört die Kristallinität; erhöht T und Zähigkeit
2,2,4,4-Tetramethyl-1,3-cyclobutandiol (TMCD)	Starres cyclisches Diol; Tritan-spezifisch	Erhöht T weiter; verbessert die hydrolytische Stabilität

Tabelle 8.1 – Die Bausteine der PETG–PCTG–Tritan-Familie.

Eastman Tritan (das Harz, das den meisten Premium-„PCTG“-Filamenten zugrunde liegt) ist technisch gesehen ein Terpolymer aus TPA + CHDM + TMCD – streng genommen also kein PCTG. Der TMCD-Ring erhöht T und die hydrolytische Stabilität über das Maß hinaus, das TPA +

CHDM allein, weshalb Eastman Tritan als Polycarbonat-Ersatz in Geschirranwendungen vermarktet. Bei Filamenten auf Basis von Harzen der Tritan-Klasse (3D-Fuel Pro PCTG, Essentium PCTG, einige Spectrum- und Fiberlogy-Typen) ist davon auszugehen, dass sie reines TPA-CHDM-PCTG in Bezug auf Temperatur- und Hydrolysebeständigkeit übertreffen; umgekehrt bedeutet dies, dass nicht jedes als „PCTG“ verkaufte Filament aus demselben Polymer besteht. In den technischen Datenblättern der Filamente wird der zugrunde liegende Harztyp selten angegeben.

8.2 Referenz-Eigenschaftsbereich: Eastman Tritan TX1001 (Harz)

Die folgenden Werte stammen aus dem TDS von Eastman TX1001. Es handelt sich um Werte aus Teststangen, nicht um Werte von gedruckten Teilen; die mechanischen Grenzwerte gedruckter Teile liegen $10\text{--}30 \text{ %}$ unter den hier angegebenen Zugfestigkeits- und Elastizitätsmodulwerten, wobei die Izod-Kerbschlagzähigkeit am empfindlichsten auf die Qualität der Schichtbindung reagiert.

Eigenschaft	Methode	Wert
Spezifisches Gewicht	ASTM D792	1,18
Zugspannung bei Streckgrenze (MPa)	ISO 527	43
Zugfestigkeit bei Bruch (MPa)	ISO 527	58

Eigenschaft	Prüfverfahren	Wert
Bruchdehnung (%)	ISO 527	185
Zugmodul (MPa)	ISO 527	1.548
Biegemodul (MPa)	ISO 178	1.495
Biegefestigkeit (MPa)	ISO 178	59
Izod, gekerbt bei 23 °C (kJ/m ²)	ISO 180	93
Izod, gekerbt bei -40 °C (kJ/m ²)	ISO 180	20
Rockwell-Härte (R-Skala)	ASTM D785	112
Gesamtlichtdurchlässigkeit (%)	ASTM D1003	90
Trübung (%)	ASTM D1003	<1
HDT bei 0,455 MPa (°C)	ASTM D648	99
HDT bei 1,82 MPa (°C)	ASTM D648	85
Formschrumpfung (in/in)	ASTM D955	0,005–0,007
Trocknungsplan	—	88 °C, 4–6 h
Schmelzverarbeitungsbereich (°C)	—	260–282

Tabelle 8.2 — Technisches Datenblatt (TDS) für Eastman Tritan TX1001-Harz. Beachten Sie die Differenz zwischen der HDT des Harzes (99 °C) und der typischen HDT des Filaments (~76 °C) — ein Merkmal von Additivpaketen, bei denen die Druckbarkeit Vorrang vor der maximalen Wärmebeständigkeit hat.

8.3 Eigenschaftsprofil in Filamentform (repräsentative Marken)

Eigenschaft	Spectrum Premium	Fiberlogy PCTG	FormFutura AthenaX	Tritan TX1001 (Kunststoff)
Dichte (g/cm ³)	1,23	~1,23	~1,23	1,18
Zugfestigkeit bei Streckgrenze (MPa)	44	—	44	43
Zugfestigkeit bei Bruch (MPa)	46	—	44	58
Bruchdehnung (%)	220	—	220	185
Biegefestigkeit (MPa)	60	—	—	59
Biegemodul (MPa)	1.600	—	—	1.495
Kerbschlagzähigkeit (kJ/m ²) *	93	~90	—	93
HDT bei 0,455 MPa (°C)	76	76	—	99
HDT bei 1,82 MPa (°C)	64	—	—	85
Vicat-Erweichung (°C)	88	—	—	—
Rockwell-R-Härte	105	—	—	112

Tabelle 8.3 — Eigenschaftsbereich von PCTG-Filamenten nach Marke. Striche kennzeichnen nicht veröffentlichte Werte. Die Differenz zwischen dem HDT-Wert des Filaments und dem des Harzes steht im Einklang mit der Schwäche der FDM-Teile in der Z-Achse sowie mit den auf die Druckbarkeit abgestimmten Additivpaketen. * Die Izod-Werte mit Kerbe basieren auf TDS-Werte auf Harzbasis; gedruckte PCTG-Proben liegen weit darunter – siehe den gedruckten Bereich in §8.2.

8.4 Chemische und Umweltbeständigkeit

PCTG ist mäßig polar und beständig gegen die meisten unpolaren Lösungsmittel, verdünnte Mineralsäuren, Salzlösungen und aliphatische Öle. Es wird von starken Basen, konzentrierten Mineralsäuren, Ketonen (Aceton, MEK), chlorierten Lösungsmitteln (DCM, Chloroform) und vielen aromatischen Lösungsmitteln (Toluol, Xylol) angegriffen. Das CHDM/TMCD-reiche Grundgerüst verleiht PCTG gegenüber PETG einen deutlichen Vorteil gegenüber Säuren, Alkoholen und Reinigungsmitteln

— 3D-Fuel veröffentlicht Daten zur chemischen Beständigkeitsrate (CRR), die einen 1,5- bis 2-fachen Vorteil von PCTG gegenüber PETG bei den meisten Reinigungsmittel- und Ölexpositionen belegen.

Klasse	Beispiele	Verhalten von PCTG
Mineralsäuren, verdünnt	10 % HCl, 10 % H ₂ SO ₄	Beständig; kein Aufquellen bei Raumtemperatur
Mineralsäuren, konz.	Konz. HCl, HNO ₃ , H ₂ SO ₄	Angegriffen; Esterhydrolyse bei erhöhter Temperatur
Starke Basen	NaOH, KOH	Langsame Verseifung; chronische Exposition vermeiden
Aliphatische Kohlenwasserstoffe	Hexan, Mineralöl, Kerosin	Beständig
Alkohole	IPA, Ethanol, Methanol	Beständig; kosmetische Rissbildung unter Belastung
Ketone	Aceton, MEK	Angegriffen; Erweichen, Rissbildung, Auflösung
Ester	Ethylacetat, Butylacetat	Angegriffen; nicht geeignet für die Dampfglättung
Chlorierte Lösungsmittel	DCM, Chloroform, TCE	Stark angegriffen; nur für den Laborgebrauch
Aromatische Lösungsmittel	Toluol, Xylol	Angegriffen; Oberflächenaufweichung
Wässrige Reinigungsmittel	Geschirrspülprogramme	Ausgezeichnet (Tritan-Zielanwendung)
Kraftstoffe	Benzin, Diesel	Grenzwertig; sowohl PETG als auch PCTG quellen mit der Zeit auf
UV-Belastung	Sonneneinstrahlung im Freien	Besser als PLA/PETG; pigmentabhängig

Tabelle 8.4 – Chemische Verträglichkeit von PCTG. Für Typen der Tritan-Klasse werden Angaben zur Hydrolysebeständigkeit gemacht, die durch Eastmans Spülmaschinentestdaten gestützt werden.

8.5 Markenlandschaft

Marke	Produkt	\$/kg	Bemerkenswert
3D-Fuel	Pro PCTG	~30	Auf Tritan-Basis; große Farbauswahl; ReFuel-Variante (Reggranulat)
Spectrum	Premium-PCTG	~25	Gut dokumentierte technische Daten; Varianten mit vollem CF- und GF-Anteil
Fiberlogy	PCTG	~30	Reines TR (lebensmitteltauglich), transparent; CF- und GF-Varianten
FormFutura	AthenaX	~30	Positioniert in der X-Linie neben ApolloX (ASA) und TitanX (ABS)
Essentium / Vision Miner	PCTG	~45	USA; wird üblicherweise auf Basis von Tritan TX1001 hergestellt
American Filament	PCTG	~25	USA; lebensmitteltauglich, transparent und Grundfarben
Nobufil	PCTG	~30	Österreich; kleinerer Katalog; farbenorientiert
Tangled Filament	PCTG (Vorbestellung)	~22	Aggressives Preisziel (letztendlich 13 \$/kg)
Polymaker	PolyMax PETG	~22	Als PETG vermarktet; chemisch gesehen PETG mit hohem CHDM-Gehalt, nahe an PCTG

Tabelle 8.5 – PCTG-Markenlandschaft (Anfang 2026). Die Preise sind typische Einzelhandelspreise für 1 kg / 1,75 mm. Abweichungen von ±15 % sind zu erwarten. Polymaker PolyMax PETG ist enthalten, da es im Polymaker-Wiki als PETG mit hohem CHDM-Gehalt identifiziert wird, was es chemisch in die Nähe von

PCTG; nominell immer noch PETG.

8.6 Verstärkte und Spezialtypen

PCTG-CF (typischerweise 10 % geschnittene CF). Referenzwerte von Spectrum PCTG CF10: Zugstreckgrenze 70

MPa (+59 % gegenüber ungefülltem Material), Bruchdehnung 5 % (–98 %), gekerbte Izod-Schlagzähigkeit 4 kJ/m² (–96 %), HDT bei 0,455 MPa

78 °C (+3 %). Die CF sorgt für Festigkeit und Steifigkeit, geht jedoch zu Lasten der Schlagzähigkeit; PCTG-CF verhält sich eher wie PETG-CF oder kurzfaseriges Nylon als wie ungefülltes PCTG. Verwendung für steife, formstabile Halterungen und Klammern, nicht für schlagbeanspruchte Teile. Gehärtete Düse erforderlich.

PCTG-GF (typischerweise 10 % GF). Ähnlicher Kompromiss wie bei CF, etwas weniger steif, hellere Farbe (weiß/transluzent matt). 3D-Fuel, Spectrum und Fiberlogy bieten 10 %-GF-Typen an. Das Verarbeitungsfenster entspricht weitgehend dem von CF. Aggressive Trocknung, da die Faseroberfläche die Feuchtigkeitsaufnahme erhöht.

Tritan-basierte Typen. Wenn ein Anbieter Tritan-Harz angibt (oder die Eigenschaftskurve dies stark nahelegt: Izod-Kerbschlagzähigkeit >15 kJ/m², HDT >80 °C, <1 % Trübung), ist mit einem besseren Verhalten in der Spülmaschine und bei Kontakt mit heißen Flüssigkeiten, einer geringfügig besseren UV-Beständigkeit und einem geringen Preisaufschlag (3–7 \$/kg) zu rechnen. Für wiederholte Anwendungen mit Lebensmittelkontakt oder im medizinischen Umfeld ist PCTG auf Tritan-Basis die vertretbare Wahl.

Recycelt / ReFuel. Das ReFuel Pro PCTG von 3D-Fuel wird aus Mahlgut hergestellt. Die mechanischen Eigenschaften sind hinsichtlich Zugfestigkeit und Schlagzähigkeit im Wesentlichen nicht von neuem Pro PCTG zu unterscheiden; die Farbauswahl ist begrenzt (natur, schwarz) und die Durchmesser toleranz beträgt ebenfalls ±0,02 mm. Nützlich für Vorrichtungen und Prototypen, bei denen der Recyclingaspekt wichtig ist, die Farbflexibilität jedoch keine Rolle spielt.

8.7 Druckverfahren und Kalibrierung

Parameter	Bereich	Anmerkungen
Düse (°C)	240–270	Unterschiedliche Angaben der Hersteller: Spectrum 250–270; 3D-Fuel 260–280; Fiberlogy 230–260
Bett (°C)	70–90	PEI glatt/strukturiert; Klebestift auf Glas; PVP-Beschichtung
Kammer	offen oder passiv beheizt	Keine aktive Beheizung erforderlich
Teilkühlgebläse (%)	30–60	Niedriger als bei PLA, höher als bei ABS; 100 % akzeptabel bei kleinen Details
Druckgeschwindigkeit (mm/s)	40–80 Körper / 30–50 Wand	Hohe Schmelzfestigkeit verträgt schnelle Bewegungen; Fadenbildung nimmt zu
Max. Volumenstrom (mm ³ /s)	8–12	20+ bei High-Flow-Hotends (CHT, Bambu HF); immer kalibrieren
Rückzug (Direktantrieb)	0,6–1,2 mm bei 30–45 mm/s	
Rückzug (Bowden)	3–6 mm bei 30–45 mm/s	
Druckvorlauf	0,03–0,06	3D-Fuel Pro PCTG, kalibriert auf 0,053 in den Tests des Autors (siehe Anhang B)
XY-Schrumpfkompensation	0,2–0,5	Einige Anwender berichten, dass eine Skalierung von 2–2,5 % erforderlich ist, um eine Passung an Nicht-PCTG-Passpartner zu erreichen
Trocknung	65–70 °C, 4–6 h	Erforderlich für transparente Drucke; die TDS-Spezifikation des Harzes liegt bei 88 °C

Tabelle 8.6 – PCTG-Startdruckparameter (0,4-mm-Düse). Kalibrierung pro Spule obligatorisch; die Temperaturunterschiede zwischen Spectrum und 3D-Fuel spiegeln tatsächliche Zusammensetzungsunterschiede wider.

8.8 Spezifische Hinweise für PCTG auf Slicer-Ebene

- **Gitterfüllung vermeiden.** Gitterlinien kreuzen sich innerhalb derselben Schicht, wodurch die Düse zweimal durch das extrudierte Material gezogen wird und PCTG an der Düse abgelagert, bis es schließlich auf das Teil tropft. Die von 3D-Fuel veröffentlichten Prozessprofile überschreiben genau aus diesem Grund die typische Slicer-StandardEinstellung auf „cubic“ oder „gyroid“.
- **Deaktivieren Sie „avoid_crossing_perimeters“.** Ein Fehler im Verfahrensweg in aktuellen Hauptzweigen des Slicers (2.9.x-Ära) verursacht Phantomartefakte, wenn diese Option bei Materialien der PCTG/PETG-Klasse aktiviert ist; die Abhilfe besteht darin, die Option deaktiviert zu lassen.
- **Achten Sie auf das Einfallen der Oberseite.** Bei einer spärlichen Füllung mit geringer Dichte ($\leq 15\%$) können dünne Oberflächen zwischen den Rafts nach unten ziehen, wenn PCTG abkühlt – derselbe Mechanismus wie beim PC-Blend-Problem, nur weniger ausgeprägt. Verwenden Sie 6–8 Deckschichten, eine kubische Füllung von 20–25 % oder beides.
- **Mehrmaterialdruck mit PETG und PLA.** PCTG haftet gut an PETG; beide Materialien können in Mehrmaterialdrucken beliebig kombiniert werden. PCTG haftet schlecht an PLA – dies ist bewusst als Trennschicht für PLA-Stützen nützlich. Die Spülvolumina zwischen PCTG und PETG können geringer sein als die typischen Slicer-Standardwerte.

8.9 Geeignete Anwendungen

Wählen Sie PCTG, wenn: Schlagbelastung oder Sturzfestigkeit wichtig sind (Werkzeuggehäuse, Drohnengehäuse, RC-Teile, Laborgeräte); ein duktiler Versagensmodus erforderlich ist (lebende Scharniere, Schnappverbindungen mit mehr als wenigen Zyklen, Clips, Verriegelungen); optische Klarheit wichtig ist (Lichtleiter, transparente Gehäuse, Flüssigkeitssichtgläser, optische Modelle – 90 % Lichtdurchlässigkeit bei $<1\%$ Trübung ist wesentlich besser als bei klarem PETG); Kontakt mit Lebensmitteln und Trinkwasser auf Harzebene (Tritan erfüllt die FDA 21 CFR-Konformität für Lebensmittelkontakt und NSF/ANSI 51/61 auf Harzebene; Additive pro Filament prüfen); Kältebeständigkeit (PCTG behält eine brauchbare Izod-Kerbschlagzähigkeit bei $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, während PETG spröde wird).

Wählen Sie PCTG nicht, wenn: Temperaturen über $\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Bereich liegen (verwenden Sie PC, PC-CF, ASA oder PPA); langfristige UV-Belastung im Außenbereich (verwenden Sie ASA); Verschleißflächen unter Gleitbelastung (verwenden Sie POM, PEEK oder iglidur); das Glätten mit Lösungsmitteln Teil des Arbeitsablaufs ist (kein gängiges Werkstattlösungsmittel wirkt auf PCTG); kostengünstigstes Prototyping (PETG spart 10–20 \$/kg bei vergleichbarer Druckbarkeit).

8.10 Nachbearbeitung

Methode	Eignung von PCTG	Anmerkungen
Schleifen (trocken/nass)	Gut	Nassschleifen 320 → 800 → 1500 für matt; ständig bewegen, feucht halten
Mechanisches Polieren	Gut	Nach Körnung 2000 Kunststoffpolitur oder Polieren für nahezu transparenten Glanz bei klaren Qualitäten
Glätten mit Acetondampf	Nicht wirksam	Greift an, fließt aber nicht; erzeugt eine mattierte Oberfläche
Glätten mit Ethylacetatdampf	Gering	Besser als Aceton; PCTG-Reaktion ist uneinheitlich
Glätten mit MEK oder DCM	Möglich / gefährlich	DCM löst auf; beide erfordern einen Abzug
Glätten mit Heißluftpistole	Möglich	Kurze, aus der Entfernung durchgeführte Durchgänge schmelzen eine dünne Oberflächenschicht; leicht zu übertreiben
2K-Epoxidbeschichtung (XTC-3D)	Hervorragend	Zuverlässig glatte Oberfläche; erhöht die Schichtdicke
Lackieren	Gut	Schleifen bis 320er-Körnung; Kunststoff-Haftgrundierung (SEM, Bulldog); anschließend Decklack
Glühen	Begrenzte Verbesserung	Amorph; keine Kristallisation; geringer Gewinn durch Spannungsabbau
Gewindeschneiden / Gewindebohren	Hervorragend	Die Duktilität sorgt für eine bessere Gewindebeständigkeit als bei PETG
Kleben	Gut	CA für schnelle Verbindungen; Loctite Plastic Bonder für tragende Verbindungen

Tabelle 8.7 – Nachbearbeitungsoptionen für PCTG. Die chemische Beständigkeit, die PCTG servicefreundlich macht, schränkt auch den Arbeitsablauf beim Glätten mit Lösungsmitteln ein.

8.11 Offene Fragen und ehrliche Unsicherheit

Die Identifizierung des Harzes wird selten offengelegt. In den meisten Filament-Sicherheitsdatenblättern wird das Material als „PCTG“ bezeichnet, ohne das

Harz. Ob es sich bei einer bestimmten Spule um Tritan, generisches Eastman-PCTG (Eastar-Serie), SK Skygreen oder ein chinesisches Copolyester ist, hat wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit – und lässt sich im Allgemeinen nur aus dem Preis und dem Eigenschaftsprofil ableiten.

Die Werte in Z-Richtung werden größtenteils nicht veröffentlicht. Anbieter geben die Zugfestigkeit in XY-Richtung und den Izod-Wert an; die Z-Werte können 40–60 % niedriger sein. Die technische Konstruktion erfordert Tests mit Halterungen an der tatsächlichen Maschine.

Es gibt nur wenige Daten zur UV-Beständigkeit im Einsatz. Die Angabe „UV-beständig“ in einem technischen Datenblatt (TDS) wird selten durch Daten zur QUV-Bestrahlungsdauer oder zu Farbveränderungen untermauert. Angaben zur Lebensdauer im Außenbereich sollten getestet und nicht blind vertraut werden.

Die Konformität für den Kontakt mit Lebensmitteln gilt nicht für gedruckte Teile. Zertifizierungen für Harze (FDA 21 CFR, NSF 51, NSF 61) gelten für das Harz im geformten Zustand. FDM-Schichtlinien beherbergen Bakterien und Verunreinigungen aus Hotend-Rückständen; bei wiederholtem Kontakt mit Lebensmitteln sollte eine Beschichtung oder Versiegelung erfolgen. Zertifizierungen auf Filamentebene decken in der Regel das Harz sowie Additive ab – nicht die gedruckte Oberfläche.

Die Abdeckung durch unabhängige Tests von Drittanbietern ist bei PCTG im Vergleich zu PLA und PETG nach wie vor gering. Markenübergreifende Vergleiche der Schlagfestigkeit und Zugfestigkeit unter einheitlichen Druckbedingungen stellen nach wie vor die größte empirische Lücke für dieses Material dar.

9. PET und verstärkte PET- -Typen

Polyethylenterephthalat ist der Stamm-Polyester der Familie, die dieser Teil behandelt: PETG und PCTG sind beide glykolmodifizierte Derivate von PET, die speziell entwickelt wurden, um die Eigenschaft zu überwinden, die das Drucken von unmodifiziertem PET erschwert. Das macht PET ein eigenes Kapitel wert – nicht weil reines PET-Filament weit verbreitet ist (das ist es nicht), sondern weil das Verständnis dafür, warum es ungewöhnlich ist, die gesamte Copolyester-Kategorie erklärt, und weil sich die beiden verstärkten Typen, die in der Praxis bedruckbar *sind*, PET-CF und PET-GF, anders verhalten als alles andere in Teil III.

9.1 Chemie: der Ausgangspolyester

PET ist das Kondensationspolymer aus Terephthalsäure (TPA) und Ethylenglykol (EG) – eine starre aromatische Disäure, die an ein kurzes, regelmäßiges Diol mit zwei Kohlenstoffatomen gebunden ist. Die Regelmäßigkeit ist entscheidend: Ein unverzweigter, symmetrischer Grundgerüst reißt sich leicht in kristalline Domänen zusammen. PET ist daher ein stark semikristallines Polymer mit einem Schmelzübergang bei etwa 250–260 °C und einem Glasübergang bei etwa 70–80 °C. In seiner kristallinen Form ist es das Material für Getränkeflaschen, Polyesterfasern und thermogeformte Verpackungen – stark, steif, chemisch beständig und im industriellen Maßstab kostengünstig.

Genau diese Kristallinität macht PET als FDM-Ausgangsmaterial schwierig. Ein Polymer, das leicht kristallisiert, kristallisiert auch *ungleichmäßig* während der schnellen, gerichteten Abkühlung beim Fused-Filament-Deposition-Verfahren: Kristalline und amorphe Bereiche bilden sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit in verschiedenen Teilen des Strangs, sie haben unterschiedliche Dichten, und die daraus resultierende unterschiedliche Schrumpfung führt zu Verformungen, schlechter Schichtregistrierung und Trübung. PETG und PCTG wurden entwickelt, um genau dieses Problem zu lösen. Der Ersatz eines Teils des Ethylenglykols durch das voluminöse, ringförmige Cyclohexandimethanol (CHDM) stört die Regelmäßigkeit des Grundgerüsts so stark, dass das Polymer auf FDM-Zeitskalen nicht mehr kristallisieren kann – es bleibt amorph, lässt sich vorhersehbar drucken und ist im fertigen Zustand klar. PETG ist die glykolmodifizierte Variante; PCTG ist die Variante mit höherem CHDM-Anteil und größerer Zähigkeit. Beide tauschen die kristalline Steifigkeit und Temperaturbeständigkeit von PET gegen Druckbarkeit ein.

An dieser Stelle lohnt es sich, einen Begriff zu klären, da er immer wieder für Verwirrung sorgt. PLA ist ebenfalls ein Polyester – Teil II behandelt es als eigene Familie –, daher ist der Leser berechtigt zu fragen, warum es nicht einfach in diesen Teil aufgenommen wurde. Die Antwort lautet, dass „Polyester“ eine Bindung bezeichnet, nicht ein Verhalten: Jedes Polymer, dessen Grundgerüst aus Esterbindungen besteht, fällt darunter. PET, PETG und PCTG sind *aromatische* Copolyester – ihre Steifigkeit und Temperaturbeständigkeit stammen vom Benzolring in der Terephthalsäureeinheit. PLA ist ein *aliphatischer* Polyester, der aus Milchsäureeinheiten ohne jeglichen aromatischen Ring aufgebaut ist. Dieser einzige strukturelle Unterschied wirkt sich auf alles aus, was für den Anwender von Bedeutung ist: PLA ist biobasiert, lässt sich bei niedrigen Temperaturen drucken, verzieht sich kaum und erweicht deutlich unter 60 °C, während die aromatische PET-Familie bei hohen Temperaturen gedruckt wird, hygroskopisch ist und ihre Form bei weitaus höheren Temperaturen beibehält. Eine Gruppierung nach dem Druckverhalten – PLA in Teil II, die aromatischen Copolyester in Teil III – ist für den Leser daher nützlicher als eine Gruppierung nach der gemeinsamen Esterbindung, auch wenn Letzteres die strengere chemische Taxonomie darstellt.

9.2 Warum reines PET als Filament selten ist

Unmodifiziertes PET wird nur selten als Filament verkauft, und es lohnt sich, dies ausdrücklich zu begründen, anstatt es als routinemäßige Option zu behandeln. Drei Faktoren spielen dabei eine Rolle. Erstens das oben beschriebene Kristallisationsverhalten: Ein Teil kann sich je nach Abkühlverlauf verziehen, delaminieren oder trüb ausfallen, und der Abkühlverlauf lässt sich über einen gesamten Druck hinweg nur schwer kontrollieren. Zweitens ist PET stark hygroskopisch und muss trocken gedruckt werden – feuchtes PET hydrolysiert bei Schmelztemperatur, und die Kettenspaltung senkt das Molekulargewicht dauerhaft, sodass eine schlecht getrocknete Spule spröde Teile ergibt, die durch keine Druckeinstellung mehr zu retten sind. Drittens besetzt PETG bereits die Nische, die reines PET ausfüllen würde: Es lässt sich leichter drucken, ist fast genauso fest, klarer und kostet nicht mehr. Bei einem unverstärkten Polyester gibt es kaum einen praktischen Grund, PET gegenüber PETG zu bevorzugen, und der Markt spiegelt dies wider. Wo PET seinen Platz verdient, ist es verstärkt – und dort ändert sich die Rechnung komplett.

9.3 Verstärkte Typen: PET-CF und PET-GF

Das Hinzufügen von geschnittenen Kohlenstofffasern (PET-CF) oder kurzen Glasfasern (PET-GF) zu einer PET-Matrix bewirkt mehr als nur eine Versteifung. Die Fasern dienen als Keimbildungsstellen und als physikalische Bremse für die Schrumpfung: Sie bieten der Kristallisation kontrollierte, verteilte Ausgangspunkte und halten die Matrix beim Abkühlen mechanisch zurück, sodass die durch unterschiedliche Schrumpfung verursachten Verformungen, die ungefülltes PET plagen, erheblich unterdrückt werden. Die zur Versteifung hinzugefügte Verstärkung behebt gleichzeitig das zentrale Druckbarkeitsproblem von PET. Das Ergebnis sind zwei Filamente, die steifer und formstabiler sind als PETG, eine nützliche höhere Betriebstemperatur aufweisen und sich weitaus problemloser drucken lassen als ungefülltes PET.

PET-CF ist das steifere der beiden und im Vergleich zu PET-GF das leichtere. Gehackte Carbonfasern erhöhen den Elastizitätsmodul deutlich; sie erhöhen auch die Dichte der Mischung leicht gegenüber dem Basis-Harz, da Carbonfasern dichter sind als PET – doch der Anstieg ist weitaus geringer als bei der Glasfaser-Variante, weshalb PET-CF-Teile leichter ausfallen als PET-GF-Teile mit derselben Geometrie. Die Teile sind dunkelgrau bis schwarz mit matter Oberfläche, formstabil und eignen sich gut für Vorrichtungen, Halterungen und strukturelle Halterungen, bei denen Steifigkeit wichtiger ist als Schlagzähigkeit. Wie bei jedem kohlenstoffgefüllten Filament ist der Nachteil die Abriebfestigkeit: Eine gehärtete oder verschleißfeste Düse ist zwingend erforderlich, und die Schlagzähigkeit liegt deutlich unter der von ungefülltem PETG – PET-CF verhält sich wie ein steifer, spröder Verbundwerkstoff, nicht wie ein duktiles Polymer. **PET-GF** tauscht einen Teil dieser Steifigkeit gegen ein zäheres, weniger sprödes Versagensverhalten und einen niedrigeren Preis ein; glasfaserverstärkte Teile sind typischerweise weiß oder durchscheinend-matt. Beide Typen sind hygroskopisch, und faserverstärkte Filamente nehmen Feuchtigkeit schneller auf als ihr Basis-Harz, da die Faser-Matrix-Grenzfläche zusätzliche Oberfläche bietet – das Trocknen ist daher unerlässlich.

Eigenschaft	PETG (Referenz)	PET-CF	PET-GF
Verstärkung	keine (amorph)	geschnittene Kohlenstofffasern	kurze Glasfaser
Steifigkeit	Ausgangswert	deutlich höher	höher
Schlagzähigkeit	hoch (duktil)	niedrig (spröder Verbundwerkstoff)	mäßig
Formstabilität	gut	ausgezeichnet	ausgezeichnet
Betriebstemperatur	Basis	höher als bei PETG	höher als PETG
Düse	Messing zulässig	gehärtet erforderlich	gehärtet erforderlich
Typisches Aussehen	klar / getönt	mattschwarz / grau	weiß / matt

Tabelle 9.1 – Verstärkte PET-Typen im Vergleich zu PETG als bekannter Referenzpunkt. Die Spalten sind bewusst qualitativ gehalten: Die in Datenblättern veröffentlichten Werte für PET-CF und PET-GF variieren stark zwischen den Anbietern, da Fasergehalt, Faserlänge und Grundharztyp unkontrollierte Variablen sind und ein Wert auf Filamentebene nicht zwischen Marken übertragbar ist. Betrachten Sie die Tabelle als Richtwert für die Wirkungsrichtung und kalibrieren Sie sie anhand der konkret vorliegenden Spule.

9.4 Druckverfahren

Die verstärkten PET-Typen werden bei höheren Temperaturen gedruckt als PETG und erfordern die gleiche Sorgfalt wie jedes fasergefüllte technische Filament: Trocknen Sie die Spule, setzen Sie eine gehärtete Düse ein und kalibrieren Sie das Gerät, anstatt sich auf das Datenblatt zu verlassen. Die unten aufgeführten Werte stammen von einem kalibrierten Fiberon PET-GF15-Profil auf einem Core One mit einer 0,4-mm-harten (E3D Diamondback) Düse und dienen als konkreter, reproduzierbarer Ausgangspunkt und nicht als universelle Spezifikation – eine andere PET-GF-Spule oder ein PET-CF-Typ erfordert einen eigenen Kalibrierungsdurchlauf.

Parameter	Fiberon PET-GF15 (kalibriert)	Anmerkungen
Düsentemperatur	290 °C	höher als bei PETG; der Glasanteil erhöht die Schmelzviskosität
Düse	0,4 mm gehärtet (E3D Diamondback)	zwingend erforderlich für alle faserverstärkten Typen
Teilekühlung	Lüfter aus	Kühlung begünstigt ungleichmäßige Kristallisation und schwächt die Schichtverbindungen
Extrusionsmultiplikator	~0,96	kalibriert durch Einwandmessung, nicht angenommen
Druckanstieg	~0,040 (Startwert)	im Filamentprofil gespeichert; maschinenspezifisch einstellen
Trocknen	vor dem Druck obligatorisch	Faser-Schnittstelle beschleunigt die Feuchtaufnahme

Tabelle 9.2 – Ein kalibriertes PET-GF15-Prozessprofil (Core One, 0,4 mm gehärtete Düse). Die Werte für Extrusionsmultiplikator und Druckvorlauf sind das Ergebnis des Standard-Kalibrierungsablaufs – Temperaturturm, Volumenstrom-Obergrenze, Extrusionsmultiplikator durch Einwandmessung, dann Druckvorlauf – und keine Angaben aus dem Datenblatt. Das Ausschalten der Lüfter ist beabsichtigt: Wie die teilkristallinen technischen Filamente verbindet verstärktes PET die Schichten besser und verzieht sich weniger ohne Teilekühlung.

Zwei Prozesspunkte werden aus dem Rest von Teil III übernommen. Die Haftung am Druckbett ist unkompliziert – die Polyesterchemie haftet gut an PEI, ebenso wie an PETG und PCTG –, doch die höhere Düsentemperatur und das Fehlen einer Teilekühlung machen eine saubere erste Schicht und eine stabile Kammer wichtiger als bei einfachem PETG. Und die Warnung vor Abrieb ist nicht zu unterschätzen: Eine Messingdüse nutzt sich bei einem einzigen großen Druck mit PET-CF oder PET-GF messbar ab, woraufhin die Extrusionskonsistenz nachlässt.

9.5 Geeignete Anwendungen

Wählen Sie PET-CF, wenn: das Teil eine Vorrichtung, Halterung oder strukturelle Halterung ist, bei der Steifigkeit und Formstabilität Vorrang vor Stoßbelastung haben; das Gewicht eine Rolle spielt; und eine gehärtete Düse verfügbar ist. **Wählen Sie PET-GF, wenn:** dieselben Anforderungen an Steifigkeit und Stabilität gelten, das Teil jedoch Stoß- oder Handhabungsbelastungen ausgesetzt sein kann, wobei der weniger spröde Versagensmodus von PET-GF den geringen Verlust an Steifigkeit wert ist und Kosten eine Rolle spielen. **Wählen Sie stattdessen reines PETG oder PCTG, wenn:** das Bauteil Duktilität, optische Klarheit oder Lebensmittelechtheit benötigt oder wenn keine gehärtete Düse verfügbar ist – die verstärkten PET-Typen bieten all dies nicht. **Verzichten Sie ganz auf PET, wenn:** die Betriebstemperatur oder die chemischen Anforderungen das übersteigen, was ein verstärktes Polyester leisten kann; in diesem Fall sind die Polyamid- und Polycarbonat-Familien in den folgenden Abschnitten die richtige Wahl.

Teil IV

Styrol-Familie

Die Styrolkunststoffe: ABS, ASA und HIPS – die ursprünglichen, an den Maschinenbau angrenzenden Standardfilamente, definiert durch ihren Styrolgehalt, ihre Anforderungen an die Umhüllung und ihr Verhalten bei der Glättung mit Lösungsmitteln.

10. Styrolkunststoffe: ABS, ASA, HIPS

Die Styrol-Familie basiert auf der Chemie des Polystyrols mit verschiedenen Copolymerzusätzen für Zähigkeit, Witterungsbeständigkeit oder Löslichkeit. Ihre drei für FDM relevanten Mitglieder – ABS, ASA und HIPS – teilen sich die Fähigkeit zur Glättung durch Acetondampf sowie ein charakteristisches Verformungsverhalten, das bestimmt, wie sie gedruckt werden. Die Familie wurde im Desktop-FDM teilweise durch PCTG und Polycarbonat-Mischungen für allgemeine technische Anwendungen verdrängt, bleibt jedoch das kostengünstigste Material für den geschlossenen Druck, die Standardwahl für den Außenbereich im Fall von ASA und die einzige weit verbreitete praktische Stützstruktur für das Auflösen in einem Bad für die Familie im Fall von HIPS. Dieses Kapitel behandelt zunächst die gemeinsame Chemie, dann nacheinander jedes Material und schließlich den Prozess, die Nachbearbeitung sowie Auswahlfragen, die allen drei Materialien gemeinsam sind.

10.1 Styrolchemie: das gemeinsame Grundgerüst

Alle drei Materialien sind amorphe Polymere, die auf einem Polystyrol-Grundgerüst aufbauen. Polystyrol selbst ist starr, glänzend, leicht zu verarbeiten und spröde; die styrolhaltigen technischen Filamente sind allesamt Strategien, um die Verarbeitbarkeit und den Glanz zu erhalten und gleichzeitig die Sprödigkeit zu überwinden. Da das Grundgerüst amorph ist, hat keines der drei Materialien einen echten Schmelzpunkt – sie erweichen progressiv oberhalb einer Glasübergangstemperatur nahe 100 °C, anstatt abrupt zu schmelzen – und alle drei sind in derselben Klasse von Lösungsmitteln löslich, weshalb eine einzige Nachbearbeitungstechnik (Lösungsmitteldampfglättung) für die gesamte Familie gilt.

ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol) ist ein Terpolymer: Acrylnitril sorgt für Steifigkeit und chemische Beständigkeit, Butadien sorgt als diskrete, dispergierte Kautschukphase für Schlagzähigkeit und Styrol sorgt für Verarbeitbarkeit und Oberflächenglanz. **ASA** (Acryl-Styrol-Acrylnitril) ersetzt das Butadien von ABS durch ein Acrylat-Elastomer. Diese einzige Substitution ist der entscheidende Vorteil von ASA: Die Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbindungen von Butadien sind der Ort der UV-Photooxidation, sodass ein ABS-Teil innerhalb weniger Monate nach der Exposition im Freien kreidet, vergilbt und spröde wird, während der gesättigte Acrylatkautschuk in ASA keine solchen Doppelbindungen aufweist und jahrelanger UV-Einwirkung standhält. **HIPS** (hochschlagfestes Polystyrol) ist das einfachste der drei Materialien: ein schlagzähmodifiziertes Polystyrol mit einer diskreten Polybutadienphase, ohne Acrylnitril. Es ist weniger steif und weniger chemikalienbeständig als ABS, aber seine Polystyrolbasis macht es in Limonen löslich – eine Eigenschaft, die HIPS seine Hauptrolle als lösliches Stützmaterial verleiht.

Das gemeinsame amorphe Grundgerüst erklärt auch die charakteristische Druckproblematik dieser Materialfamilie. Ein amorphes Polymer mit einer Glasübergangstemperatur nahe 100 °C zieht sich beim Abkühlen von der Schmelze auf Raumtemperatur erheblich zusammen, und da die Kontraktion kontinuierlich erfolgt und nicht an einem scharfen Kristallisationspunkt freigesetzt wird, baut ein Styrol-Teil beim Drucken Schicht für Schicht innere Spannungen auf. Diese Spannung äußert sich in Verformungen und Rissen zwischen den Schichten – je größer das Teil und je kühler die Umgebung, desto stärker treten beide Probleme auf. Der gesamte Druckprozess mit Styrolbasierten Materialien ist darauf ausgerichtet, diese Spannung zu bewältigen.

10.2 ABS

ABS ist das ursprüngliche technische Filament und bleibt der Maßstab, an dem die gesamte Familie gemessen wird. Seine Glasübergangstemperatur von etwa 105 °C, seine Zugfestigkeit von etwa 30–45 MPa, sein Elastizitätsmodul von etwa 2 GPa und seine Dehnung von 10–40 % beschreiben ein steifes, mäßig zähes Material mit einer brauchbaren Hitzebeständigkeit, die deutlich über der von PLA oder PETG liegt. Sein herausragender Izod-Schlagzähigkeitswert von etwa 15–25 kJ/m^2 spiegelt die Funktion der Butadien-Kautschuk-Phase wider.

Der Preis für diese Materialeigenschaften ist die Druckbarkeit. ABS schrumpft beim Abkühlen um 1–2 %, und bei Teilen, die in einer Dimension größer als etwa 100 mm sind, kommt es ohne Gehäuse zu starken Verformungen. Die praktische Konsequenz ist, dass ABS ein Material für geschlossene Drucker ist: Ein passives Gehäuse, das die Kammer auf 40–50 °C hält, ist das realistische Minimum, und die Drucke werden sich an den Ecken dennoch abheben, wenn keine gute Haftung der ersten Schicht und kein Brim vorhanden sind. ABS setzt beim Drucken außerdem Styrol und Feinstaub frei; Belüftung oder Filterung ist daher eine wichtige Überlegung.

und wird im Abschnitt über Emissionen in Kapitel 5 behandelt. ABS besticht durch die Kombination aus niedrigen Kosten, Glättung mit Acetondampf und mäßiger Hitzebeständigkeit – keine andere Filamentfamilie bietet alle drei Eigenschaften zum Preis von ABS.

10.3 ASA

ASA hat eine Glasübergangstemperatur nahe 100 °C sowie Zugfestigkeits- und Steifigkeitswerte, die denen von ABS nahekommen; mechanisch sind die beiden nahezu gleichwertig. Der entscheidende Unterschied liegt in der Umweltverträglichkeit. Die gesättigte Acrylat-Kautschukphase von ASA verleiht ihm einen großen Vorteil hinsichtlich der UV-Beständigkeit – die Lebensdauer im Außenbereich wird in Jahren gemessen, statt in Monaten, wie es bei ABS-Teilen der Fall ist, bevor diese kreiden und spröde werden –, was ASA zum Standard-Engineering-Filament für Teile macht, die im Freien eingesetzt werden. ASA wird bei etwas höheren Temperaturen als ABS gedruckt, typischerweise 250–270 °C an der Düse bei einer Betttemperatur von 105–110 °C und in einer geschlossenen Kammer, und es reagiert auf die Glättung mit Aceton genauso wie ABS.

Die folgenden Zahlen sind die vom Autor selbst ermittelten Kalibrierungswerte für Prusament ASA auf einem Core One mit einer 0,4-mm-PCD-Düse (E3D Diamondback). Die Kalibrierung war zum Zeitpunkt der Erstellung noch im Gange: Die Werte für Düsentemperatur, Volumenstrom und Extrusionsmultiplikator sind festgelegt, die Z-Schrumpfkompensation wurde bewusst übersprungen, und die Kalibrierung von Druckvorschub und XY-Schrumpfung stand noch aus. Sie dienen als konkreter, reproduzierbarer Ausgangspunkt für eine bestimmte Filament-Maschinen-Kombination und stellen keine universelle ASA-Spezifikation dar – Anhang B enthält das vollständige Beispiel.

Parameter	Prusament ASA (kalibriert)	Anmerkungen
Düsentemperatur	260 °C	eingestellt; innerhalb des ASA-Bereichs von 250–270 °C
Max. Volumenstrom	9,5 mm ³ /s	Obergrenze aus dem Volumenstrom-Kalibrierungsschritt
Extrusionsmultiplikator	1,03	kalibriert durch Einwandmessung
Z-Schrumpfkompensation	absichtlich übersprungen	für dieses Profil nicht verfolgt
Druckvorlauf	Kalibrierung ausstehend	muss eingestellt und im Filamentprofil gespeichert werden
XY-Schrumpfkompensation	Kalibrierung ausstehend	muss am Standard-Testobjekt gemessen werden

Tabelle 10.1 – Laufendes Kalibrierungsprofil für Prusament ASA (Core One, 0,4-mm-PCD-Düse). Die festgelegten Werte folgen dem Standard-Kalibrierungsablauf; die ausstehenden Zeilen werden ehrlich vermerkt, anstatt mit Werten aus dem Datenblatt ausgefüllt zu werden. Betrachten Sie dies als ein praktisches Beispiel für die auf eine ASA-Spule angewandte Kalibrierungsmethode, nicht als übertragbare Spezifikation.

10.4 HIPS

HIPS hat eine Glasübergangstemperatur von etwa 90–100 °C, eine Zugfestigkeit von etwa 34 MPa und einen Elastizitätsmodul von etwa 1,9 GPa – es ist weicher und weniger steif als ABS und verfügt nicht über die von Acrylnitril abgeleitete chemische Beständigkeit von ABS. Als Baumaterial wird es für leichtere kosmetische Teile verwendet, doch dies ist eine untergeordnete Rolle, und HIPS als eigenständiges Modellmaterial ist selten. Wichtiger ist seine Verwendung als lösliche Stützstruktur: HIPS löst sich in Limonen auf, während ABS und ASA dies nicht tun; daher kann eine HIPS-Stützstruktur durch ein Limonenbad von einem ABS- oder ASA-Druck entfernt werden, ohne das Modell zu beschädigen. HIPS wird bei etwa 230–250 °C an der Düse und 100–110 °C am Bett gedruckt, wobei die gleichen Überlegungen hinsichtlich Gehäuse und Verzug gelten wie bei den übrigen Materialien dieser Familie.

Zwei Vorsichtsmaßnahmen gelten speziell für HIPS. Limonen ist ein Hautsensibilisator, und der Badprozess erfordert eine angemessene Handhabung und Belüftung. Außerdem wird HIPS von Aceton stärker angegriffen als ABS – das Glätten mit Limonen eignet sich als Veredelungstechnik für HIPS, aber Aceton, das ABS sauber glättet, führt

die HIPS-Oberfläche überätzen.

10.5 Eigenschaftsprofil

Die drei Materialien sind mechanisch so ähnlich, dass ein direkter Vergleich die deutlichste Methode ist, um ihre Unterschiede zu erkennen. Die Zahlen geben repräsentative Bereiche für Filamente an; wie bei jedem Polymer in diesem Band gibt es echte Abweichungen zwischen den Marken, und eine bestimmte Spule sollte kalibriert werden, anstatt die Werte aus der Tabelle zu übernehmen.

Eigenschaft	ABS	ASA	HIPS
Glasübergangstemperatur (T_g)	~105 °C	~100 °C	~90–100 °C
Zugfestigkeit	30–45 MPa	ähnlich wie ABS	~34 MPa
Elastizitätsmodul	~2 GPa	ähnlich wie ABS	~1,9 GPa
Bruchdehnung	10–40 %	ähnlich wie ABS	niedriger als bei ABS
Kerbschlagzähigkeit nach Izod	15–25 kJ/m ²	ähnlich wie ABS	mäßig
UV-Beständigkeit	schlecht (Monate im Freien)	ausgezeichnet (Jahre im Außenbereich)	schlecht
Chemische Beständigkeit	mäßig	mäßig	geringer (kein Acrylnitril)
Lösungsmittelglättung	Aceton	Aceton	Limonen
Hauptfunktion	kostengünstige technische Teile	Ersatzteile für den Außenbereich	lösliche Stützstrukturen

Tabelle 10.2 – Eigenschaftenspektrum der Styrolkunststoffe. ABS und ASA sind mechanisch nahezu gleichwertig; die Spalten, die diese Familie tatsächlich unterscheiden, sind die UV-Beständigkeit und die Wahl des Glättungsmittels. HIPS tauscht Steifigkeit und chemische Beständigkeit gegen Limonenlöslichkeit ein, was es als Stützmaterial nützlich macht.

10.6 Druckverfahren und Kalibrierung

Der Druckprozess für Styrolkunststoffe ist im Wesentlichen ein Spannungsmanagement. Die unten zusammengefassten Parameter sind Ausgangspunkte; die ihnen zugrunde liegende Logik ist für die gesamte Familie einheitlich. Die Betttemperatur wird hoch gehalten, um die ersten Schichten über dem Punkt zu halten, an dem sie sich zusammenziehen und abheben würden. Die Kammer ist geschlossen, damit das gesamte Teil langsam und gleichmäßig abkühlt, was die Schichten-zu-Schichten-Spannung begrenzt, die sowohl Verziehen als auch Risse zwischen den Schichten verursacht. Die Teilekühlung wird sparsam oder gar nicht eingesetzt – aggressive Lüfterkühlung friert jede Schicht ein, bevor sie vollständig mit der darunterliegenden verbunden ist, was das Teil schwächt und das Verziehen verschlimmert. Ein Brim oder Raft ist bei großen Teilen Standard. PEI haftet stark an allen drei Materialien, daher ist die Haftung selten die Fehlerursache; vielmehr ist es das durch Verziehen verursachte Abheben der Ecken.

Parameter	ABS	ASA	HIPS
Düsentemperatur	240–260 °C	250–270 °C	230–250 °C
Betttemperatur	95–110 °C	105–110 °C	100–110 °C
Kammer	geschlossen, passiv 40–50 °C	geschlossen	geschlossen
Teilekühlung	minimal bis keine	minimal bis keine	minimal bis keine

Parameter	ABS	ASA	HIPS
Bettfläche	PEI; Rand für große Teile	PEI; Rand für große Teile	PEI
Schrumpfung	1–2 %	ähnlich wie bei ABS	ähnlich wie bei ABS

Tabelle 10.3 – Konsolidierte Druckparameter für Styrolkunststoffe. Die Bereiche überschneiden sich stark, da die drei Materialien eine gemeinsame Grundstruktur und ein gemeinsames Versagensverhalten aufweisen; die Gehäuseform und die kontrollierte Teilekühlung sind wichtiger als die genaue Temperatur innerhalb dieser Bereiche. Kalibrieren Sie die jeweilige Spule – das bearbeitete ASA-Beispiel in Tabelle 10.1 zeigt die Methode.

10.7 Nachbearbeitung: Glätten mit Lösungsmitteldampf

Die Glättung mit Lösungsmitteldampf ist das charakteristische Nachbearbeitungsverfahren der Styrol-Familie und ein echter Vorteil gegenüber den meisten anderen Filamentfamilien. Durch das kurze Eintauchen eines Teils in den Lösungsmitteldampf verflüssigt sich die äußerste Oberflächenschicht; die Oberflächenspannung glättet diese Schicht dann, wodurch Schichtlinien verschwinden und eine glänzende, fast spritzgegossene Oberfläche entsteht. Der Prozess verschließt zudem die Porosität der Oberfläche, was die Beständigkeit des Teils gegen das Eindringen von Wasser verbessert.

ABS und ASA werden mit Aceton geglättet, das als kontrollierter Dampf statt durch Eintauchen aufgebracht wird. Die Technik ist bei diesen beiden Materialien sehr flexibel: Eine kurze Einwirkzeit erzeugt eine leichte Satinierung, eine längere einen hohen Glanz, und die Oberfläche gewinnt ihre Härte zurück, sobald das restliche Lösungsmittel vollständig verdunstet ist – was Zeit braucht und nicht überstürzt werden sollte. HIPS wird stattdessen mit Limonen geglättet – Aceton greift HIPS aggressiver an als ABS und neigt dazu, die Oberfläche zu stark zu ätzen. Zu berücksichtigende Kompromisse sind, dass das Dampfglätten feine Details und Kanten leicht abmildert, dass es die Abmessungen geringfügig verändert, wenn die Oberfläche nachfließt, und dass beide Lösungsmittel eine Belüftung und angemessene Handhabung erfordern – Aceton wegen seiner Entflammbarkeit, Limonen wegen seines Potenzials zur Hautsensibilisierung.

10.8 Mehrmaterialdruck: HIPS als abbrechbare Stützstruktur

Auf Dual-Hotend- oder IDEX-Hardware lässt sich HIPS gut mit Polycarbonat-Blends als abbrechbare Stützstruktur kombinieren. Die Haftung zwischen PC und HIPS ist von Natur aus mittelmäßig – stark genug, um die Stützstruktur während des Drucks an Ort und Stelle zu halten, schwach genug, um sich beim Abkühlen sauber und ohne Auflösungsschritt ablösen zu lassen. Ein praktischer Arbeitsablauf für PC-Blend mit HIPS-Abtrennstütze ist eine mit Magigoo PC vorbereitete PEI- oder Garolite-Platte, auf der zwei Schichten einer PCTG-Schnittstelle (geradlinig, 0,2 mm Abstand, null Z-Spalt) über dem HIPS-Stützkörper aufgebracht werden. Die PCTG-Schnittstelle löst sich sauberer ab als HIPS, das direkt auf PC-Blend gedruckt wird, und macht das Limonenbad vollständig überflüssig – eine sinnvolle Vereinfachung, wenn der Stützdruck nur abgebrochen und nicht aufgelöst werden muss.

10.9 Markenlandschaft

ABS ist ein Standardfilament, das von praktisch jedem Hersteller angeboten wird, und die praktische Unterscheidung erfolgt zwischen einfachem ABS und den schlagzähmodifizierten oder verformungsarmen technischen Typen, die mehrere Anbieter unter ihren eigenen Namen vermarkten – letztere lassen sich leichter drucken und sind den Aufpreis für größere Teile wert. ASA hat ein kleineres, aber gut etabliertes Feld: FormFutura ApolloX, Prusament ASA, Fiberlogy ASA, Polymaker PolyLite ASA und Overture ASA sind repräsentativ für die führenden Markenprodukte, und ASA ist der Typ, bei dem sich der Kauf eines bekannten Filaments anstelle der billigsten verfügbaren Spule am deutlichsten auszahlt, da die Außenleistung vom UV-Stabilisatorpaket abhängt. HIPS ist weit verbreitet und kostengünstig; da es vorwiegend als Stützmaterial verwendet wird, sind bei der Auswahl die Konsistenz von Spule zu Spule und die reine Limonenlöslichkeit wichtiger als mechanische Werte.

10.10 Anwendungsgeeignetheit und aktuelle Marktposition

Wählen Sie ABS, wenn: das Teil ein kostenorientiertes technisches Bauteil ist, das mäßige Hitzebeständigkeit oder eine Glättung mit Acetondampf benötigt – Prototypen für den Automobilbereich unter der Motorhaube, Elektronikgehäuse und Ähnliches – und ein geschlossener Drucker verfügbar ist. **Wählen Sie ASA, wenn:** das Teil im Außenbereich eingesetzt wird – Sprinklergehäuse, Markierungspfähle, Elektronikgehäuse für den Außenbereich, Gartengeräte –, wo PCTG der Witterung ausgesetzt wäre und eine Polycarbonat-Mischung überdimensioniert wäre; ASA ist die richtige Wahl bei UV-Belastung. **Wählen Sie HIPS, wenn:** ein lösliches oder abbrechbares Stützmaterial für einen ABS- oder ASA-Druck benötigt wird oder, seltener, für ein leichtes Kosmetikteil. **Wählen Sie etwas anderes, wenn:** das Teil Duktilität, Transparenz oder Lebensmittelechtheit benötigt oder wenn kein geschlossener Drucker verfügbar ist – PCTG ist das einfachere technische Filament, und die Polycarbonat-Mischungen decken die Fälle mit höheren Temperaturen und höherer Zähigkeit ab. Die Styrol-Familie wurde im Bereich der allgemeinen technischen Anwendungen teilweise aus dem Desktop-FDM verdrängt, doch ABS hinsichtlich der Kosten, ASA hinsichtlich der Außenbeständigkeit und HIPS als Stützmaterial behalten jeweils eine Nische, die die verdrängenden Materialien nicht vollständig abdecken.

Teil V Polyolefine

Polypropylen – der weltweit am zweithäufigsten produzierte Standardkunststoff und das am schwierigsten zu druckende Standardpolymer auf FDM-Hardware für Endverbraucher – sowie die kleinere Nische des Polyethylens. Die entscheidenden Herausforderungen sind die geringe Oberflächenenergie bei der Bettadhäsion und die hohe Kristallisationsschrumpfung; die Lösungen sind spezielle PP-beschichtete Bauplatten und Faserverstärkung.

11. Polypropylen (PP) – Ein tiefer Einblick

Polypropylen ist ein Polyolefin-Standardpolymer mit einer weltweiten Produktion von rund **90 Millionen Tonnen** jährlich – an zweiter Stelle nach Polyethylen. Der Großteil wird im Spritzguss und in der Extrusion verbraucht: Verpackungen, Innenausstattungen für Kraftfahrzeuge, Textilien, Konsumgüter. Die Eigenschaften, die seine industrielle Dominanz begründen – geringe Dichte ($0,90\text{--}0,91\text{ g/cm}^3$, niedriger als bei jedem anderen wichtigen Thermoplast), hohe chemische Beständigkeit, hohe Ermüdungsfestigkeit, geringe Wasseraufnahme, Lebensmittelechtheit und einfache Recyclingfähigkeit – machen es auch für den 3D-Druck attraktiv. Dieselben Eigenschaften machen PP jedoch für die schichtweise Extrusion äußerst ungeeignet.

Drei Einschränkungen bestimmen die Prozessgestaltung bei PP unabhängig von der Marke. Erstens haften weder PEI noch Glas noch pulverbeschichtete Bauplatten ohne Zwischenschicht auf PP; diese Schicht ist entweder eine spezielle PP-auf-PP-Platte, Polypropylen-Klebeband oder ein PP-spezifischer Klebstoff. Zweitens erfordern faserverstärkte Typen ausnahmslos eine gehärtete oder verschleißfeste Düse. Drittens muss die Teilekühlung für die Schichthaftung minimiert werden; PP verträgt die für PLA und PETG üblichen aggressiven Kühlprofile nicht. Die materialwissenschaftliche Literatur hat fast ein Jahrzehnt damit verbracht, diese Probleme anzugehen, vor allem durch die Zugabe von Glas- oder Kohlefasern und durch die Entwicklung einer PP-spezifischen Chemie für die Bettadhäsion.

11.1 Homopolymer vs. Copolymer

Handelsübliches PP lässt sich in zwei große Kategorien einteilen. **Homopolymer-PP** besteht aus reinen Propylenketten; es ist steifer, weist eine höhere Zugfestigkeit auf, ist kristalliner, spröde bei niedrigen Temperaturen und verzieht sich stark. **Copolymer-PP** – entweder ein statistisches Copolymer mit einigen Prozent Ethylen, das entlang der Kette verteilt ist, oder ein schlagzähes Copolymer (Block- oder heterophasisch) mit einer diskreten Ethylen-Propylen-Kautschukphase – tauscht etwas Steifigkeit und Kristallinität gegen eine deutlich verbesserte Schlagzähigkeit (insbesondere unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) und eine etwas bessere Druckbarkeit ein.

Die erfolgreichsten PP-Typen für den 3D-Druck sind Copolymere: 3DXTech CarbonX PP+CF, Braskem FL900PP sowie die technischen Produkte von Fiberlogy und Recreus basieren alle ausdrücklich auf PP-Copolymer-Matrizen. Reines Homopolymer-PP ist auf dem FFF-Markt für Endverbraucher selten, da die erhöhte Neigung zum Verziehen große Teile auf den meisten Geräten praktisch undruckbar macht.

11.2 Filamentvarianten

Variante	Typische Füllung	Position
Ungefülltes PP	0 %	Höchste Dehnung ($>100\%$); Living Hinge, wasserdichte Behälter; am schwierigsten zu bedrucken
PP-GF	15–30 % Glasfaser	Gängigste technische Sorte; Verzug weitgehend unter Kontrolle; kostengünstig
PP-CF	15–30 % geschnittene CF (oft recycelt)	Höchste Steifigkeit und geringste Dimensionsänderung; mattschwarz; abrasiv
PP-Talk / Mineral	20–40 % Talk/ CaCO_3	Häufig in Spritzgussqualitäten, selten in Filamenten; beugt Verzug nicht vor
Recyceltes PP / R-PP	100 % PCR/PIR	Fiberlogy R PP; aus dem Meer geborgenes PP-GF (Porthcurno); das Leistungsspektrum entspricht dem von Neuware

Tabelle 11.1 – PP-Filamentvarianten. Die Faserverstärkung ist der wichtigste Faktor für die Druckbarkeit; CF und GF weisen jeweils anwendungsabhängige Vor- und Nachteile auf.

11.3 Eigenschaftsprofil

Eigenschaft	Ungefülltes PP	PP-GF (15–30 %)	PP-CF (15–30 %)
Dichte (g/cm ³)	0,90–0,91	1,05–1,15	0,91–1,00
Zugfestigkeit, XY (MPa)	15–25	30–50	25–45
Zugmodul, XY (GPa)	1,0–1,4	2,0–3,0	2,0–4,0
Bruchdehnung (%)	100–600	3–10	3–6
Biegemodul (GPa)	0,8–1,2	2,0–3,0	1,8–3,5
Charpy-Kerbschlagzähigkeit ² (kJ/m)	5–15	7–12	10–15
HDT bei 0,45 MPa (°C)	85–100	115–140	115–160
HDT bei 1,80 MPa (°C)	55–75	90–115	95–120
Shore D	65–72	67–72	60–65
Feuchtigkeitsaufnahme (%)	<0,05	0,05–0,15	<0,05
Schichtzähigkeit (MPa)	10–15	15–20	10–15
Volumenschumpfungstendenz	hoch (Verformungen)	gering	sehr gering
Für Living-Hinge geeignet	ja	nein	nein
Es wird eine gehärtete Düse benötigt	nein	ja	ja

Tabelle 11.2 – PP-Eigenschaftsprofil nach Variante. Die HDT-Werte sind mit Vorsicht zu betrachten: Der für einige PP-CF-Typen bei 0,45 MPa angegebene Wert von 158 °C entspricht zwar der Prüfmethode, bedeutet jedoch nicht, dass das Bauteil bei dieser Temperatur unter Belastung funktionsfähig ist. PP kriecht unabhängig vom HDT-Wert oberhalb von 60–70 °C.

Bei der chemischen Beständigkeit zeichnet sich PP besonders aus. Sowohl in Herstellerangaben als auch in der Fachliteratur zeigt PP Beständigkeit gegenüber verdünnten und konzentrierten Säuren (Essigsäure, Borsäure, Salzsäure, Phosphorsäure, Schwefelsäure), Hydroxidbasen (Ammonium, Natrium, Kalium, Barium, Magnesium, Calcium), den meisten Alkoholen, aliphatischen und aromatischen Lösungsmitteln (Aceton, Ethanol, Methylethylketon), Salzlösungen und Wasser bis zu 80 °C. PP wird durch starke Oxidationsmittel (konzentrierte Salpetersäure, Chromsäure, heiße Schwefelsäure über 60 %) zersetzt und zeigt bei längerem Kontakt mit unpolaren Kohlenwasserstofflösungsmitteln bei erhöhten Temperaturen Kriechverhalten.

11.4 Das Problem der Bedruckbarkeit

Warum sich PP verzieht. PP ist teilkristallin mit einem Schmelzübergang bei etwa 160 °C und einem Kristallisationsbeginn zwischen 110 und 130 °C beim Abkühlen. Die Volumenschumpfung vom Schmelzzustand auf Raumtemperatur liegt in der Größenordnung von 1,5–2,5 %, verglichen mit etwa 0,4 % bei amorphen Polymeren wie PETG. Durch die schichtweise Aufbauprozess bei einem FFF-Druck konzentriert sich diese Schrumpfung in der Ebene an den Kanten des Teils. Das Problem verschärft sich mit den Abmessungen des Teils: Ein 20-mm-Würfel lässt sich problemlos drucken; dieselbe Geometrie, auf 200 mm skaliert, weist an den Ecken eine kumulative Schrumpfkraft auf, die ausreicht, um jede Standard-Bettadhäsion zu überwinden. Glas- und Kohlefasern reduzieren die Schrumpfung in der Ebene um die Hälfte bis zwei Drittel, was der strukturelle Grund dafür ist, dass faserverstärktes PP ohne Gehäuse gedruckt werden kann, während dies bei unverstärktem PP oft nicht möglich ist.

Warum PP nicht an PEI haftet. Die Haftung auf dem Druckbett beruht auf Grenzflächenbenetzung und intermolekularer Anziehung. PEI hat eine Oberflächenenergie von ~40 mN/m und ist auf polare Wechselwirkungen angewiesen, um amorphe Polymere zu binden; PP ist ein unpolares Polyolefin mit einer Oberflächenenergie von ~30 mN/m und kann keine polaren Gruppen für diese Wechselwirkungen bereitstellen. Der Kontakt ist nahezu reibungsfrei. Praktische Haftlösungen nutzen alle die Selbsthaftung von PP auf PP: eine Polypropylenoberfläche auf dem Bett, eine Betttemperatur, die niedrig genug ist, um das Oberflächen-PP in die erste Schicht des Drucks einzuschmelzen, und anschließend

Abkühlung zum Ablösen.

Wie Verstärkung beide Probleme behebt. Fasern kristallisieren nicht, daher reduzieren sie die Volumenschrumpfung proportional zur Beladung. Fasern richten sich während des Drucks in Extrusionsrichtung aus und begrenzen die Schrumpfung der Matrix physikalisch anisotrop – weniger in Druckrichtung, stärker senkrecht dazu. Ein zu 30 % mit Glas gefülltes PP weist in Druckrichtung etwa ein Drittel der linearen Schrumpfung von ungefülltem PP auf. Dies reicht für den gefahrtraumfreien Druck mittelgroßer Teile aus. Die Oberflächenenergie bleibt unverändert: Die Strategie für die Haftung am Druckbett ist identisch mit der für ungefülltes PP.

11.5 Markenlandschaft

Prusament PP Carbon Fiber

Hergestellt von Prusa Polymers, Tschechische Republik; Carbonfasern aus Produktionsabfällen und ausgedienten CF-Verbundwerkstoffen. Dichte $0,91 \text{ g/cm}^3$, 0,03 % Feuchtigkeitsaufnahme in 24 Stunden, HDT $158 \text{ °C} / 115 \text{ °C}$ (bei 0,45 und 1,80 MPa). Zugstreckgrenze $27,3 \pm 0,7 \text{ MPa}$ horizontal, $30,7 \pm 0,3 \text{ MPa}$ vertikal; Modul $2,1 / 2,5 \text{ GPa}$; Charpy ohne Kerbe 19 kJ/m^2 . 650-g-Spulen. Drucken bei $270 \pm 10 \text{ °C}$ Düse, $85 \pm 10 \text{ °C}$ Bett, $\leq 40 \text{ mm/s}$, Lüfter aus, Extrusionsmultiplikator 1,09. Prusa PP-Platte empfohlen; PEI smooth + PP-Klebeband ist die dokumentierte Alternative. Keine Gehäuse erforderlich.

Prusament PP Glasfaser

Glasfaservariante von PP-CF. Dichte $1,12 \text{ g/cm}^3$, MFR $14,7 \text{ g/10 min}$, HDT $138,3 / 112,6 \text{ °C}$, Zugstreckgrenze $40,3 / 48,8 \text{ MPa}$ horizontal/vertikal, Modul $2,1 / 2,5 \text{ GPa}$, Charpy ohne Kerbe $17,6 / 26,9 \text{ kJ/m}^2$. 850-g-Spulen, nur in Naturfarbe. Drucken bei $245 \pm 10 \text{ °C}$, $95 \pm 10 \text{ °C}$ Bett, $\leq 50 \text{ mm/s}$, Extrusionsmultiplikator 1,03, Füll-/Randüberlappung 15 % (deutlich niedriger als die für PP-CF verwendeten 40 %). PP-Platte, gehärtete Düse. PP-GF ist die steifere, HDT-stärkere und kostengünstigere Wahl innerhalb der Prusament PP-Familie.

Braskem FL900PP-Familie

Braskem ist der größte Polyolefin-Hersteller in Amerika und der Hauptlieferant von Basis-PP-Harz für zahlreiche Filament-Compoundierer. Das Flaggschiff FL900PP-CF besteht zu 100 % aus recycelten Carbonfasern. Die Zugfestigkeit beträgt etwa das Sechsfache von ungefülltem PP. Spulen zu 700 g. Die Produktlinie umfasst außerdem FL100PP (ungefülltes Prototyping), FL105PP (hohe Ermüdungsfestigkeit), FL500PP-GF (Glasfaser) sowie die Granulatprodukte GR100PP und GR105PP für FGF. Eine von Braskem veröffentlichte Fallstudie zu einem Drohnenarm dokumentiert eine Gewichtsreduzierung von 37 % gegenüber dem Werkstück bei einer um 63 % geringeren Belastung beim Aufprall und einer um ca. 4 % verbesserten Flugzeit – einer der wenigen öffentlich zugänglichen Leistungsvergleiche für PP-CF-Produkte.

3DXTech CarbonX PP+CF

Hergestellt in Grand Rapids, Michigan. Spezielle PP-Copolymer-Matrix, verstärkt mit hochmoduligem, geschnittenem CF. 3DXTech hält einen zum Patent angemeldeten Anspruch auf eine verbesserte Formulierung hinsichtlich verbesserter thermischer Eigenschaften und geringer Schrumpfung im Vergleich zu PP-CF von Wettbewerbern. 750-g-Spulen (Volumen einer 1-kg-ABS/ASA-Spule aufgrund der Dichte). Empfohlene Schichthöhe 60 % des Düsendurchmessers, harte Unterlage 0,25 mm; darunter verursacht der Rückstau der faserverstärkten Schmelze Staus und das Schleifen des Filamentantriebs.

Fillamentum PP 2320

Ungefülltes PP in Industriequalität. Dichte $0,96 \text{ g/cm}^3$ (höher als bei typischem ungefülltem PP, was auf einen Mineralstoffgehalt hindeutet), MFR 7,4 g/10 min. Zugfestigkeit 23 MPa, Dehnung 20 %, Modul 1400 MPa, Charpy ohne Kerbe 184 kJ/m^2 (entspricht einem schlagzähmodifizierten Copolymer). Drucken bei 225–245 °C, 90–105 °C Bett, 20–40 mm/s, Brim erforderlich, Magigoo PP empfohlen. 600-g-Spulen, natur/schwarz/weiß. Die Dokumentation ist eindeutig: „*Das Drucken mit Polypropylen ist äußerst anspruchsvoll und erfordert eine präzise Vorbereitung.*“ Deklarationen zur Lebensmittelechtheit auf Anfrage. Einsatzbereich –40 bis 100 °C; unter anderem für orthopädische Schienen vermarktet.

Fiberlogy PP und R PP

Neuware Fiberlogy PP und zu 100 % recyceltes R PP aus PCR/PIR-Rohstoffen. Dichte $1,05 \text{ g/cm}^3$ (Füllstoffgehalt über das Basiscopolymer hinaus), Zugfestigkeit 14 MPa, Modul 700 MPa, Dehnung >100 %. Durchmesser toleranz $\pm 0,02 \text{ mm}$. Druck bei 220–250 °C an der Düse, Bett nicht zwingend erforderlich bei Verwendung von Packband (die meisten Anwender 80–100 °C).

Spulen zu 0,75 kg und 2,5 kg.

FormFutura Centaur PP

Die Variante „Natural“ ist lebensmittelecht, spülmaschinenfest und mikrowelleneeignet. Dichte $0,9 \text{ g/cm}^3$, Dehnung >600 % (eine der höchsten veröffentlichten Werte für ein PP-Filament). Wasserdichter Einwanddruck wird ausdrücklich unterstützt. 500-g-Spulen, 1,75 und 2,85 mm. Empfohlene Düsentemperatur 200–240 °C. Die ungewöhnliche Dehnung macht Centaur zu einer guten Wahl für Living-Hinges und Behälter im Vase-Modus, bei denen die Flexibilität der Wand ein Designmerkmal ist.

PPprint P-Filament 721

Deutschland; Polypropylen-Spezialist. Das P-Filament 721 lässt sich bereits bei 200–220 °C extrudieren – das niedrigste Temperaturfenster aller handelsüblichen PP-Filamente. Der vorgesehene Arbeitsablauf nutzt PPprint-Substrate: P-Surface 141 (PP-Haftfolie), P-Adhesive 220 (Befestigung), P-Roller 621 (Installation). Die Drucke lösen sich durch Erhitzen des Bettes auf 110

°C. Das Bett bleibt während des Druckvorgangs kalt (20 °C im stationären Zustand, 50–70 °C in der ersten Schicht), wobei die Wärme auf die Entnahme des Teils verlagert wird – dies vermeidet das Problem der Verformung durch langes Einweichen, das Braskem bei höheren Betttemperaturen dokumentiert. P-Filament 721 ist biokompatibel gemäß DIN EN ISO 10993-5; die für die Druckbarkeit optimierte Formulierung entspricht nicht den FDA-Vorschriften für den Kontakt mit Lebensmitteln. PPprint produziert auch P-Support 279, ein spezielles, PP-kompatibles, ablösbares Stützmaterial – wichtig, da die meisten Allzweck-Stützmaterialien überhaupt nicht auf PP haften.

UltiMaker PP, Recreus PP3D / PP-GF, generisch / Sunlu / Yousu

UltiMaker PP: 500-g-Spulen, nur 2,85 mm, naturfarben, in erster Linie für das UltiMaker-Drucker-Ökosystem konzipiert. Druckbereich 220–240 °C / 80–100 °C, Lüfter 50 %. NFC-Verifizierung und vorgefertigte Slicer-Profilen sind der Mehrwert des Ökosystems; außerhalb dieses Ökosystems ist der Preis pro Kilogramm ungünstig. **Recreus PP3D und PP-GF** (Spanien): PP-GF gemeinsam mit Repsol entwickelt; Standard-PP-GF-Hüllkurve. Düsen von 0,4–0,6 mm, mindestens aus gehärtetem Stahl, 0,2 mm Schichthöhe optimal. Historisches Recreus PP wurde mit einem speziellen PP-Kleber für PEI-Bett bei nur 40 °C ausgeliefert – der Cold-Bed-Ansatz wurde später von PPprint verfeinert. **Generic / Sunlu / Yousu / Eryone / Iemai:** Chinesisches ungefülltes PP zu etwa der Hälfte der Preise der Markenprodukte. Von der Sunlu-PP-Community gemeldete Kalibrierung: Düse 220 °C, Bett 60 °C, EM 1,04, PP-Folie obligatorisch, Lüfter aus, Brim, „avoid_crossing_perimeters“ deaktiviert. Geeignet für Prototypen; nicht für dokumentierte mechanische Leistung oder Chargenkonsistenz.

11.6 Druckparameter (zusammengefasst)

Parameter	Ungefülltes PP	PP-GF	PP-CF
Düse (°C)	200–245	230–260	260–280
Bett (°C)	20–100*	85–105	75–95
Druckgeschwindigkeit (mm/s)	20–50	30–60	30–50
Geschwindigkeit der ersten Schicht (mm/s)	10–20	15–25	15–25
Lüfter zur Teilekühlung (%)	0–30	0	0 (Brücken 100)
Schichthöhe (mm)	0,15–0,30	0,20–0,32	0,25–0,32
Wandanzahl	3–5	3–4	3–4
Extrusionsmultiplikator	1,00–1,05	1,00–1,05	1,05–1,10
Rückzug (DD, mm)	1–2	1–2	0,8–1,5
Rückzug (Bowden, mm)	4–6	3–5	3–5
Rand	erforderlich	empfohlen	empfohlen
Gehäuse	vorteilhaft	optional	nicht erforderlich
Kammertemperatur (°C)	25–50	25–50	Umgebungstemperatur
Düsenhärte	Messing OK	gehärtet	gehärtet
Trocknung	nein	ja	ja

Tabelle 11.3 – Startparameter für den PP-Druck. *Die Betttemperatur für ungefülltes PP wird durch die Haftstrategie bestimmt: PP-Klebeband funktioniert bei 80–100 °C; der Cold-Bed-Ansatz verwendet ein Bett mit einer stationären Temperatur von 20 °C; der historische Recreus-Workflow verwendete 40 °C auf PEI mit PP-Kleber.

Der Fan-Off-Betrieb ist für die Schichthaftung unerlässlich; das enge Fenster von PP zwischen dem Beginn der Kristallisation und der Temperatur, bei der nachfolgende Schichten verschmelzen, bedeutet, dass eine aggressive Kühlung zu sichtbarer Schichttrennung führt. 3–5 Perimeterwände, um die mäßige Schichthaftung auszugleichen (Prusament PP-CF TDS: Schichthaftung 13 ± 1 MPa gegenüber einer Zugfestigkeit des Filaments von 21 MPa). Eine Wölbung der Oberseite bei spärlicher Füllung ist ein bekanntes Versagensphänomen – wechseln Sie bei einer Dichte von 20–25 % von Gyroid zu Kubisch und erhöhen Sie die Anzahl der oberen Schichten auf 6–8.

11.7 Strategien zur Bettadhäsion (PP-spezifisch)

Die Bettadhäsion ist die wichtigste Variable für einen erfolgreichen PP-Druck. Jeder erfolgreiche Ansatz bietet eine polypropylenkompatible Oberfläche, auf der der Druck haften kann – PEI, Glas und pulverbeschichteter Stahl halten PP allein nicht.

PP-beschichtete Druckplatten. Pulverbeschichtete PP-Aufbauplatten sind der sauberste und reproduzierbarste Ansatz. Die PP-Platte der Marke Prusament (konzipiert für das Standardformat mit magnetischem Federstahlbett) und die P-Surface 141 von PPprint sind die am weitesten verbreiteten Optionen. Mit IPA entfetten, auf das Magnetbett legen, drucken. Bett 85–95 °C. Entfernung nach dem Abkühlen; keine Rückstände. Die Platte ist ein Verbrauchsmaterial, das viele Drucke vor dem Austausch aushält. Das System von PPprint sieht einen Betrieb mit kaltem Bett vor: PP-Folie mit selbstklebender Rückseite oder P-Adhesive 220, installiert mit P-Roller 621, Bett bei 20 °C im stationären Zustand und am Ende des Drucks auf 110 °C erhitzt zur Ablösung. PP-Aufkleber von Drittanbietern in Standardgrößen für Bauplatten sind bei Online-Anbietern weit verbreitet.

PP-Packband. Die ursprüngliche Community-Lösung und nach wie vor die kostengünstigste. Standard-Packband auf PP-Basis (Tesa, 3M, Scotch), das auf sauberes Glas oder PEI aufgebracht wird, bietet eine PP-Oberfläche; der Acrykleber hält es auf dem Bett. Bett 80–100 °C, leichtes Entfernen nach dem Abkühlen. Nachteile: Zeitaufwand beim Anbringen auf einem 250-mm-Bett, und der Klebstoff des Klebebands überträgt sich auf das Bett (Aceton entfernt ihn; Aceton greift PEI bei wiederholter Anwendung allmählich an). Für Anwender, die zwischen PP und anderen Materialien wechseln, ist Klebeband auf einem speziellen Glasbett sauberer als Klebeband auf PEI.

Magigoo PP und Magigoo PP-GF. Flüssiger Klebstoff, speziell für PP entwickelt, zum Auftragen auf sauberes Glas, PEI, BuildTak, pulverbeschichtete Oberflächen oder Kapton. Mit der federbelasteten Spitze der Flasche gleichmäßig verteilen, den Druckbereich bedecken, kurz trocknen lassen. Bett 85–100 °C. Reinigung mit Wasser (wasserlöslich). Magigoo PP-GF ist die stärkere Formulierung für glasfaserverstärktes PP und verformungsanfällige, unverstärkte PP-Geometrien mit scharfen Ecken oder langen flachen Abschnitten. Konsens in den wichtigsten FDM-Foren: Die Magigoo PP-Familie ist die zuverlässigste Klebstoffoption für schwierige PP-Drucke, insbesondere in Kombination mit einer PP-Folie zur Absicherung.

Was nicht funktioniert: Der Direktdruck von PP auf blankem PEI, Glas, Spiegel, BuildTak, FR-4/G10 oder pulverbeschichtetem Stahl haftet nicht. Herkömmlicher PVA-Klebstift ist zu dünnflüssig und zu polar. Haarspray und Klebstoffe auf Acrylbasis sind ebenfalls ungeeignet. Die für andere Materialien unverzichtbare Reinigung mit IPA hilft bei der PP-Haftung nicht – entscheidend ist die Oberflächenchemie, nicht die Verschmutzung. Hersteller von PP-Platten empfehlen für die Reinigung der PP-Platte selbst in der Regel Seife und warmes Wasser anstelle von IPA, da Seifenrückstände die Haftung von PP auf PP nicht beeinträchtigen.

11.8 Nachbearbeitung und chemische Verträglichkeit

PP lässt sich nicht durch Verdampfen glätten: Aceton, MEK, Ethylacetat, DCM, IPA, Ethanol, Methanol und Toluol haben bei Raumtemperatur keinerlei Wirkung auf PP. Die chemische Beständigkeit, die die Anwendungsmöglichkeiten von PP bestimmt, schließt die meisten Nachbearbeitungsmöglichkeiten aus. Praktische Optionen sind mechanischer Natur: Nassschleifen (Körnung 220, 400, 600, 1000) für eine matte Oberfläche; Rasierklingen und Rotationswerkzeuge zum Entfernen von Stützstrukturen. Nassschleifen vor Trockenschleifen, um Partikel in der Luft zu minimieren (einatembare Glas- und CF-Fragmente sind dokumentierte Gefahren). PP verformt sich nicht unter Reibungswärme, wodurch das Schleifen mit Elektrowerkzeugen ohne die bei PLA oder PETG auftretenden Verschmierungen möglich ist.

Lackieren und Kleben sind die Haupteinschränkungen. Standardklebstoffe (CA, Epoxid, Polyurethan) haften schlecht, da sie die niederenergetische Oberfläche nicht benetzen können. Lösungen: Flammbehandlung (Propanbrenner oxidiert die Oberfläche und erhöht die Energie von 30 auf 30–55 mN/m); Koronabehandlung für Serienfertigung; PP-spezifische Grundierungen (3M 4298UV, Loctite 770) gefolgt von Cyanacrylat. 2K-Epoxid- und XTC-3D-Beschichtungen haften etwas besser als unbehandelte Direktklebstoffe, profitieren aber dennoch von einer Oberflächenaktivierung. Mechanische Verriegelungen (Schnappverbindungen, Schwalbenschwanzverbindungen, Gewindeeinsätze) sind bei PP-Baugruppen in der Regel zuverlässiger als chemische Verklebungen.

11.9 Überlegungen zu Multimaterial- und Dual-Hotend-Systemen

Multimaterial-Drucker, die sich eine einzige Düse teilen (MMU-Systeme mit einem Extruder) oder zwei Hotends in einem einzigen Gehäuse betreiben (Dual-Hotend, IDEX), stehen vor derselben Einschränkung: Die Kammertemperatur und die Betttemperatur müssen mit jedem im Druck geladenen Filament kompatibel sein. Mehrere Druckerhersteller veröffentlichen explizite Kompatibilitätskategorien zum Zeitpunkt des Slicings; die zugrunde liegende Physik ist dieselbe, unabhängig davon, welcher Drucker sie durchsetzt. **PP, PP-CF und PP-GF sind in diesen Schemata Materialien für mittlere Temperaturen**, ebenso wie HIPS, PE, PE-CF, EVA und PHA. Hochtemperaturfilamente (ABS, ASA, PC, PA, PA-CF, PA-GF, PA6-CF, PET-CF, PPS, PPS-CF, PPA-CF, PPA-GF, ABS-GF) können nicht mit PP in einem einzigen Druckvorgang gemischt werden, da die für das technische Material erforderlichen Kammer- und Betttemperaturen das PP zersetzen oder verziehen würden. Niedertemperatur-Filamente (PLA, PETG, PETG-CF, TPU, PVA, BVOH, PCTG) können mit PP gemischt werden, sofern die Kammertemperatur sorgfältig geregelt wird, um ein Erweichen des Niedertemperaturmaterials zu vermeiden.

Stützmaterial-Schnittstellen. Die schlechte Haftung von PP an anderen Materialien macht es in bestimmten Kombinationen zu einer hervorragenden ablösbaren Stützmaterial-Schnittstelle; umgekehrt können PCTG und HIPS als ablösbare Schnittstellen für

PP. PPprints P-Support 279 ist ein spezielles, PP-kompatibles Abreißstützmaterial, das mit dem P-Filament 721 kombiniert wird. **Mehrmaterial-Puffersysteme:** Lange, kurvenreiche Filamentwege in Filamentpuffern (Gehäuse im AMS-Stil, MMU-Puffer, seitlich montierte Spulenhalter mit PTFE-Führung) verstärken durch den Rückzug verursachte Fadenbildung und Filamentwiderstand, beides Eigenschaften, die PP nur schlecht verträgt. Faserverstärktes PP kann interne Pufferkomponenten in Systemen verschleifen, die nicht für abrasive Materialien ausgelegt sind; überprüfen Sie, ob in der Dokumentation des Puffersystems die Unterstützung für faserverstärkte Materialien aufgeführt ist, bevor Sie PP-CF oder PP-GF durch das System laufen lassen.

11.10 Leitfaden zur Anwendungsauswahl

Anwendung	Empfohlene Sorte	Begründung
Living-Hinges, Schnappdeckel	Ungefülltes PP-Copolymer	Nur ungefülltes PP behält bei wiederholter Biegung eine Dehnung von >100 % bei
Chemikalienbehälter, Laborgeräte	PP-GF oder PP-CF	Chemische Beständigkeit durch Grundmaterial; Fasern für Formstabilität
Drohnen-Flugkörper, ferngesteuerte Flugzeuge	PP-CF	Niedrigste Dichte aller strukturellen FFF-Filamente; schlagfest
Wasserdichte Flaschen, einwandig	Ungefülltes PP (Centaur, UltiMaker, Fillamentum)	Transluzent und lebensmitteltauglich; einwandige Vasen sind zuverlässig wasserdicht
Automobilverkleidung, Motorraum (außer Motor)	PP-GF oder PP-CF	Thermische Stabilität ausreichend; chemische Beständigkeit gegen Öle, Kraftstoffe, Reinigungsmittel
Orthesen, Prothesen	PPprint 721, Fillamentum 2320	Biokompatibel (PPprint), lebensmitteltauglich (Fillamentum); Flexibilität für tragbare Anwendungen
Werkzeuge, Vorrichtungen, Halterungen	PP-CF oder PP-GF	Kostengünstige Alternative zu PA-CF oder PC; leichter als ABS/PETG-Vorrichtungen
Elektrische Isolierung	Ungefülltes PP	Hohe Durchschlagfestigkeit; geringe Wasseraufnahme; kostengünstig
Hochtemperatur-Konstruktionsmaterial (>90 °C)	Nicht empfohlen	PP HDT irreführend; Kriechen über 70 °C; Wechsel der Polymerfamilie

Tabelle 11.4 – Auswahl der PP-Anwendung. Die richtige PP-Variante hängt in erster Linie davon ab, ob Flexibilität (ungefüllt) oder Dimensionsstabilität (faserverstärkt) die entscheidende Anforderung ist.

12. Polyethylen (PE) und andere Polyolefine

Polyethylen als FDM-Filament ist ein viel kleinerer Markt als Polypropylen. Die grundlegenden Probleme sind ähnlich – niedrige Oberflächenenergie, hohe Kristallisationsschrumpfung – und die Lösungen sind ähnlich (PE-auf-PE-Aufbauoberflächen, Faserverstärkung), aber die kommerziellen Filamentoptionen sind spärlich. Insbesondere HDPE war in der Vergangenheit aufgrund von Verzug und Hohlraumbildung im FFF schwierig; veröffentlichte Arbeiten zeigen Parameterstrategien zur Verbesserung der mechanischen Leistung und Oberflächenqualität auf, aber in der Praxis ist PE selten die richtige Wahl, wenn auch PP verfügbar ist.

12.1 HDPE (hochdichtes Polyethylen)

Spectrum Filaments bietet HDPE speziell als Filament an; Braskem FL300PE ist eine weitere dokumentierte Option. Dichte $\sim 0,95 \text{ g/cm}^3$, $T \sim 130 \text{ }^\circ\text{C}$, Vicat $\sim 125 \text{ }^\circ\text{C}_m$. Drucken bei einer Extrusionstemperatur von $210\text{--}230 \text{ }^\circ\text{C}$. Bett

Haftung folgt den Strategien der PP-Klasse: PE-beschichtete Folie, Packband oder Spezialkleber. Die chemische Beständigkeit ist ausgezeichnet (ähnlicher Bereich wie bei PP); die UV-Beständigkeit ist ohne Rußzugabe schlecht; die Lebensmittelechtheit hängt von der jeweiligen Sorte ab.

12.2 Anwendungen für PE-Filamente

Wasserdichte Behälter, Chemikalienflaschen, kraftstoffbeständige Bauteile (PE quillt in aliphatischen Kohlenwasserstoffen weniger als PP), Rohrverbindungsstücke als funktionale Prototypen. PE ist die naheliegende Wahl, wenn die chemischen Eigenschaften von PP-Typen gefragt sind, die Anwendung jedoch vom spezifischen Beständigkeitsprofil von PE profitiert – typischerweise bei Lebensmittel- und Wasserbehältern in Kühlkettenanwendungen oder in aggressiven alkalischen Umgebungen, in denen PP mit der Zeit kriecht. Für die meisten Anwendungen, bei denen der Anwender PE in Betracht zieht, ist PP die praktische Standardwahl; PE ist ein Nischenmaterial.

12.3 Andere Polyolefine: EVA, COC, COP

EVA (Ethylen-Vinylacetat) kommt in einigen Nischen für flexible Schaumstofffilamente vor; es schlägt eine Brücke zum TPU-Bereich und

wird in Kapitel 16 behandelt. **Cyclisches Olefin-Copolymer (COC)** und **cyclisches Olefin-Polymer (COP)** sind klare, feuchtigkeitsarme Polymere, die in medizinischen und optischen Anwendungen eingesetzt werden; sie sind als Filament bei einigen Spezialanbietern erhältlich, auf dem Verbrauchermarkt jedoch so gut wie nicht vorhanden. Beide sind amorph, werden bei $240\text{--}280$

$^\circ\text{C}$ und erfordern je nach spezifischer Sorte PEI- oder polyolefinverträgliche Bettstrategien.

Teil VI

Polyamide

Die Polyamid-Familie im FDM-Verfahren lässt sich klar in zwei Gruppen unterteilen: aliphatische Nylons (PA6, PA66, PA12, PA612,

PA11) – die klassischen technischen Filamente, bei denen Feuchtigkeit die dominierende Variable ist; und die halb-aromatische PPA-Familie – bei der höhere T_g , höhere HDT und eine um eine Größenordnung geringere Feuchtigkeitsempfindlichkeit auf Kosten engerer Verarbeitungsfenster und Anforderungen an eine aktive Kammer gehen.

13. Aliphatische Nylons (PA6, PA66, PA12, PA612, PA11)

Aliphatische Nylons sind die ursprünglichen technischen Thermoplaste – sich wiederholende Amidbindungen (–CO–NH–) entlang eines ansonsten aliphatischen Grundgerüsts, teilkristallin, mit mechanischen Eigenschaften, die von der Steifigkeit und Festigkeit von PA6 im trockenen Zustand über die Stabilität, aber bescheidenen Eigenschaften von PA12 bis hin zur Zähigkeit von PA11 reichen. Bei FDM ist Feuchtigkeit die entscheidende Variable: Dasselbe Netzwerk aus Wasserstoffbrückenbindungen, das Nylons ihre Steifigkeit und Kristallinität verleiht, macht sie so hygroskopisch, dass sich alle Prozess- und Eigenschaftswerte in diesem Kapitel wesentlich verändern. Trocknen ist zwingend erforderlich, keine Option.

13.1 Chemie und die wichtigsten Untertypen

Nylons werden nach der Kohlenstoffanzahl der Monomere benannt. **PA6** ist das Homopolymer von Caprolactam – einer sich wiederholenden Einheit mit sechs Kohlenstoffatomen. **PA66** polymerisiert Hexamethyldiamin mit Adipinsäure – einem Diamin mit sechs Kohlenstoffatomen und einer Disäure mit sechs Kohlenstoffatomen. **PA12** ist das Homopolymer von Lauro-lactam, einem Ring mit zwölf Kohlenstoffatomen. **PA612** kondensiert Hexamethyldiamin mit Dodecandisäure mit zwölf Kohlenstoffatomen. **PA11** ist das Homopolymer von 11-Aminoundecansäure, die aus Rizinusöl gewonnen wird. Die Anzahl der Kohlenstoffatome bestimmt die wesentlichen Unterschiede in den Eigenschaften: Mehr Kohlenstoffatome zwischen den Amidgruppen bedeuten eine geringere Amiddichte, was eine geringere Feuchtigkeitsaufnahme, einen niedrigeren Schmelzpunkt und eine geringere Volumensteifigkeit zur Folge hat – aber eine bessere Dimensionsstabilität unter feuchten Einsatzbedingungen.

Co-Polyamide (CoPA) – statistische Copolymere, die zwei oder mehr Nylonchemien mischen, am häufigsten PA6/PA66 – liegen in jeder Achse zwischen ihren Ausgangsmaterialien. CoPA-Filamente sind die gängigste Einstiegs-Nylon-SKU auf dem Verbrauchermarkt und werden oft mit dem Begriff „Nylon“ ohne Markenbezeichnung bezeichnet.

Polymer	Wiederholungseinheit	T _m (°C)	Sättigungsfeuchte (%)	Position in FDM
PA6	Caprolactam (C6-Amid)	215–225	~8–10	Fest, steif, trocken; hohe Feuchtigkeitsempfindlichkeit
PA66	HMDA + Adipinsäure (C6+C6)	255–265	~6–8	Höhere T _m als PA6; selten in Filamentform, da T _m das Prozessfenster verschiebt
PA12	Lauro-lactam (C12-Amid)	175–180	~1,5	Mangelnde Dimensionsstabilität; geringere mechanische Eigenschaften als PA6
PA612	HMDA + DDDA (C6+C12)	210–220	~3	Ausgewogenheit: PA12-ähnliche Feuchtigkeitsbeständigkeit, PA66-ähnliche Steifigkeit
PA11	11-Aminoundecansäure (C11)	180–190	~1,9	Führend in der Zähigkeit; biobasiert; selten in ungefüllten Filamenten
CoPA	PA6/PA66-Random-Copolymer	195–215	~5–8	Einstiegsmodell; die gängigsten „Nylon“-Filamente; Kosmetik und Prototypenbau

Tabelle 13.1 – Aliphatische Nylon-Untertypen in handelsüblichen FDM-Filamenten. Die Spalte „Feuchtigkeit“ gibt die Sättigungsaufnahme (vollständiges Eintauchen / 100 % r. F. Gleichgewicht) gemäß den TDS-Daten des Harzes an, nicht die Daten gedruckter Teile und auch nicht den deutlich niedrigeren Wert bei 50 % r. F. Gleichgewicht

— bei PA6 unterscheiden sich die beiden Werte um etwa das 3–4-Fache (Sättigung ~8–10 % gegenüber ~2,5–3 % bei 50 % r. F.). Gedruckte Proben nehmen Feuchtigkeit schneller auf (größere Oberfläche, Porosität der Schichtlinien), erreichen jedoch ähnliche Sättigungsgrade. Überspringen Sie diese Tabelle auf eigene Gefahr: Die Wahl des falschen Untertyps für eine feuchte Einsatzumgebung ist die häufigste Fehlerursache bei Nylon-FDM, weit vor etwaigen Fehler bei den Druckparametern.

13.2 Das Feuchtigkeitsproblem

Die Polyamid-Wasserstoffbrücke ist es, die Nylons fest macht und dafür sorgt, dass sie Wasser aufnehmen. Wassermoleküle schieben sich zwischen Amidgruppen, plastifizieren das Polymer (Senkung der T_g), verringern die Steifigkeit und erhöhen die Dehnung. Der Effekt ist erheblich: PA6, das sich bei normaler Raumfeuchtigkeit im Gleichgewicht befindet, verliert im Vergleich zum trockenen Zustand etwa 60 % seines Biegemoduls, und seine T_g kann sich von ~55 °C im trockenen Zustand auf unter Raumtemperatur im feuchten Zustand verschieben. PA12 und PA612 weisen aufgrund ihrer geringeren Amiddichte deutlich geringere Schwankungen auf (15–35 % Modulverlust bei gleichem feuchtigkeitsbedingten Zustand). Dies ist die wichtigste Eigenschaftsachse bei der Auswahl eines aliphatischen Nylons und der Hauptgrund, warum es die PPA-Familie (Kapitel 14) überhaupt gibt.

Drei praktische Konsequenzen. **Erstens** gibt jedes Nylon-TDS „trockene Werte im Formzustand“ an, sofern nicht ausdrücklich als „konditioniert“ gekennzeichnet; bei der geplanten Nutzung sollten diese Werte um den entsprechenden Feuchtigkeitskonditionierungsfaktor

– unter Verwendung des Gleichgewichtswerts für die erwartete Betriebsfeuchtigkeit oder des Sättigungswerts, wenn das Teil eingetaucht wird oder kontinuierlich in feuchter Umgebung betrieben wird – es sei denn, es wird bei niedriger Luftfeuchtigkeit betrieben. **Zweitens** lässt sich Filament, das sich mit der Raumluft ausgeglichen hat, schlecht drucken – das Wasser verdampft in der Schmelzzone, was zu Oberflächenrauheit, Fadenbildung, Mikroblasen im Schmelzstrang und einem starken Verlust der Schichthaftung führt. Eine aktive Trocknung vor dem Drucken ist zwingend erforderlich; siehe §3.5 für die Tabelle mit dem Trocknungsprotokoll. **Drittens** kann die Konditionierung nach dem Drucken gezielt genutzt werden: Ein PA6-Teil, das in einer kontrollierten feuchten Umgebung bis zum Gleichgewicht konditioniert wurde, tauscht Steifigkeit gegen Schlagzähigkeit ein und ist danach formstabiler als das direkt gedruckte, trockene Teil. Die Konditionierung ist in einigen industriellen Nylon-Workflows ein bewusster technischer Schritt; die resultierenden Abmessungen und mechanischen Eigenschaften müssen empirisch charakterisiert werden.

13.3 Eigenschaftsprofil

Die folgende Tabelle fasst typische FDM-Druckwerte für die gängigsten aliphatischen Nylons zusammen. Wenn die technischen Datenblätter der Hersteller sowohl Werte für den trockenen, direkt gedruckten Zustand als auch für den feuchtkonditionierten Zustand angeben, werden beide Werte aufgeführt – die Differenz ist der wichtigste Wert auf dieser Seite.

Polymer	T_g trocken (°C)	HDT bei 0,45 MPa (°C)	Zugfestigkeit (MPa)	Modul (GPa)	Modulverlust trocken→nass
PA6	~55	~155	70–85 trocken / 40–55 nass	2,0–3,0 / 0,8–1,5	~60 %
PA66	~70	~190	75–90 trocken / 50–60 nass	2,5–3,5 / 1,5–2,0	~40 %
PA12	~45	~145	45–55 trocken / 40–50 nass	1,1–1,5 / 1,0–1,3	~15 %
PA612	~50	~150	50–60 trocken / 45–55 nass	1,4–1,8 / 1,2–1,6	~25 %
PA11	~45	~150	50–65 trocken / 45–55 nass	1,0–1,4 / 0,9–1,3	~20 %
CoPA (PA6/66)	~55	~150	55–70 trocken / 35–50 nass	1,6–2,4 / 0,8–1,4	~45 %

Tabelle 13.2 – FDM-Eigenschaftsbereich von aliphatischem Nylon. Trockenwerte entsprechen dem Druckzustand in einer Umgebung mit ≤15 % r. F.; Nasswerte wurden bei ~23 °C und 50 % r. F. bis zum Gleichgewicht konditioniert (nicht bis zur vollständigen Sättigung, was strengere Bedingungen darstellen würde). Die Differenz zwischen Trocken- und Nasswerten ist das entscheidende Kriterium: PA12 und PA11 sind die richtige Wahl für Teile, die im Einsatz unkontrollierten Feuchtigkeitsschwankungen ausgesetzt sind. Die Verwechslung von reinen Trockenwerten aus dem technischen Datenblatt mit der tatsächlichen Leistung im Einsatz ist der häufigste Fehler bei der Konstruktion von Nylonteilen, der zu übertriebenen Erwartungen führt.

13.4 Verstärkte Typen (PA-CF, PA-GF)

Kohlenstoff- und Glasverstärkungen dominieren das Angebot an handelsüblichen Nylonfilamenten. Geschnittene Fasern in einem Anteil von 10–25 Gew.-% bewirken drei Dinge gleichzeitig: Sie erhöhen die Steifigkeit um das 2- bis 4-fache, unterdrücken die Kristallisationsschrumpfung (da Fasern nicht kristallisieren und die Matrix physikalisch zurückhalten; siehe §3.2) und reduzieren den feuchtigkeitsbedingten Modulverlust in absoluten Werten, da die Fasersteifigkeit durch Wasser unverändert bleibt. Der Preis dafür ist Sprödigkeit – die Izod-Kerbschlagzähigkeit sinkt typischerweise um 60–90 % gegenüber dem Wert der ungefüllten Matrix – sowie abrasiver Verschleiß an jeder Kontaktfläche, vom Extrudergetriebe bis zur Düsenbohrung. Gehärtete Düsen sind zwingend erforderlich; PCD- oder Rubinspitzen verlängern die Lebensdauer bei hoher Faserkonzentration von Hunderten auf Tausende von Druckstunden (siehe §4.1).

CF und GF sind nicht austauschbar. Carbonfasern bieten die höchste spezifische Steifigkeit, die niedrigste Dichte (PA6-CF20 druckt bei $\sim 1,15 \text{ g/cm}^3$ gegenüber 1,13 bei ungefülltem PA6) und eine charakteristische mattschwarze Oberfläche. Glasfasern bieten bei etwa der Hälfte des Steifigkeitsergebnisses geringere Kosten, sind in jeder Farbe erhältlich und weisen eine deutlich bessere Schlagzähigkeit auf. Bei Teilen, bei denen das Verhältnis von Steifigkeit zu Gewicht die entscheidende Einschränkung darstellt (Drohnenrahmen, Endeffektor-Werkzeuge), hat CF die Nase vorn. Bei schlagbeanspruchten Halterungen, Schnappverschlussgehäusen oder farbigen Teilen ist GF die bessere Wahl. Beide reduzieren die Feuchtigkeitslücke im Vergleich zur ungefüllten Matrix, beseitigen sie jedoch nicht vollständig: Ein PA6-CF-Teil verliert im feuchten Zustand immer noch erheblich an Modul, nur ausgehend von einem höheren Trockenwert. Dies ist die empirische Beobachtung, die die Entwicklung von PPA-CF vorangetrieben hat – behandelt in Kapitel 14.

13.5 Druckverfahren und Kalibrierung

Aliphatische Nylons teilen sich einen Prozessbereich am oberen Ende der Tier-2-Hardware (siehe §4): Düsen 240–290 °C, Betten 60–110 °C, passives Gehäuse vorteilhaft, aktive Kammer für die formstabilen Typen (PA12, PA612, PA11) nicht zwingend erforderlich, für PA6 und PA66 bei Teilen über ~80 mm jedoch empfohlen. Die Strategie zur Bettadhäsion ist nach der Trocknung die zweitwichtigste Variable.

Parameter	PA6 / PA66	PA12 / PA612	PA11	PA-CF / PA-GF
Düse (°C)	260–280	245–275	245–270	265–295
Bett (°C)	90–110	70–90	60–85	90–110
Kammer	passiv 40–50 °C	offen OK	offen OK	passiv 40–50 °C; aktiv 55 °C bei großen Teilen
Teilekühlung (%)	0–10	0–20	0–20	0–10
Max. Volumenstrom (mm ³ /s)	8–12	8–14	8–12	6–10
Druckvorlauf	0,030–0,06	0,025–0,05	0,025–0,05	0,04–0,08
Düsenhärte	Messing OK	Messing OK	Messing OK	gehärtet erforderlich; PKD/Rubin bevorzugt
Trocknung	80–90 °C, 10–16 h	70–80 °C, 8–12 h	70–80 °C, 8–12 h	90–110 °C, 8–10 h
Bettfläche	G10-Garolite oder PEI + PVP / Klebstoff	glattes PEI; G10 akzeptabel	glattes PEI; G10 akzeptabel	G10-Garolite; PEI + Magigoo PA oder PVP

Tabelle 13.3 – Prozessparameter für aliphatisches Nylon (Ausgangswerte für 0,4-mm-Düse). Eine Kalibrierung pro Spule auf dem jeweiligen Drucker ist zwingend erforderlich; die oben genannten Werte sind die durch die Polymerchemie vorgegebenen Ausgangswerte. Das Überspringen der Trocknungsphase ist der Punkt, an dem die meisten ersten Nylon-Drucke scheitern, noch bevor andere Parameter falsch eingestellt sein können.

Die Haftung auf dem Druckbett verdient einen eigenen Absatz. G10-Garolite ist der technische Standard für PA6, PA66 und jedes hochverformbare, CF-verstärkte Nylon: Es haftet während des Drucks stark und löst sich nach vollständiger Abkühlung sauber ab, wobei die Garolite-Platte praktisch keinen Verschleiß aufweist. Glattes PEI eignet sich für PA12, PA612 und PA11 (geringere Schrumpfung, geringerer Haftbedarf) sowie für kurze Drucke aus PA6 auf einer Trennschicht aus Klebstoff. Strukturiertes PEI ist für Materialien der PA12-Familie akzeptabel, neigt jedoch dazu, bei PA6 zu stark zu haften und die Platte beim Ablösen zu beschädigen. Magigoo PA ist der spezielle Klebstoff der Magigoo-Familie für die Nylonklasse. CryoGrip Glacier – eine Platte mit Frost-Effekt – hat sich als stabile Kaltablösefläche für CoPA bei moderaten Betttemperaturen bewährt und ist eine Überlegung wert für Drucke, bei denen keine Standard-Garolite-auf-Magnet-Stapel verfügbar sind.

13.6 Markenlandschaft

Der Markt für aliphatisches Nylon hat sich auf eine Handvoll Anbieter mit gut dokumentierten SKUs in Engineering-Qualität konzentriert.

Marke / Produktlinie	Bemerkenswerte SKUs	Besondere Merkmale
Polymaker Fiberon	PA6-CF20, PA612-CF15, PA6-GF25, PolyMide CoPA	Technische Produktreihe auf Basis dokumentierter Harzsorten; 20 % CF in PA6-CF20 ergeben einen Elastizitätsmodul von ~8,6 GPa; PA612-CF15 ist die praktische Wahl, wenn die Formbeständigkeit im nassen Zustand wichtiger ist als maximale Steifigkeit. CoPA zielt auf den Einsatz von Nylon im Einstiegsbereich ab.
Bambu Lab	PA6-CF, PA6-GF, PAHT-CF, PA-CF-Stützmaterial	PAHT-CF basiert auf PA12 (nicht PPA – siehe §2.3 und Kap. 14); PA6-CF und PA6-GF stehen in direkter Konkurrenz zu Fiberon. Risiko der Spulenverformung in Trocknern im oberen Temperaturbereich.
3DXTech CarbonX	PA6 + CF, PA12 + CF, Nylon X Familie	US-Industrieproduktreihe; ISO 9001-zertifizierte Fertigung; strenge, veröffentlichte TDS-Daten; Preis 1,5–2-mal so hoch wie bei entsprechenden Produkten für Endverbraucher.
Prusament	PA11-CF-Kohlefaser	PA11-CF ist auf dem Verbrauchermarkt selten; die Matrix aus biobasiertem PA11 macht es zum Spitzenreiter in Sachen Schlagzähigkeit unter den verstärkten Nylons.
Overture	Easy Nylon (CoPA)	CoPA-Matrix zu Verbraucherpreisen; Einstiegs-Schlagzähigkeit; CryoGrip Glacier als kompatible Bauoberfläche validiert.
Siraya Tech	NylonPro CoPA, Mecha PA6-CF	Mainstream-Verbraucherpreise; breite Farbauswahl bei der ungefüllten CoPA-SKU.
Fiberlogy	Nylon PA12, PA12 + GF	Europäischer Mainstream; PA12 ungefüllt in mehreren Farben; bescheidene mechanische Eigenschaften, aber zuverlässiger Druck.
eSun, Creality, Sunlu	Generische „Nylon“-SKUs (auf CoPA- oder PA6-Basis)	Günstige Preisklasse; Spezifikationen oft unvollständig; geeignet für Prototypen, bei denen die mechanische Leistung nicht im Datenblatt steht.

Tabelle 13.4 – Markenübersicht für aliphatisches Nylon (Anfang 2026). Die Polymaker Fiberon-Reihe und die Bambu PA-CF / PA-GF / PAHT-CF-Reihe sind die beiden am umfassendsten dokumentierten, für Verbraucher zugänglichen Produktfamilien; 3DXTech CarbonX ist die Standardwahl, wenn industrielle Qualifizierung im Fokus steht. Eine markenübergreifende Substitution innerhalb eines Polymer-Subtyps (PA6-CF von Marke A vs. Marke B) ist nicht beliebig möglich – Faservollgehalt, Matrixqualität und Beschichtungsschemie verschieben den Druckbereich um 10–25 %.

13.7 Kritische Auswertung der Datenblattwerte

Die in Tabelle 13.2 zusammengestellten TDS-Werte sind der richtige Ausgangspunkt für die Materialauswahl, aber sie entsprechen nicht den tatsächlichen Eigenschaften eines gedruckten Teils. Unabhängige Tests mit aliphatischen Nylon-Filamenten auf kontrollierten, einheitlichen Geräten liegen durchweg unter den vom Hersteller veröffentlichten Werten, und bei dieser Polymerfamilie ist die Abweichung groß genug, um Designentscheidungen zu beeinflussen. Dieser Abschnitt erklärt, warum diese Lücke besteht und wie man sie beim Design umgehen kann; er zitiert bewusst keine von Dritten gemessenen Werte, da die zuverlässigen unabhängigen Datensätze in diesem Bereich unter den Bedingungen ihrer Eigentümer veröffentlicht werden (siehe Anhang D.1).

Zunächst ist ein methodischer Punkt wichtig. Anbieter veröffentlichen zwei Steifigkeitswerte: einen Elastizitätsmodul (Zugmodul) und einen Biegemodul, und der im Marketing hervorgehobene Wert ist in der Regel der Zugmodul – Polymakers vielfach zitierte „8,6 GPa“ für PA6-CF20 ist der Elastizitätsmodul, nicht der Biegemodul. Ein Biegetest misst den Biegemodul, daher muss jeder ehrliche Vergleich mit einem Biegeergebnis den Biegemodul-Wert (ISO 178) aus dem jeweiligen Datenblatt verwenden, bei XY-Ausrichtung und im trockenen Zustand – nicht den höheren Zugmodul-Wert. Die Vermischung beider Werte ist eine gängige Methode, um eine scheinbare Übereinstimmung oder einen scheinbaren Skandal zu erzeugen, der in Wirklichkeit nur auf einer Einheitendiskrepanz beruht.

Der veröffentlichte Biegemodul überbewertet die beim Druck erzielte Steifigkeit, und bei aliphatischen Nylons kann diese Diskrepanz bis zu einem Faktor von zwei betragen. Dabei wirken zwei Effekte zusammen. Der erste betrifft generell alle gefüllten Filamente und entspricht dem in §14.11 für Polyphthalamide beschriebenen: Der in den Datenblättern angegebene Modul wird anhand von optimal gedruckten, vollständig dichten Proben ermittelt, während ein reales Bauteil Porosität entlang der Schichtlinien und eine unvollständige Faserausrichtung aufweist. Der zweite Effekt ist spezifisch für Nylone – sie sind hygroskopisch, und sofern ein Prüfkörper nicht knochentrocken gedruckt und sofort getestet wird, plastifiziert die aufgenommene Feuchtigkeit die Matrix und senkt den Modul weiter. Ein Datenblatt-Probenstück stellt in beiden Punkten den Best-Case-Fall dar; ein normal gedrucktes und gehandhabtes Bauteil hingegen nicht. Die technische Konsequenz: Bei aliphatischen Nylons sollte man den veröffentlichten Biegemodul nicht wie bei einem weniger feuchtigkeitsempfindlichen Polymer als eine 20–30-prozentige Überschätzung betrachten – behandeln Sie ihn eher als Obergrenze und konstruieren Sie auf der Grundlage eines konservativ reduzierten Wertes, der auf Ihrer eigenen Maschine bestätigt wurde.

Wärmewerte weichen je nach Methode ab, und im Gegensatz zum Modul weichen sie nicht durchgängig in eine Richtung ab. Der HDT-Wert im Datenblatt (ISO 75, ein Test mit definierter Durchbiegung unter fester Belastung) und die von unabhängigen Prüfern verwendeten Verformungstemperaturtests sind unterschiedliche Verfahren, sodass nicht zu erwarten ist, dass beide übereinstimmen, und beobachtete Unterschiede sind eher auf methodische Abweichungen zurückzuführen als auf den Nachweis, dass ein Anbieter übertreibt. Die praktische Erkenntnis ist einfach, dass ein einzelner Wärmewert in einem Datenblatt wenig aussagt, ohne die dahinterstehende Prüfung zu kennen. Für Entscheidungen zur Betriebstemperatur bilden die Leitlinien zum Dauerbetrieb in Anhang A und die Erörterung der Anwendungsgeeignetheit in §13.8 – die auf T_g und HDT zusammen basieren – eine solidere Grundlage als jeder einzelne veröffentlichte Wert.

Die Marke beeinflusst das Ergebnis nach wie vor. Zwei Filamente, die unter derselben Nennklasse verkauft werden – beispielsweise PA6-CF von zwei verschiedenen Herstellern – können in ihren Datenblättern eine bestimmte Einstufung aufweisen, beim Drucken und Messen jedoch das Gegenteil. Dies ist die markenübergreifende Varianz, auf die §13.6 hinweist: Faserbelastung, Matrixqualität und die Chemie der Appretur verschieben den Druckbereich so stark, dass die in den Datenblättern angegebene Steifigkeit kein verlässlicher Maßstab für die Einstufung zweier Produkte verschiedener Hersteller ist. Wenn ein Anbieter den Biegemodul ehrlich als orientierungsabhängigen Bereich statt als einzelne Zahl angibt – Prusament tut dies für PA11-CF –, ist dieser Bereich selbst die genaueste Angabe, die das Datenblatt zur gedruckten Steifigkeit liefert, und es sollte nicht erwartet werden, dass eine einzelne Schlagzeilenzahl diesen Bereich ersetzen kann.

13.8 Anwendungsgeeignetheit

Aliphatische Nylons sind die richtige Wahl, wenn das Bauteil bei moderaten Temperaturen (unter ~80 °C im Dauerbetrieb) ausgesetzt ist, die Einsatzumgebung trocken ist oder eine kontrollierte Luftfeuchtigkeit aufweist und die relevante Versagensart eher Ermüdung oder Verschleiß als Stoßbelastung ist. PA6-Typen der Iglidur-Klasse, die für tribologische Anwendungen entwickelt wurden, sind die typischen Anwendungen für verschleißfeste Teile. Drohnenkomponenten und End-Effektor-Werkzeuge sind die typischen Anwendungen für CF-verstärkte Materialien. Kabelmanagementgehäuse und ergonomische Griffe sind die typischen Anwendungen für CoPA/PA12.

Aliphatische Nylone sind die falsche Wahl, wenn die Einsatzumgebung unkontrollierte Luftfeuchtigkeit aufweist und die Konstruktion auf Steifigkeit angewiesen ist – der Modulverlust ist bei PA6 katastrophal und bei PA612 und PA11 erheblich. PPA (Kapitel 14) ist die technische Lösung für diese Einschränkung, allerdings mit höheren Kosten und höheren Anforderungen an die Prozessdisziplin. Aliphatische Nylone sind auch die falsche Wahl, wenn die Dauerbetriebstemperatur 100 °C übersteigt: PA11 und PA12 kriechen oberhalb ihrer T_g ; PA6 behält seine Form besser bei, verliert jedoch durch die Wechselwirkung mit Feuchtigkeit zu viel Steifigkeit. Bei einer Dauerbetriebstemperatur über 100 °C sind die geeigneten Optionen PPA, PC-Mischungen mit hohem PC-Anteil (Kapitel 15) oder – im Hochleistungsbereich – PPS oder PEI (Kapitel 18).

14. PPA / halbaromatische Polyamide – vertiefender Einblick

Polyphthalamid (PPA) ist ein teilkristallines, halbaromatisches Polyamid: Es hat denselben Amid-Grundgerüst wie die aliphatischen Nylons aus Kapitel 13, jedoch ist eines der Monomere – typischerweise die Disäure – durch einen aromatischen Ring (Terephthalsäure oder Isophthalsäure) ersetzt. In seiner reinen Form als Harzklasse versteift der aromatische Ring die Kette erheblich, wodurch die Glasübergangstemperatur und der Schmelzpunkt deutlich über die von PA6 angehoben werden – die PA6T-, PA9T- und PA10T-Chemien aus Tabelle 14.1 schmelzen zwischen 290 und 325 °C – und die gesättigte Feuchtigkeitsaufnahme auf etwa ein Fünftel des Wertes von PA6 reduziert wird. Die in diesem Kapitel behandelten druckbaren PPA-Filamente sind jedoch nicht diese reinen Hochtemperaturharze: Um auf Prosumer-Hardware extrudierbar zu sein, handelt es sich um druckbarkeitsmodifizierte Copolymere mit einem deutlich niedrigeren Schmelzpunkt (üblicherweise 230–260 °C) und einer Glasübergangstemperatur nahe 80 °C, wobei der Großteil des Vorteils der Feuchtigkeitsbeständigkeit erhalten bleibt. Der Leser sollte beide Fakten im Blick behalten – PPA als Harzklasse ist eine Hochtemperaturfamilie, aber PPA als Filament ist ein mitteltemperaturbeständiger, feuchtigkeitsarmer technischer Werkstoff. Der Nachteil des Filaments liegt nach wie vor in einem engeren Verarbeitungsfenster als bei aliphatischen Nylons, Anforderungen an die aktive Kammer, Anforderungen an gehärtete Düsen für die verstärkten Typen (was im Wesentlichen auf alle handelsüblichen PPA-Filamente zutrifft) sowie einem Preisaufschlag von 2–4× gegenüber gleichwertigem aliphatischem PA-CF.

14.1 Chemie: die PPA-Untergruppe

„PPA“ ist ein Oberbegriff für mehrere spezifische semi-aromatische Polyamid-Chemien, die sich durch die Kombination eines aliphatischen Diamins mit einer aromatischen Disäure auszeichnen. Der Subtyp bestimmt den Schmelzpunkt, die Feuchtigkeitsaufnahme und den Bioanteil; Filamenthersteller geben selten an, welcher Subtyp auf der Spule enthalten ist.

Subtyp	Monomere	T_m (°C)	Sättigungsf euchte (%)	Marktposition
PA6T/X	Hexamethyldiamin + TPA, copolymerisiert (z. B. PA6T/66, PA6T/6I, PA6T/DT)	~290–320	~2–3	Dominante industrielle PPA-Chemie; bildet die Grundlage für DuPont Zytel HTN und viele Compound-Filamente. Reines PA6T schmilzt oberhalb seiner Zersetzungstemperatur, daher wird es immer als Copolymer geliefert.
PA9T	Nonandiamin + TPA	~306	~0,17	Kuraray Genestar®-Flaggschiff; das PA mit dem niedrigsten Feuchtigkeitsgehalt auf dem Markt; selten in Filamenten von Drittanbietern.
PA10T	Decandiamin + TPA	~316	~0,4	Teilweise biobasiert (Decandiamin aus Rizinusöl); liegt in allen Eigenschaften zwischen PA6T und PA9T.
PA4T	Butandiamin + TPA	~325	~1,5	Neuere Chemie, von DSM industrialisiert; hoher $T_{(m)}$ -Wert bringt die Verarbeitung an die Spitze der Tier-3-Hardware Hardware.

Tabelle 14.1 – PPA-Subtyp-Familie. In den technischen Datenblättern (TDS) der Filamente wird fast nie angegeben, welcher Subtyp sich auf der Spule befindet; eine Identifizierung auf Subtyp-Ebene ist im Allgemeinen nur durch DSC-Analyse oder durch Rückschluss aus dem angegebenen T_m möglich. Behandeln Sie die Bezeichnung „PPA“ beim Vergleich von Spulen verschiedener Anbieter als Chemiefamilie und nicht als einzelnes Material, wenn Sie Spulen verschiedener Anbieter vergleichen.

14.2 PPA vs. aliphatische Nylons: die vier entscheidenden Faktoren

Im direkten Vergleich mit den aliphatischen Nylons aus Kapitel 13 schneidet PPA bei der Wärmebeständigkeit, Feuchtigkeitsstabilität, Dimensionsstabilität unter Belastung und der mechanischen Festigkeit im nassen Zustand besser ab; aliphatische Nylons punkten bei der Druckbarkeit, den Kosten und der Zähigkeit ohne Füllstoffe. Der Unterschied bei der Festigkeit im nassen Zustand ist das Hauptmerkmal.

Eigenschaft	PA6	PA12	PA612	PPA-Filament (a)
T_g (°C)	~55	~45	~50	~80
HDT bei 0,45 MPa (°C)	150–170	140–150	150–160	80–200
Sättigungsfeuchte (%)	~8–10	~1,5	~3	~1–2,6
Steifigkeitsverlust trocken→nass	60 %	15	25	~2–3 %
Drucktemperatur (°C)	260–280	245–275	255–280	280–320
Aktive Kammer	optional	optional	optional	empfohlen (55–65 °C)
Relative Kosten für den Heizdraht	\$	\$\$	\$\$	\$\$\$

Tabelle 14.2 – PPA im Vergleich zu aliphatischen Nylons. (a) Die PPA-Spalte enthält Werte für FDM-Filamente: Bei den in diesem Kapitel untersuchten druckbaren PPA-Filamenten handelt es sich um druckbarkeitsmodifizierte halbaromatische Copolymere mit einer Glasübergangstemperatur nahe 80 °C, nicht um die reinen Hochtemperatur-PA6T/PA9T-Harze aus Tabelle 14.1, deren T_g bei 290–325 °C liegt. Der HDT-Bereich reicht von ungefülltem PPA (~80 °C bei 0,45 MPa) bis zu geglühtem PPA-CF (~190–200 °C bei 0,45 MPa); siehe Tabelle 14.5 und Anhang A. Die wichtigste bedeutende Zeile ist die vierte: PPA-CF behält den Großteil seiner Steifigkeit im trockenen Zustand auch unter feuchten Betriebsbedingungen bei, während PA6-CF etwa drei Fünftel seines Biegemoduls verliert. Der genaue Wert für die Feuchtigkeitsbeständigkeit ist typspezifisch – die in den Messungen von Tabelle 14.6 beobachtete nahezu vollständige Beibehaltung ist ein Ergebnis von Bambu PPA-CF und keine Familienkonstante –, doch die Tendenz gilt für alle PPA-Typen. Für Automobilteile unter der Motorhaube, Außengehäuse und alle strukturellen Anwendungen mit unkontrollierter Luftfeuchtigkeit wird dieser Unterschied zum technischen Argument dafür, den Preisaufschlag für PPA zu zahlen.

14.3 Das Problem der PAHT-/HTN-/PPA-Kennzeichnung

In Teil I §2.3 wurde das Marketing-Durcheinander vorgestellt: „PAHT“ (Polyamide High-Temperature) bezog sich ursprünglich auf PPA-basierte Filamente um 2020–2022, wurde jedoch auf mindestens vier verschiedene Basispolymere angewendet. „HTN“ (High-Temperature Nylon), von 3DXTech für die CarbonX HTN+CF-Produktlinie verwendet, ist auf chemischer Ebene funktional gleichbedeutend mit PPA – beide beziehen sich auf semi-aromatische Polyamide. Die DuPont Zytel HTN-Produktfamilie ist ebenfalls eine PPA-Produktlinie (insbesondere PA6T-Copolymere). Dieses Kapitel fasst zusammen, was über die tatsächliche Zusammensetzung der einzelnen PAHT-Bezeichnungen bekannt ist.

Filamentprodukt	Tatsächliches Basis-Harz	Quelle / Nachweis
Siraya Tech Fibreheart PAHT-CF (vor 2024)	PPA	Ende 2024 vom Hersteller in Fibreheart PPA-CF umbenannt; die chemische Zusammensetzung blieb unverändert.
Bambu Lab PAHT-CF	Modifiziertes PA12	Unterscheidet sich von Bambu Lab PPA-CF, das echtes Polyphthalamid ist. Beide Produkte werden gleichzeitig verkauft.
BCN3D PAHT CF15	Modifiziertes Hochtemperatur-PA (proprietär)	BCN3D gibt das Basispolymer nicht bekannt; die mechanischen Eigenschaften liegen zwischen PA6-CF und PPA-CF.
Qidi PAHT-CF / PAHT-GF	PPA	Auf der Verpackung ist ausdrücklich „(PPA-CF)“ oder „(PPA-GF)“ in Klammern angegeben.
Generisches PAHT-CF für den asiatischen Markt	Modifizierte PA6- oder PA6/66-Copolymere	Abgeleitet aus mechanischen Eigenschaften und Preis; variiert von Spule zu Spule.

Tabelle 14.3 – Was „PAHT“ je nach Anbieter tatsächlich bedeutet (Stand: Anfang 2026). Das technische Datenblatt des Filaments, nicht die SKU-Bezeichnung, ist der einzige verlässliche Hinweis auf die zugrunde liegende chemische Zusammensetzung. Seit der Einführung von Bambu PPA-CF Mitte 2024 geht der Branchentrend in Richtung einer expliziten „PPA“-Bezeichnung; die älteren PAHT-Spulen sind weiterhin im Vertrieb und im Einzelhandel erhältlich.

14.4 Verstärkungsvarianten: ungefüllt, CF, CF-Core, GF

PPA ist als kommerzielles FDM-Filament in vier Verstärkungsvarianten erhältlich. Carbonfaser-Varianten dominieren die Regale, da die starke Neigung von PPA zum Verziehen (bedingt durch seine hohe Kristallinität, ähnlich wie bei PA6) durch die Faserverstärkung weitgehend gemildert wird, während die ungefüllte Variante wesentlich mehr Prozessdisziplin erfordert. Ungefülltes PPA ist seltener und wird derzeit am besten von Siraya Tech Fibreheart PPA angeboten.

Form	Typische Füllung	Am besten geeignet für	Nicht geeignet für
Ungefülltes PPA	0 %	Verschleißflächen, Zahnräder, Teile, die neben Hitzebeständigkeit auch Schlagzähigkeit erfordern; Gewinde zum Gewindeschneiden	Große flache Teile (verziehen sich ohne Faserverstärkung); Maßteile mit hohen Toleranzen
PPA-CF	10–25 Gew.-% geschnittene CF	Strukturelle Halterungen, Drohnenrahmen, End-Effektor-Werkzeuge, Automobil-Motorraum, Vorrichtungen und Halterungen	Zyklische Biegebelastung (CF erzeugt Ermüdungsbruchflächen); Teile mit engen Toleranzen, sofern nicht gegläht und konditioniert
PPA-CF-Kern	25 % CF (konzentriert im Filamentkern), Schale aus reinem PPA	PPA-CF-Anwendungen, bei denen die Schichthftung in der Z-Achse die entscheidende Einschränkung darstellt	Multimaterial-Drucker, die einen gleichmäßigen Filamentquerschnitt erfordern; kostensensible Drucke
PPA-GF	10–20 Gew.-% geschnittenes GF	Bauteile, bei denen die Farbe eine Rolle spielt, Geometrien von Schnappverbindungen und Scharnieren, bei denen die Sprödigkeit von CF zu Ausfällen führt, Elektronikgehäuse	Anwendungen mit maximaler Steifigkeit (CF hat den Vorteil beim Elastizitätsmodul); niedrigste Kosten (CF und GF sind preislich vergleichbar)

Tabelle 14.4 – PPA-Verstärkungsvarianten. CF-Core ist eine coextrudierte Haut-Kern-Architektur: eine Außenhülle aus reinem PPA, die die Z-Achsen-Verbindung von Schicht zu Schicht fördert, umgeben von einem CF-reichen Kern, der die mechanische Belastung in der Ebene aufnimmt. Das Mischen von Varianten in einem einzigen Multimaterial-Druck birgt das Risiko von Kompatibilitätsproblemen mit der Kammer (siehe §14.10).

14.5 Eigenschaftsbereich nach Marken

Die folgende Tabelle fasst die veröffentlichten TDS-Werte der wichtigsten Marken zum direkten Vergleich zusammen. Bei den Werten handelt es sich um Zug- und Biegefestigkeitsdaten in XY-Richtung aus den veröffentlichten Datenblättern der jeweiligen Hersteller – sie stammen nicht aus einem einheitlichen unabhängigen Test. Verwenden Sie sie als relative Indikatoren; §14.11 erklärt, warum diese veröffentlichten Zahlen eher als Obergrenze denn als Erwartungswert zu verstehen sind.

Marke · Produkt	Zugfestigkeit (MPa)	Biegeelastizitätsmodul (GPa)	HDT (°C)	Verstärkung
Siraya · Fibreheart PPA (ungefüllt)	72	3,4	81 (0,45 MPa)	0 %
Siraya · Fibreheart PPA-CF	98	7,4	192 (0,45 MPa, glühen)	15 % CF
Siraya · Fibreheart PPA-CF-Kern	121	9,5	199 (0,45 MPa, glühen)	25 % CF (Kern)
Bambu Lab · PPA-CF	168	~10	227	~15–20 % CF
Bambu Lab · PAHT-CF (auf PA12-Basis)	90	~4	194	~15 % CF
3DXTech · CarbonX HTN+CF	130	~9	~195–240	15–20 % CF
3DXTech · FibreX PPA+GF15	115	~7	260	15 % GF

Marke · Produkt	Zugfesti- gkeit (MPa)	Biegemod- ul (GPa)	HDT (°C)	Verstärkung
Raise3D · Industrial PPA CF	120	~7	~210	15 % CF
Qidi · PAHT-CF	110	6,9	~200	15 % CF
Qidi · PAHT-GF	85	~5	~180	15 % GF
Flashforge · PPA-CF (LUVOCOM)	—	~6	220	10 % CF

Tabelle 14.5 — Eigenschaftsbereich von PPA-Filamenten (TDS-Werte 2024–2026). Der HDT-Wert ist last- und glühzustandsabhängig und wird nicht von jedem Anbieter einzeln angegeben; wenn ein Anbieter mehrere Werte veröffentlicht, gibt die Tabelle den Wert von 0,45 MPa unter Angabe des Glühzustands an, während für den Wert von 1,80 MPa das markeneigene Datenblatt herangezogen werden sollte. Der von Bambu Lab angegebene Biegemodul von ~10 GPa für PPA-CF ist etwa doppelt so hoch wie der Durchschnitt im Consumer-Bereich, was sowohl auf eine höhere Faserbeladung als auch auf eine prozessoptimierte Compoundierung; das Preisverhältnis von ~4× gegenüber dem chemisch gleichwertigen Siraya Fibreheart PPA-CF ist real und für die Beschaffung von Bedeutung. Die Werte im feuchten Zustand variieren erheblich und sind in §14.6 separat dokumentiert, sofern Anbieter diese veröffentlichen.

14.6 Markenübersicht

Siraya Tech (Fibreheart). Siraya bietet das breiteste PPA-Sortiment, das für Verbraucher erhältlich ist. Das Sortiment umfasst Fibreheart PPA (ungefüllt – ursprünglich als Fibreheart PAHT verkauft), Fibreheart PPA-CF (15 % geschnittene CF, ursprünglich ebenfalls PAHT-CF) und Fibreheart PPA-CF Core (25 % CF in einem coextrudierten Kern mit einer Hülle aus reinem PPA, eingeführt Ende 2024). Das Produkt CF Core zielt speziell auf das höhere Preissegment ab und bietet laut Siraya durch seine Skin-Core-Architektur eine überlegene Schichthftung in Z-Richtung. Der Preis liegt bei etwa einem Viertel der Kosten pro Kilogramm des teuersten PPA-CF auf dem Markt für chemisch nominell gleichwertige Produkte. Fibreheart PPA ist das am leichtesten zugängliche ungefüllte echte PPA-Filament auf dem Verbrauchermarkt.

Bambu Lab. Bambu brachte sein PPA-CF Mitte 2024 zu einem Preisaufschlag auf den Markt, der auf industrielle Qualifizierungsarbeiten ausgerichtet ist. Das Produkt-TDS veröffentlicht den Vergleich der Trocken-/Nass-Eigenschaften, der das Hauptverkaufsargument von PPA quantifiziert – siehe Tabelle 14.6 unten – und ist eines der wenigen PPA-TDS, das dies explizit tut. Ein begleitendes PPA-GF wurde Ende 2025 / Anfang 2026 hinzugefügt. Beachten Sie, dass Bambu zwei unterschiedliche Produkte mit ähnlichen Namen verkauft: Bambu PAHT-CF (auf PA12-Basis) und Bambu PPA-CF (echtes Polyphthalamid); es handelt sich nicht um dasselbe Filament. PAHT-CF bleibt als kostengünstige Option im Sortiment, die etwa die Hälfte des Preises von echtem PPA-CF kostet.

Eigenschaft (XY-Richtung)	Normales PA6-CF	Bambu PA6-CF	Bambu PAHT-CF	Bambu PPA-CF
Biegemodul, trocken (MPa)	4.870	5.460	4.230	9.860
Biegemodul, nass* (MPa)	1.890	3.560	3.640	9.620
Steifigkeitsabnahme trocken→nass	61,2 %	34,8 %	13,9	2,4
Biegefestigkeit, trocken (MPa)	141	151	125	208
Biegefestigkeit, nass* (MPa)	67	95	115	202
Festigkeitsabfall trocken→nass	52,5 %	37,1 %	8,0 %	2,9
Maximale Gebrauchstemperatur (°C)	—	—	194	227

Tabelle 14.6 — Bambu Lab PPA-CF Technisches Datenblatt V1.0, XY-Zug-/Biegebalken, 100 % konzentrische Füllung. *Nass = Probe bei ~25 °C, 55 % r. F. auf Gleichgewichtskondition gebracht (ein Feuchtezustand im Einsatz, keine vollständige Sättigung durch Eintauchen). Der Rückgang der Steifigkeit um 2,4 % und der Festigkeit um 2,9 % bei Bambu PPA-CF im nassen gegenüber dem trockenen Zustand sind der empirische Fall für PPA gegenüber PA6-CF in jeder

Anwendung, die Feuchtigkeit ausgesetzt ist; der Rückgang von über 60 % bei PA6-CF mit ungefüllter Matrix ist der Hauptversagensmodus, den dieses Kapitel dokumentieren soll.

3DXTech (CarbonX, FibreX). Die Produktionslinie in Grand Rapids, Michigan, mit der längsten ununterbrochenen Geschichte in der Herstellung von PPA-Filamenten. Fertigung nach ISO 9001:2015; Verwendung der HTN-Terminologie anstelle von PPA in den Produktnamen, jedoch gehört die chemische Zusammensetzung zur gleichen Familie. CarbonX HTN+CF weist T_g 125 °C und eine thermische Beständigkeit bis ~240 °C auf (höher als ULTEM 9085 PEI auf der entsprechenden Achse); FibreX PPA+GF15 weist HDT 260 °C und T_m 305 °C auf. Die Preise liegen beim 1,5- bis 2-fachen der Verbraucheräquivalente; dies ist die Standardwahl, wenn Teile einer Qualifizierungsprüfung unterzogen werden.

Polymaker (Fiberon-Reihe – auffällige Lücke). Die Fiberon-Engineering-Reihe von Polymaker ist eine der ausgereiftesten Produktfamilien für Hochtemperatur-Filamente auf dem Markt, enthält jedoch Anfang 2026 kein echtes PPA-Filament. Polymaker hat den PPA-Anwendungsbereich mit PA6-CF20 (Metallersatz zu moderaten Kosten – siehe Kap. 13 §13.6) und PPS-CF10 (ultrahochtemperaturbeständig, flammhemmend – Kap. 18) ins Visier genommen. Das Fehlen eines echten PPA-CF hinterlässt eine Lücke, die Wettbewerber aktiv geschlossen haben. Polymaker schließt Lücken bei technischen Kunststoffen in der Regel im 12- bis 24-Monats-Rhythmus.

Raise3D, Qidi, Flashforge, BCN3D. Raise3Ds Industrial PPA CF (15 % CF) und PPA GF (15 % GF) werden in erster Linie für die industrielle Druckerreihe des Unternehmens verkauft, wobei ein PPA-Stützfilament zum Ablösen als Begleitprodukt dient – eine nützliche Nische, da die meisten Anbieter es den PPA-Anwendern überlassen, Stützstrukturen selbst zu entwickeln. Qidi verkauft PAHT-CF und PAHT-GF (beide auf PPA-Basis, mit PPA-Kennzeichnung in Klammern auf der Verpackung) zu günstigen Preisen; Flashforge verwendet LUVOCOM® PPA-CF (Lehvoss-Compound) mit 10 % CF, das eine HDT von 220 °C und für ein PPA ungewöhnliche Kompatibilität mit nicht beheizten Druckkammern aufweist. Das PAHT CF15 von BCN3D wird hauptsächlich für die industrielle Druckerreihe des Unternehmens ausgeliefert; das Basispolymer wird nicht genannt, doch die mechanischen Eigenschaften lassen es zwischen PA6-CF und PPA-CF einordnen.

14.7 Druckverfahren und Kalibrierung

Das enge Verarbeitungsfenster von PPA – bedingt durch die hohe T_g und den steilen Viskositätsabfall oberhalb von T_m – führt zu geringeren Abweichungen bei den empfohlenen Parametern zwischen den verschiedenen Marken als bei den meisten Polymerfamilien. Ausgangswerte für Hardware mit 0,4-mm-Hartdüse:

Parameter	Unfilled PPA	PPA-CF	PPA-GF
Düse (°C)	275–310	280–320	285–320
Bett (°C)	80–110	90–120	90–120
Kammer	40–60 °C empfohlen	55–65 °C (aktiv, empfohlen)	55–65 °C aktiv empfohlen
Teil-Kühlventilator (%)	0	0; nur bei 5–15 % Überhängen	0; nur bei 5–15 % Überhängen
Druckgeschwindigkeit (mm/s)	30–60	30–80	30–80
Max. Volumenstrom (mm ³ /s)	7–9	8–12	8–12
Düsenhärte	gehärtet oder Messing OK	gehärteter Stahl vorgeschrieben	gehärteter Stahl erforderlich
Düsendurchmesser (mm)	0,4+	0,4+ (0,6 bevorzugt)	0,4+ (0,6 bevorzugt)
Bettfläche	glatte PEI-Platte + Klebestift / PVP / Magigoo PC	glattes PEI + Klebestift / PVP / Magigoo PC; G10 Garolite akzeptabel	glattes PEI + Klebestift / PVP

Tabelle 14.7 – Startparameter für den PPA-Druck. Die Kammerzeile ist die Grenze zwischen marginal und konsistent: Passive Gehäuse drucken kleine PPA-CF-Teile, aber die Haftung zwischen den Schichten lässt bei einer Z-Höhe von über ~80 mm nach, da die Temperatur der oberen Schicht unter den Kristallisationsbeginn fällt. Eine aktive Kammer ist die technische Lösung; siehe §4.3.

14.8 Trocknungsprotokoll

Die Feuchtigkeitsaufnahme von PPA-Filamenten ist sortenabhängig: immer weit unter PA6 und je nach Formulierung und Verstärkung zwischen der PA12-Klasse und etwas höher – die Carbonfasersorten liegen am unteren Ende, ungefülltes PPA etwas darüber. Feuchtigkeitssymptome bei PPA-Drucken sind charakteristisch: feine Fadenbildung trotz gut eingestellter Rückzugskraft, Oberflächenrauheit, Auslaufen während der Verfahrbewegungen und – als strukturelle Versagensart – Mikroblassen in der Wandwulst, die die Z-Achsen-Schichthaftung an von der Oberfläche unsichtbaren inneren Grenzflächen zerstören.

Die Trocknungsempfehlungen für PPA variieren stärker je nach Marke als bei den meisten Filamentfamilien, und die Querverweise in Teil I dieses Kapitels sollten eher als konservative Untergrenze eines Bereichs denn als allgemeingültige Vorgabe verstanden werden. Die Tabelle zum Trocknungsprotokoll in Teil I (§3.5, Tabelle 3.1) gibt für PPA Werte am oberen Ende an – bis zu 100–140 °C für 8–12 Stunden –, was den Empfehlungen von Bambu für sein höher schmelzendes PPA-CF entspricht und für technische PPA-Typen geeignet ist; An diesem oberen Ende übertrifft ein Konvektionsofen einen Filamenttrockner tatsächlich, da Filamenttrockner in der Praxis bei etwa 80–90 °C ihre Obergrenze erreichen. Andere aktuelle Filamente sehen ein deutlich milderes Protokoll vor: Siraya Fibreheart PPA erfordert 80–100 °C für 4–6 Stunden und Siraya PPA-CF 100 °C für 4–6 Stunden, wobei bei beiden eine Trocknung nur dann als notwendig erachtet wird, wenn Anzeichen von Feuchtigkeit auftreten oder die Vakuumverpackung beschädigt wurde. Als Faustregel gilt, das Datenblatt der Spule zu befolgen: Ein Filamenttrockner mit 80–90 °C ist für die Siraya-Klasse und zum Nach-Trocknen geöffneter Spulen ausreichend, während der Ofenplan mit 100–140 °C den Marken vorbehalten ist, die dies vorschreiben. Die Obergrenze von 160 °C für die Trocknungstemperatur ist eine Grenze für das Spulensubstrat, nicht für das Polymer – Kunststoffspulen verformen sich oberhalb dieses Wertes. Kartonspulen vertragen höhere Temperaturen, verursachen jedoch eigene Probleme durch Ablagerungen.

Während des Druckvorgangs selbst: Die Lagerung in einer Trockenbox mit aktivem Trockenmittel oder aktiver Wärme (einfacher Filamenttrockner bei 50–70 °C) ist der gängige Standard. Trocknen Sie jede Spule, die länger als 24 Stunden offen gestanden hat, vor einem wichtigen Druckvorgang erneut.

14.9 Glühen

PPA ist teilkristallin und spricht bei den CF- und GF-Varianten gut auf das Tempern an: Die Behandlung erhöht die Kristallinität, verbessert die HDT und die Festigkeit in der Z-Achse und reduziert die Restspannung. Die Empfehlungen der Hersteller variieren, wobei Bambu PPA-CF den aggressivsten Zeitplan aufweist (120–140 °C, 6–12 h). Die meisten handelsüblichen PPA-CF-Filamente sprechen gut auf 100–120 °C für 4–6 Stunden an, wobei das Teil während des Ausheizens in verdichtetem Sand oder Salz gelagert wird, um ein Durchhängen feiner Details zu verhindern.

Ungefülltes PPA bildet hier eine bemerkenswerte Ausnahme. Siraya Tech rät ausdrücklich davon ab, Fibreheart PPA zu glühen – ohne Faserverstärkung verzieht sich das Bauteil während des Ausglühens, und die Verzugstendenz überträgt sich stärker auf das Endprodukt, als der Kristallinitätsgewinn an HDT wieder wettmacht. Dies steht im Einklang mit den Vorgaben in Teil I §3.6: Glühen Sie CF- und GF-Varianten, bei denen der Verzug begrenzt ist; glühen Sie ungefülltes PPA nur bei kleinen, robusten Geometrien, bei denen das Verzugrisiko von vornherein gering ist.

14.10 Überlegungen zu Mehrfach-Extrudern und der Verarbeitung abrasiver Materialien

Bei Mehrfach-Extruder-Hardware treten zwei PPA-spezifische Versagensarten auf, die bei Einzel-Extruder-Tier-3-Konfigurationen nicht vorkommen.

Filamentsprödigkeit innerhalb des Filamentwegs. PPA-CF – insbesondere bei höheren Faseranteilen – ist auf der Spule so spröde, dass es bei gekrümmten Filamentwegen innerhalb der PTFE-Röhrchen brechen kann. PA6-CF verträgt dies; PPA-CF nicht. Bei Hardware mit einem beweglichen Druckkopf, der das Filamentröhrchen beim Zurückfahren in seine Ausgangsposition

, ist der Biegewinkel des Schlauchs in der Nähe des Druckkopfes die Schwachstelle. Praktische Abhilfemaßnahmen: Führen Sie das Filament durch den Druckkopf, der weniger Biegebelastung auf den Schlauch ausübt (typischerweise der feststehende statt des anhebbaren Hotends bei Systemen mit zwei Hotends); drehen Sie das PTFE-Rohr vor dem Drucken von PPA-CF um 360° gegen den Uhrzeigersinn und führen Sie es in einer sanfteren Spirale wieder ein; oder führen Sie das Filament aus einer Trockenbox zu, die nahe am Werkzeugkopf angebracht ist, um die Länge des Schlauchverlaufs vollständig zu minimieren. Die Herstellerangaben zu diesem Punkt finden sich vor allem in den druckerspezifischen Anleitungen und weniger im Filament-TDS.

Kompatibilität von abrasiven Düsen mit Offset-Kalibrierung. Düsen aus gehärtetem Stahl, Rubin, Wolframkarbid und mit PCD-Spitze (E3D Diamondback) sind alle für die Anwendung mit faserverstärktem PPA ausgelegt. PCD-Spitzen sind nicht leitfähig und können von den bei Prosumer-Druckern üblichen induktiven oder Wirbelstrom-Düseneffektsensoren nicht erkannt werden, sodass stattdessen eine kamerabasierte Offset-Kalibrierung erforderlich ist; dies wird in §4.1 erwähnt und wird betrieblich relevant, wenn während des Druckvorgangs von einer Düse für aliphatisches Nylon auf eine Düse für PPA-Qualität gewechselt wird.

Kompatibilität mit Multimaterial-Kammern. PPA-CF gilt in den Kompatibilitätsschemata aller Anbieter als Hochtemperatur-Filament. Es kann nicht mit Niedertemperatur-Filamenten (PLA, PETG, weiches TPU) im selben Druck kombiniert werden: Die für PPA-CF erforderlichen Kammer- und Betttemperaturen führen dazu, dass diese Materialien erweichen und sich verziehen. Zu den kompatiblen Filamenten gehören andere technische Nylons (PA6-CF, PAHT-CF, PA-GF), ABS, ASA, PC-Mischungen, PET-CF, PPS-CF und ABS-GF. Kompatible Stützfilamente sind begrenzt; PPA-spezifische ablösbare Stützen (insbesondere die Raise3D Industrial PPA-Ablöseserie) und Strategien mit löslichen Stützen aus dem gleichen Material sind die praktischen Optionen.

14.11 Kritische Auswertung der Datenblattangaben

Jeder Wert in Tabelle 14.5 stammt aus einem Datenblatt des Herstellers. Unabhängige Tests von Filamenten der PPA-Klasse auf kontrollierten, einheitlichen Geräten zeigen, dass diese Datenblattangaben mit derselben Vorsicht gelesen werden sollten – §13.7 gilt für aliphatische Nylons. Dieser Abschnitt beschreibt die Muster, die sich in der gesamten PPA-Familie wiederholen, ohne gemessene Zahlen von Dritten zu reproduzieren; die zuverlässigen unabhängigen Datensätze in diesem Bereich werden unter den Bedingungen ihrer Eigentümer veröffentlicht (siehe Anhang D.1).

Der Biegemodul wird durchweg zu hoch angegeben. Bei Produkten der PPA-Klasse liegt die Steifigkeit der gedruckten Teile unter dem Wert im Datenblatt, und die Diskrepanz ist bei den höchsten Angaben tendenziell am größten. Dies gilt nicht nur für eine bestimmte Marke: Der im Datenblatt angegebene Modul wird typischerweise aus spritzgegossenen oder optimal ausgerichteten Proben abgeleitet, während ein gedrucktes Teil Porosität an den Schichtgrenzen und eine unvollständige Faserausrichtung aufweist. Behandeln Sie den veröffentlichten Modul eher als Obergrenze denn als Erwartungswert und reduzieren Sie ihn für die Konstruktion um etwa 20–30 % – überprüfen Sie dies anschließend anhand eines Probekörpers, der so gedruckt und konditioniert wurde, wie es beim tatsächlichen Bauteil der Fall sein wird.

Die Wärmeangaben weichen je nach Methode ab, nicht immer in die gleiche Richtung. Die HDT-Angaben im Datenblatt und die von unabhängigen Prüfern verwendeten Verformungstemperaturtests belasten die Probe unterschiedlich, sodass nicht erwartet wird, dass beide übereinstimmen – ein Produkt kann bei einem Test über seinem TDS-Wärmewert liegen und bei einem anderen darunter, ohne dass eine der beiden Zahlen falsch ist. Die Schlussfolgerung lautet, dass ein einzelner Wärmewert im Datenblatt wenig aussagt, ohne die dahinterstehende Prüfung zu kennen. Für Entscheidungen zur Betriebstemperatur bilden die Leitlinien für Dauerbetrieb in Anhang A und die Erörterung der Anwendungsgeeignetheit in §14.12 – die auf T_g und HDT zusammen basieren – eine solidere Grundlage als jeder einzelne veröffentlichte Wert.

Abnehmende Erträge bei einem Faseranteil von über ~20 %. Ein Muster, das bei der Produktauswahl berücksichtigt werden sollte und mit der Erörterung in §14.6 übereinstimmt: Sobald der Carbonfaseranteil etwa 20 % übersteigt, tendiert die gemessene Steifigkeit dazu, sich abzuflachen, während die Sprödigkeit weiter zunimmt. Ein Typ mit 25 % Faseranteil übertrifft in einem gedruckten Bauteil nicht zuverlässig die Steifigkeit eines gut hergestellten Typs mit 20 % Faseranteil, sodass ein höherer Faseranteil in den technischen Daten an sich kein Grund ist, ein PPA-CF-Produkt einem anderen vorzuziehen. Wie bei den Nylons bedeuten der Faseranteil, die Matrixqualität und die chemische Zusammensetzung der Beschichtung, dass die im Datenblatt angegebene Steifigkeit kein verlässlicher Maßstab für die Einstufung von Produkten verschiedener Hersteller ist; sofern unabhängige Daten vorliegen, sind diese am nützlichsten als Gegenprüfung der relativen Rangfolge, nicht als Ersatz für Tests auf Ihrer eigenen Maschine.

14.12 Anwendungsgeeignetheit

Wählen Sie PPA, wenn: der Dauerbetrieb 100 °C übersteigt und eine verstärkte Sorte verwendet wird (Motorraumhalterungen, Verteiler, ofennah gelegene Vorrichtungen – PPA-CF und PPA-GF leiten die Wärme ab, während ungefülltes PPA-Filament bei seinem HDT von ca. 75–85 °C an seine Grenzen stößt und nicht für anhaltende Hochtemperaturbelastung geeignet ist); ein Kontakt mit Kraftstoffen, Ölen, Glykolen oder aggressiven Reinigungsmitteln zu erwarten ist (PA6 versagt bei chemischem Kontakt, PPA hält stand); Teile im Außenbereich müssen ihre Steifigkeit trotz winterlicher Feuchtigkeit beibehalten (PA6-CF verliert im nassen Zustand >60 % seines Moduls, während PPA-CF in Bambus' veröffentlichtem Trocken-gegen-Nass-Test nur ~2 % verlor); mechanische Teile unter Belastung unterliegen Anforderungen hinsichtlich Verschleiß, Ermüdung oder Dimensionsstabilität; das Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht ist die entscheidende Einschränkung (Drohnenrahmen, End-Effektor-Werkzeuge); Ersatzteile für den Automobilbereich unter der Motorhaube fallen in den Anwendungsbereich.

Vermeiden Sie PPA, wenn: das Teil ästhetischen oder kosmetischen Zwecken dient (PPA-CF ist nur in Schwarz mit matter Oberflächenbeschaffenheit erhältlich, und die Kosten sind nicht gerechtfertigt); der Einsatz bei Raumtemperatur erfolgt (PETG, PCTG oder PA612 lassen sich bei gleicher mechanischer Leistungsfähigkeit zu einem Drittel der Kosten zuverlässiger drucken); zyklische Biegung erforderlich ist (CF-Verstärkung erzeugt Ermüdungsbruchflächen; ein ungefülltes technisches Nylon – PA12, PA11 – oder PCTG ist widerstandsfähiger); das Design noch in der Iterationsphase ist (der Druckbarkeitsaufschlag ist real; 200 \$/kg Material sind eine hohe Ausgabe für Teile, die vor der Freigabe möglicherweise 5–10 Mal überarbeitet werden).

Weitere Alternativen, die eine Überlegung wert sind. PA612-CF15 bietet den Großteil der Vorteile hinsichtlich der Formbeständigkeit im feuchten Zustand bei geringeren Kosten und einfacherem Druck – ein guter Kompromiss, wenn die volle Temperaturbeständigkeit von PPA nicht erforderlich ist. PA6-CF und PAHT-CF eignen sich, wenn die Betriebstemperatur unter 80 °C bleibt und die Kosten eine Rolle spielen. PPS-CF (Kapitel 18) ist die nächsthöhere Stufe für Teile, die dauerhaft Temperaturen über 200 °C ausgesetzt sind, und ist flammhemmend – eine andere Polymerfamilie, die anspruchsvoller zu drucken ist, aber Temperaturen erreicht, die PPA nicht erreichen kann. PEEK und PEKK (Kapitel 19) liegen noch eine Stufe darüber und erfordern Tier-4-Hardware, die über den Rahmen dieses Bandes hinausgeht.

Teil VII

Polycarbonate

Polycarbonat (PC) ist das amorphe Polymer mit der höchsten T_g , das im FDM-Bereich für Verbraucher routinemäßig erhältlich ist – und das Polymer, das am ehesten unter einem Namen verkauft wird, der nicht beschreibt, was sich auf der Spule befindet. Fast jedes „PC“-Filament ist eine Legierung oder ein Verbundwerkstoff, kein reines Polycarbonat; sowohl die technischen Grenzen als auch das Verarbeitungsfenster hängen davon ab, um welche es sich handelt.

15. PC und PC-Mischungen – ein tiefer Einblick

Polycarbonat (PC) nimmt eine besondere Nische in der FDM-Polymerhierarchie ein: amorph, in seiner reinen Form transparent, mit $T_g \sim 145\text{--}150\text{ }^\circ\text{C}$, HDT um $135\text{--}145\text{ }^\circ\text{C}$ bei $0,45\text{ MPa}$, Zugstreckgrenze $60\text{--}70\text{ MPa}$ und die höchste Kerbschlagzähigkeit aller Polymere im Bereich von Standard- bis Technikmaterialien dieses Bandes – reines PC erreicht bei der Izod-Kerbschlagzähigkeit im duktilen Bruchbereich $60\text{--}85\text{ kJ/m}^2$, ein Vielfaches von PCTG und deutlich mehr als PETG (PC-Mischungen liegen unter reinem PC, sind aber immer noch führend). Es ist das technische Arbeitstier für Teile, die im Einsatz bei $100\text{--}130\text{ }^\circ\text{C}$ belastet werden – Halterungen unter der Motorhaube, Elektronikgehäuse, optische Halterungen, Strukturkomponenten. Der Haken ist, dass reines, unmodifiziertes PC in kommerziellen FDM-Filamenten selten ist. Der Markt unterteilt sich in PC-Legierungen (die auf Harzebene mit einem anderen Polymer gemischt werden, um Verformungen zu reduzieren und das mechanische Gleichgewicht zu verschieben) und PC-Verbundwerkstoffe (die mit Fasern, leitfähigen Additiven, Flammschutzmitteln oder PTFE versetzt sind). Die Wahl zwischen diesen ist die Grundvoraussetzung für die Verwendung von „PC“ im FDM; sie gut zu drucken ist die nächste Stufe.

15.1 Chemie des Polycarbonats

BPA-Polycarbonat (Bisphenol-A-Polycarbonat) ist die vorherrschende chemische Verbindung – ein thermoplastischer Polyester aus Kohlensäure, die mit dem Bisphenol-A-Diol kondensiert wurde. Die voluminösen aromatischen Gruppen und die Carbonatbindung ergeben ein Polymer, das amorph ist (keine Kristallinität, vollständige Transparenz bei klaren Typen, keine Schlieren-Struktur), glasartige mechanische Eigenschaften aufweist (hohe Steifigkeit kombiniert mit erheblicher Schlagzähigkeit), eine hohe T_g besitzt und im Spritzguss bei $280\text{--}320\text{ }^\circ\text{C}$ verarbeitet werden kann. Im Wesentlichen stammen alle handelsüblichen PC-Filamente von vier globalen Harzherstellern: Covestro Makrolon, SABIC Lexan, Mitsubishi Lupilon und Trinseo Calibre. In den technischen Datenblättern (TDS) der Filamente wird das Ausgangsharz selten angegeben; Unterschiede im Molekulargewicht, in den Additivpaketen und (bei Legierungen) im Partnerpolymer sind für den Großteil der markenspezifischen Abweichungen in der Druckleistung verantwortlich.

BPA selbst ist ein reguliertes Monomer, bei dem bei den Expositionen, denen Verbraucher ausgesetzt sind, Bedenken hinsichtlich einer endokrinen Disruption dokumentiert sind. In der fertigen Polymerform verbleiben nur Spuren von unreaktiertem Monomer, was für die Sicherheit der Druckteile relevant ist – für gedruckte Oberflächen praktisch vernachlässigbar, aber im Hinblick auf die Risikokommunikation erwähnenswert, wenn Endverbraucher danach fragen. Für Anwendungen, bei denen BPA ein regulatorisches oder wahrnehmungsbezogenes Problem darstellt, erreicht Eastman Tritan (ein TMCD-reiches Terpolymer, das als Polycarbonat-Ersatz vermarktet wird und in Kapitel 8 behandelt wird) eine hydrolytische Stabilität der PC-Klasse und einen ähnlichen HDT-Bereich, ohne BPA zu verwenden. Harze der Tritan-Klasse verfügen auf Harzebene über eine Zertifizierung für den Kontakt mit Lebensmitteln – doch wie in §8.9 betont wird, überträgt sich diese Zertifizierung nicht auf ein gedrucktes Teil: FDM-Schichtlinien bergen Verunreinigungen und Hotend-Rückstände, sodass jede Verwendung im Kontakt mit Lebensmitteln oder medizinischen Produkten eine Versiegelung und eine eigene Qualifizierung erfordert, unabhängig von der Herkunft des Harzes.

15.2 Das Problem der PC-Kennzeichnung (Vertiefung §2.4)

In Teil I §2.4 wurde das Prinzip vorgestellt: „PC“ auf einem Filamentetikett steht fast immer für eine Legierung oder einen Verbundwerkstoff. Diese Details sind für die Beschaffung und Prozessplanung von Bedeutung.

Bei PC-Legierungen wird PC auf Harzebene mit einem anderen Polymer gemischt. Das Partnerpolymer verbessert eine Eigenschaft auf Kosten einer anderen. **PC/ABS** ist die vorherrschende Legierung: ABS senkt T_g und HDT, erhöht die Kerbschlagzähigkeit erheblich (die Butadienphase absorbiert Energie), verringert das Verziehen beim Abkühlen und senkt die Kosten. Der Kompromiss ist für allgemeine technische Anwendungen gut ausbalanciert. **PC/PBT** ist die zweithäufigste Legierung: PBT ist ein teilkristalliner Polyester; die Legierung behält die Steifigkeit und die hohe T_g von PC bei und bietet zusätzlich chemische Beständigkeit sowie eine durch die Kristallinität bedingte Schlagzähigkeit. Die Legierung weist in ihrem TDS einen T_m -Wert auf (typischerweise $220\text{--}230\text{ }^\circ\text{C}$ aus der PBT-Phase), während reines PC keinen solchen Wert aufweist. **PC/ASA** kombiniert die Hitzebeständigkeit von PC mit der UV-Stabilität von ASA; relevant für Teile im Außenbereich, aber selten in handelsüblichen Filamenten. **PC/PCTG** behält die Transparenz und Steifigkeit von PC bei und bietet zusätzlich die Zähigkeit von PCTG; selten und kaum auf dem Markt vertreten.

PC-Verbundwerkstoffe verbinden PC mit einem Füllstoff oder Additiv. **PC-CF** und **PC-GF** erhöhen die Steifigkeit und den HDT auf Kosten von Sprödigkeit und Abriebfestigkeit. **ESD-PC** mit leitfähigen Additiven (Kohlenstoffnanoröhren oder Spezialruß) senkt den Oberflächenwiderstand in den Bereich der elektrostatischen Ableitung. **FR-PC** mit flammhemmenden Additiven zielt auf die Einhaltung der Norm UL94 V-0 ab. **PC/PTFE** mit eingearbeitetem PTFE bietet reibungsarme Oberflächen für Verschleißanwendungen.

In den technischen Datenblättern (TDS) der Filamente wird typischerweise „PC-Blend“ (Legierung mit nicht genanntem Partner) oder „PC + N % [Füllstoff]“ (Verbundwerkstoff mit Angabe des Füllstoffanteils) angegeben. Die mechanischen Eigenschaften, das Verarbeitungsfenster und die Bedruckbarkeit hängen alle davon ab, welcher Ansatz verwendet wurde. Prusament PC Blend, Bambu PC und PolyMax PC – die drei am besten dokumentierten Allzweck-PC-Produkte auf dem Verbrauchermarkt – sind allesamt Legierungen mit nicht genannten Partnerpolymeren; Polymakers PC-ABS und PC-PBT hingegen nennen ihre Legierungspartner ausdrücklich.

15.3 Allzweck-PC-Mischungen

Dies ist der Standard für Verbraucher, die „PC-Eigenschaften auf Prosumer-Hardware“ benötigen. Mechanische Eigenschaften: Streckgrenze 55–65 MPa (niedriger als bei reinem PC mit 65–70), T_g 105–150 °C je nach Legierungspartner, HDT bei 0,45 MPa 95–145 °C. Drucken bei 260–290 °C an der Düse, 100–115 °C am Bett, geschlossene Kammer dringend empfohlen (passive 40–50 °C ausreichend für die meisten Teile bis ~150 mm; darüber hinaus aktive Kammer bevorzugt). Messingdüsen weisen bei ungefüllten PC-Mischungen einen akzeptablen Verschleiß auf. Die Kategorie umfasst:

Produkt	Klasse	T_g (°C)	HDT bei 0,45 MPa (°C)	Zugstreckgrenze (MPa)	Anmerkungen
Prusament PC-Mischung	PC-Legierung (Partner nicht bekannt)	—	113	63	Der am ausführlichsten dokumentierte Verbraucher-PC; veröffentlichte Daten aus gedruckten Spezifikationen
Bambu-PC	PC (Legierung zur Verringerung der Schrumpfung optimiert)	145	112	55	Aktivkammer 45–60 °C vorgeschrieben; Klebeplatte; vor dem Drucken trocknen
PolyMax PC	Technische PC-Legierung (Partner nicht bekannt)	113	—	60	Glühen bei 100 °C für 2 Stunden, um die HDT zu stabilisieren
Polymaker PC-ABS	PC/ABS-Legierung (explizit)	109	—	40	Vicat 135 °C; Einstiegs-Zähigkeit; niedrigste Kosten in der Produktfamilie
Polymaker PC-PBT	PC/PBT-Legierung (explizit)	140	—	42	Kristallisierende Legierung; T_m 223 °C laut TDS; chemische Beständigkeit Step-up
AzureFilm PC-ABS	PC/ABS-Legierung	—	120	—	Automobilindustrie; preisgünstige Variante

Tabelle 15.1 — Allzweck-PC-Mischungen für Endverbraucher. Die T_g -Spanne von 109 °C (Polymaker PC-ABS) bis 145 °C (Bambu PC) spiegelt direkt die Wahl des Legierungspartners wider: Mehr ABS senkt T_g , mehr PC erhöht sie. Hinweis zur Beschaffung: Die Zugfestigkeitswerte von Polymaker-Produkten beziehen sich auf die Streckgrenze von XY-gedruckten Probekörpern, während die Werte von Prusament und Bambu die XY-Zugfestigkeit angeben – sie sind nicht direkt vergleichbar, wie angegeben. Überprüfen Sie stets die TDS-Prüfmethode, bevor Sie Produkte nach ihrer Zugfestigkeit bewerten.

15.4 PC-CF- und PC-GF-Verbundwerkstoffe

Faserverstärktes PC erhöht die Steifigkeit, die HDT und die Dimensionsstabilität – und verringert die Verformungsneigung bei langen, flachen Teilen, bei denen die thermische Schrumpfspannung von ungefülltem PC dominiert – auf Kosten von Sprödigkeit, Abrieb und einer erheblich beeinträchtigten Z-Festigkeit. Der Füllstoffanteil beträgt typischerweise 10–30 Gew.-%.

Produkt	Füllstoff	HDT bei 0,45 MPa (°C)	Zugstreckgrenze (MPa)	Anmerkungen
Prusament PC Blend CF	~10–15 % CF (Füllstoffgehalt nicht angegeben)	114	64	Gehärtete Düse empfohlen; entspricht Prusament PC Blend bei T _g mit Steifigkeitsgewinn
Spectrum PC CF	10 % CF	140	76	Vicat 150 °C; Trockenbox ja; gehärtete Düse
Ultrafuse PC GF30	30 % Glasfaser	140	36	T _g 142 °C; sehr steif; geringe Dehnung; abrasiv; Trocknung 100 °C / 4–16 h
3DXTech CarbonX PC-CF	~15 % CF	~140	—	US-Industrieprodukt; ISO 9001; gehärtete Düse erforderlich

Tabelle 15.2 – Verstärkte PC-Verbundwerkstoffe. Bemerkenswert ist der Zugstreckgrenze-Wert von 36 MPa für Ultrafuse PC GF30: Er erscheint niedriger als der des ungefüllten PC-Blends (~60 MPa), da GF-gefüllte amorphe Polymere an der Matrix-Faser-Grenzfläche im spröden Modus versagen, bevor sie in die Streckgrenze übergehen; daher entspricht die angegebene „Streckgrenze“ effektiv einem Bruchfestigkeitswert. Modul und HDT sind die relevanten technischen Kennzahlen für diese Typen, nicht die Streckgrenze. Die Wahl von GF30 für Zuganwendungen ist eine Fehlinterpretation der Daten.

15.5 ESD-sicheres PC

PC ist in seiner ursprünglichen Form elektrisch isolierend (Oberflächenwiderstand $\sim 10^{15} \Omega/\text{sq}$). Für Elektronikgehäuse, IC-Handhabungsvorrichtungen, ESD-empfindliche Werkzeuge für den Arbeitsbereich und bestimmte Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt wird ESD-taugliches PC mit leitfähigen Additiven (mehrwandige Kohlenstoffnanoröhren oder Spezialruß) compounding, um den Oberflächenwiderstand in den elektrostatisch ableitenden Zielbereich von 10^6 – $10^9 \Omega/\text{sq}$ zu senken.

Produkt	Leitfähiger Zusatzstoff	Oberflächenwiderstand	HDT bei 0,45 MPa (°C)	Anmerkungen
3DXTech 3DXSTAT ESD-Safe PC	Leitfähiger Kohlenstoff (CNT-Klasse)	10^4 – $10^9 \Omega/\text{sq}$	135	T _g 143 °C; gehärtete Düse erforderlich; der ESD-PC für den Verbraucherbereich ist standardmäßig
Prusament PC Space Grade Black	Additive auf Kohlenstoffbasis (CNT-Klasse)	ESD-ableitende Produktreihen (laut TDS)	137,6	Spezialklasse; veröffentlichte geringe Ausgasungswerte; gehärtete Düse erforderlich; der Preisaufschlag spiegelt eher die Qualifizierungstests als die Leistung wider Aufwertung

Tabelle 15.3 – ESD-sichere PC-Filamente für Endverbraucher. CNT-verstärkte Filamente sind volumenbezogen abrasiver als faserverstärkte Typen, da die Nanoröhren entlang ihrer Länge mit den Oberflächen der Düsenbohrung interagieren; PCD- oder Rubindüsenspitzen verlängern die Lebensdauer bei diesen Materialien erheblich. Der Preisaufschlag für Prusament Space Grade (~269 \$/kg gegenüber ~50 \$/kg für die Standard-PC-Mischung) ist eher eine Beschaffungsentscheidung als eine Leistungsentscheidung – man kauft es wegen der dokumentierten Ausgasungsdaten, nicht wegen der HDT.

15.6 Flammhemmendes PC und PC/ABS-FR

Für Gehäuse in der Nähe von Zündquellen, Elektronikgehäuse, die einer UL-Zulassung unterliegen, Anwendungen im Schienen- und Straßenverkehr sowie andere sicherheitskritische Arbeiten. FR-Additive – typischerweise halogenfreie Phosphor- oder Sulfonat-Pakete – senken die Entflammbarkeitsklasse auf UL94 V-0 (selbstlöschend innerhalb von 10 Sekunden nach Entfernen der Flamme, keine brennenden Tropfen). Der Kompromiss ist entscheidend: FR-Additive plastifizieren das Polymer oft und senken T_g und HDT im Vergleich zu reinem PC um 30–50 °C.

Produkt	FR-Klasse	FR-Einstufung	T_g (°C)	HDT bei 0,45 MPa (°C)	Anmerkungen
Forward AM Ultrafuse PC/ABS FR Schwarz	PC/ABS + halogenfrei FR	UL94 V-0; EN45545-2 R22/R23	94	89	Zertifizierungen für Schienenfahrzeuge machen dieses Material zur Standardwahl für den Nahverkehr
Spectrum PC/ABS FR V0	PC/ABS + halogenfreies FR	UL94 V-0	—	— (HDT bei 1,8 MPa: 90)	Vicat 104 °C; Druck 240–265 °C; Gehäuse für größere Teile empfohlen
Bambu PC FR	PC + FR (Halogengehalt nicht angegeben)	UL94 V-0 (Angabe)	145	113	Höchster T_g -Wert in der FR-PC-Kategorie; FR-Additiv Paket nicht im TDS aufgeführt

Tabelle 15.4 – Flammhemmende PC- und PC/ABS-Filamente. Die T_g -Spanne (94 °C bei Ultrafuse gegenüber 145 °C bei Bambu PC FR) ist das entscheidende technische Merkmal: FR-Konformität und maximale Betriebstemperatur stehen im Widerspruch zueinander, und das Bambu-Produkt

behält seine hohe T_g durch die FR-Compoundierung aggressiver bei als die Ultrafuse-Legierung. Wählen Sie zuerst nach Zertifizierung (welchen Standard erfordert Ihre Anwendung?), dann nach thermischem Bereich.

15.7 PC/PTFE (reibungssarme Verschleißflächen)

PC-Matrix, compoundiert mit PTFE für reibungsarme Gleitflächen – Buchsen, Führungen, Verschleißplatten, mechanische Schnittstellen, bei denen der Reibungskoeffizient (COF) entscheidend ist. Die PTFE-Phase senkt den Reibungskoeffizienten und die Verschleißrate sowohl gegenüber sich selbst als auch gegenüber metallischen Gegenflächen; die PC-Matrix trägt die strukturelle Last.

Spectrum PC/PTFE ist das am weitesten verbreitete kommerzielle Produkt in dieser Nische, mit einer HDT von 140 °C (geglüht) und tribologischen Kennwerten, die im TDS veröffentlicht sind. Drucken Sie bei 265–295 °C Düsentemperatur, 90–120 °C Betttemperatur, mit empfohlener Kammer und dem vom Hersteller spezifizierten Magigoo PC-Kleber.

Einschränkung hinsichtlich des Hotend-Materials. Die Zersetzung von PTFE ist ein stufenweiser Prozess, kein einzelner Schwellenwert: Daten aus dem Sicherheitsdatenblatt für Fluorpolymere sowie Leitlinien von NIOSH/PlasticsEurope beschreiben, dass die Freisetzung von Partikelrauch und das Risiko von Polymerrauchfieber bei etwa 300–350 °C relevant werden, aktive Pyrolyse bei etwa 400 °C auftritt und die gefährlicheren Gase – Fluorwasserstoff und Carbonylfluorid – bei noch höheren Temperaturen, etwa ab 400 °C, entstehen (siehe §5.3). PC/PTFE-Filamente werden bei einer Düsentemperatur von 280–300 °C verarbeitet, was unterhalb der Schwelle für die Freisetzung von PTFE-Dämpfen liegt, aber deutlich über der sicheren Temperatur für PTFE-ausgekleidete Hotends (PTFE-Auskleidungen erweichen und entgasen bereits oberhalb von ~240–250 °C, noch bevor eine Zersetzung zum Problem wird). Der Druck mit PC/PTFE erfordert ausnahmslos ein Vollmetall-Hotend; dies ist der häufigste Fehler aufgrund von Prozessinkompatibilität bei diesem Filament.

15.8 Zusammengefasste Eigenschaftsbereiche

Über die vier oben genannten Produktkategorien hinweg erstreckt sich der Eigenschaftsbereich so weit, dass „PC“ als generische Spezifikation praktisch bedeutungslos ist. Die folgende Tabelle fasst die wichtigsten Zahlen aus jeder Kategorie zum direkten Vergleich zusammen.

Kategorie	T _g -Bereich (°C)	HDT bei 0,45 MPa (°C)	Zugfesti- gkeit (MPa)	Düsen- Temperatur (°C)	Am besten geeignet für
Allzweck-PC-Mischung	105–150	95–145	40–65	260–290	Standard-Konstruktionsarbeiten, Elektronikgehäuse, Halterungen für den Einsatz bis 100 °C
PC-CF / PC-GF Verbundwerkstoff	142+	140	36–76	275–300	Starre Halterungen, Vorrichtungen, Spannvorrichtungen für den Einsatz bis 130 °C; Bauteile
ESD-PC	143	135–138	55–70	270–300	Elektronikgehäuse, IC- Handhabung, ESD-empfindliche Arbeitsbereiche, Raumfahrt- Hardware
FR-PC / PC/ABS-FR	94–145	89–113	50–60	240–280	Sicherheitskritische Gehäuse, für den Verkehr/Eisenbahn zugelassene Teile, UL- zertifizierte Elektronik
PC/PTFE	—	140 (geglüht)	55	265–295	Reibungsarme Buchsen, Führungen, Verschleißflächen; Vollmetall-Hotend erforderlich

*Tabelle 15.5 – Zusammengefasste Anwendungsgrenzen der PC-Familie. Die Spalte „T_g-Bereich“ erfasst die wichtigste Beschaffungsvariable in dieser Kategorie: Eine Schwankung von 50 °C bei T_g verändert die Anwendungsgrenzen hinsichtlich der Betriebstemperatur vollständig. Die Angabe von „PC“ ohne Nennung der Unterkategorie ist der häufigste Beschaffungsfehler bei dieser Polymerfamilie – leicht zu begehen bei einer Teilstückliste
Stückliste leicht zu begehen, in der Produktion jedoch schwer zu beheben.*

15.9 Druckverfahren und Kalibrierung

Die Parameter der PC-Familie variieren stärker je nach Unterkategorie als innerhalb einer einzelnen Kategorie. Die folgenden Ausgangswerte gehen von einer 0,4-mm-Düse aus gehärtetem Stahl aus (PC-Blends vertragen Messing; alle faser- oder CNT-verstärkten Materialien tun dies nicht) sowie von einem geschlossenen Bauraum.

Parameter	PC-Mischung	PC-CF / PC-GF	ESD-PC	FR-PC	PC/PTFE
Düse (°C)	270–290	275–300	270–300	240–280	265–295
Bett (°C)	100–115	100–115	110–120	90–110	90–120
Kammer	passiv 40–50 °C	passiv 40–50 °C	passiv 45– 60 °C	passiv 40–50 °C	aktiv 45–55 °C
Teilkühlung (%)	0–10	0	0	0–10	0
Max. Volumenstrom (mm³/s)	8–12	6–10	7–10	8–11	6–9
Druckvorlauf	0,025–0,05	0,035–0,06	0,030–0,05	0,030–0,05	0,030–0,05
Düsenhärte	Messing zulässig	gehärtet erforderlich; PKD/Rubin bevorzugt	gehärtet erforderlich; PCD/Rubin bevorzugt	Messing OK; gehärtet bei FR-CF Varianten	gehärtet empfohlen
Trocknung	80–100 °C, 6–8 h	90–110 °C, 8–10 h	80–100 °C, 6–8 h	60–80 °C, 4–16 h	80–100 °C, 6–8 Std.
Hotend-Typ	beliebig	beliebig	beliebig	beliebig	nur Vollmetall

Tabelle 15.6 – Startdruckparameter für die PC-Familie. Die Zeile zum Hotend-Typ ist die am häufigsten übersehene Angabe: PTFE-ausgekleidete Hotends im Bowden-Stil mit einer Nennbetriebstemperatur von 240 °C sind bei Tier-1-Hardware allgegenwärtig und werden bei den Verarbeitungstemperaturen von PC unabhängig vom Düsenverschleiß ausgasen oder sich zersetzen, noch bevor eine Prozessoptimierung überhaupt eine Rolle spielen kann. Eine Kalibrierung pro Spule auf dem jeweiligen Drucker bleibt zwingend erforderlich; die oben genannten Werte sind Ausgangspunkte für die Polymerchemie.

Feuchtigkeit ist die zweitwichtigste Einflussgröße. PC nimmt bei Sättigung 0,3–0,5 % Wasser auf; PC-CF und PC-GF deutlich mehr, da die Faseroberfläche die Aufnahme beschleunigt. Anzeichen für Feuchtigkeit: Fadenbildung trotz angepasster Rückzugseinstellung, Oberflächenrauheit, hörbares „Zischen“ oder Knacken in der Schmelzzone sowie beeinträchtigte Schichtverbundfestigkeit. Eine aktive Trocknung vor jedem wichtigen Druckvorgang ist bei technischen Anwendungen Standard; in Teil I

§3.5 gibt für PC eine Trocknungszeit von 6–8 Stunden bei 80–100 °C und für die verstärkten Typen eine von 8–10 Stunden bei 90–110 °C an. Die Lagerung in einer Trockenbox während des Druckvorgangs verlängert das Druckfenster für geöffnete Spulen.

15.10 Strategie zur Bettadhäsion

PC weist das gegenteilige Problem von Polypropylen auf: PC haftet bei richtiger Erwärmung zu stark an glattem PEI. Die Haftung ist so stark, dass beim Entfernen des Teils das Federstahlblech zerreißen oder PEI-Fragmente vom magnetischen Substrat abgezogen werden können. Die Strategie hängt vom Druckvolumen und davon ab, wie oft die Oberfläche zwischen PC und anderen Materialien wechselt.

Oberfläche	PC-Kompatibilität	Haftungsstrategie	Anmerkungen
Glattes PEI	Übergriffe; Beschädigung der Folie beim Entfernen	Klebestift, PVP-Beschichtung oder Magigoo PC als Trennschicht	Standard-Prosumer-Platte; Trennschicht ist für technische Teile unverzichtbar
Strukturiertes PEI	Akzeptabel; verminderte Haftung	Unbeschichtet für kleine Teile; Magigoo PC für größere	Geringere Beschädigungsgefahr beim Entfernen; die Oberflächenstruktur überträgt sich auf die erste Schicht

Oberfläche	PC-Kompatibilität	Haftstrategie	Anmerkungen
G10 Garolite	Beste Langzeitlösung	Unbeschichtet; Druckbett 100–115 °C; vor dem Entfernen vollständig abkühlen lassen	Standard für wiederholtes PC-Drucken; keine Klebstoffrückstände; langlebig über viele Drucke hinweg
CryoGrip Glacier	Dokumentierte Kompatibilität bei moderaten Betttemperaturen	Unbeschichtet; Bett 90–100 °C	Technisch entwickelte Platte mit Frost-Effekt; löst sich beim Abkühlen von selbst; niedrigere Betttemperaturen als PEI
Glas / Borosilikat	Grenzwertig	Magigoo PC zwingend erforderlich	Funktioniert, löst sich jedoch unvorhersehbar; nicht die erste Wahl
Polycarbonatplatte	Übergriff führt zu katastrophalen Folgen	Nicht verwenden	Die PC-auf-PC-Haftung ist nach dem Abkühlen mechanisch unlösbar

Tabelle 15.7 – Strategien zur Bettadhäsion für Materialien der PC-Familie. G10-Garolite ist der technische Standard für die PC-Produktion, da seine Oberflächenchemie PC während des Drucks festhält und sich beim Abkühlen ohne Verbrauchsmaterialien sauber löst – ein Arbeitsablaufvorteil, der sich über viele Drucke hinweg summiert.

Die Kostenbilanz für Garolite ist eindeutig. Standard-PEI-Platten aus Federstahl, die beim Entfernen von PC durch Überkleben beschädigt wurden, können nicht repariert werden; der Ersatz kostet 30–60 \$ pro Platte und stellt den größten laufenden Kostenfaktor beim Einsatz von PC auf PEI ohne Trennschicht dar.

15.11 Glühen

PC ist amorph; das Tempern verändert die Kristallinität nicht (es gibt keine). Das Tempern dient bei PC dazu, Restspannungen aus der schnellen Abkühlung der Schichten abzubauen – nützlich für Teile mit dicken Wänden, scharfen Ecken oder geometrischen Spannungskonzentratoren, bei denen die Restspannungen nach dem Druck andernfalls zu verzögertem Rissbildung führen würden. Die Maßveränderung ist gering: Typische PC-Teile schrumpfen während eines Spannungsabbauglühens um 0,3–0,5 %.

Gängige Herstellerempfehlungen: PolyMax PC 100 °C für 2 h; Bambu PC und PC FR 85–100 °C für 6–12 h. Die Temperatur muss um ca. 10–15 °C unter T_g bleiben, um Verformungen in dünnen Wänden zu vermeiden – 100 °C ist die praktische Obergrenze für die meisten handelsüblichen PC-Mischungen, obwohl T_g bei 110–145 °C liegt. Langsam abkühlen (Ofen ausschalten, das Teil im Ofen lassen, bis es Raumtemperatur erreicht hat), um neue Spannungen zu vermeiden. Die PC/PBT-Legierung (Polymaker PC-PBT) bildet eine Ausnahme: Die PBT-Phase ist teilkristallin und reagiert auf das Tempern ähnlich wie andere teilkristalline Polymere, wobei sich die HDT und die Steifigkeit über die einfache Spannungsentlastung hinaus verbessern. Halten Sie sich an die Angaben im technischen Datenblatt (TDS) des Herstellers für dieses spezifische Produkt.

15.12 Markenlandschaft (für Verbraucher zugänglich)

Der für Verbraucher zugängliche PC-Markt konzentriert sich auf etwa acht Anbieter mit gut dokumentierten SKUs in Engineering-Qualität. Industrielle PC-Materialien in versiegelten Kartuschen (Stratasys PC-ABS und PC-ESD, beschränkt auf Drucker der Fortus/F-Serie) fallen gemäß Teil I §1.2 (Rahmenbedingungen für die Prosumer-Ebene) nicht in den Geltungsbereich.

Marke	Katalog	Besondere Hinweise
Prusament (Prusa Polymers)	PC-Mischung; PC-Mischung mit Kohlefaser; PC Space Grade Black	Dreistufiges Sortiment von technischen Produkten für Endverbraucher bis hin zu weltraumtauglichen Spezialprodukten; veröffentlichte Daten zu Druckmustern; die am besten dokumentierte PC-Marke für Endverbraucher

Marke	Katalog	Besondere Merkmale
Bambu Lab	PC; PC FR	Optimiert für reduzierten Schrumpf; spezifiziert Kammer 45–60 °C; FR-Variante mit UL94 V-0-Zertifizierung; gängige Verbraucherpreise
Polymaker	PolyMax PC; PolyLite PC; PC-ABS; PC-PBT	Technische Legierungen mit Partnerpolymeren, die im TDS für PC-ABS und PC-PBT genannt werden; PolyMax PC ist die unbenannte Legierung im Consumer-Segment
Forward AM (BASF)	Ultrafuse PC/ABS FR Black; Ultrafuse PC GF30	FR-Zertifizierung für Schienenfahrzeuge (EN45545-2) für das FR-Produkt; GF30 ist der steifste handelsübliche PC-Verbundwerkstoff im Consumer-Segment
3DXTech	3DXSTAT ESD-Safe PC; CarbonX PC-CF; ECO-PC FR (eingeschränkt)	US-Industriesortiment; Fertigung nach ISO 9001; das ESD-Produkt ist der Standard-ESD-PC im Consumer-Bereich; Preis 1,5–2× so hoch wie bei vergleichbaren Consumer-Produkten
Spectrum Filaments	PC CF; PC/PTFE; PC/ABS FR V0	Europäische Industrielinie; das einzige für Verbraucher zugängliche PC/PTFE-Produkt; halogenfreie FR-Formulierung
AzureFilm	PC-ABS	Budget-Segment; Ausrichtung auf die Automobilindustrie; veröffentlichte HDT 120 °C
Nanovia	PC-Familie (PC-CF- und PC-ABS-Varianten)	Französischer Spezialhersteller; für die Produktdokumentation ist der Zugriff über einen Händler erforderlich; aufgrund der mechanischen Eigenschaften gehören die Produkte zur Kategorie „Engineering“

Tabelle 15.8 – Landschaft der für Verbraucher zugänglichen PC-Marken (Anfang 2026). Prusament, Bambu und Polymaker dominieren die Regale im Consumer-Segment und machen den Großteil der in der Community geteilten Druckprofile aus. Forward AM Ultrafuse und 3DXTech sind die Standardprodukte für den Engineering-Bereich. Spectrum's PC/PTFE ist der einzige Zugangspunkt für Verbraucher für diese spezifische Verbundchemie. Die gegenseitige Substitution von Marken innerhalb einer Unterkategorie (z. B. Prusament PC Blend vs. Bambu PC) ist nicht beliebig – die Legierungszusammensetzung unterscheidet sich, auch wenn keine der Marken dies angibt, und der Druckbereich kann sich bei der Zugfestigkeit um 10–20 % und bei T_g um deutlich mehr verschieben.

15.13 Anwendungsgeeignetheit

Wählen Sie eine Allzweck-PC-Mischung, wenn: das Bauteil bei Betriebstemperaturen von 80–120 °C mechanisch belastet wird (Motorraumkomponenten fern von direkter Hitze, Elektronikgehäuse in warmen Umgebungen, Maschinenschutzvorrichtungen in der Nähe von Motoren); Kerbschlagzähigkeit erforderlich ist (PETG und PCTG können in dieser Hinsicht nicht mit ungefüllten PC-Mischungen mithalten); das Bauteil Lösungsmittelverklebt oder dampfbehandelt wird (PC reagiert gut auf Dichlormethan-Verklebung für technische Verbindungen, wobei die Handhabungshinweise aus §5.3 zu beachten sind); Kosten und Druckbarkeit gegenüber dem maximalen Temperaturbereich überwiegen.

Wählen Sie PC-CF oder PC-GF, wenn: das Bauteil die Steifigkeit eines Metallsatz-Filaments benötigt, ohne bei Kosten oder Prozessdisziplin in den PPA-Bereich zu geraten; eine HDT von bis zu 140 °C erforderlich ist; die Dimensionsstabilität unter Belastung wichtiger ist als die Schlagzähigkeit; das Design eine faserausgerichtete Geometrie verwendet, bei der die Z-Festigkeit keine einschränkende Größe darstellt. PA6-CF (Kapitel 13) ist die Alternative, wenn die Feuchtigkeit gut kontrolliert wird und eine höhere Schlagzähigkeit erforderlich ist; PPA-CF (Kapitel 14) ist die Alternative, wenn die Feuchtigkeit unkontrolliert ist oder die Betriebstemperatur die Obergrenze von PC überschreitet.

Wählen Sie ESD-PC, wenn: die Anwendung eine Oberflächenwiderstandsfähigkeit im Bereich von 10^6 – 10^9 Ω/sq bei struktureller Leistungsfähigkeit der PC-Klasse erfordert – Vorrichtungen für die Elektronikhandhabung, IC-Testvorrichtungen, Halbleiterwerkzeuge. Das Produkt Prusament Space Grade berücksichtigt zusätzlich die Ausgasung im Vakuumbetrieb für Arbeiten an Weltraumhardware.

Wählen Sie FR-PC, wenn: eine Zertifizierung (UL94 V-0, EN45545 für den Schienenverkehr, gleichwertig für die Luft- und Raumfahrt) erforderlich ist. Wählen Sie zunächst nach Zertifizierungsstandard; die thermischen Grenzen folgen daraus.

Vermeiden Sie die PC-Familie, wenn: das Bauteil über längere Zeit im Freien eingesetzt wird (BPA-PC vergilbt unter UV-Licht; ASA ist die richtige Wahl); Kontakt mit Lebensmitteln im Anwendungsbereich liegt (Bedenken hinsichtlich der BPA-Migration; PCTG auf Tritan-Basis ist die validierte Alternative); die Betriebstemperatur unter 80 °C bleibt und die Schlagzähigkeit keine zwingende Anforderung ist (PCTG spart 30–40 % der Filamentkosten und druckt zuverlässiger); das Bauteil unter zyklischer Belastung Ermüdungsfestigkeit erfordert (PC weist Kerbbrüche auf; PA612 und PA11 aus Kapitel 13 behalten die Duktilität besser bei).

Teil VIII

Spezial- und Hochleistungs

Elastomere, Nischen-Technische Thermoplaste, Sulfon- und Imidharze, die PAEK-Familie, Stützfilamente und biologisch abbaubare Spezialharze. Die Polymere in diesem Teil decken den breitesten Anwendungsbereich in diesem Band ab – von Tier-1-TPU auf jedem beheizten Bett bis hin zu Tier-4-PEEK, das den von dieser Referenz abgedeckten Prosumer-Bereich von 350 °C / 120 °C / 65 °C-Prosumer-Bereich, den dieses Nachschlagewerk abdeckt. Wenn ein Polymer für Verbraucherhardware grundsätzlich unerreichbar ist, wird dies in dem Kapitel ausdrücklich erwähnt, anstatt etwas anderes vorzutäuschen.

16. TPU, TPEE, PEBA und schäumende Elastomere

Thermoplastische Elastomere bilden die Kategorie der flexiblen Filamente im kommerziellen FDM – Polymere, die gummiartige Elastizität (200–700 % Bruchdehnung) mit der Schmelzbarkeit und Recyclingfähigkeit von Thermoplasten verbinden. **TPU** (thermoplastisches Polyurethan) dominiert den Verbrauchermarkt mengenmäßig. **TPE** (thermoplastisches Elastomer) ist ein Oberbegriff, der TPU und mehrere andere Blockcopolymer-Elastomerchemien umfasst. **TPEE** (thermoplastisches Polyesterelastomer, manchmal auch COPE genannt) ist ein Elastomer auf Polyesterbasis mit höherer Wärme- und Chemikalienbeständigkeit als TPU. **PEBA** (Polyetherblockamid, vermarktet unter dem Markennamen Arkema Pebax) ist ein Elastomer auf Polyamidbasis mit der geringsten Dichte und der besten dynamischen Biegefestigkeit in dieser Familie. **Geschäumte Elastomere** (flexible Filamente mit chemischem Treibmittel) bilden eine separate Funktionskategorie, die die Dichte von Druckteilen um 30–50 % reduziert und in §16.7 behandelt wird.

16.1 Chemie: harte Segmente und weiche Segmente

Jedes handelsübliche flexible Filament ist ein Blockcopolymer aus abwechselnden harten und weichen Segmenten. Die harten Segmente sorgen für mechanische Festigkeit, Dimensionsstabilität und die obere Betriebstemperatur; die weichen Segmente sorgen für Elastizität. Die Chemie des harten Segments ist das, was die vier hier behandelten Polymerfamilien voneinander unterscheidet.

TPU verwendet aromatische, mit Diisocyanat verlängerte Harnstoff- oder Urethan-Bindungen als harte Segmente und Polyester- oder Polyether-Polyole als weiche Segmente. TPU auf Polyesterbasis weist bessere mechanische Eigenschaften, Abriebfestigkeit und Ölbeständigkeit auf; TPU auf Polyetherbasis verfügt über eine bessere hydrolytische Stabilität und Flexibilität bei niedrigen Temperaturen. In den technischen Datenblättern (TDS) der Filamente wird selten angegeben, welche Chemie der weichen Segmente im Produkt enthalten ist.

TPEE (auch COPE – Copolyester-Elastomer – genannt) verwendet teilkristalline Polyester-Hartsegmente und amorphe Polyether-Weichsegmente. Die kristallinen Hartsegmente sorgen für eine höhere Wärmebeständigkeit (Dauerbetrieb bis ~120 °C gegenüber ~80 °C bei TPU) und eine bessere Kriechfestigkeit unter Dauerbelastung, allerdings auf Kosten engerer Verarbeitungsfenster und einer stärkeren Kristallisationsschrumpfung. TPEE ist das Elastomer für Teile, die bei erhöhter Temperatur mechanisch belastet werden und sich dabei biegen; TPU ist das Elastomer für alle anderen Anwendungen in diesem Bereich.

PEBA kombiniert Polyamid-Hartsegmente (typischerweise PA12, manchmal PA11 in den biobasierten Pebax Rnew-Typen) mit Polyether-Weichsegmenten (typischerweise PTMG oder PEG). Die Polyamid-Hartsegmente verleihen PEBA eine außergewöhnliche dynamische Biegefestigkeit – mit einem der niedrigsten Hystereseverluste pro Zyklus aller handelsüblichen Elastomere, weshalb superkritisch geschäumtes PEBA (Nikes ZoomX, eingeführt 2017) die Spitzenklasse der Renn-Mittelsohlen mit Carbonplatte dominiert. Es ist jedoch nicht das universelle Mittelsohlenmaterial: Expandiertes TPU (Adidas Boost) ist nach wie vor weit verbreitet, und auch neuere Premium-Schäume basieren auf superkritischem EVA und aliphatischem TPU. Die Schüttdichte von PEBA liegt bei etwa 1,01–1,04 g/cm³ (nahe der Dichte von Wasser – die niedrigste aller handelsüblichen Elastomere), was ihm die höchsten Steifigkeits- und Zähigkeits-Gewichts-Verhältnisse in der Elastomerfamilie verleiht. Die harten Polyamidsegmente erweitern zudem den einsetzbaren Temperaturbereich: PEBA bleibt bis -40 °C flexibel und behält bei den steiferen Typen auch bei Dauerbetrieb von 100–120 °C eine brauchbare Steifigkeit. Der Nachteil sind die Kosten – PEBA-Filamente kosten in der Regel das 3- bis 5-fache des Preises für vergleichbares TPU.

16.2 Shore-Härte: die wichtigste Spezifikation

Die Shore-Härte auf der A- und D-Skala ist die wichtigste Spezifikation für ein flexibles Filament. Die A-Skala misst weiche Elastomere (0–100); die D-Skala misst harte Elastomere und starre Kunststoffe (0–100). Die Skalen überschneiden sich: Shore 90A entspricht in etwa Shore 40D. Herkömmlicherweise wird TPU bis ~95A auf der A-Skala angegeben, wechselt dann am starren Ende zur D-Skala; TPEE wird je nach Typ auf der A- und D-Skala angegeben; PEBA wird fast ausschließlich auf der D-Skala angegeben (Pebax-Typen reichen von 25D für das weichste handelsübliche Produkt bis 72D am starren Ende). Die meisten Filamenthärtewerte gruppieren sich in bekannten Bereichen:

Shore	Typisches Gefühl	Druckschwierigkeit	Übliche Anwendungen
60A	Weiches Gummiband; verformt sich leicht unter Fingerdruck	Sehr schwierig; Direktantrieb erforderlich; sehr langsame Druckgeschwindigkeiten	Kosmetische Griffe, weiche Dichtungen, anatomische Modelle
70A	Weiches Reifenprofil; lässt sich in der Hand stark biegen	Schwierig; Direktantrieb wird dringend empfohlen	Vibrationsdämpfer, Soft-Touch-Umspritzungen, weiche Handyhüllen
80A–85A / 25D–35D	Mittlerer Gummi; vergleichbar mit einem weichen Radiergummi	Mäßig; Direktantrieb bevorzugt, aber Bowden möglich	Flexible Scharniere, Dichtungen, Uhrenarmbänder, Rollen; weiche PEBA-Anwendungen für Laufschuhe
90A–95A / 40D–45D	Fester Gummi; härter als ein typischer Radiergummi	Einfacher; Bowden-Konfigurationen drucken diesen Bereich erfolgreich	Drohnenreifen, mechanische Stoßfänger, strapazierfähige Handyhüllen – der Standard für Verbraucher
60D–72D	Harter Kunststoff mit leichter Biegsamkeit; vergleichbar mit flexiblem PP	Einfach; drückt sich wie ein leicht gummiartiges, starres Material	Bewegliche Scharniere, Schnappverbindungen mit hoher Zyklusanzahl, industrielle Buchsen, starre PEBA-Medizinschläuche

Tabelle 16.1 – Shore-Härte-Übersicht für FDM-Elastomer-Filamente. Die Achse für den Druckaufwand verläuft umgekehrt proportional zur Härte: Jeder Rückgang um 10 Punkte auf der A-Skala verdoppelt in etwa die Herausforderung beim Drucken. Die meisten Verbraucher, die zum ersten Mal mit flexiblen Filamenten arbeiten, sollten bei 95A beginnen – weichere Materialien erfordern Hardware und Fähigkeiten, die in diesem Härtebereich nicht notwendig sind.

16.3 Eigenschaftsprofil

Die mechanischen Eigenschaften von Elastomeren werden maßgeblich von der Shore-Härte und der Chemie des Basispolymers bestimmt. Die folgenden Werte sind repräsentative Bereiche; einzelne Filamente variieren innerhalb jedes Bereichs.

Eigenschaft	TPU 95A	TPU 64D	TPEE (~55D)	PEBA 40D / 55D
Dichte (g/cm³)	1,20–1,25	1,15–1,20	1,10–1,20	1,01–1,04
Zugfestigkeit (MPa)	30–45	40–55	25–40	35–55
Bruchdehnung (%)	400–600	200–400	300–500	400–700
Reißfestigkeit (kN/m)	80–120	100–150	80–130	100–180
Dauerbetrieb (°C)	70–80	70–85	100–120	90–120
Nutzbare Biegetemperatur (°C)	-20	-20	-30	-40
Druckverformungsrest (%)	25–40	20–35	15–30	15–25

Eigenschaft	TPU 95A	TPU 64D	TPEE (~55D)	PEBA 40D / 55D
Hydrolytische Beständigkeit	befriedigend (Polyester) / gut (Polyether)	befriedigend (Polyester) / gut (Polyether)	gut	ausgezeichnet

Tabelle 16.2 – Elastomer-Eigenschaftsprofil nach Materialfamilie. Die PEBA-Spalte dient als Referenz für Hochleistungsmaterialien: geringe Dichte, breiter Temperaturbereich, außergewöhnliche dynamische Biegefestigkeit, ausgezeichnete hydrolytische Stabilität. Bei Anwendungen, bei denen Gewicht, dynamische Biegefestigkeit oder Beständigkeit im Nassbetrieb entscheidend sind, übertrifft PEBA TPU so deutlich, dass der höhere Preis gerechtfertigt ist; in allen anderen Fällen ist TPU die praktische Standardwahl.

16.4 Druckverfahren: das Problem der Filamentknickung

Flexible Filamente stellen die FDM-Hardware vor größere Herausforderungen als starre Materialien. Das Extrudergetriebe befördert das Filament in das Hotend; das Filament muss dem Gegendruck standhalten, der durch den Schmelzfluss durch die Düse entsteht. Starres Filament bewältigt dies problemlos – die Filamentsäule ist steifer als der Gegendruck. Flexibles Filament hingegen nicht: Ab einem bestimmten kritischen Gegendruck (der von der Shore-Härte, der Geometrie des Filamentwegs, der Düsenverengung und der Druckgeschwindigkeit abhängt) knickt das Filament im Filamentweg zwischen dem Extrudergetriebe und dem Hotend-Eingang ein, was zu einer Unterextrusion oder einem verstopften Extruder führt.

Die technische Lösung besteht darin, den Filamentweg einzuschränken. Direktantriebsextruder, die am Druckkopf montiert sind – wo das Filament etwa 30–50 mm vom Getriebe bis zur Schmelzzone der Düse zurücklegt – drucken 85A und weicher zuverlässig. Bowden-Rohr-Extruder mit etwa 500–800 mm PTFE-Schlauch zwischen Getriebe und Hotend haben Schwierigkeiten mit allem, was weicher als 95A ist. Extruder mit begrenztem Filamentweg – Direktantriebskonstruktionen, die das Filament physisch zwischen Rollen oder in einem starren Kanal bis zum Düseneingang begrenzen – drucken 70A und weicher. Multi-Extruder-Hardware für ein Material, die eine Düse für mehrere Filamentzuführungen gemeinsam nutzt, verwendet typischerweise eine Bowden-artige Führung zwischen Puffer und Druckkopf, was diese Systeme auf 95A und härteres TPU beschränkt, sofern der Hersteller nichts anderes angibt.

PEBA lässt sich bei gleicher Shore-Härte toleranter drucken als TPU. Die harten Polyamid-Segmente verleihen dem PEBA-Filament bei gleichem Shore-Wert eine steifere, ungeschmolzene Säule als TPU, was das Knicken unter Gegendruck verringert. Ein PEBA-40D-Filament (entspricht ca. 90A) lässt sich zuverlässig auf Bowden-Hardware drucken, während ein TPU-90A-Filament knicken würde. Dies ist für Multi-Extruder-Systeme mit längeren Filamentwegen von großer praktischer Bedeutung.

Die Druckgeschwindigkeit verschärft die Einschränkungen hinsichtlich des Gegendrucks. Ein flexibles Filament, das bei 20 mm/s zuverlässig gedruckt wird, kann unter ansonsten identischen Bedingungen bei 40 mm/s knicken, da der höhere Volumenstrom einen höheren Gegendruck der Schmelze erfordert. Der erste Kalibrierungsschritt bei jedem neuen flexiblen Filament ist der maximale Volumenstrom bei der angestrebten Düsensentemperatur – typischerweise 4–6 mm³/s für weichere Typen, 6–10 mm³/s für 95A und bis zu 12 mm³/s für die härteren Typen 60D–72D. Beginnen Sie mit einer niedrigeren Einstellung und steigern Sie diese schrittweise.

16.5 Betthaftung: das Problem der Überhaftung

TPU, TPEE und PEBA haften alle stark an glatten PEI-Oberflächen – stark genug, um die Federstahlplatte beim Entfernen großer oder geometrisch komplexer Drucke zu beschädigen. Das gleiche Problem der übermäßigen Haftung, das bereits für PC und PETG dokumentiert wurde, wird hier verstärkt, da sich die Elastomeroberflächen beim Entfernen verformen und zusätzliche Belastung auf die Platte ausüben. Es gelten die üblichen Abhilfemaßnahmen: Trennschicht aus Klebestift, PVP-Beschichtung, spezielle, für Elastomere entwickelte Bauplatten oder deutlich niedrigere Betttemperaturen, um die Haftung zu verringern. Strukturiertes PEI haftet weniger stark und ist die praktische Standardwahl für routinemäßige TPU-Arbeiten; glattes PEI mit einer Trennschicht aus Klebestift eignet sich für Teile, die eine glänzende Oberfläche der ersten Schicht benötigen. CryoGrip Glacier ist ebenfalls als erfolgreiche Kaltablöse-Oberfläche für TPU dokumentiert; eine Betttemperatur von 40–50 °C ohne Klebstoff ist der typische Arbeitsablauf. PEBA haftet weniger stark als TPU an PEI und löst sich in der Regel bei einer Betttemperatur von 50–60 °C ohne Klebstoffhilfen sauber ab – einer von mehreren Vorteilen, die PEBA gegenüber TPU in der Produktion bietet.

16.6 Trocknung

TPU ist mäßig hygroskopisch – typische Sättigung 0,3–0,8 %, weniger als bei Polyamiden, aber mehr als bei Polyestern. Feuchtigkeitssymptome sind charakteristisch und sofort erkennbar: sichtbare Dampfblasen, die während der Extrusion aus der Düsenspitze austreten, hörbares Knacken in der Schmelzzone, starke Oberflächenrauheit am gedruckten Strang und erheblicher Festigkeitsverlust im gedruckten Teil. Die Trocknungstabelle in Teil I §3.5 gibt für TPU/TPE 50–65 °C für 4–6 Stunden an, mit dem wichtigen Vorbehalt, dass die Obergrenze unter dem Vicat-Erweichungspunkt des jeweiligen Filaments bleiben muss – weichere Typen (60A, 70A) verformen sich oberhalb von 55 °C irreversibel und die Spulenschichten können in einem heißen Trockner miteinander verschmelzen. Filamenttrockner im Bett-Stil, die bei 50 °C betrieben werden, sind für alle Typen sicher; bei Konvektionsöfen ist bei weichen Filamenttypen eine sorgfältige Temperaturüberwachung erforderlich.

TPEE ist weniger feuchtigkeitsempfindlich als TPU, weist jedoch bei Nässe die gleichen Symptome hinsichtlich der Oberflächenqualität auf. Eine Trocknung bei 65–75 °C für 6–8 Stunden ist Standard. **PEBA ist** aufgrund seiner harten Polyamidsegmente **das hygroskopischste Elastomer in diesem Kapitel** – diese weisen das gleiche Feuchtigkeitsverhalten der Amidgruppen auf wie die aliphatischen Nylons aus Kapitel 13. Die Sättigungsabsorption liegt je nach Typ bei 1–2 %. Eine Trocknung bei 70–80 °C für 6–8 Stunden ist vor anspruchsvollen Drucken Standard; die Lagerung in einer Trockenbox während des Druckvorgangs ist für geöffnete Spulen praktisch zwingend erforderlich. Die im Vergleich zu TPU höhere sichere Trocknungstemperatur spiegelt die höhere Betriebstemperatur von PEBA wider.

16.7 Schäumende Elastomere

Schaumfilamente verwenden chemische Treibmittel – Additive, die bei erhöhten Düsentemperaturen Gas (typischerweise CO_2 oder N_2) freisetzen –, um extrudierte Perlen mit einer inneren Mikroporenstruktur zu erzeugen. Das Ergebnis ist ein gedrucktes Teil mit einer um 30–50 % reduzierten Dichte, einer weichen Haptik selbst bei gleicher Grundpolymerhärte, verbesserter Schallabsorption und verringerter Wärmeleitfähigkeit. Die Kategorie der schäumenden PLA-Filamente (colorFabb LW-PLA und Äquivalente) ist volumenmäßig führend und wird in Kapitel 6 behandelt. Die Kategorie der schäumenden Elastomere ist kleiner, aber funktional einzigartig: Die Kombination aus der Elastizität des Elastomers und der Kompressibilität des Schaums erzeugt ein Dämpfungsmaterial mit Eigenschaften, die kein starres schäumendes Filament erreichen kann.

Der Schäummechanismus wird durch die Düsentemperatur gesteuert. Unterhalb einer Aktivierungsschwelle (typischerweise 225–240

°C, herstellereinspezifisch) ist das Treibmittel inaktiv und das Filament wird mit seiner Nenndichte extrudiert. Oberhalb der Schwelle zersetzt sich das Mittel und der Schäumvorgang beginnt; das Schäumungsverhältnis steigt mit der Düsentemperatur bis zu einem Sättigungspunkt an. Die Folge für den Betrieb: **Die Druckparameter müssen auf das Schäumverhalten abgestimmt werden, nicht nur auf die Oberflächenqualität.** Ein Filament, das bei 220 °C mit einer effektiven Durchflussrate von 1,0 extrudiert, kann bei 250 °C mit einer effektiven Durchflussrate von 0,5 extrudieren, da sich das gleiche Volumen an festem Filament auf das doppelte Volumen der Schmelze ausgedehnt hat. Von den Herstellern veröffentlichte Prozessfenster geben die Zielschäumtemperatur an; die im Slicer eingestellte Durchflussrate (typischerweise als Extrusionsmultiplikator im Bereich von 0,5 bis 0,7 gegenüber dem Basiswert 1,0 kodiert) gleicht die Ausdehnung aus.

Markenlandschaft für geschäumte Elastomere. Siraya Tech gehört zu den bekanntesten Anbietern in der für Verbraucher zugänglichen Nische der geschäumten Elastomere und bietet geschäumte TPU-Produkte an, die für Zwischensohlen von Schuhen, maßgeschneiderte Polstereinlagen, vibrationsdämpfende Halterungen und orthopädische Anwendungen entwickelt wurden. Das Schaumstoffsortiment von Siraya Tech umfasst sowohl starre (geschäumtes PLA, vermarktet unter Namen wie „Mushroom“ für die PLA-Basis) als auch elastomere (geschäumtes TPU) Basispolymere; für dieses Kapitel sind die Elastomerprodukte relevant. Die Preise liegen beim 1,5- bis 2-fachen des Preises für unverfülltes TPU. Spezialisierte europäische und asiatische Anbieter führen geschäumte TPU-Artikel zu Preisen auf Industrieebene für Schuhprototyp-Anwendungen. **Geeignete Anwendungen:** Geschäumte Elastomere sind die richtige Wahl, wenn das Bauteil zyklischen Druckbelastungen ausgesetzt ist (Mittelsohlen von Laufschuhen sind die klassische Anwendung), wenn es auf Gewichtsreduzierung bei gleichbleibender Weichheit ankommt oder wenn die Schalldämpfung ein Konstruktionsziel ist. Vermeiden Sie geschäumte Elastomere, wenn Maßgenauigkeit entscheidend ist (das Ausdehnungsverhältnis variiert pro Spule und Charge so stark, dass die Toleranzen der Passflächen eine Herausforderung darstellen) oder wenn die Belastung durch anhaltende statische Kompression erfolgt (geschäumte Elastomere weisen eine schnellere Druckverformungsrest auf als das entsprechende ungeschäumte Ausgangsmaterial).

16.8 Markenlandschaft

Der Markt für flexible Filamente ist nach Shore-Härte, nach der Chemie des Ausgangspolymers und nach dem Preis-Leistungs-Segment unterteilt. Die meisten großen Filamenthersteller bieten mindestens ein TPU-Produkt an; Spezialelastomer-Marken (NinjaTek, Recreus) konkurrieren im weichen Bereich, wo Anbieter von Allzweckprodukten Schwierigkeiten haben. PEBA-Filamente sind bei einer kleineren Gruppe von Spezialanbietern erhältlich. Geschäumte Elastomere sind im Wesentlichen ein Verbrauchermarkt mit einem einzigen Anbieter.

Marken	Bemerkenswerte Produkte	Besondere Merkmale
NinjaTek	NinjaFlex 85A; Cheetah 95A; Armadillo 75D	US-amerikanischer Elastomerspezialist; die 85A- und weichen Typen sind der Maßstab im Consumer-Bereich; Armadillo schließt die Lücke zum Bereich der harten Elastomere
Recreus	FilaFlex 60A; FilaFlex 70A; FilaFlex 82A; FilaFlex 95A	Spanischer Spezialist; das einzige kommerzielle 60A-Elastomer mit einem ausgebauten Vertriebsnetz; im weichen Bereich sind Extruder mit begrenzter Verformung zwingend erforderlich
Polymaker	PolyFlex TPU95; PolyMax TPU95; PolyFlex TPU90	Mainstream-Verbraucherpreise; PolyMax bietet eine schlagzähmodifizierte Variante; große Farbauswahl
Bambu Lab	TPU 95A; TPU für AMS	TPU für AMS wurde speziell für den Druck mit begrenzter Bahnführung und Pufferzuführung entwickelt; Standard-TPU 95A ist nur für Direktantrieb geeignet
Siraya Tech	TPU 64D; Pro Flex 85A; geschäumte TPU-Produktreihe; Mushroom (geschäumtes PLA)	TPU 64D ist das schlagzähmodifizierte Hartelastomer für Living-Hinges und Schnappverbindungen; die geschäumten TPU-Produkte sind der Maßstab im Consumer-Bereich für Mittelsohlen und Dämpfungsanwendungen
3DXTech	CarbonX PEBA; Spezial-TPU-Typen	US-Industrieproduktreihe; das am leichtesten erhältliche PEBA-Filament für den Endverbrauchermarkt mit veröffentlichten TDS-Daten; gehärtete Düse nicht erforderlich, wird jedoch für den Einsatz bei hohen Stückzahlen empfohlen
Forward AM (BASF)	Ultrafuse TPU 64D; Ultrafuse TPU 85A; Ultrafuse TPU 95A; Ultrafuse PEBA	BASF Elastollan TPU-Harzbasis; dokumentierte mechanische Eigenschaften; PEBA-SKU ist der Einstiegspunkt für den europäischen Mainstream-Verbraucher; Preise auf Industrieniveau
eSun, Sunlu, SainSmart	eTPU-95A; TPU 95A; verschiedene TPU-95A-Produkte	Budget-Segment; Verwendung für Kosmetik und Prototypenbau; mechanische Eigenschaften variabel
Spezial-TPEE	3DXTech CarbonX TPC; Polymaker PolyFlex TPU95-HF	TPEE-Produkte im Consumer-Bereich sind rar; die genannten Produkte sind am leichtesten erhältlich

Tabelle 16.3 – Markenlandschaft bei Elastomeren (Anfang 2026). Das Produkt Recreus FilaFlex 60A ist im Grunde das einzige für Verbraucher zugängliche druckbare Shore-60A-Elastomer auf dem FDM-Markt – für den erfolgreichen Druck sind ein Extruder mit begrenztem Verfahrensweg und erhebliche Hardware-Investitionen erforderlich, die über die von Allzweckdruckern hinausgehen. NinjaTek und Polymaker dominieren den Mainstream-Markt im Bereich 85A–95A für Endverbraucher. 3DXTech CarbonX PEBA und Forward AM Ultrafuse PEBA sind die Einstiegsprodukte im Endverbrauchersegment für Polyamid-Block-Elastomere; die geschäumten TPU-Produkte von Siraya Tech sind die Referenz im Endverbrauchersegment für Anwendungen mit geschäumten Elastomeren.

16.9 Anwendungsbereich

Wählen Sie TPU, wenn: das Bauteil Flexibilität, Schwingungsdämpfung oder ein gummiartiges Druckverhalten bei Raumtemperatur erfordert; Abriebfestigkeit wichtig ist (TPU übertrifft die meisten anderen Elastomere); die Anwendung kurzzeitig Ölen oder aliphatischen Lösungsmitteln ausgesetzt ist (TPU auf Polyesterbasis widersteht diesen gut, TPU auf Polyetherbasis weniger); die Kosten begrenzt sind und die Anwendung die Obergrenze von 80 °C für den Dauerbetrieb toleriert.

Wählen Sie TPEE, wenn: das Elastomer im Dauerbetrieb über 80 °C eingesetzt wird (Tüllen im Motorraum, Hochtemperaturdichtungen, Dämpfer in Ofennähe); die Kriechfestigkeit unter Dauerbelastung wichtiger ist als die maximale Dehnung; Kontakt mit Öl und Kraftstoff im Bereich liegt (TPEE übertrifft TPU in beiden Punkten).

Wählen Sie PEBA, wenn: die dynamische Biegefestigkeit die entscheidende Anforderung ist (Zwischensohlen von Sportschuhen, Sportgeräte, mechanische Federn mit wiederholten Zyklen); das Bauteil im Einsatz unkontrollierter Feuchtigkeit ausgesetzt ist (die hydrolytische Stabilität von PEBA übertrifft die von TPU bei weitem); eine niedrige Dichte wichtig ist (PEBA hat die niedrigste Dichte aller handelsüblichen Elastomere); der Temperaturbereich von unter dem Gefrierpunkt bis zu 100 °C im Dauerbetrieb reicht; die Kosten durch die Leistung gerechtfertigt sind.

Wählen Sie ein schäumendes Elastomer, wenn: das Konstruktionsziel die Dämpfung unter zyklischer Kompression ist (Zwischensohlen von Schuhen sind der typische Anwendungsfall); geringeres Gewicht bei gleichbleibender Weichheit wichtig ist; akustische Dämpfung Teil der Anwendung ist; Maßgenauigkeit keine entscheidende Einschränkung darstellt (die schäumungsbedingte Ausdehnungsabweichung pro Spule erschwert die Herstellung von Passflächen mit engen Toleranzen).

Vermeiden Sie Elastomerfilamente, wenn: das Bauteil präzise Maßtoleranzen erfordert (Elastomere werden mit einer geringeren Maßgenauigkeit gedruckt als starre Polymere); der Mehrmaterialdruck mit starren Filamenten erforderlich ist und die Verarbeitungstemperatur des starren Materials den Vicat-Punkt des Elastomers überschreitet; das Design das Elastomer unter Druck belastet, ohne dass eine Entlastungsgeometrie vorhanden ist (die Druckverformungsrest des Elastomers beträgt 15–50 % und beeinträchtigt die Anwendung im Laufe der Zeit).

17. PMMA, POM, PVDF

Drei technische Thermoplaste, die derselben Hardware-Stufe angehören (Stufe 2 bis niedrige Stufe 3), aber unterschiedliche Anwendungsbereiche abdecken. PMMA ist ein optisch klares Polymer mit begrenzter Hitzebeständigkeit und sprödem Verhalten. POM (Acetal, auch als Delrin-Klasse vermarktet) ist ein reibungsarmes, verschleißfestes technisches Polymer mit erheblichen Verarbeitungsrisiken. PVDF (Kynar-Klasse) ist ein Fluoropolymer für chemikalienbeständige Anwendungen, bei dem bei Temperaturen über 300 °C die Freisetzung von Fluorwasserstoff ein Risiko darstellt. Alle drei haben im Vergleich zu den Standardpolymeren nur kleine kommerzielle Filamentmärkte, und die Beschaffung konzentriert sich auf eine Handvoll Spezialanbieter.

17.1 PMMA (Acryl)

Polymethylmethacrylat – Acryl – ist der technische Kunststoff mit optischer Klarheit. Amorph, T_g ~80–110 °C, Zugfestigkeit 60–75 MPa, Elastizitätsmodul 3,0–3,5 GPa, transparent in klaren Qualitäten mit einer Lichtdurchlässigkeit, die mit Glas vergleichbar ist (~90 %). Das Polymer, aus dem Fenster und Aquarien hergestellt werden, wenn sie nicht aus Glas bestehen. UV-beständig für jahrelangen Einsatz im Freien ohne Qualitätsverlust – die Witterungsbeständigkeit von PMMA ist deutlich besser als die von PC, PETG oder PCTG.

Die Druckbarkeit ist die einschränkende Größe. PMMA ist spröde, thermisch empfindlich (das Teil schrumpft und es entstehen Spannungen während der schnellen Abkühlung der FDM-Schichten) und reißt beim Abkühlen leicht an Stellen mit scharfen Innenwinkeln oder Übergängen von dicken zu dünnen Abschnitten. Die Prozessfenster der Hersteller geben typischerweise eine Düsentemperatur von 240–270

°C, das Bett auf 100–110 °C, eine geschlossene Kammer (mindestens 40–55 °C Umgebungstemperatur) und ausdrücklich langsames Drucken der ersten Schicht vor, um Restspannungen zu minimieren. Die Teilekühlung wird auf Null oder nahezu Null eingestellt – die Lüfterkühlung verstärkt die thermische Belastung von PMMA und ist die häufigste Fehlerursache beim erstmaligen Drucken mit diesem Material.

Markenlandschaft. PMMA-Filamente sind rar. Fillamentum PMMA (tschechischer Spezialist für den europäischen Markt) ist eines der am leichtesten erhältlichen Produkte mit einem veröffentlichten TDS, das eine Zugfestigkeit von 70 MPa, einen Elastizitätsmodul von 3,3 GPa, T_g 80 °C und eine HDT von 94 °C angibt. Spectrum bietet ein PMMA-Produkt mit ähnlichen technischen Daten an. 3D-Fuel und eine Handvoll regionaler europäischer Anbieter führen PMMA-Artikel. Das Polymer ist im kommerziellen FDM-Bereich so selten, dass es keine gemeinschaftlich festgelegte Kalibrierungsbasis gibt; Tests pro Spule auf der jeweiligen Maschine sind die Norm.

Geeignete Anwendungen. Wählen Sie PMMA, wenn optische Klarheit wichtig ist, das Bauteil im Freien UV-Strahlung ausgesetzt ist und keine Stoßbelastung zu erwarten ist (Acryl ist spröde und zerbricht, anstatt sich zu verformen). Vermeiden Sie PMMA, wenn Schlagzähigkeit wichtig ist (PETG, PCTG oder PC-Mischungen sind bessere Wahlmöglichkeiten), wenn die Betriebstemperatur dauerhaft 70 °C übersteigt (T_g -Obergrenze) oder wenn die Druckgeometrie scharfe Innenwinkel aufweist, an denen sich thermische Spannungen konzentrieren.

17.2 POM (Acetal / Delrin-Klasse)

Polyoxymethylen – Acetal, manchmal unter dem Markennamen Delrin von DuPont als Delrin-Klasse vermarktet – ist der technische Thermoplast für reibungsarme Verschleißanwendungen. Halbkristallin, T_m ~165–180 °C, T_g ~-60 °C (deutlich unterhalb der Raumtemperatur, weshalb POM bei Raumtemperatur steif, im gesamten Betriebsbereich jedoch zäh ist), Zugfestigkeit 65–75 MPa, Elastizitätsmodul 2,5–3,0 GPa, niedriger Reibungskoeffizient gegenüber sich selbst und gegenüber den meisten Metallen, ausgezeichnete Ermüdungsbeständigkeit unter zyklischer Belastung. Die erste Wahl für gedruckte Zahnräder, Nocken, Gleitmechanismen, reibungsarme Buchsen, Ventile und alle beweglichen mechanischen Teile, bei denen Verschleiß die Hauptursache für Ausfälle ist.

Zwei gravierende Druckprobleme. Das erste ist die Haftung am Druckbett. POM hat eine geringe Oberflächenenergie – ähnlich wie Polypropylen – und haftet chemisch nicht an PEI, Glas oder pulverbeschichtetem Stahl. Die in der Community getesteten Ansätze sind spezielle POM-beschichtete Bauplatten (begrenzt im Handel erhältlich), Klebestift auf Glas bei erhöhter Betttemperatur oder Magigoo PA (das für POM mäßig gut funktioniert, obwohl es für Polyamid formuliert ist). Bei Teilen über ~60 mm kommt es zu starker Verformung; ein Brim ist zwingend erforderlich.

Das zweite Problem stellt ein echtes Sicherheitsrisiko dar. **POM kann bei erhöhten Verarbeitungstemperaturen Formaldehyd freisetzen.** Mehrere Sicherheitsdatenblätter warnen vor starker Formaldehydverdampfung oberhalb von 230 °C, wobei die Rate nahe dem Zersetzungspunkt des Polymers dramatisch ansteigt. Drucken Sie POM ausnahmslos mit aktiver Belüftung – belüftete Gehäuse, die an eine Außenabsaugung angeschlossen sind, entsprechen dem technischen Standard. Die Empfehlung für belüftete Gehäuse reduziert auch die für POM dokumentierte Exposition gegenüber ultrafeinen Partikeln, die pro Druckeinheit höher ist als bei den meisten anderen technischen Thermoplasten. POM ist das Polymer in diesem Band, bei dem der Abschnitt über Druckemissionen in Kapitel 5 am relevantesten für den Betrieb ist; lesen Sie Abschnitt 5.3, bevor Sie POM in bewohnten Räumen drucken.

Markenlandschaft. Gizmo Dorks Acetal, 3D-Fuel POM und einige regionale Spezialanbieter bieten POM-Filament an. Polymaker hat POM getestet, liefert derzeit jedoch kein Serienprodukt aus. Die mechanischen Eigenschaften sind markenübergreifend konsistent; auch die Druckbarkeit ist markenübergreifend konsistent (auf jeder getesteten Plattform eine Herausforderung).

Anwendungsg Geeignetheit. Wählen Sie POM, wenn Verschleiß, geringe Reibung, Ermüdungsbeständigkeit oder Dimensionsstabilität unter zyklischer Belastung die entscheidenden Anforderungen sind; wenn die gedruckte Oberfläche als bewegliche Schnittstelle fungiert; oder wenn das Teil bei Temperaturen belastet wird, bei denen Polyamide Feuchtigkeit aufnehmen und an Steifigkeit verlieren würden. Vermeiden Sie POM, wenn eine Verbindung mit anderen Teilen erforderlich ist (POM lässt sich nicht zuverlässig kleben; mechanische Befestigung ist der einzige zuverlässige Ansatz); wenn keine aktive Belüftung verfügbar ist; wenn das Teil klein und kosmetischer Natur ist und kostengünstigere Materialien ausreichen würden.

17.3 PVDF (Kynar-Klasse)

Polyvinylidenfluorid – PVDF, das unter dem Markennamen Arkema Kynar als bekannteste handelsübliche Qualität vertrieben wird – ist ein Fluorpolymer, dessen chemische Beständigkeit der von PTFE nahekommt und das in FDM-druckbarer Form deutlich bessere mechanische Eigenschaften als PTFE aufweist. Teilkristallin, T_m 165–175 °C, T_g ~-35 °C, Zugfestigkeit 35–50 MPa, Elastizitätsmodul 1,5–2,5 GPa, Dichte 1,75–1,80 g/cm³ (die höchste Dichte aller in diesem Band behandelten Filamente). UV-beständig, witterungsbeständig, beständig gegen die meisten Säuren und Säuregemische, Halogene, halogenierte Lösungsmittel, Kohlenwasserstoffe und Oxidationsmittel – jedoch nur gegen schwache Basen: PVDF ist im Allgemeinen bis zu einem pH-Wert von etwa 12 (Homopolymer) oder 13,5 (Kynar Flex-Copolymer) einsetzbar; stärkere Laugen greifen es darüber hinaus an. Einsatz in chemischen Prozessanlagen, Pumpenkomponenten, Elektronikgehäusen in korrosiven Umgebungen und in Anwendungen mit hohen Reinheitsanforderungen.

Die Bildung von Fluorwasserstoff ist die größte thermische Gefahr. PVDF beginnt bei seiner Zersetzung, HF freizusetzen – laut Daten von Arkema (Kynar) setzt die Zersetzung bei etwa 315 °C ein, wobei die Bildung bei etwa 370 °C stark ansteigt, anstatt an einem einzigen Punkt zu beginnen. PVDF wird beim normalen Drucken bei 230–250 °C verarbeitet, was einen Spielraum unterhalb dieser Zersetzungsgrenze lässt; überhitzte Düsen, thermische Ausreißer und festsitzende Thermistoren können die Temperaturen jedoch in den Zersetzungsbereich treiben. In der Praxis wird ein Hotend mit zuverlässiger Temperaturüberwachung und Durchheizung verwendet, ein vollständig aus Metall gefertigtes Hotend ohne PTFE-Auskleidung (PTFE selbst zersetzt sich in einem vergleichbaren Bereich) sowie eine aktive Belüftung. PTFE-Schläuche im Filamentweg des Cold-Ends sind akzeptabel; PTFE-ausgekleidete Hotends hingegen nicht. Beziehen Sie sich auf das Sicherheitsdatenblatt (SDS) des Polymers als maßgebliche Quelle für den spezifischen Zersetzungsbeginn und die empfohlene maximale Verarbeitungstemperatur.

Druckprozess. Düse 230–250 °C, Bett 90–110 °C, Messingdüse für ungefülltes PVDF (ohne Faserzusatz) akzeptabel, geschlossene Kammer vor allem zur Verwindungskontrolle und weniger zur Regulierung der Kammertemperatur empfohlen. PVDF weist eine gute Haftung auf glattem PEI auf (kein Problem mit übermäßiger Haftung; löst sich beim Abkühlen sauber ab). Trocknen ist bei Routineanwendungen in der Regel nicht erforderlich – die Feuchtigkeitsaufnahme ist gering (<0,05 %) –, bei technischen Anwendungen wird jedoch vor ernsthaften Drucken als Standardmaßnahme 4–6 Stunden bei 80 °C getrocknet.

Markenlandschaft. 3DXTech FluorX PVDF ist eines der am weitesten verbreiteten Produkte im Consumer-Bereich, mit einem veröffentlichten TDS und einem gut ausgebauten Support-Netzwerk. Spezialisierte europäische Anbieter führen PVDF-Artikel zu

Preisen für den industriellen Bereich an. Die Kosten für PVDF-Filamente liegen bei 100–200 \$/kg – der Preis spiegelt sowohl die Polymerkosten als auch die geringe Marktgröße wider. **Anwendungsgesegnet:** Wählen Sie PVDF, wenn die chemische Beständigkeit gegenüber Säuren, Basen oder Kohlenwasserstoffen die entscheidende Anforderung ist – die meisten Säuren, halogenierten Lösungsmittel und Kohlenwasserstoffe sowie schwache Basen innerhalb der pH-Obergrenze von PVDF – und ABS oder PETG nicht ausreichen; UV-Stabilität über Jahre im Außenbereich erforderlich ist; die Anwendung ist Elektronik in einer korrosiven Umgebung. Vermeiden Sie PVDF für allgemeine Konstruktionsarbeiten, bei denen PC-Mischungen, PA6-CF oder PETG zu einem Fünftel der Kosten ausreichen würden.

18. PPS, PSU, PPSU, PEI

Vier Hochtemperatur-Technische Kunststoffe, die dieselbe Hardware-Stufe erfordern – Hardware an der Grenze zwischen Stufe 3 und Stufe 4 (Düse 300–350 °C, Bett 110–150 °C, aktive Kammer ≥ 65 °C) ist für alle zwingend erforderlich. Die Anforderungen an Bett und Düse gehen hier über den Bereich von §4 Tier 3 (Bett ≤ 120 °C) hinaus, sodass eine vollwertige Tier-3-Maschine nur für die niedrigeren Temperaturklassen das praktische Minimum darstellt; für ungefülltes PEI und die High-End-PSU/PPSU-Typen ist vollwertiges Tier 4 (Düse 380–420 °C, Kammer ≥ 85 °C) erforderlich. Die Polymere selbst haben sonst fast nichts gemeinsam: PPS ist teilkristallin und weist eine chemische Beständigkeit auf, die der von PEEK nahekommt, jedoch bei deutlich niedrigeren Verarbeitungstemperaturen; PSU und PPSU sind amorphe Sulfonpolymere mit hydrolytischer Stabilität und Eignung für die Dampfsterilisation; PEI ist amorph und weist eine der höchsten Glasübergangstemperaturen aller amorphen Polymere auf, die in kommerzieller Filamentform erhältlich sind (217 °C – über PSU, jedoch knapp unter PPSU), sowie eine inhärente Flammhemmung.

Hinweis zur Verfügbarkeit für Verbraucher. Filamente auf offener Spule für diese Polymerfamilie konzentrieren sich auf CF-verstärkte PPS- und PEI-Produkte. Ungefülltes PSU und PPSU sind auf dem Verbrauchermarkt praktisch nicht vorhanden – das Harz ist industriell erhältlich, aber kein großer Filamenthersteller bietet seit Anfang 2026 eine Verbraucher-SKU an. Ungefülltes PEI (ULTEM 9085, ULTEM 1010) ist in erster Linie über industrielle Ökosysteme mit versiegelten Kartuschen erhältlich (fällt nicht unter Teil I §1.2). Die für Verbraucher zugänglichen Produkte in diesem Kapitel sind PPS-CF (verschiedene Marken), CF-verstärktes PEI (begrenzt) und ein begrenztes Angebot an experimentellen PSU/PPSU-Produkten.

18.1 PPS (Polyphenylsulfid)

PPS ist ein aromatischer technischer Kunststoff mit einer Dauergebrauchstemperatur über 200 °C, chemischer Beständigkeit gegenüber praktisch allen gängigen Lösungsmitteln und Säuren unter 200 °C, einer intrinsischen Flammwidrigkeit nach UL94 V-0 ohne Additive und geringer Feuchtigkeitsaufnahme. Halbkristallin, $T_m \sim 280$ °C, $T_g \sim 90$ °C, Zugfestigkeit 90–110 MPa (gefüllte Typen), Modul etwa 5–12 GPa für gedruckte CF-gefüllte Typen (die 10 %-CF-Filamente für Endverbraucher liegen am unteren Ende dieses Bereichs – Polymaker Fiberon PPS-CF10 gibt etwa 5 GPa für gedruckte Proben an –, während Compounds mit höherem CF-Anteil Werte im niedrigen zweistelligen Bereich erreichen), HDT bei 1,8 MPa über 130 °C. Das Polymer für Teile, die bei 150–200 °C kontinuierlich mechanisch belastet werden, mit Kraftstoffen oder Ölen in Kontakt kommen oder Flammschutz ohne halogenierte Additive erfordern.

Die CF-gefüllten Typen decken im Wesentlichen den gesamten Verbrauchermarkt ab. Ungefülltes PPS ist schwierig zu drucken, da die schnelle Abkühlung zwischen den aufgetragenen Schichten unterhalb der Kristallisationsanfangstemperatur des Polymers (~ 120 °C, was Kammertemperaturen am oberen Ende von Tier 3 erfordert) zu einer ungleichmäßigen Kristallinität führt, die die mechanische Leistung beeinträchtigt. Eine Carbonfaserverstärkung von 10–20 Gew.-% unterdrückt die Kristallisationsschrumpfung, verleiht die für CF-gefüllte Polymere charakteristische mattschwarze Oberfläche und erzeugt ein druckbares technisches Filament. Gehärtete Düsen sind zwingend erforderlich; der Abrieb kombiniert den Verschleiß durch CF mit dem PPS-spezifischen Werkzeugverschleiß aufgrund des aromatischen Grundgerüsts.

Druckprozess. Düse 320–350 °C, Bett 110–120 °C, aktive Kammer 55–65 °C, gehärtete Stahldüse (PCD für die Produktion bevorzugt), Trocknung bei 80–110 °C für 6–8 h. Betthaftung: G10 Garolite ist der Standard für technische Anwendungen; Magigoo PA funktioniert ebenfalls. PPS-CF druckt zuverlässig auf Tier-3-Hardware am oberen Ende des Kammer-Temperaturbereichs; bei einer Kammertemperatur unter 50 °C lässt die Schichthaftung ab einer Z-Höhe von ~ 80 mm nach. Für Teile, die hohen Temperaturen ausgesetzt werden, wird ein Tempern bei 200 °C für 2–4 Stunden mit Sandstützstruktur empfohlen; die durch das Tempern erzielte Kristallinität hält die Wärme zurück.

Markenlandschaft. Bambu Lab PPS-CF (Markteinführung Mitte 2024), Polymaker Fiberon PPS-CF10 (10 % CF-Anteil dokumentiert), Flashforge PPS-CF (LUVOCOM-Compound), 3DXTech CarbonX PPS+CF und Raise3D Industrial PPS-CF gehören zu den am weitesten verbreiteten, für Verbraucher zugänglichen Produkten. Die Preise liegen zwischen 150 und 280 \$/kg. Polymaker und 3DXTech veröffentlichen die detailliertesten TDS-Daten; das Bambu-Produkt ist am

in der Community verbreitet. PPS-CF ist die richtige Wahl, wenn die Anwendung bei über 150 °C im Dauerbetrieb eingesetzt wird und PPA-CF (Kapitel 14) nicht ausreicht.

18.2 PSU (Polysulfon) und PPSU (Polyphenylsulfon)

Polysulfon (PSU) und Polyphenylsulfon (PPSU) sind amorphe technische Kunststoffe aus der Sulfon-Familie – gekennzeichnet durch die Sulfonbindung ($-\text{SO}_2-$) im Polymergerüst. Beide weisen eine sehr hohe Glasübergangstemperatur (T_g) auf (PSU ~185 °C, PPSU ~220 °C), eine außergewöhnliche hydrolytische Stabilität (PPSU übersteht unbegrenzt wiederholte Dampf-Autoklav-Zyklen) und ein transparentes oder bernsteinfarbenes Erscheinungsbild. Die Polymere kommen in der industriellen Fertigung für medizinische Instrumente, Flugzeugkabinenbauteile und Hochtemperatur-Sanitärarmaturen zum Einsatz.

Die Prozessanforderungen gehen über die Grenzen des Prosumer-Bereichs hinaus. PSU wird bei 350–400 °C Düsen- und 140–155

°C Bett und mindestens 65 °C Kammer. PPSU wird bei 370–410 °C Düse, 140–155 °C Bett und 65 °C Kammer gedruckt. Beide Werte überschreiten die Obergrenze des in diesem Band definierten Tier-3-Bereichs (350 °C Düse, 120 °C Bett, 65 °C Kammer). Verbraucherhardware, die diese Temperaturen nominell erreicht, tut dies oft nur instabil; zuverlässiges PSU/PPSU-Drucken erfordert Hardware, die ebenfalls außerhalb des hier behandelten Rahmens liegt. Das Polymer wird in diesem Kapitel behandelt, weil es auf dem kommerziellen Filamentmarkt erhältlich ist und Verbraucher danach fragen, nicht weil es eine praktische Wahl für Prosumer-FDM ist.

Markenlandschaft. 3DXTech ThermoX PSU und ThermoX PPSU sind die für Verbraucher erhältlichen Produkte; Preis: 250–500 \$/kg. Der realistische Beschaffungsweg für PSU-/PPSU-Teile ist die industrielle Auftragsfertigung oder der Einsatz von Industriedruckern mit versiegelten Kartuschen – beides liegt außerhalb des Rahmens dieses Bandes. Für Verbraucher, die auf eine Anwendung stoßen, die PSU oder PPSU erfordert, sind die praktischen Alternativen PPS-CF (für die Hitzebelastung) oder PC-Mischungen mit FR-Additiven (für den Nischenbereich der Autoklavbeständigkeit ohne Hitzebegrenze).

18.3 PEI (Polyetherimid / ULTEM-Klasse)

Polyetherimid ist ein amorphes Hochtemperaturpolymer, das vor allem unter dem Markennamen SABIC ULTEM bekannt ist – ULTEM 9085 und ULTEM 1010 sind die beiden dominierenden Typen im industriellen FDM. Zugfestigkeit 85–105 MPa, Elastizitätsmodul 3,0–3,5 GPa, T_g 215–220 °C, HDT bei 1,8 MPa 170–200 °C, inhärente Flammwidrigkeit nach UL94 V-0, sehr geringe Rauchentwicklung bei Verbrennung (die Eigenschaft, die den Einsatz von PEI in der Luft- und Raumfahrt sowie bei Schienenfahrzeugen vorantreibt). Amorph, daher kein durch Kristallisation bedingtes Maßverhalten zu beachten – gedruckte Teile sind maßhaltig.

Die Prozessanforderungen entsprechen eindeutig Tier 4. PEI wird bei 370–420 °C an der Düse, 140–155 °C auf dem Bett und mindestens 85 °C in der Kammer gedruckt. Eine Trocknung bei 130–150 °C für 4–6 Stunden ist zwingend erforderlich – Feuchtigkeit bei Drucktemperaturen von 400 °C führt zu katastrophalen Blasenbildungen innerhalb der Schmelzzone. Hardware, die diese Temperaturen stabil halten kann, ist zwar vorhanden, aber nicht für den Endverbraucher erhältlich.

Verfügbarkeit für Verbraucher. Für Hobbyanwender ist PEI-Filament in offenen Spulen nur in Form von CF-verstärkten Typen von 3DXTech (ThermoX PEI 9085 CF, ThermoX PEI 1010 CF) und einigen Spezialanbietern erhältlich. Unverstärktes PEI 9085 und PEI 1010 werden von industriellen Ökosystemen mit versiegelten Kartuschen dominiert (außerhalb des Rahmens). Für Anwendungen, die echte PEI-Leistung erfordern (UL94 V-0 mit hoher Hitzebelastbarkeit, Zertifizierungen für die Luft- und Raumfahrt, raucharme Verbrennung), ist der praktische Beschaffungsweg für Verbraucher eher die industrielle Auftragsfertigung als der Eigendruck. PEI wird in diesem Band in erster Linie zum Kontext und zur Abgrenzung dessen behandelt, was Prosumer-FDM leisten kann und was nicht.

18.4 Zusammenfassender Vergleich

Polymer	Kristallinität	T _g (°C)	Dauerbetrieb (°C)	Düse (°C)	Verbrauchertemperatur
PPS-CF	Teilkristallin	90	180–200	320–350	Mainstream-Konsumgüter; mehrere Marken
PSU	Amorph	185	150–170	350–400	Nur Spezialanwendungen (3DXTech); über dem Prosumer-Bereich
PPSU	Amorph	220	180–200	370–410	Nur Spezialanwendungen (3DXTech); über dem Prosumer-Bereich
PEI 9085-CF	Amorph	186	170	350–390	Spezialprodukt (3DXTech); oberste Stufe der Kategorie 3
PEI 1010-CF	Amorph	217	200	370–420	Spezial (3DXTech); Tier-4-Hardware erforderlich
PEI ungefüllt	Amorph	217	200	370–420	Nur für Industrieanwendungen mit versiegelter Kartusche — außerhalb des Anwendungsbereichs

Tabelle 18.1 – Übersicht über die Familie der hochtemperaturbeständigen technischen Kunststoffe. PPS-CF ist der einzige Kunststoff dieser Gruppe, der zuverlässig auf Tier-3-Prosumer-Hardware gedruckt werden kann; alle anderen erfordern entweder Tier-4-Hardware oder sind an industrielle Kartuschen-Ökosysteme gebunden. Für Verbraucher mit Anwendungen in diesem Temperaturbereich ist PPS-CF die praktische technische Lösung; PEI und die Sulfonkunststoffe sind nur dann eine Option, wenn industrielle Hardware oder Outsourcing in Betracht gezogen werden.

19. PAEK-Familie (PEEK, PEKK)

Die Polyaryletherketon (PAEK)-Familie ist die Spitze der FDM-Thermoplaste: Dauerbetriebstemperaturen von 250 °C, mechanische Eigenschaften, die mit denen von Aluminiumguss konkurrieren, bei etwa der halben Dichte, eine chemische Beständigkeit, die sich PTFE annähert, und – in Formulierungen für Implantate – eine Biokompatibilitätsbilanz, die auf jahrzehntelanger Erfahrung mit zugelassenen Medizinprodukten basiert. PEEK (Polyetheretherketon) ist der Marktführer; PEKK (Polyetherketonketon) gibt es in amorphen und teilkristallinen Varianten mit etwas niedrigerem T_m . Die Polymerfamilie ersetzt zunehmend Metall in Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie, der Öl- und Gasindustrie sowie in der Medizin.

Dieses Kapitel dient dazu, den Umfang des Bandes abzugrenzen, und nicht dazu, den PAEK-Druck für Verbraucher zu ermöglichen. Die PAEK-Verarbeitung erfordert eine Düsentemperatur von 380–440 °C, eine Betttemperatur von 140–155 °C, eine aktive Kammer von ≥ 85 °C, eine Trocknung bei 120–130 °C und ein Nachglühen nach dem Druck zur Kristallinisierung. Jeder dieser Punkte überschreitet den in diesem Band behandelten Rahmen für Tier-3-Prosumer. FDM-Hardware für Endverbraucher, die als PEEK-fähig ausgewiesen ist, erreicht die Düsentemperatur in der Regel nur kurzzeitig und unstabil, verfügt nicht über die für die PEEK-Kristallinität erforderliche aktive Kammer und produziert Teile, deren mechanische Leistungsfähigkeit nur einen Bruchteil des Industriestandards erreicht. Der PAEK-Druck für Endverbraucher ist bei kleinen Teilen mit erheblichen Einschränkungen möglich; ein zuverlässiger PAEK-Druck ist es nicht. Hobbybastler, die PEEK-Teile benötigen, finden fast ausnahmslos in der industriellen Auftragsfertigung den praktischen Beschaffungsweg.

19.1 PEEK (Polyetheretherketon)

Teilkristallin. T_g 143 °C, T_m 343 °C, Zugfestigkeit 90–100 MPa (ungefüllt), 130–170 MPa (CF-gefüllt), Modul 3,5–4,0 GPa ungefüllt und bis zu 12–15 GPa für CF-gefüllte Typen, Dauerbetriebstemperatur 240–250 °C. Die Polymerchemie ist seit den 1970er Jahren industriell ausgereift; die FDM-spezifische Compoundierung (Verarbeitung von Harz in Filamentqualität, Durchmessertoleranz, Feuchtigkeitsschutz) ist eine neuere Entwicklung.

Die Kristallinität ist die dominierende Variable bei gedruckten Teilen. Eine schnelle Abkühlung während der FDM-Ablagerung führt zu teilweise amorphem PEEK mit mechanischen Eigenschaften, die deutlich unter den Harzspezifikationen liegen. Aktive Kammertemperaturen von 150–200 °C während des Drucks – im industriellen Bereich – führen zu teilkristallinen Teilen mit dem vollen PEEK-Leistungsspektrum. Kammertemperaturen von 85–110 °C (die Obergrenze der Verbraucherklasse 3) führen zu Zwischenergebnissen, die noch eine Nachglühung (140–200 °C für 2–4 Stunden) erfordern, um die volle Kristallinität zu erreichen. Der Glühschritt lässt das Teil um 1–3 % schrumpfen und kann dünne Wände verziehen.

19.2 PEKK (Polyetherketonketon)

PEKK ist ein Mitglied der PAEK-Familie, das sich durch seine Molekülstruktur auszeichnet – ein anderes Verhältnis von Ether- zu Ketonbindungen entlang des Hauptgerüsts. Kommerzielles PEKK gibt es in zwei Hauptvarianten: PEKK-A (amorph, T_g ~ 165 °C, keine T_m , wird amorph verarbeitet und bleibt amorph) und teilkristallines PEKK (T_g ~ 165 °C, T_m ~ 310 –340 °C je nach Typ, entwickelt beim Abkühlen und während des Temperns Kristallinität). Amorphes PEKK lässt sich leichter verarbeiten als PEEK, da es keine aktive Kammerkristallisation erfordert; semikristallines PEKK verhält sich beim Drucken ähnlich wie PEEK. PEKK ist die praktische Wahl aus der PAEK-Familie für Drucker, die die Verarbeitungstemperaturen von PEEK nicht stabil erreichen können.

19.3 Verfügbarkeit für Verbraucher und Markenlandschaft

PAEK-Filamente in offenen Spulen, die für Hobbyanwender erhältlich sind, werden von einer kleinen Gruppe spezialisierter Anbieter angeboten:

Marke	Produkte	Anmerkungen
3DXTech	ThermaX PEEK; ThermaX PEEK-CF; ThermaX PEKK-A; ThermaX PEKK-CF	Der US-Marktführer für konsumentenfreundliches PAEK; ISO 9001; umfassende veröffentlichte technischen Datenblätter; Preise 300–500 \$/kg
Polymaker	PolyMide PA12-CF Pro (als PEEK-Alternative positioniert)	Polymaker liefert derzeit kein echtes PAEK-Produkt; zielt mit verstärktem Polyamid auf diesen Anwendungsbereich ab
Flashforge / asiatische Spezialanbieter	PEEK / PEEK-CF (begrenzt)	Verfügbar, aber spärliche TDS-Dokumentation; wettbewerbsfähige Preise, aber variable mechanische Eigenschaften
Generische chinesische Spezialprodukte	PEEK / PEEK-CF	Budgetklasse mit erheblichen Qualitätsschwankungen; mechanische Eigenschaften unter denen der führenden Spezialprodukte; nur für den Prototypenbau geeignet

Tabelle 19.1 – Für Verbraucher zugängliche PAEK-Filamente. Der realistische Beschaffungsweg für PAEK-Anwendungen im Hobbybereich ist 3DXTech ThermaX PEEK-CF oder PEKK-CF auf Hardware, die die Anforderungen der Stufe 4 erfüllt. Industrielle PAEK-Ökosysteme mit versiegelten Kartuschen (Stratasys F900 mit PEKK, industrieller Roboze mit PEEK) liegen außerhalb des Rahmens. Betrachten Sie PAEK für Verbraucher als ein Nischen-Spezialfilament, das nur für Nutzer zugänglich ist, die in die entsprechende Hardware-Stufe investiert haben.

19.4 Anwendungsgeeignetheit

Wählen Sie PEEK, wenn: die Anwendung einen Dauerbetrieb über 200 °C bei voller mechanischer Leistungsfähigkeit erfordert; das Teil aus einem PEEK-Harz in Implantat- oder medizinischer Qualität durch einen qualifizierten, validierten Prozess hergestellt wird, bei dem Biokompatibilität eine Anforderung ist; die chemische Beständigkeit und thermische Belastbarkeit zusammen die Werte von PPS-CF übersteigen; und die erforderliche Hardware-Stufe verfügbar ist. **Wählen Sie PEKK, wenn:** die Anwendung die etwas geringere thermische Belastbarkeit von PEKK toleriert (typischerweise 220–240 °C Dauerbetrieb gegenüber 250 °C bei PEEK); amorphes PEKK-A akzeptabel ist, da eine Kristallisation nach dem Druck betrieblich schwierig ist; die Kosteneinsparung gegenüber PEEK erheblich ist.

Ein Hinweis zu medizinischen und implantatbezogenen Angaben: Die Biokompatibilitätsbilanz von PEEK bezieht sich auf bestimmte Harzsorten in Implantatqualität, die in zugelassenen, validierten Arbeitsabläufen für Medizinprodukte verwendet werden – nicht auf PEEK-Filament im Allgemeinen. Das erste von der FDA zugelassene 3D-gedruckte PEEK-Implantat wurde als komplettes System zugelassen: ein benanntes Harz in Implantatqualität, ein spezifizierter Drucker, definierte Modellierungssoftware und ein vorvalidierter Produktionsprozess mit vollständiger Rückverfolgbarkeit der Chargen und Tests nach dem Druck. Die behördliche Zulassung gilt für dieses Gerät und diesen Prozess und wird für jedes einzelne Gerät erteilt. Ein Teil, das aus gewöhnlichem PEEK-Filament auf Prosumer-Hardware gedruckt wurde, ist kein Implantat und verfügt über keinen Biokompatibilitätsstatus; behandeln Sie jede Verwendung mit Körperkontakt so, als ob sie eine eigene Qualifizierung gemäß den relevanten Normen (z. B. ISO 10993) und dem entsprechenden Zulassungsverfahren erfordern würde.

Für die meisten Verbraucher: PPS-CF (Kapitel 18), PPA-CF (Kapitel 14) oder PA6-CF (Kapitel 13) erfüllen mit ziemlicher Sicherheit die Anwendungsanforderungen zu einem Bruchteil der Kosten und des Prozessaufwands. Die PAEK-Familie ist die richtige Wahl, wenn die Anwendungsanforderungen tatsächlich über das hinausgehen, was diese Polymere leisten können, und diese Grenze ist hoch: Dauerbetrieb über 200 °C, Autoklavierbarkeit, bestimmte Biokompatibilitätszertifizierungen. Unterhalb dieser Grenze ist die Wahl von PAEK überdimensioniert.

20. Lösliche Stützpolymere (PVA, BVOH, proprietär)

Lösliche Stützfilamente ermöglichen Innengeometrien und Überhänge, die mit abbrechbaren Stützen nicht realisierbar sind: geschlossene Hohlräume, Hinterschnidungen, eingeschlossene Überhänge und Teile, bei denen die Oberflächenbeschaffenheit im Stütz-Kontaktbereich glatt sein muss. Die Stützen werden neben dem Modell in Dual-Extruder- oder Single-Extruder-Multimaterial-Konfigurationen gedruckt und nach dem Druck in einem Wasserbad aufgelöst. Zwei Hauptchemikalien dominieren den Verbrauchermarkt – PVA (Polyvinylalkohol) und BVOH (Butendiol-Vinylalkohol-Copolymer) – mit mehreren proprietären Alternativen für spezifische Anwendungen.

20.1 PVA (Polyvinylalkohol)

PVA ist das ursprüngliche lösliche Stützmaterial für den FDM-Druck. Es ist bei Raumtemperatur wasserlöslich und von Natur aus hydrophil. Das Polymer löst sich langsam in kaltem Wasser auf (Stunden bei kleinen Teilen, über Nacht bei größeren), schneller in warmem Wasser (40–60 °C) und sehr schnell unter mechanischer Bewegung. Drucken Sie bei 195–220 °C Düsentemperatur, 50–65 °C Betttemperatur, sehr niedriger Teilekühlung und einer Messingdüse. Vor allem mit PLA kompatibel (passendes Temperaturfenster) und in einigen Konfigurationen mit PETG.

Von Natur aus hygroskopisch und in dieser Hinsicht sehr aggressiv. PVA nimmt schnell Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft auf – eine Spule, die einige Tage bei 50 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert wurde, kann genug Feuchtigkeit aufnehmen, um die Düse beim ersten Gebrauch zu verstopfen. Die Wasserlöslichkeit des Polymers wirkt sich direkt auf sein Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten aus. Eine aktive Filamenttrocknung (45–60 °C für 8–12 Stunden) vor jedem Druck ist zwingend erforderlich; das Drucken direkt aus einer beheizten Trockenbox ist der Standard-Produktionsablauf. PVA, das wochenlang an der Luft gelagert wurde, ist für den Druck funktional unbrauchbar – der Feuchtigkeitsgehalt lässt sich durch normales Trocknen nicht vollständig rückgängig machen.

20.2 BVOH (Butendiol-Vinylalkohol-Copolymer)

BVOH ist eine neuere lösliche Stützchemie – ein Copolymer aus Butendiol und Vinylalkohol. Die Butendiol-Einheiten verbessern die thermische Stabilität gegenüber reinem PVA, erweitern den praktischen Drucktemperaturbereich auf 200–225 °C und (vor allem) verbessern die Kompatibilität mit PETG und ABS, wo reines PVA aufgrund von Temperaturunterschieden versagt. BVOH löst sich schneller in Wasser auf als PVA und quillt während der Auflösung weniger auf, was für empfindliche innere Geometrien von Bedeutung ist, die durch die Volumenausdehnung von PVA beschädigt würden.

BVOH ist die technische Weiterentwicklung. Während PVA nur mit PLA zuverlässig kombinierbar war, lässt sich BVOH mit PLA, PETG, ABS und (bei sorgfältiger Steuerung der Kammertemperatur) einigen Nylons kombinieren. Der Preis liegt beim 2- bis 3-fachen von reinem PVA. Für spezielle Multimaterial-Anwendungen ist BVOH die praktische Standardwahl; PVA bleibt die kostengünstige Wahl für Anwendungen mit löslichem Stützmaterial, die ausschließlich PLA verwenden.

20.3 Markenlandschaft

Marke	Produkt	Klasse	Anmerkungen
Polymaker	PolyDissolve S1	BVOH-Klasse	Hochleistungsfähiger löslicher Stützwerkstoff; kompatibel mit PLA, PETG, ABS, ASA, TPU; gängige Verbraucherpreise
eSun	eSun PVA	PVA	Günstige Preisklasse; für PLA geeignet; erheblich Markenunterschiede bei der Feuchtigkeitsempfindlichkeit
Wörtlich	Primalloy PVA, BVOH	Beide	Europäischer Mainstream; gut dokumentierte TDS-Daten; PLA- und PETG-kompatibel
FormFutura	Atlas Support	PVA-Klasse	Europäische Spezialität; Fokus auf den PLA-Workflow mit mehreren Materialien
Spezial-Abtrennmateri	PolySupport (Polymaker), Bambu Support W	Mechanisch ablösbar	Nicht löslich; mechanische Entfernung; geeignet, wenn keine löslichen Stützmaterialien verfügbar sind oder Kompatibilitätsprobleme bestehen

Tabelle 20.1 – Übersicht über lösliche und abbrechbare Stützfilamente. Das Produkt Polymaker PolyDissolve S1 ist der Standard im Consumer-Bereich für lösliche Stützmaterialien der BVOH-Klasse; das eSun PVA ist der Standard im Consumer-Bereich für kostengünstige Workflows, die ausschließlich PLA verwenden.

Der markenübergreifende Austausch löslicher Stützmaterialien ist nicht problemlos – die Auflösungskinetik, das Quellverhalten und die Feuchtigkeitsempfindlichkeit variieren erheblich, selbst innerhalb derselben nominellen Chemie.

20.4 Überlegungen zum Workflow mit mehreren Materialien

Lösliche Stützmaterialien erfordern Dual-Extruder-, IDEX- oder Ein-Düsen-Multimaterial-Hardware. Ein-Düsen-Systeme, bei denen sich Modell- und Stützfilamente die Schmelzzone teilen, erfordern bei jedem Filamentwechsel eine Spülung – typischerweise 50–200 mm³ Spülmaterial pro Wechsel. Workflows mit löslichen Stützstrukturen können bei kleinen Teilen Spülvolumina erzeugen, die das Modellvolumen übersteigen, was für Gelegenheitsnutzer das Hauptargument gegen lösliche Stützstrukturen hinsichtlich der Druckkosten darstellt. Dual-Hotend- und IDEX-Systeme haben diesen Spülaufwand nicht, führen jedoch zu einer erhöhten mechanischen Komplexität im Druckkopf.

Auflösungs-Workflow. Tauchen Sie das gedruckte Teil unter leichtem Rühren in warmes Leitungswasser (40–60 °C) ein. Kleine Teile lösen sich in 1–4 Stunden auf; große Teile über Nacht. Das mechanische Entfernen von Stützmaterial vor dem Auflösen beschleunigt den Prozess erheblich – entfernen Sie zugängliches Stützmaterial und tauchen Sie das Teil anschließend ein, um das eingeschlossene Innere aufzulösen. Das verwendete Auflösungswasser kann über den Hausabfluss entsorgt werden (PVA und BVOH sind keine regulierten Abfälle), allerdings führt eine längere Auflösezeit dazu, dass das Wasser so stark mit Polymer belastet wird, dass ein Austausch erforderlich ist.

21. Nischenprodukte unter den biologisch abbaubaren Materialien (PHA, PCL, PVB)

Drei Polymere, die eine gemeinsame Positionierung haben – biologisch abbaubare oder mit Lösungsmitteln nachbearbeitbare Spezialfilamente außerhalb des Mainstreams der Standardprodukte –, ohne jedoch Chemie, Anwendungen oder Prozessfenster zu teilen. PHA (Polyhydroxyalkanoat) ist ein bakteriell fermentierter Polyester, der als PLA-Zähigkeitsmodifikator und als eigenständiges biologisch abbaubares Filament verwendet wird. PCL (Polycaprolacton) ist ein niedrigschmelzendes Polymer, das in medizinischen und orthopädischen Anwendungen eingesetzt wird, da es in warmem Wasser nachgeformt werden kann. PVB (Polyvinylbutyral) ist ein mit Isopropylalkohol glättbares Filament für kosmetische Drucke. Keines dieser Materialien gehört zum Mainstream; jedes hat eine spezifische Anwendungsnische, in der es die richtige Lösung darstellt.

21.1 PHA und PLA/PHA-Mischungen

Polyhydroxyalkanoat ist eine Familie von Polyestern, die durch bakterielle Fermentation pflanzlicher Zucker hergestellt werden – der am besten biologisch abbaubare thermoplastische Rohstoff, der derzeit verfügbar ist. PHA kompostiert sowohl in industriellen als auch in marinen Umgebungen mit angemessener Geschwindigkeit, während PLA industrielle Kompostieranlagen benötigt, um sinnvoll abgebaut zu werden. Reines PHA ist spröde und als eigenständiges Filament schwer zu drucken; PLA/PHA-Mischungen verbinden die Druckbarkeit von PLA mit dem Vorteil der biologischen Abbaubarkeit von PHA und einer verbesserten Schichthaftung.

Markenlandschaft. colorFabb PLA/PHA war die erste kommerzielle PLA/PHA-Mischung und ist nach wie vor der Maßstab im Consumer-Bereich – typische Zusammensetzung: 10–20 % PHA in einer PLA-Matrix, Zugfestigkeit über 60 MPa, Dehnung von einigen Prozent. colorFabb allPHA ist das reine PHA-Filament – mit veröffentlichten mechanischen Eigenschaften, Zeitplan für die biologische Abbaubarkeit und ungewöhnlichem Druckverhalten (Konfiguration mit „kaltem Bett“ empfohlen, starke Lüfterkühlung für die Schichthaftung). Die NonOilen-Reihe von Fillamentum ist ähnlich positioniert. Der Druckprozess für PLA/PHA entspricht weitgehend dem von Standard-PLA; reines PHA erfordert eine Anpassung des Prozesses je nach Anbieter. **Anwendungsbereich:** PLA/PHA ist die richtige Wahl, wenn biologische Abbaubarkeit eine Rolle spielt und die Druckbarkeit von PLA die entscheidende Einschränkung darstellt; reines PHA ist die richtige Wahl für wirklich kompostierbare Einwegteile, bei denen die Kosten nicht der ausschlaggebende Faktor sind.

21.2 PCL (Polycaprolacton)

Polycaprolacton ist ein aliphatischer Polyester mit einem ungewöhnlich niedrigen Schmelzpunkt – $T_m \sim 60^\circ\text{C}$ –, der so niedrig ist, dass gedruckte Teile ohne spezielle Ausrüstung in warmem Leitungswasser umgeformt werden können. Diese eine Eigenschaft bestimmt jede PCL-Anwendung: medizinische Orthesen, die nach dem Druck an den Patienten angepasst werden müssen, thermogeformte Zahnprothesen, maßgefertigte Zahnspannen, exoskelettale Stützen. Das Polymer wird bei sehr niedrigen Temperaturen (85–95 °C an der Düse) gedruckt, auf einem unbeheizten oder kaum erwärmten Druckbett, auf Standardhardware mit minimaler Prozessoptimierung.

Die Anwendungsmöglichkeiten sind begrenzt. PCL-Teile können nicht in Umgebungen eingesetzt werden, in denen Temperaturen nahe der Körpertemperatur herrschen (das Polymer wird oberhalb von 40 °C merklich weich und verliert oberhalb von 50 °C seine Formstabilität). Der Markt für medizinische Orthesen deckt im Wesentlichen den gesamten Verbrauchermarkt für PCL-Filamente ab. **Markenlandschaft:** 3D4Makers PCL ist das am besten dokumentierte Verbraucherprodukt; spezielle PCL-Filamente in medizinischer Qualität sind zu deutlich höheren Preisen für qualifizierte Medizinprodukteanwendungen erhältlich. **Anwendungsbereich:** PCL ist die richtige Wahl für Teile bei Raumtemperatur, die in warmem Wasser nachgeformt werden müssen; für nichts anderes.

21.3 PVB (Polyvinylbutyral)

Polyvinylbutyral ist in der Industrie vor allem als Zwischenlage in Verbundsicherheitsglas bekannt. In Form eines FDM-Filaments besetzt es die Nische des kosmetischen Drucks dank einer einzigen besonderen Eigenschaft: PVB ist das einzige kommerzielle FDM-Filament, das sich mit Isopropylalkohol glätten lässt. Der IPA-Glättungs-Workflow erzeugt nahezu glänzende Oberflächen ohne die Komplexität der chemischen Handhabung beim Glätten von ABS mit Aceton – IPA ist ein handelsübliches Lösungsmittel und keine regulierte Industriechemikalie.

Zwei strukturelle Einschränkungen. Erstens weist PVB im Vergleich zu PLA oder PETG eine geringe Schichthaftung auf – dieselbe Eigenschaft, die das Glätten mit IPA ermöglicht (PVB quillt in IPA auf), führt auch zu schwächeren Schichtenverbindungen

des unglätteten Drucks. Zweitens ist PVB stark hygroskopisch – die Hersteller geben Trocknungszeiten von etwa 8 Stunden bei 45 °C vor, und Spulen, die bei Raumtemperatur gelagert wurden, führen oft zu schlechten Druckergebnissen. Drucken Sie bei 215 °C Düsen- und 75 °C Betttemperatur mit Standard-Prosumer-Hardware.

Markenlandschaft. Prusament PVB gehört zu den am weitesten verbreiteten Verbraucherprodukten, mit einem gut ausgebauten Vertriebskanal und einer breiten Farbpalette. Eine Handvoll regionaler europäischer Anbieter führt PVB-Artikel.

Anwendungsbereich: PVB ist die richtige Wahl für kosmetische Drucke, bei denen die IPA-glättbare Oberfläche das Designziel ist – Ausstellungsmodelle, dekorative Teile, Teile, die für die Ästhetik der Dampfglättung vorgesehen sind – und bei denen die Schichtfestigkeit keine einschränkende Größe darstellt. Vermeiden Sie PVB für Funktionsteile (geringe Schichthaftung schränkt die mechanische Leistungsfähigkeit ein) oder für lagersensitive Anwendungen (Feuchtigkeit führt bei ungeschützten Spulen zu schneller Zersetzung).

Teil IX

Übergreifende Arbeitsabläufe

Materialauswahl, Kalibrierung, Betthaftung, Multimaterialdruck, Nachbearbeitung, Kosten/Beschaffung und tribologische Filamente – sieben zusammenfassende Kapitel, die die über die einzelnen Polymere verstreuten Leitlinien aus den Teilen II–VIII zu Referenzwerken mit einem einzigen Zweck zusammenfassen. Lesen Sie diese einmal nach den Polymerkapiteln durch; kehren Sie zu ihnen zurück, wenn Fragen zum Arbeitsablauf aufkommen.

22. Entscheidungsrahmen für die Materialauswahl

Die Auswahl des Polymers ist die technische Entscheidung, die alle nachfolgenden Entscheidungen beim Druck bestimmt – Prozessparameter, Hardware, Nachbearbeitung, Kosten und letztlich die Leistungsfähigkeit des Druckergebnisses. Das untenstehende Schema ist sequenziell aufgebaut: Filtern Sie zunächst nach der strengsten Einschränkung und verfeinern Sie die Auswahl dann anhand der weniger strengen Kriterien. Wenn zwei Polymere bei der entscheidenden Einschränkung gleichauf liegen, wählen Sie das kostengünstigere oder das besser druckbare – in den Kapiteln des Buches wird erläutert, wann es sich lohnt, in die zweitbeste Wahl zu investieren.

22.1 Die vier Entscheidungsachsen

Die Betriebstemperatur ist der erste Filter. Der Glasübergang des Polymers (bei amorphen Polymeren) oder der Schmelz-/Kristallisationsbereich (bei teilkristallinen Polymeren) setzt eine harte Obergrenze für den Dauerbetrieb: Teile, die über T_g belastet werden, kriechen, Teile, die nahe T_m belastet werden, verformen sich. Fügen Sie für technische Anwendungen eine Sicherheitsmarge von 20–30 °C hinzu. **Die mechanischen Eigenschaften** sind das zweite Kriterium: Steifigkeit vs. Zähigkeit vs. Flexibilität. Die meisten FDM-Polymere sind steif (PLA, PETG, PC, Nylons); eine Minderheit ist zäh (PCTG, PC-Blend, PPA-CF, PEBA); einige wenige sind flexibel (TPU, TPEE, PEBA). **Die Umgebung** ist das dritte Kriterium: UV-Belastung, Kontakt mit Chemikalien, Feuchtigkeit, Kraftstoffe, Kontakt mit Lebensmitteln, Biokompatibilität. **Kosten und Druckbarkeit** sind der vierte Filter – in der Regel eher ein Entscheidungskriterium als eine primäre Einschränkung, aber entscheidend, wenn die Anwendung keine besonderen Anforderungen an die anderen drei Achsen stellt.

22.2 Entscheidungshilfe

Die folgende Abfolge beantwortet die Frage „Welches Polymer?“ durch Ausschlussverfahren. In jedem Schritt werden Polymere ausgeschlossen, die die aktuelle Einschränkung nicht erfüllen; die verbleibende Gruppe ist die richtige Antwort.

Schritt	Frage	Wenn ja →	Wenn nein →
1	Muss das Bauteil flexibel sein (Shore D < 70)?	TPU, TPEE, PEBA, geschäumtes Elastomer (Kap. 16)	Weiter zu Schritt 2
2	Wird das Bauteil dauerhaft bei Temperaturen über 200 °C?	PPS-CF, falls verfügbar; andernfalls PAEK oder auslagern (Kap. 18–19)	Weiter zu Schritt 3
3	Wird das Bauteil dauerhaft bei Temperaturen über 100 °C?	PPA-CF, PC-Mischung (hoher PC-Anteil), PPS-CF (Kap. 14, 15, 18)	Weiter zu Schritt 4
4	Monatelange oder jahrelange UV-Belastung im Freien?	ASA, PMMA, PVDF (Kap. 10, 17)	Weiter zu Schritt 5
5	Einwirkung aggressiver Chemikalien (Säuren, Basen, Kohlenwasserstoffe, Kraftstoffe)?	PP, PVDF, PPS, POM je nach chemischer Zusammensetzung (Kap. 11, 17, 18)	Weiter zu Schritt 6
6	Kontakt mit Lebensmitteln oder Wasser?	PCTG auf Tritan-Harz (bevorzugt), PP, PCTG (Kap. 8, 11)	Weiter zu Schritt 7
7	Wiederholte Stoßbelastung oder Living-Hinge-Zyklen?	PCTG, PA6/PA12, ungefülltes PP, PEBA (Kap. 8, 13, 11, 16)	Weiter zu Schritt 8
8	Hohes Steifigkeits-Gewichts-Verhältnis für Strukturteile?	PA-CF, PPA-CF, PC-CF, PPS-CF, PEBA (Kap. 13, 14, 15, 18, 16)	Weiter zu Schritt 9
9	Anwendungen mit Verschleiß, Reibung oder Gleitkontakt?	POM, PC/PTFE, iglidur PA6 (Kap. 17, 15, 13)	Weiter zu Schritt 10
10	Ist eine ESD-ableitende Oberfläche erforderlich?	ESD-PC (Kap. 15)	Weiter zu Schritt 11
11	Ist Flammwidrigkeit (UL94 V-0) erforderlich?	FR-PC, PPS, PEI (Kap. 15, 18)	Weiter zu Schritt 12

Schritt	Frage	Wenn ja →	Wenn nein →
12	Ist optische Klarheit erforderlich?	PCTG (Kap. 8), PETG klar, PMMA, PC klar (Kap. 7, 17, 15)	Weiter zu Schritt 13
13	Keine der oben genannten besonderen Anforderungen zutrifft?	PETG (Kosten), PLA (Druckbarkeit), PCTG (erhöhte Zähigkeit)	—

Tabelle 22.1 – Schritt-für-Schritt-Anleitung zur Materialauswahl. Jede „Ja“-Antwort beendet den Ablauf und wählt eines der aufgeführten Polymere aus; jede „Nein“-Antwort führt zum nächsten Schritt. Die Reihenfolge der Schritte spiegelt die Häufigkeit wider, mit der die einzelnen Einschränkungen in praktischen FDM-Anwendungen zum Tragen kommen – Flexibilität und Hochtemperaturbeständigkeit sind die entscheidenden Filter; die Auswahl eines Polymers der Standardklasse (Schritt 13) deckt den Großteil aller Hobbyanwendungen ab.

22.3 Schnellübersicht: nach Anwendung

Anwendungsklasse	Standardpolymer	Aufrüstung, wenn das Budget es zulässt
Ausstellungsmodelle, kosmetische Drucke	PLA	PCTG für Zähigkeit, PETG für Kosten
Funktionsprototypen (bei Raumtemperatur)	PETG	PCTG für Schlagfestigkeit, PC-Mischung für Hitzebeständigkeit
Teile für den Außenbereich (UV, Witterung)	ASA	PMMA für Transparenz, PVDF für chemische Beständigkeit
Elektronikgehäuse (passiv)	ASA oder PETG	PC-Mischung für Hitzebeständigkeit
Motorraum / unter der Motorhaube	PC-Mischung	PPA-CF für Steifigkeit + Hitzebeständigkeit
Drohnen- oder RC-Flugkörper	PCTG oder PP-CF	PA6-CF oder PPA-CF für Leistung
Laboraüstung, Kontakt mit Chemikalien	PP	PVDF für aggressive Chemikalien
Living-Hinges, Schnappverbindungen (hohe Zyklen)	PP ungefüllt, PA12	PEBA für dynamische Biegung
Dichtungen, Schwingungsdämpfer	TPU 95A	TPEE für Hitze, PEBA für dynamische Biegung
Verschleißflächen, reibungsarme Buchsen	POM	PC/PTFE für chemische Anwendungen, PEEK für hohe Temperaturen
Konstruktionshalterungen, Vorrichtungen	PETG oder PC-Mischung	PA6-CF oder PPA-CF für Steifigkeit
Lebensmittelkontakt (Konformität auf Harzebene)	PCTG auf Tritan	Zertifizierung pro Filament überprüfen
Sportschuhe, Dämpfung	PEBA oder geschäumtes TPU	—
Luft- und Raumfahrt, flammgeschützte Elektronik	FR-PC	PEI, sofern die Hardware-Stufe dies unterstützt

Tabelle 22.2 – Schnellübersicht über Anwendungsbereiche und Polymere. Als Ausgangspunkt für Beschaffungsentscheidungen verwenden; die Kapitel zu den einzelnen Polymeren in den Teilen II–VIII enthalten die technischen Details zur Eignungsprüfung sowie die für den Einkauf erforderlichen Markenübersichten.

23. Kalibrierungsablauf (vereinheitlicht)

Jedes neue Filament – selbst bei einer Nachbestellung einer zuvor kalibrierten Marke und Farbe – erfordert eine Kalibrierung pro Spule auf der tatsächlichen Maschine, bevor technische Arbeiten durchgeführt werden können. Harzchargen unterliegen Schwankungen, Additivpakete ändern sich zwischen den Revisionen, und der Druckerstatus verschiebt sich mit dem Verschleiß der Düse, dem Verschleiß des Extrudergetriebes und den Umgebungsbedingungen. Der unten stehende Arbeitsablauf ist die konsolidierte Abfolge, auf die sich der Rest dieses Bandes bezieht; die Reihenfolge ist wichtig – das Ergebnis jedes Schritts ist die Eingabe für den nächsten.

Ein Wort zum Umfang vor dem Arbeitsablauf. Eine vollständige Kalibrierung lohnt sich, wenn der Druck funktional ist – also bei einem Teil, das Belastungen aushält, mit anderen Teilen mit einer bestimmten Toleranz zusammenpasst, abdichtet, heiß wird oder getestet oder zertifiziert werden soll. Bei solchen Drucken sind die Maßgenauigkeit, die mechanische Festigkeit und die Wiederholbarkeit, die der Arbeitsablauf gewährleistet, der springende Punkt. Für rein dekorative oder kosmetische Drucke – Ausstellungsmodelle, Figuren, visuelle Prototypen – ist der größte Teil dieser Abfolge übertrieben. Ein Modell, das lediglich gut aussehen muss, benötigt keinen gemessenen Extrusionsmultiplikator oder einen abgestimmten Druck-Vorschub-Wert; das generische Profil des Anbieters, vielleicht mit einer kurzen Temperaturprüfung für die Oberflächenbeschaffenheit, ist ausreichend, und die Stunden, die für die Kalibrierung von Fließverhalten und Schrumpfung aufgewendet werden, bringen keinen sichtbaren Nutzen. Die Entscheidung hängt einfach davon ab, ob der Druck eine Aufgabe zu erfüllen hat, die über das bloße Betrachten hinausgeht. Der Rest dieses Kapitels geht davon aus, dass die Antwort „Ja“ lautet; wenn dies nicht der Fall ist, sind das Trocknen (Schritt 1) und eine Temperaturprüfung (Schritt 2) die einzigen Schritte, die das kosmetische Ergebnis sinnvoll beeinflussen, und der Rest kann ohne Folgen übersprungen werden.

23.1 Schritt 1 – Trocknen des Filaments

Das Trocknen ist der erste Schritt, da Feuchtigkeit jede nachfolgende Messung verfälscht. Ein feuchtes Filament weist einen künstlich niedrigen maximalen Volumenstrom auf (Dampf stört die Kohäsion der Schmelze), einen künstlich niedrigen effektiven Extrusionsmultiplikator (Hohlräume im Strang reduzieren die Masse pro Längeneinheit) und stark schwankende Druckfortschrittswerte. Die Tabelle im

§3.5 in Teil I dient als Referenz; trocknen Sie bis zum oberen Ende des empfohlenen Bereichs und der empfohlenen Zeit, mit einer Sicherheitsmarge von 30 Minuten über die Spezifikation hinaus, um bei der ersten Kalibrierung auf der sicheren Seite zu sein.

23.2 Schritt 2 – Temperaturprofil

Ein Temperaturturm druckt eine einzelne hohe Geometrie, wobei die Düsentemperatur pro 30-mm-Band um 5 °C abgesenkt wird und den vom Hersteller empfohlenen Bereich sowie 5 °C darüber und darunter abdeckt. Bewerten Sie jedes Band in drei Kategorien: Oberflächenbeschaffenheit (glatt und gleichmäßig), Brückenbildung (kein Durchhängen) und Fadenbildung (keine feinen Filamente zwischen den Strukturen). Die optimale Temperatur ist das Band mit dem niedrigsten Wert, das in allen drei Kategorien gut abschneidet – niedrigere Temperaturen verengen das Prozessfenster und reduzieren die thermische Belastung im gedruckten Teil. Standard-Modelldateien für Temperaturtürme finden sich in den Modell-Repositories der Community; die spezifische Turmgeometrie ist weniger wichtig als die einheitliche Bewertung der Bänder.

23.3 Schritt 3 – Maximaler Volumenstrom

Der maximale Volumenstrom (mm^3/s) ist die Rate, mit der das Hotend Filament schmelzen und extrudieren kann, ohne dass es zu einer Unterextrusion kommt. Der Test druckt eine einwandige Geometrie mit stufenweise ansteigender Durchflussrate – typische Bänder reichen von 5 mm^3/s bis 20 mm^3/s in Schritten von 1 mm^3/s . Der Versagenspunkt ist als plötzlicher Übergang von einer massiven Wand zu einer dünnen, lückenhaften oder sichtbar unterextrudierten Wulst erkennbar. Der maximale Volumenstrom ist der höchste Wert vor diesem Versagen, abzüglich einer Sicherheitsmarge von 20 %. Bei Arbeiten im Engineering-Bereich werden 60–70 % des Maximalwerts verwendet, um eine Prozessmarge gegen Abweichungen zu schaffen; Arbeiten auf Produktionsebene werden am unteren Ende des Bereichs durchgeführt.

23.4 Schritt 4 – Extrusionsmultiplikator (Wandmessung an 12 Proben)

Der Extrusionsmultiplikator (EM, je nach Slicer auch als Durchfluss oder Durchflussverhältnis bezeichnet) ist der Skalierungsfaktor, der auf das vom Slicer berechnete Extrusionsvolumen angewendet wird. Der Standardwert von 1,0 geht von einem perfekten Filamentdurchmesser, einer perfekten Kalibrierung des Extrusions-Schrittmotors und null Schmelzschrumpfung während der Abkühlung aus – selten trifft all dies gleichzeitig zu. Die 12-Punkt-Wandmessmethode: Drucken Sie einen einwandigen Hohlwürfel mit einer bekannten Wandstärke-Slicer-Einstellung (typischerweise 0,45 mm für eine 0,4-mm-Düse). Messen Sie nach dem Abkühlen die tatsächliche Wandstärke mit einem Messschieber an 12 Punkten, die um den Würfel verteilt sind. Berechnen Sie den Durchschnitt; dividieren Sie die Soll-Wandstärke des Slicers durch den gemessenen Durchschnitt, um die EM-Korrektur zu erhalten. Wenden Sie diese an, drucken Sie erneut und messen Sie erneut, um eine Abweichung von $\pm 0,5$ % zu überprüfen. Typische konvergierte EM-Werte: 0,93 für hochfaserverstärkte Typen, 0,97–1,00 für ungefüllte technische Kunststoffe, 1,03–1,05 für weichere Elastomere und PC-Mischungen.

Die YOLO-Methode – eine schnellere Alternative für viele Anwender. Die Wandmessmethode hat eine echte Schwäche: Ein Messwert mit dem Messschieber an einer einzelnen $\sim 0,45$ mm dicken Wand liegt an der Grenze dessen, was Handmessschieber zuverlässig auflösen können, und der Druck im Vasenmodus selbst kann je nach Abkühlung und Nahtplatzierung in der Breite variieren. Der in OrcaSlicer integrierte YOLO-Fließgeschwindigkeitstest (der auch als Community-Testmodell für andere Slicer verfügbar ist) macht den Messschieber komplett überflüssig. Er druckt eine einzelne Platte mit kleinen Blöcken, die jeweils mit einem leicht unterschiedlichen Fließmodifikator geschnitten wurden – typischerweise in einem Bereich von

$-0,05$ bis $+0,05$ in Schritten von $0,01$ – und der Benutzer wählt den Block mit der saubersten Oberseite aus: die glatteste Füllung, keine Lücken zwischen den Bögen des Oberflächenmusters und keine erhabenen oder vertieften Nahtstellen zwischen den inneren und äußeren Bereichen. Der gewählte Modifikator wird in einem einzigen Durchgang als „ $\text{neu} = \text{alt} \pm \text{Modifikator}$ “ angewendet. Da die Oberflächenqualität eher beurteilt als gemessen wird, ist YOLO oft die bessere Wahl für ungefüllte Polymere auf einer gut eingestellten Maschine: Es ist schneller, benötigt keine Messschieber, und die Beurteilung „Ist diese Oberfläche glatt?“ ist eine weniger anspruchsvolle Aufgabe als die Auflösung von Hundertstel Millimetern an einer dünnen Wand. Die Wandmessmethode hat nach wie vor ihre Berechtigung, wenn ein *absoluter, rückverfolgbarer* Wert benötigt wird – zur Qualifizierung eines neuen Materials, zur Dokumentation eines Profils für die Veröffentlichung oder zur Kalibrierung von faserverstärkten und elastomeren Typen, deren Oberflächen so stark strukturiert sind, dass die visuelle Beurteilung mehrdeutig wird. Eine sinnvolle Standardvorgehensweise: YOLO für die routinemäßige Einstellung pro Spule, die 12-Proben-Messung, wenn der Wert vertretbar sein muss.

23.5 Schritt 5 – Druckvorlauf

Der Druckvorschub (PA, manchmal auch Linear Advance) gleicht die elastische Verzögerung zwischen der Bewegung des Extrudergetriebes und der Materialablage an der Düse aus. Ohne PA driftet die Materialbreite am Anfang und Ende jeder Linie – dünne Einstiche, dicke Ausstiche. Der Test druckt ein einlagiges Muster, wobei der PA-Wert über die Druckfläche hinweg schrittweise erhöht wird; der optimale Wert ist der Bereich, in dem die Linienenden und -anfänge optisch mit dem Rest der Linie übereinstimmen. Typische konvergierte PA-Werte: 0,020–0,040 für PLA, 0,030–0,060 für PETG/PCTG, 0,025–0,050 für PC-Mischungen, 0,04–0,08 für faserverstärkte Polymere.

23.6 Schritt 6 – XY-Schrumpfkompensation

Amorphe Polymere schrumpfen beim Abkühlen in der Druckebene um 0,3–0,5 %; teilkristalline Polymere können je nach Kristallisationsverhalten um 1,5–3 % schrumpfen. Der XY-Kompensationsfaktor im Slicer skaliert das Modell nach außen, um dies auszugleichen, wodurch beim Abkühlen maßgenaue Teile entstehen. Das Califlower Mk2-Modell – ein Schrumpfungstest mit mehreren Merkmalen, der sowohl externe als auch interne Maßprüfungen umfasst – ist der praktische Referenzstandard der Community. Drucken, wichtige Abmessungen messen, die durchschnittliche Schrumpfung in Prozent berechnen, die Slicer-Kompensation einstellen. Typische konvergierte Werte: 0,20 % für PCTG, 0,25 % für Nylons, 0,35 % für ABS, 0,45 % für ASA, 0,5 % für ungefülltes PP.

23.7 Schritt 7 – Z-Schrumpfung

Die Schrumpfung in Z-Richtung ist in der Regel geringer als in XY-Richtung, da die schichtweise Ablagerung eine teilweise Entspannung zwischen den Schichten ermöglicht. Der Standardtest ist ein 100 mm hoher Hohlzylinder; messen Sie die tatsächliche Höhe mit einem Messschieber, berechnen Sie den Schrumpfungsprozentsatz und stellen Sie die Slicer-Kompensation ein. Viele Anwender überspringen diesen Schritt bei der ersten Kalibrierung – die Größe liegt bei amorphen Polymeren in der Regel unter 0,3 %, sofern die technischen Toleranzen dies zulassen. Überspringen Sie diesen Schritt bewusst und nicht versehentlich.

23.8 Speichern des kalibrierten Profils

Kalibrierte Werte gehören in das Filamentprofil, nicht in den permanenten Speicher des Druckers. Die meisten Slicer unterstützen die filamentspezifische Speicherung von Düsentemperatur, Betttemperatur, maximalem Volumenstrom, EM, PA, XY-Schrumpfung und Kammertemperatur. Der Druckvorlaufwert kann auch in den filamentspezifischen Start-G-Code eingebettet werden, sofern die Firmware dies unterstützt (der Befehl variiert je nach Firmware: `M900 K[Wert]` bei Marlin, `M572 D0 S[Wert]` bei RepRapFirmware und Prusa Buddy-Firmware sowie `SET_PRESSURE_ADVANCE ADVANCE=[Wert]` bei Klipper). Speichern Sie das Profil, kennzeichnen Sie es mit dem Kalibrierungsdatum und dem Spulen-Chargencode und überprüfen Sie EM und PA erneut bei der ersten Verwendung einer neuen Spule derselben Marke – eine Abweichung von 5–10 % zwischen den Chargen ist normal.

24. Strategie zur Bettadhäsion nach Polymerfamilie

Die Bettadhäsion ist das in §3.3 beschriebene Problem der Grenzflächenchemie: Benetzung und intermolekulare Anziehung zwischen dem geschmolzenen Polymer der ersten Schicht und der Bauperfläche. Polare Polymere haften an polaren Oberflächen (PEI, Glas, pulverbeschichteter Stahl); unpolare Polymere (PP, PE) erfordern unpolare, kompatible Oberflächen. Die Kapitel zu den einzelnen Familien in den Teilen II–VIII behandeln die Einzelheiten; dieses Kapitel fasst die Auswahlmöglichkeiten in einer Tabelle zusammen.

24.1 Zusammengefasste Referenz zur Bettadhäsion

Polymerfamilie	Beste Oberfläche	Haftmittel/Trennmittel	Bett (°C)	Hinweise zum Ablösen
PLA	glattes PEI	keine	50–60	Vollständig abkühlen lassen; löst sich von selbst
PETG	strukturiertes PEI	Klebestift bei zu festem Griff	80–90	Übergriffe auf glattem PEI; Trennschicht unerlässlich
PCTG	glattes PEI	Klebestift oder PVP	70–90	Ähnlich wie PETG; Trennschicht verringert Beschädigungen der Platte
ABS / ASA	glattes PEI	Klebestift bei ersten Drucken	95–110	Brim erforderlich für Teile >100 mm; geschlossene Bauumgebung zwingend erforderlich
HIPS	glattes PEI	Klebestift	100–110	Limonenlöslich; Brim für große Teile
PP (ungefüllt, CF, GF)	PP-beschichtete Folie oder PP-Verpackungsklebeband	Magigoo PP für schwierige Teile	85–105 (PP-Platte) / 80–100 (Klebeband) / 20 (Kaltbett)	PP-auf-PP-Haftung; zum Ablösen vollständig abkühlen lassen
PE / HDPE	PE-beschichtete Folie oder PP-Verpackungsklebeband	Magigoo PP	80–100	Gleiches Prinzip wie PP; PE-Folien sind im Handel nur selten erhältlich
PA6 / PA66 / CoPA	G10 Garolite	PEI + PVP als Alternative	90–110	Die Garolite-Platte haftet stark; vollständig abkühlen; CryoGrip Glacier ebenfalls dokumentiert
PA12 / PA612 / PA11	glattes PEI	Klebstift auf anspruchsvollen Teilen	70–90	Geringere Schrumpfung als PA6; PEI haftet zuverlässig
PA-CF / PA-GF	G10 Garolite	Magigoo PA auf PEI als Alternative	90–110	Starke Verwindungsneigung lässt sich am besten auf Garolite bändigen
PPA / PPA-CF / PPA-GF	glattes PEI + Klebestift / PVP	Magigoo PC funktioniert ebenfalls	90–120	G10 Garolite akzeptabel; die Kammertemperatur ist entscheidender für den Erfolg als die Oberfläche
PC / PC-Mischung	G10 Garolite (langfristig)	Klebestift / PVP auf PEI	100–115	Überzieht PEI katastrophal; Trennschicht unverzichtbar
PC-CF / PC-GF / ESD-PC	G10 Garolite	Magigoo PC	100–120	Gehärtete Düse zwingend erforderlich; Betttemperatur nahe der Obergrenze
PC/PTFE	glattes PEI	Magigoo PC	90–120	Vollmetall-Hotend erforderlich; Kammer empfohlen
TPU / TPE	strukturiertes PEI	CryoGrip Glacier bei 40–50 °C	40–60	Übergriffe aus glattem PEI; Trennschicht, falls eine glatte Oberfläche benötigt wird
TPEE	strukturiertes PEI	CryoGrip Glacier	50–70	Ähnlich wie TPU; höhere Bettung als weiches TPU

Polymerfamilie	Beste Oberfläche	Haftung/Trennfähigkeit	Bett (°C)	Hinweise zum Entfernen
PEBA	glattes PEI	keine	50–60	Löst sich rückstandsfrei; einfacher als TPU
PMMA	glattes PEI	Klebestift	100–110	Spröde; thermische Belastung dominiert; vollständig abkühlen lassen
POM	Glas + Klebestift oder PA-Platte	Magigoo PA	100–115	Niedrige Oberflächenenergie; Brim erforderlich; Belüftung erforderlich
PVDF	glattes PEI	keine	90–110	Haftet gut; Vollmetall- Hotend; Kammer zur Verzugskontrolle
PPS-CF	G10 Garolite	Magigoo PA	110–120	Aktive Kammer 55–65 °C erforderlich; gehärtete Düse zwingend erforderlich
PEI / PEEK / PEKK	Industrieklebstoff	über den Prosumer-Bereich hinaus	140–155	Industriekammer erforderlich; außerhalb des Umfangs dieses Bandes
PVA / BVOH	glattes PEI	keine	50–65	Direkt aus dem Trockner bedrucken; zersetzt sich in Umgebungsluft schnell
PVB	glattes PEI	Klebestift	70–80	Hygroskopisch; vor dem Drucken trocknen; nach dem Drucken mit IPA glättbar
PHA / PLA-PHA	glattes PEI	Klebestift bei kaltem Druckbett	0–60	PHA druckt kühler als PLA; einige Produkte erfordern ein unbeheiztes Bett
PCL	Glas + Klebestift	Klebeband	20–30	Sehr niedrige T_m ; nur minimale Bettheizung erforderlich

Tabelle 24.1 – Strategie zur Bettadhäsion nach Polymerfamilie (konsolidierte Referenz). G10 Garolite ist der technische Standard für alle stark verformungsanfälligen technischen Polymere, bei denen der Druck beim Entfernen eine PEI-Federstahlplatte beschädigen würde; die Familie der polymerspezifischen Klebstoffe von Magigoo deckt die meisten übrigen Sonderfälle ab. Bei Ansätzen mit kaltem Bett (PP, PCL, einige PHA-Typen) wird während des Drucks ein Bett mit Raumtemperatur verwendet und erst am Ende des Druckvorgangs zur Ablösung eine erhöhte Temperatur.

Drei Grundsätze ziehen sich durch die Tabelle. Erstens ist glattes PEI die Standardoberfläche für die meisten polaren Polymere; strukturiertes PEI verringert die Haftung und wird bevorzugt, wenn eine zu starke Haftung die Platte beim Entfernen beschädigt. Zweitens ist G10-Garolite die richtige Wahl für stark verformbare technische Polymere (PA6, PC, PPA, PPS), da es während des Drucks zuverlässig haftet, sich beim Abkühlen sauber löst und wiederholte Temperaturwechsel ohne Oberflächenverschleiß verträgt. Drittens übertreffen polymerspezifische Klebstoffe (Magigoo PP, PA, PC) generische Klebestifte bei den härtesten Filamenten deutlich und sind die erste Wahl, wenn es um die Druck-Erfolgsrate geht.

24.2 Klebstoffe für die Bauplatte: die Produktlandschaft

Wenn in Tabelle 24.1 ein Klebstoff oder eine Trennschicht genannt wird, hat man selten die Wahl zwischen Marken, die sich identisch verhalten. Klebstoffe für die Bauplatte lassen sich in vier mechanische Klassen einteilen, und die Klasse ist wichtiger als die Marke. **Klebestifte** bestehen aus festem PVA: Sie sind günstig, wasserlöslich, überall erhältlich und für PLA und einfaches PETG geeignet, nutzen sich jedoch nach wenigen Drucken ab und lassen sich ungleichmäßig auftragen. **Sprays** beschichten eine große Druckplatte schnell und gleichmäßig – nützlich für große erste Schichten –, allerdings auf Kosten von Sprühnebel auf der Maschine und der Notwendigkeit einer Belüftung. **Flüssige Klebstoffe für Stifte und Pinsel** sind die speziell entwickelte Kategorie: Sie sind so formuliert, dass sie bei heißer Druckplatte haften und sich beim Abkühlen lösen, und reichen für viele Drucke pro Anwendung. **Temperaturaktivierte Klebstoffe** sind eine flüssige Untergruppe, deren Haftkraft mit der Temperatur der Druckplatte zunimmt, was einen starken Halt auf heißen Druckplatten und ein leichtes Lösen nach dem Abkühlen gewährleistet. Tabelle 24.2 gibt einen Überblick über die Produkte, auf die ein Prosumer-Anwender wahrscheinlich stoßen wird.

Produkt	Typ	Materialbereich	Anmerkungen
Magigoo Original	Flüssigstift	PLA, ABS, PETG, HIPS, ASA, TPU	Der standardmäßige All-in-One-Stift. Stiftapplikator, hält im heißen Zustand und gibt beim Abkühlen frei, ~100+ Anwendungen pro Stift, mit Wasser zu reinigen. Die sicherste Allzweck-Wahl für gängige Filamente.
Magigoo PP / PA / PC	Flüssigstift	Polymerspezifisch: PP, die Nylon-Familie, die PC-Familie	Chemische Zusammensetzung auf die jeweilige Familie abgestimmt. Magigoo PP ist eine der wenigen praktischen Optionen für Polypropylen; Magigoo PA und PC zielen auf die stark verformbaren technischen Polymere ab, bei denen herkömmlicher Klebestift versagt.
Vision Miner Nano Polymer	Flüssigpinsel	Hochtemperatur: PEEK, PEI, PPSU, PC, Nylon; außerdem PLA, PETG, ABS, HIPS, PVDF	Die Wahl für den technischen Bereich. 120-ml-Pinsel-Flasche, formuliert für Hochtemperaturmaterialien, funktioniert auf Glas-, PEI- und Carbonoberflächen; eine einzige Schicht reicht für viele Drucke mit Filamenten niedrigerer Temperatur.
Layerneer Bed Weld Original	Flüssigkeit	PLA, PETG, ABS, ASA, PVA, CPE – nicht Nylon oder PP	Ein stark haftender Klebstoff gegen hartnäckiges Abheben an den Ecken bei großen, flachen Teilen. Der Hersteller rät ausdrücklich von der Verwendung bei Nylon oder Polypropylen ab.
Bambu Lab Flüssigkleber	Flüssig	PETG, TPU und andere gängige Filamente	Eine saubere flüssige Alternative zum Klebestift; anfängerfreundlich, hinterlässt weniger Rückstände. Wird oft als Trennschicht auf Platten mit übermäßig starker Haftung verwendet.
TH3D Bed Cement	Flüssig	Breites Anwendungsspektrum; funktioniert auf PEI, Flexplatten, Glas, Garolite	100-ml-Flasche mit Applikatorspitze, preislich etwa halb so teuer wie die führenden Marken. Die Haftung reicht für etwa drei bis vier Drucke, bevor eine erneute Anwendung erforderlich ist.
Dimafix	Temperaturaktivierter Stift	ABS, ASA, PC, PP, Nylon und andere stark zum Verziehen neigende Materialien	Die Haftkraft nimmt mit steigender Betttemperatur zu und lässt nach, wenn das Bett abkühlt. Stiftformat; bevorzugt für verformungsanfällige technische Filamente.
3DLAC (und ähnliche Sprays)	Spray	PLA, PETG, ABS, ASA; nyonspezifische Variante erhältlich	Schnelle, gleichmäßige Abdeckung auf großen Druckbetten. Übersprühen und Belüftung sind die Nachteile; auf sehr griffigen Standardplatten wirkt es eher als Trennschicht als als Klebstoff.
PVA-Klebestift (generisch)	Fester Stift	PLA, einfaches PETG; Trennschicht für viele Materialien	Die preisgünstige Basisvariante – abwaschbar, überall erhältlich, muss nach wenigen Drucken neu aufgetragen werden. Ein lila gefärbter Stift zeigt die Abdeckung. Ausreichend für anspruchslöse Arbeiten und als Opferschicht auf PEI.

Tabelle 24.2 – Für Prosumer-Anwender zugängliche Haftmittel für die Bauplatte. Die Materialbereiche entsprechen den Angaben der jeweiligen Hersteller; betrachten Sie diese als erste Orientierung, da die Haftung auch von der Bettoberfläche, der Temperatur und den Einstellungen für die erste Schicht abhängt.

Produkte aus geschlossenen Ökosystemen und rein industrielle Produkte werden hier nicht berücksichtigt. Preise und Zusammensetzungen ändern sich – Anhang D gibt einen Überblick über die Markenlandschaft zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Zwei Auswahlregeln decken die meisten Fälle ab. Für **gängige Filamente** – PLA, PETG, ABS, ASA, TPU – ist ein All-in-One-Flüssigstift wie Magigoo Original die reibungsärmste Wahl, und ein PVA-Klebestift ist die kostengünstige Alternative; beide haften ausreichend und lösen sich beim Abkühlen. Für **technische Filamente** – die Nylon-, PC-, PPA- und PPS-Familien sowie alles, was in einer beheizten Kammer gedruckt wird – macht sich ein polymer-spezifischer oder hochtemperaturbeständiger Klebstoff bezahlt: die familienspezifischen Stifte von Magigoo, Dimafix für verzuganfällige Materialien oder Vision Miner Nano Polymer für die höchsten Temperaturstufen. Ein wichtiger Punkt aus Tabelle 24.1: Bei den am stärksten zum Verziehen neigenden technischen Polymeren ist der Klebstoff kein Ersatz für die richtige Bauoberfläche und Kammertemperatur – er sorgt für die letzten paar Prozent an Zuverlässigkeit zusätzlich zur richtigen Oberflächenwahl, nicht als Rettung bei einer falschen Wahl. Schließlich ist jedes der hier genannten Produkte auch ein Trennmittel: Auf einer Bauoberfläche, die ein bestimmtes Polymer zu stark festhält (PC oder PETG auf glattem PEI ist der klassische Fall), schützt eine dünne Klebeschicht das Material, indem sie dem Teil eine Opferfläche bietet, an der es haften kann.

24.3 Bauplattentypen und das Federstahl-Ökosystem

Tabelle 24.1 nennt für jedes Polymer eine Oberfläche; in diesem Abschnitt geht es um die Oberfläche selbst. Moderne Prosumer-Geräte haben sich weitgehend auf das flexible Federstahlsystem geeinigt: ein dünnes Stahlblech, ein- oder beidseitig beschichtet, das durch einen eingebauten Magneten am beheizten Bett gehalten wird. Das Blech biegt sich nach einem Druck vom Magneten weg, sodass sich die Teile lösen, und die Druckplatte eines Geräts wird tatsächlich durch ihre *Beschichtung* definiert, nicht durch den Stahl. Die Beschichtungen lassen sich in sechs Funktionsklassen einteilen:

- **Glatte Oberflächen** – glattes PEI (eine Polymerfolie) und glatte, PEI-ähnliche Beschichtungen – sorgen für glasglatte, glänzende erste Schichten und den stärksten Halt bei polaren Polymeren. Dieser Halt ist der Haken: PC, PETG und PETG haften zu stark auf heißem, glattem PEI und können die Beschichtung zerreißen oder beim Entfernen Fragmente mitreißen, weshalb sie in Tabelle 24.1 mit einer Trennschicht kombiniert werden.
- **Strukturierte Oberflächen** – strukturiertes PEI, meist ein pulverbeschichtetes PEI-Stahlblech – tauschen Glanz gegen eine matte, leicht gepunktete Oberfläche der ersten Schicht und eine deutlich geringere Haftung ein, was sie zur sichereren Standardwahl für Materialien mit übermäßiger Haftung und für Kosmetikteile macht, bei denen eine matte Unterseite gewünscht ist.
- **Satinierte Oberflächen** liegen zwischen den beiden: eine feine, gleichmäßige Mikrostruktur, die eine weiche, halbmatte Oberfläche mit einer Griffigkeit ergibt, die eher der von glatten als der von grob strukturierten Oberflächen ähnelt – eine mittlere Option für Anwender, denen glatte Oberflächen zu griffig und strukturierte Oberflächen zu grob sind.
- **Gemusterte Platten** weisen ein dekoratives Relief (Holzmaserung, geometrische Muster, Marmoroptik) auf, das auf die Unterseite des Bauteils übertragen wird; sie stellen eine Oberflächenausführung dar, wobei das Haftverhalten von der jeweiligen Grundbeschichtung abhängt, auf der das Muster aufgebracht ist.
- **Technische Platten** gehören zur Kategorie der hochtemperaturbeständigen, stark verformbaren Materialien: starres G10/Garolite und gleichwertige Spezialplatten, die unbehandelt für PA, PC, PPA und PPS verwendet werden, da sie diese Polymere im heißen Zustand festhalten und beim Abkühlen sauber ablösen, ohne dass ein Verbrauchsmaterial wie Klebstoff erforderlich ist.
- **Kaltplatten** sind der umgekehrte Fall – Oberflächen (und ein Arbeitsablauf) für Materialien, die auf einem unbeheizten oder kaum beheizten Bett gedruckt werden, wie beispielsweise Polypropylen auf einer PP-beschichteten Platte oder PCL: Die Haftung wird durch Oberflächenchemie und Klebeband statt durch Bettwärme gesteuert, wobei das Bett manchmal erst am Ende des Druckvorgangs erwärmt wird, um das Ablösen zu erleichtern.

Oberflächenklasse	Typische Oberflächenbeschaffenheit	Haftung	Am besten geeignete Materialien
Glattes PEI	Glänzend, spiegelglatt	Gut geeignet für polare Polymere	PLA, PVB, PEBA; PETG/PCTG/PC nur mit Trennschicht
Strukturiertes PEI (pulverbeschichtet)	Matt, leicht genoppt	Mäßig	PETG, PCTG, TPU, ABS/ASA; Materialien, die generell zu Übergriffen neigen
Satin	Weich, halbmatt	Mäßig-hoch	PLA, PETG, ABS – eine mittlere Option zwischen glatt und strukturiert
Gemustert / dekorativ	Reliefmuster teilweise auf der Unterseite	Folgt der Grundbeschichtung	Kosmetische Drucke; die Haftung richtet sich nach der Beschichtung, auf der das Muster aufgebracht ist
Technik (G10 / Garolite)	Fein matt	Hoher Anteil an technischen Polymeren; saubere Ablösung nach dem Abkühlen	PA, PA-CF/GF, PC-Familie, PPA, PPS-CF
Kaltplatte (PP-beschichtet, Klebeband, Glas)	Variiert je nach Beschichtung	Chemie- und bandgesteuert, nicht wärme gesteuert	PP und PP-CF/GF, PCL, einige PHA-Typen

Tabelle 24.3 – Oberflächenklassen für Bauplatten. Die Klasse beschreibt das Verhalten der Beschichtung; bestimmte Markenplatten (unten) sind Ausführungsformen einer oder mehrerer dieser Klassen. Die Haftung hängt auch von der Betttemperatur und den Einstellungen für die erste Schicht ab, betrachten Sie die Spalte daher eher als relative Rangfolge und nicht als absolute.

Innerhalb dieser Klassen sind einige Produktfamilien auf Prosumer-Hardware so verbreitet, dass sie namentlich genannt werden können. **G10-/Garolite-Platten** sind ein Glas-Epoxid-Laminat, das als flache, starre Platten (Holden Enterprises und andere) und nicht als flexibler Stahl verkauft wird; sie sind das Arbeitstier unter den technischen Platten für verformungsanfällige Polymere und vertragen wiederholte Temperaturwechsel ohne Verschleiß der Beschichtung. **BIQU** CryoGrip-Platten sind flexible Federstahlplatten, die auf einen Cool-Release-Effekt ausgelegt sind – die Haftung ist während des Drucks stark und lässt stark nach, sobald die Platte abkühlt; die Glacier-Variante ist für TPU und Nylon bei moderaten Betttemperaturen dokumentiert; in Slicer-Begriffen wird eine CryoGrip-Platte als glatte PEI-Platte der Hochtemperaturklasse behandelt und innerhalb ihrer Nenn-Temperaturgrenze gehalten. **Prusa** liefert drei Federstahlplatten aus, die direkt den oben genannten Klassen entsprechen: eine glatte PEI-Platte, eine strukturierte, pulverbeschichtete PEI-Platte und eine satinierte Platte sowie eine separate Platte mit Polypropylen-Beschichtung für den Cold-Plate-PP-Workflow. **Bambu** Lab-Platten folgen dem gleichen Muster unter anderen Namen – eine strukturierte PEI-Platte als universeller Standard, eine glatte/Hochtemperatur-Platte für glänzende erste Schichten und technische Arbeiten bei höheren Temperaturen, eine Cool-Plate-Option für Materialien bei niedrigen Temperaturen und eine technische Platte für Materialfamilien, die zu Verzug neigen. Die Bezeichnungen unterscheiden sich je nach Anbieter, aber die zugrunde liegenden Oberflächenklassen in Tabelle 24.3 bestimmen tatsächlich das Verhalten; die Zuordnung der Klasse zum Polymer in Tabelle 24.1 ist wichtiger als die Marke auf der Verpackung.

Drei praktische Hinweise. Erstens ist die Beschichtung das Verbrauchsmaterial, nicht der Stahl: Sowohl glattes PEI als auch pulverbeschichtetes, strukturiertes PEI nutzen sich ab, und eine Trennschicht bei Kombinationen mit starker Haftung (PC oder PETG auf heißem, glattem PEI) schützt diese Beschichtung direkt – genau darum geht es in dem in §15.10 beschriebenen Kostenfall für Garolite auf PC. Zweitens sind Oberflächenklasse und Betttemperatur miteinander gekoppelt und nicht unabhängig voneinander: Dieselbe Platte haftet bei hohen Temperaturen stärker, sodass ein zu starkes Anhaften manchmal eher ein Problem der Betttemperatur als ein Problem der falschen Platte ist. Drittens: Passen Sie die Platte an das vorherrschende Material an – eine strukturierte PEI-Platte deckt die meisten gängigen Filamente ab, eine blanke technische Platte bewährt sich, sobald PA, PC, PPA oder PPS regelmäßig im Einsatz sind, und eine Kaltplatte oder eine Platte mit PP-Beschichtung ist für Polypropylen eher zwingend erforderlich als optional.

25. Drucken mit mehreren Materialien und Dual-Hotend

Der Mehrmaterialdruck erweitert FDM über einfarbige Teile aus einem einzigen Polymer hinaus zu funktionalen Kombinationen: starre Körper mit flexiblen Dichtungen, Strukturkörper mit löslichen Stützen, farbcodierte mechanische Baugruppen und kosmetische Modelle mit gemischter Transparenz. Die Hardware-Ökosysteme, die Mehrmaterialfähigkeit implementieren, lassen sich in drei Architekturen unterteilen, von denen jede unterschiedliche Einschränkungen hinsichtlich der Kombinierbarkeit aufweist.

25.1 Drei Hardware-Architekturen

Multi-Material-Systeme (MMU) mit einem Extruder teilen sich eine Düse für mehrere Filamentzuführungen über einen vorgelagerten Umschaltmechanismus. Der Filamentwechsel erfolgt durch Zurückziehen des aktiven Filaments, Vorschieben des neuen Filaments durch den Cutter oder Splicer und Spülen der Schmelzzone vor Wiederaufnahme des Drucks. Die Architektur ist mechanisch einfach und kostengünstig, verursacht jedoch einen erheblichen Spülsaufwand: Typische Spülvolumina pro Wechsel betragen 50–200 mm³, die sich bei einem mehrfarbigen Druck schnell zu Volumina summieren, die das Modell selbst übersteigen können. Die Kompatibilität der Filamente mit der Kammer ist ebenfalls eine strenge Einschränkung – jedes geladene Filament muss die Kammertemperatur aushalten, die durch das Material mit der höchsten Temperatur im Druck vorgegeben wird.

Dual-Hotend-Systeme montieren zwei unabhängige Hotends an einem gemeinsamen Druckkopf. Ein Hotend wird zur Seite geschoben, während das andere druckt. Für den Filamentwechsel muss lediglich das aktive Hotend umgeschaltet werden – keine Spülung, keine Verunreinigung der Schmelzzone. Der Preis dafür ist mechanische Komplexität und zusätzliche Kalibrierung: Der Hotend-Offset (XY und Z) muss für jede Maschine charakterisiert werden. Dual-Hotend-Systeme unterstützen Kombinationen, die MMU nicht bieten kann, da sich die beiden Filamente niemals eine Schmelzzone teilen – unterschiedliche Temperaturbereiche, unterschiedliche Zuführsysteme und sogar inkompatible Materialien können kombiniert werden.

IDEX-Systeme (Independent Dual EXtruder) montieren zwei komplette Druckköpfe auf unabhängigen Portalen und ermöglichen so echtes paralleles Drucken – zwei Teile gleichzeitig oder ein Teil mit gleichzeitiger Ablagerung von zwei Materialien. Die Betriebskosten und der Platzbedarf sind in dieser Kategorie am höchsten; der Durchsatzvorteil ist für die Serienfertigung von Bedeutung.

25.2 Gruppierungen nach Materialkompatibilität

Filamente in jedem Multimaterial-Druck müssen einen kompatiblen Temperaturbereich in der Kammer teilen. Drei praktische Stufen:

Stufe	Kammertemperatur	Kompatible Filamente
Niedrig	Umgebungstemperatur – 35 °C	PLA, PVA, BVOH, PVB, PHA, PCL – sowie TPU/PEBA mit Vorsicht
Mittel	35 – 50 °C	PETG, PCTG, ABS, ASA, HIPS, PA12, PA612, PP, PE — und PLA am unteren Ende
Hoch	50 – 65 °C (aktiv)	PC, PC-CF, PA6, PA6-CF, PPA-CF, PPS-CF, PEI-CF — und ABS/ASA am unteren Ende

Tabelle 25.1 – Materialkompatibilitätsgruppen nach Kammertemperatur. Das Mischen über die Stufen hinweg birgt das Risiko einer Verformung des Material der niedrigeren Temperatur (TPU erweicht oberhalb von 50 °C; PLA erweicht oberhalb von 55 °C). Filamente an den Grenzen der Temperaturstufen können nach unten gemischt werden (verwenden Sie Material der höheren Stufe in der Kammer der niedrigeren Stufe, sofern die Geometrie dies zulässt), jedoch nicht nach oben.

25.3 Strategien für Stützfilamente

Stützmaterial ist die häufigste Anwendung für Multimaterialdruck. Drei Strategien dominieren:

Lösliche Stützstrukturen (Kapitel 20) – PVA in Kombination mit PLA, BVOH in Kombination mit PLA/PETG/ABS – lösen sich nach dem Druck in einem Wasserbad auf. Höchste geometrische Leistungsfähigkeit (innere Hohlräume, Hinterschnidungen, eingeschlossene Stützstrukturen) bei höchsten Kosten (Spülverlust, Auflösungszeit, Filamentkosten).

Stützen aus dem gleichen Material verwenden dasselbe Filament für Modell und Stütze, wobei sie sich durch die Geometrie unterscheiden (spärliche Füllung, dünne Wände, Abstand zur Modelloberfläche). Keine zusätzlichen Filamentkosten; die Entfernung erfordert eine mechanische Trennung. Der Standardansatz für FDM mit einem Extruder ohne Multimaterial-Fähigkeit.

Abbrechbare Schnittstellenstützen – herstellerspezifische Produkte wie Polymaker PolySupport oder spezielle PPA-kompatible abbrechbare Filamente – werden als Stützkörper gedruckt, jedoch mit einer bewusst schwachen Bindung zum Modellmaterial. Lösen sich beim Abkühlen. Der Mittelweg: geringere Kosten als lösliche Stützen, bessere Oberflächenqualität als Stützen aus dem gleichen Material.

Hybridstrategien sind in der Produktion üblich. Ein Modell aus PC-Mischung mit PCTG-Schnittstellenschichten auf HIPS-Stützstrukturen – der HIPS-Körper trägt die strukturelle Stützlast, die PCTG-Schnittstelle löst sich sauber vom PC-Körper ohne Limonen-Auflösung, und die Kosten für das Stützvolumen entfallen auf HIPS statt auf teures PCTG.

25.4 Wirtschaftlichkeit der Spülkosten

Der Mehrmaterialdruck mit einem einzigen Extruder an einem vierfarbigen Teil mit 100 Filamentwechseln und einer Spülmenge von 100 mm^3 pro Wechsel verbraucht 10.000 mm^3 gespültes Material – etwa 12 g bei einem Polymer mit $1,24 \text{ g/cm}^3$. Bei einem kleinen Modell kann das Spülgewicht das Modellgewicht übersteigen. Abhilfemaßnahmen: Reduzieren Sie das Spülvolumen pro Wechsel (kalibrieren Sie es anhand der tatsächlichen Kreuzkontamination; viele Systeme verwenden eine höhere Standard-Spülmenge als nötig); entwerfen Sie das Modell so, dass Wechsel minimiert werden (Farbblöcke statt feiner Details); verwenden Sie Hardware mit zwei Hotends, die das Spülen bei Filamentwechseln vollständig überflüssig macht; oder akzeptieren Sie die Spülkosten als Preis für die Farbfähigkeit.

26. Nachbearbeitungsstrategien

Die Nachbearbeitung verwandelt einen rohen FDM-Druck in ein fertiges Teil. Die Techniken lassen sich in fünf Kategorien einteilen – mechanische Bearbeitung, chemische Glättung, Beschichtung, Wärmebehandlung und Montage –, wobei jede Kategorie polymerspezifische Kompatibilitätsbeschränkungen aufweist. Die wichtigste Erkenntnis aus den Kapiteln zu den einzelnen Polymeren: Dieselbe Chemie, die den technischen Wert eines Polymers ausmacht, schließt in der Regel eine Lösungsmittelbasierte Endbearbeitung dieses Polymers aus.

26.1 Mechanische Nachbearbeitung

Schleifen, Polieren und maschinelle Bearbeitung funktionieren bei jedem FDM-Polymer mit dem richtigen Schleifmittel und der richtigen Technik. Drei Grundsätze: **Nassbearbeitung vor Trockenbearbeitung** minimiert Partikel in der Luft (unverzichtbar bei CF/GF-verstärkten Typen, bei denen Faserfragmente als Atemwegsgefahren dokumentiert sind); **eine schrittweise Körnung** von grob (220) über mittel (400, 600) bis fein (1000, 2000) sorgt für die glatteste Oberfläche, ohne Schritte zu überspringen; **die Beachtung der polymer-spezifischen Temperatur** ist wichtig – PLA, PETG und PCTG verschmieren unter der Reibungswärme von Elektrowerkzeugen, während POM, PC und PPS aggressives Schleifen ohne Verformung vertragen. Für optische Klarheit bei PCTG und PMMA: Nassschleifen bis Körnung 2000, anschließend mit Kunststoffpolierpaste polieren. Für ein mattes Finish: Bei Körnung 800–1000 aufhören.

26.2 Glättung mit Lösungsmitteln

Das Glätten mit Dampf und in Bädern mit kompatiblen Lösungsmitteln erzeugt glattglänzende Oberflächen, indem die gedruckte Perlenstruktur nur an der Oberfläche wieder geschmolzen wird. Die Kompatibilitätsmatrix ist eng:

Polymer	Kompatibles Lösungsmittel	Methode	Gefahrenstufe
ABS, ASA	Aceton	Dampfglättung in geschlossenem Behälter mit kurzer Exposition gegenüber warmem Dampf	Entzündlich; Belüftung erforderlich
HIPS	Limonen; Aceton	Auflösung im Bad; Dampfglättung funktioniert ebenfalls	Hautsensibilisator (Limonen); entzündlich (Aceton)
PVB	Isopropylalkohol	Dampf oder Bad; vom Hersteller empfohlener Arbeitsablauf	Gering; Lösungsmittel für den Hausgebrauch
PLA	Kein gängiges Werkstattlösungsmittel funktioniert	Glanz mit Heißluftpistole möglich; matt nur mechanisch	—
PETG, PCTG	Kein wirksames Lösungsmittel	Nur mechanisch; XTC-3D / 2K-Epoxidharz für Glanz	—
PC, PC-Mischung	Dichlormethan (DCM)	Bad oder Dampf; erzeugt starke Lösungsmittel-Schweißverbindung	OSHA-Karzinogen; Abzugshaube vorgeschrieben
Nylons (PA, PPA)	Kein gängiges Werkstattlösungsmittel ist geeignet	Nur mechanisch; Oberflächenbeschichtungen für Glanz	—
PP, PE	Kein Werkstattlösungsmittel bei Raumtemperatur	Nur mechanisch; Flammbehandlung zur Verbesserung der Lackhaftung	—
TPU, TPE, PEBA	Kein wirksames Dampf-Lösungsmittel	Nur mechanisch; Beschichtungen durch Flexibilität eingeschränkt	—

Tabelle 26.1 — Kompatibilität mit der Lösungsmittelglättung nach Polymerfamilie. Für die meisten technischen Kunststoffe in diesem Band gibt es keine praktikable Möglichkeit der Lösungsmittelglättung in der Werkstatt — die chemische Beständigkeit, die ihren technischen Wert ausmacht, schließt eine chemische Oberflächenbehandlung aus.

Mechanische Oberflächenbearbeitung und Beschichtungen (2K-Epoxid, XTC-3D) sind die praktischen Verfahren für PETG, PCTG, Nylon, Polypropylen und die hochleistungsfähigen Spezialpolymere.

26.3 Beschichtungen und Lacke

Oberflächenbeschichtungen decken drei Anwendungsklassen ab: **Glanz und Füllung** (XTC-3D, 2K-Epoxid-Klarlacke, kunststoffbindende Grundierungen füllen Schichtgrenzen auf und erzeugen glatte lackierte Oberflächen); **Farbe und Ästhetik** (Automobilgrundierungen und Decklacke über polymerkompatiblen Haftgrundierungen); **Funktion** (leitfähige Beschichtungen für ESD, Dampfsperren, antistatische Behandlungen, UV-Schutzlacke für Teile im Außenbereich). Polymere mit niedriger Oberflächenenergie (PP, PE, POM) erfordern eine Flammbehandlung oder polymerspezifische Grundierungen (3M 4298UV, Loctite 770), bevor eine Beschichtung zuverlässig haftet; Standard-Automobilgrundierungen benetzen diese Oberflächen nicht ausreichend. Polymere mit höherer Oberflächenenergie (PLA, PETG, PCTG, ABS, ASA, PC) lassen sich direkt mit Standard-Grundierung-Decklack-Verfahren beschichten.

26.4 Wärmebehandlung (Tempern)

Das Tempern dient bei amorphen und teilkristallinen Polymeren unterschiedlichen Zwecken. Bei amorphen Polymeren (PETG, PCTG, ABS, ASA, PC) baut das Tempern Restspannungen ab, die durch schnelles Abkühlen der Schichten entstehen – dies führt zu einer leichten Verbesserung der Dimensionsstabilität und Kriechfestigkeit, ohne die HDT zu verändern. Die Temperatur muss 10–15 °C unter T_g bleiben, um Verformungen zu vermeiden; typische Zeitpläne liegen je nach Polymer bei 60–100 °C für 2–4 Stunden. Bei teilkristallinen Polymeren (PLA, PA, PP, PPA, PEEK) fördert das Tempern die Kristallinität – erhebliche Steigerungen bei HDT und Steifigkeit, Maßänderungen von 1–3 %, da sich die Polymerketten in geordnete Bereiche anordnen. Der Ablauf muss oberhalb von T_g , aber unterhalb T_m liegen. Details zu den einzelnen Polymeren finden sich in §3.6 und den Polymerkapiteln; die Ausnahme für ungefülltes PPA in §14.9 ist der wichtigste Vorbehalt (Verzug während der Wärmeeinwirkung überträgt sich auf das Endprodukt).

26.5 Montage: Kleben, Befestigen, Einsätze

Beim Lösungsmittelschweißen werden beide Fügeflächen in einem kompatiblen Lösungsmittel aufgelöst, das anschließend verdampft und eine durchgehende Polymerverbindung hinterlässt. Funktioniert bei ABS (Aceton), PC (DCM) und PMMA (DCM oder spezielle Acryllösungsmittel). **Die Klebeverbindung** deckt alles andere ab: Cyanacrylat (CA) für die schnelle Montage der meisten polaren Polymere; Epoxid (2K) für hochfeste strukturelle Verbindungen; Polyurethan für Verbindungen zwischen Elastomeren und starren Materialien; spezielle Polyolefin-Klebstoffe (Loctite Plastic Bonder, 3M 4298UV-Primer + CA) für die Verklebung von PP und PE. **Mechanische Befestigung** umgeht das Klebstoffproblem vollständig: thermisch verfestigte Gewindeeinsätze (Messingeinsätze mit gerändelter Außenseite, die in den gedruckten Kunststoff greifen) funktionieren bei PLA, PETG, PCTG, ABS, ASA, PC, Nylons – jedem Polymer mit einem angemessenen Schmelzbereich. Selbstschneidende Schrauben eignen sich für faserverstärkte Filamente, bei denen die Matrix die Gewinde zuverlässig festhält. **Press- und Schnappverbindungen** nutzen die polymerspezifische Elastizität: PETG, PCTG, PP und Nylons halten Schnappverbindungen über viele Zyklen hinweg; PLA und PC brechen eher, als dass sie nachgeben.

27. Kosten- und Beschaffungslandschaft

Die Filamentkosten erstrecken sich über vier Größenordnungen bei den in diesem Band behandelten Polymeren – von 15 \$/kg für handelsübliches PLA bis zu 500 \$/kg für PEEK-CF. Die Kostenstruktur bestimmt die Beschaffungsstrategie ebenso stark wie die technischen Spezifikationen.

27.1 Preisstufen (Anfang 2026, 1 kg / 1,75 mm im Einzelhandel)

Stufe	Spanne (\$/kg)	Repräsentative Produkte
Standard	15–25	PLA, PETG, generisches ABS, generisches ASA, HIPS, generisches CoPA, preisgünstige Marken von eSun/Sunlu
Mittlere technische Kunststoffe	25–50	PCTG (Spectrum, 3D-Fuel, Fiberlogy), PolyMax PETG, PolyMax PC, Bambu PC, Prusament PETG, ASA-Premium-Marken, ungefülltes PA12
Technik	50–100	Prusament PC Blend, PA-CF (Polymaker, Bambu), TPU 95A Premium (NinjaTek, Polymaker), PVDF Einstiegsklasse
Spezial	100–250	PA-CF Premium, PPA-CF (Bambu, 3DXTech), PPS-CF, ESD-PC, FR-PC, PEBA (3DXTech, Forward AM), PVDF-Spezialtypen
Ultra	250–500+	PEEK, PEKK, PEI 1010-CF, Prusament PC Space Grade Black, TheraX PSU/PPSU, Spezialprodukte in Industriequalität

Tabelle 27.1 – Filament-Preisstufen (Einzelhandelspreise Anfang 2026; typische Abweichung von $\pm 20\%$ je nach Region und Abnahmemenge). Der Kostenunterschied von Standard- zu mittlerer Technik beträgt etwa das Doppelte; von mittlerer zu hoher Technik weitere 2 \times ; von hoher zu Spezialtechnik 3–5 \times ; von Spezial- zu Ultra-Technik weitere 2–4 \times . Beschaffungsentscheidungen sollten die Kostenstufe den verbindlichen Einschränkungen der Anwendung zuordnen.

27.2 Qualitätsmerkmale und Lieferantenauswahl

Drei beobachtbare Merkmale unterscheiden Qualitätshersteller von Herstellern im Niedrigpreissegment, oft zuverlässiger als der Preis allein:

Durchmessertoleranz. $\pm 0,02$ mm ist der Zielwert für Engineering-Grade bei 1,75-mm-Filament. $\pm 0,03$ bis $\pm 0,05$ mm sind für den Standardgebrauch akzeptabel; eine Toleranz von mehr als $\pm 0,05$ mm führt zu sichtbaren Schwankungen der Extrusionsrate im gedruckten Strang. **Chargenkonsistenz.** Anbieter, die Chargencodes veröffentlichen und über Chargen hinweg konsistente Farb- und mechanische Eigenschaften bieten, sind die erste Wahl für technische Anwendungen; Billigmarken weisen oft Farbabweichungen und mechanische Schwankungen von Charge zu Charge auf. **TDS-Tiefe.** Veröffentlichte TDS-Daten – insbesondere Zugfestigkeitswerte von gedruckten Proben, nicht nur Werte für den Harzrohstoff – unterscheiden technisch orientierte Anbieter von marketingorientierten. Die Tiefe und Spezifität des TDS korreliert stark mit der zugrunde liegenden Produktkonsistenz.

27.3 Programme für recycelte Inhaltsstoffe

Eine wachsende Zahl von Anbietern bietet Produkte mit Recyclinganteil an, die von den Herstellern in Bezug auf die wichtigsten technischen Kennzahlen als nahezu gleichwertig mit Neuware positioniert werden, obwohl unabhängige Vergleiche begrenzt sind und die Wiederaufbereitungshistorie jede einzelne Charge beeinflusst. **3D-Fuel ReFuel** verarbeitet postindustrielles PCTG wieder, wobei der Anbieter angibt, dass die Zugfestigkeitskurve nach ISO 527 der von neuem Pro PCTG erhalten bleibt. **Fiberlogy R PP** besteht zu 100 % aus Post-Consumer-/Post-Industrial-Polypropylen, dessen vom Anbieter dokumentierte mechanische Eigenschaften denen von neuem Fiberlogy PP entsprechen. **Braskem FL900PP-CF** verwendet zu 100 % recycelte Carbonfaser als Ausgangsmaterial in der PP-Matrix. **Polymaker PolyTerra PLA** ist CO₂-kompensiertes PLA, das auf Papier statt auf Kunststoffspulen geliefert wird. **Fillamentum Porthcurno / Fishy Filaments** bietet aus dem Meer geborgenes PP-GF an. Diese Produkte stellen einen echten Fortschritt gegenüber reinem Neufilament dar; betrachten Sie sie als marginale Verbesserungen gegenüber der Mainstream-Beschaffung und nicht als Freibrief für verschwenderisches Drucken.

27.4 Beschaffungsstrategie nach Anwendungsfall

Hobbyisten oder Gelegenheitsnutzer: Halten Sie sich an Standard- und mittlere technische Materialien (PLA, PETG, PCTG, einfache PC-Mischungen, TPU 95A) sowie ein oder zwei preisgünstige Marken und eine Marke aus dem technischen Bereich als Referenz. Kaufen Sie 1-kg-Spulen; Großabnahmen lohnen sich nur, wenn das Druckvolumen dies rechtfertigt. **Makerspace oder Prototypenwerkstatt:** Standardisieren Sie auf Marken der technischen Klasse (Prusament, Bambu, Polymaker, Spectrum) für vorhersehbare Ergebnisse; die Budgetklasse als zweite Option für kosmetische Arbeiten. Großpackungen mit 2,5-kg-Spulen und 5-kg-Nachfüllpackungen sind kostengünstig. **Technische Qualifizierung oder Produktionsarbeiten:** Marken der Spezial- und Technikklasse mit veröffentlichten TDS-Daten sind obligatorisch; der Großeinkauf bestimmter Chargencodes gewährleistet die Wiederholbarkeit. Der höhere Preis ist in der Regel lohnenswert für Teile, die getestet oder zertifiziert werden sollen.

28. Tribologische Filamente

Tribologische Filamente sind für Teile konzipiert, deren entscheidende Einschränkung der Verschleiß an einer beweglichen Schnittstelle ist – Zahnräder, Buchsen, Nocken, Gleitführungen, Lagerflächen, Führungen. Der relevante Versagensmodus ist nicht Bruch unter Belastung oder Kriechen bei Temperatur, sondern der allmähliche Verlust von Material und Maßgenauigkeit durch die Reibung zweier Oberflächen. Die in diesem Kapitel behandelten Polymere werden an anderer Stelle im Band unter ihren chemischen Familien behandelt – iglidur-Tribograde basieren auf PA (Kapitel 13), PC/PTFE ist ein Polycarbonat-Verbundwerkstoff (Kapitel 15), POM bildet eine eigene Familie (Kapitel 17) – doch der tribologische Anwendungsfall erstreckt sich über alle diese Werkstoffe hinweg, weshalb ihm ein übergreifendes Kapitel gewidmet ist, anstatt ihn einer einzelnen Polymerfamilie zuzuordnen. Dieses Kapitel fasst die Optionen für verschleißfeste Typen zusammen und vermittelt das erforderliche Vokabular, um zwischen ihnen zu wählen.

28.1 Eine kurze Einführung in die Tribologie

Vier Parameter entscheiden darüber, ob ein gedrucktes Teil in einer Verschleißanwendung bestehen kann. Die Auswahl eines Tribo-Filaments ohne Verständnis dieser Parameter ist reine Spekulation.

Reibungskoeffizient (COF). Das Verhältnis von Reibungskraft zu Normalkraft an einer Gleitfläche, angegeben als dynamischer Wert (Gleiten) und statischer Wert (Anlaufreibung). Ein niedriger COF bedeutet weniger Widerstand, weniger Reibungswärme und weniger Energieverlust im Mechanismus. Technische Tribopolymere erreichen dynamische COF-Werte von 0,10–0,25 gegenüber trockenem Stahl; ungefüllte technische Polymere wie PA6 oder PETG liegen bei 0,30–0,45. Der COF ist keine feste Materialkonstante – er hängt vom Gegenmaterial, der Oberflächenbeschaffenheit, der Belastung, der Gleitgeschwindigkeit und der Temperatur ab –, daher sind die COF-Werte der Hersteller vergleichende Indikatoren und keine zulässigen Konstruktionswerte.

Verschleißrate (spezifische Verschleißrate, k). Das Materialvolumen, das pro Einheit der Gleitstrecke pro Einheit der Normalkraft verloren geht, mit SI-Einheiten von $\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$. Es ist das direkteste Maß dafür, wie lange ein Verschleißteil halten wird. Tribologisch optimierte Polymere weisen k-Werte auf, die ein bis zwei Größenordnungen unter denen ihres ungefüllten Basis-Harzes liegen. Ein Teil, das über seine Lebensdauer 0,05 mm Wandstärke verliert, ist funktionsfähig; dasselbe Teil aus einem Material mit hohem k-Wert verliert 0,5 mm und versagt aufgrund von Spiel oder Spielraum.

PV-Grenze. Das Produkt aus Kontaktdruck (P) und Gleitgeschwindigkeit (V) definiert die thermomechanische Belastungsgrenze eines Gleitteils. Jedes Tribopolymer hat eine PV-Grenze, oberhalb derer die Reibungswärmeentwicklung die Wärmeabfuhr übersteigt, die Kontaktfläche erweicht und sich der Verschleiß katastrophal beschleunigt. Die PV-Grenze ist der Grund, warum eine Buchse, die bei niedriger Drehzahl kühl läuft, bei hoher Drehzahl unter derselben Belastung versagt. Verschleißteile sollten so ausgelegt werden, dass sie deutlich unterhalb der angegebenen PV-Grenze arbeiten; FDM-gedruckte Teile sollten weiter heruntergestuft werden, da die Porosität der Schichtlinien die Wärmeleitfähigkeit verringert und die effektive Kontaktfläche geringer ist als bei einem geformten Äquivalent.

Gegenfläche und Schmierverhalten. Die tribologische Leistung ist eine Eigenschaft des Paares, nicht des Polymers allein. Ein Polymer, das gegen gehärteten Stahl gleitet, verhält sich anders als dasselbe Polymer gegen Aluminium, gegen ein anderes Polymer oder gegen sich selbst. Trockenlaufende (selbstschmierende) Tribopolymere werden mit Festschmierstoffen formuliert – PTFE, Silikon, Graphit oder Molybdändisulfid, die in der Matrix dispergiert sind – sodass sie kein zusätzliches Fett oder Öl benötigen; dies ist der vorherrschende Anwendungsfall für gedruckte Verschleißteile, da aufgetragenes Schmiermittel Schmutz anzieht und viele gedruckte Mechanismen im Betrieb nicht nachgeschmiert werden können. Der Betrieb unter Schmierung (mit Fett oder Öl) verringert den Verschleiß weiter, entspricht jedoch selten der Konstruktionsabsicht für FDM-Teile. Polymer-auf-Polymer-Paare sollten unterschiedliche chemische Zusammensetzungen aufweisen – beispielsweise POM gegen PA –, da identische Polymere bei Gleitkontakt dazu neigen, zu fressen und Material durch Adhäsion zu übertragen.

Ein für FDM spezifischer Hinweis zur Anisotropie. Eine gedruckte Verschleißfläche ist nicht isotrop. Schichtlinien erzeugen eine gerichtete Textur; das Gleiten quer zu den Schichtlinien führt zu einem anderen Verschleiß als das Gleiten entlang dieser Linien, und eine durch die oberste oder unterste Schicht gebildete Oberfläche unterscheidet sich von einer durch die Randwände gebildeten. Richten Sie das Teil nach Möglichkeit so aus, dass die Verschleißfläche durch eine glatte Randextrusion statt durch abgestufte Schichtstreifen gebildet wird, und

rechnen Sie mit einer Einlaufphase, in der hohe Unebenheiten abgetragen werden, bevor die stationäre Abnutzungsrate erreicht ist.

28.2 Übersicht über Filamente für Verschleißanwendungen

Der für Hobbyanwender zugängliche Markt für tribologische Filamente lässt sich in vier Gruppen einteilen: spezielle Tribopolymer-Compounds (die igus iglidur-Filamentfamilie), PTFE-modifizierte Verbundwerkstoffe aus ansonsten konventionellen Polymeren, reines POM und die kohlefaserverstärkten technischen Typen, die Verschleißfestigkeit als Nebeneffekt ihrer Steifigkeit bieten.

Filament	Basis / Typ	Tribologische Eigenschaften	Beste Anwendung
igus iglidur I150	Tribopolymer auf PA-Basis mit Festschmierstoff	Trockenlauf; geringer Verschleiß gegenüber Stahl und gegenüber sich selbst; FDA-konforme Ausführung	Zahnräder, Buchsen, Gleitteile im Lebensmittelbereich oder im allgemeinen Einsatz
igus iglidur I180	Tribopolymer, Typ mit höherer Zähigkeit	Trockenlauf; bessere Schlagfestigkeit als I150; etwas höherer Reibungskoeffizient	Verschleißteile, die zudem Stoßbelastungen oder Vibrationen ausgesetzt sind
igus iglidur RW370 / J-Klasse	Hochtemperatur- und Spezial-Tribopolymer-Typen	Trockenlauf; erweiterter PV-Bereich oder Temperaturbereich je nach Typ	Verschleißteile bei erhöhten Temperaturen oder höheren PV-Werten, als I150 zulässt
PC/PTFE (z. B. Spectrum)	Polycarbonatmatrix + dispergiertes PTFE	Niedriger Reibungskoeffizient durch die PTFE-Phase; PC-Matrix trägt strukturelle Last und Wärme	Lasttragende Verschleißteile, die zudem eine Steifigkeit der PC-Klasse und HDT erfordern
POM (Acetal – Gizmo Dorks, 3D-Fuel)	Reines Polyoxymethylen	Niedriger Reibungskoeffizient, ausgezeichnete Ermüdungsbeständigkeit, geringer und stabiler Verschleiß; kein Festschmierstoffzusatz erforderlich	Zahnräder, Nocken, reibungsarme Mechanismen; das Standardmaterial für gedruckte Zahnräder
PETG-PTFE	PETG-Matrix + dispergiertes PTFE	Niedrigerer Reibungskoeffizient als reines PETG; mäßige Verbesserung der Verschleißfestigkeit; leicht zu drucken	Leicht beanspruchte Gleitbauteile, bei denen die Druckbarkeit von PETG gefragt ist und die Belastungen gering sind
PA-CF-Verschleißklassen	Kohlefaserverstärktes Nylon (PA6-CF, PA12-CF)	Verschleißfestigkeit als Nebenwirkung der Fasersteifigkeit; abrasiv gegenüber der Gegenfläche	Steife Strukturteile mit gelegentlichem Verschleiß; nicht die erste Wahl für reine Buchsen
PA + Festschmierstoff-Mischungen	Nylon, gemischt mit PTFE, MoS ₂ oder Graphit	Trockenlauf; hinsichtlich Verschleiß zwischen reinem PA und speziellen Tribopolymeren	Allgemeine Verschleißteile, für die kein spezielles Tribopolymer verfügbar ist

Tabelle 28.1 – Für Hobbyanwender zugängliche tribologische Filamente. Die igus iglidur-Filamentfamilie ist die einzige Gruppe, die speziell und ausschließlich für Verschleißanwendungen entwickelt wurde; die anderen bieten tribologische Leistung entweder als PTFE-Additivmodifikation (PC/PTFE, PETG-PTFE) oder als inhärente Eigenschaft des Basispolymers (POM) oder der Verstärkung (PA-CF). Die Wahl einer CF-verstärkten Sorte für eine reine Buchsenanwendung ist ein häufiger Fehler – die Faser, die für Steifigkeit sorgt, schleift auch die darin laufende Metallwelle ab.

Die iglidur-Filamentfamilie ist igus' Adaption seiner geformten Tribopolymer-Buchsenwerkstoffe in Form von FDM-Filamenten. Die Typen tragen die gleiche Bezeichnung wie die Produktreihen für Formteile und Stangenmaterial: I150 ist der Allzweck-Trockenlauf-Typ und der am häufigsten vorrätige; I180 tauscht ein wenig Verschleißfestigkeit gegen deutlich bessere Zähigkeit ein; Spezialtypen erweitern den Temperatur- oder PV-Bereich. Alle sind für den Trockenlauf ausgelegt – das Festschmiermittel ist im Polymer verteilt, sodass ein frisch gedrucktes Teil selbstschmierend ist und kein Einlaufschmierfett benötigt wird. iglidur-Filament ist die technische Standardlösung, wenn Verschleiß die primäre Konstruktionsanforderung ist und das Teil keine hohen strukturellen Belastungen tragen muss.

PTFE-modifizierte Verbundwerkstoffe – PC/PTFE und PETG-PTFE – basieren auf einem herkömmlichen Matrixpolymer, in das PTFE dispergiert wird, um den Reibungskoeffizienten zu senken. Sie sind nicht gleichwertig. PC/PTFE behält die Steifigkeit, Schlagzähigkeit und den Einsatzbereich von ~110–140 °C des Polycarbonats bei, sodass es sich für Verschleißteile eignet, die auch Lasten tragen oder Hitze ausgesetzt sind; es erfordert ein Vollmetall-Hotend und die Prozessdisziplin der PC-Klasse gemäß §15.7. PETG-PTFE ist ein Material für leichte Beanspruchung – es lässt sich so einfach drucken wie PETG und senkt die Reibung sinnvoll, doch die Verschleißverbesserung gegenüber reinem PETG ist bescheiden, und die PETG-Matrix beschränkt es auf geringe Belastungen und den Einsatz bei nahezu Raumtemperatur. Behandeln Sie PETG-PTFE als praktisches Mittel zur Reibungsreduzierung, nicht als echtes Lagermaterial.

POM verdient seinen Ruf als Standardmaterial für gedruckte Zahnräder. Es bietet einen niedrigen und stabilen Reibungskoeffizienten, eine ausgezeichnete Ermüdungsbeständigkeit unter zyklischer Zahnbelastung und eine geringe Abnutzungsrate ohne Festschmierstoffzusätze – das tribologische Verhalten ist der Acetal-Chemie inhärent. Die Nachteile werden in §17.2 behandelt: schwierige Haftung auf dem Druckbett und eine echte Gefahr durch Formaldehydemissionen, die eine Belüftung erforderlich macht. Wo diese Probleme bewältigt werden können, übertrifft POM jedes PTFE-modifizierte Verbundmaterial bei Zahnrad- und Nocken Anwendungen. POM gegen PA – Acetal-Zahnrad auf einem Nylon-Zahnrad oder Acetal auf einer iglidur-Buchse – ist eine besonders gute Polymer-auf-Polymer-Kombination, da die unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen ein Festfressen verhindern.

28.3 Auswahl und Konstruktion eines Verschleißteils

Passen Sie das Material an die vorherrschende Beanspruchung an. **Für Zahnräder und Nocken** – zyklischer Zahneingriff, mäßige Belastung, die Ausfallart ist Zahnverschleiß und zunehmendes Spiel – ist POM die erste Wahl, wobei iglidur I150 die Alternative ist, wenn die Anforderungen von POM an die Bettung oder Belüftung nicht erfüllt werden können. **Für Gleitbuchsen und Gleitlager** – bei denen es zu kontinuierlicher Reibung an einer Welle kommt und die Ausfallart Bohrungsverschleiß und zunehmendes Spiel ist – ist ein spezieller iglidur-Typ die technische Lösung; die Trockenlaufformulierung entspricht genau der Konstruktionsabsicht. **Für tragende Verschleißteile** – eine Gleitführung oder ein Verschleißpolster, das auch strukturelle Lasten trägt oder Hitze ausgesetzt ist – ist PC/PTFE die richtige Wahl, da die Polycarbonatmatrix eine Steifigkeit und thermische Spielraum bietet, die weder POM noch iglidur erreichen. **Für leicht belastete, reibungsarme Teile** – eine Schubladenführung, eine leicht belastete Führung, ein Teil, bei dem eine gleichmäßige Bewegung wichtiger ist als die Lebensdauer – ist PETG-PTFE geeignet und lässt sich am einfachsten drucken. **Vermeiden Sie CF-verstärkte Typen für reine Buchsen:** Die freiliegende Kohlefaser reibt an der metallischen Gegenfläche, und für diese Anwendung ist ein spezielles Tribopolymer besser geeignet.

Drei Konstruktionspraktiken verlängern die Lebensdauer gedruckter Verschleißteile erheblich. **Drucken Sie die Verschleißfläche von den Außenwänden aus, nicht von den Schichtstreifen** – richten Sie das Teil so aus, dass die Gleitfläche durch eine glatte Außenextrusion gebildet wird, was eine gleichmäßigere Oberfläche und eine geringere Verschleißrate im stationären Zustand ergibt. **Verwenden Sie eine hohe Wand- und Füllungsdichte in der Kontaktzone** – die innere Porosität unter einer Verschleißfläche verringert sowohl die Belastbarkeit als auch die Wärmeleitung und bringt das Teil schneller an seine PV-Grenze; eine massive oder nahezu massive Füllung unter den Lagerflächen ist das Material wert. **Berücksichtigen Sie die Einlaufphase** – gedruckte Verschleißflächen verlieren in den ersten Betriebsstunden starke Unebenheiten, bevor sie den stationären Verschleiß erreichen; dimensionieren Sie daher Spielräume unter Berücksichtigung einer geringen anfänglichen Maßänderung, und führen Sie bei kritischen Anwendungen einen gezielten Einlauf unter geringer Belastung durch, bevor das Teil voll in Betrieb genommen wird.

Querverweise: Die iglidur-Kalibrierungswerte finden sich in Anhang B und die Prozessrichtlinien für die PA-Familie in §13.5; der PC/PTFE-Prozess und die zwingende Anforderung eines Vollmetall-Hotends sind in §15.7 aufgeführt; die Haftung auf POM-Bett, die Gefahr durch Formaldehydemissionen und die Belüftungsanforderungen sind in §17.2 und §5.3 zu finden.

Anhänge

Vergleichstabellen zu den Eigenschaften von Copolymeren, die vom Autor im Labor gemessenen Kalibrierungsprofile für eine repräsentative Prosumer-Konfiguration, ein alphabetisches Markenverzeichnis mit Verweisen auf die Kapitel sowie die konsolidierte Quellenliste für die im gesamten Band zitierten Datenwerte.

Anhang A – Master-Vergleichstabelle der Eigenschaften von Kreuzpolymeren

Zusammengefasste Eigenschaftstabellen für alle Polymerfamilien in diesem Band. Die Werte entsprechen typischen FDM-Druckproben aus den technischen Datenblättern der Hersteller, wobei der Schwerpunkt auf Zugfestigkeits- und Elastizitätsmodulwerten in XY-Richtung liegt, sofern diese von den Anbietern veröffentlicht werden. Spezifische Filamentmarken und Chargen können innerhalb des Bereichs jedes Polymers um 10–25 % variieren. Für technische Entscheidungen bitte das jeweilige Kapitel zum jeweiligen Polymer heranziehen.

A.1 Thermischer Bereich

Polymer	T _g (°C)	T _m (°C)	HDT bei 0,45 MPa (°C)	Dauerbetrieb (°C)
PLA	55–65	150–170	55–60	50
PLA, gegläht (HTPLA)	55–65	150–170	~120	100
PETG	75–80	— (a)	70–75	60
PCTG	85–95	—	76–99	70
ABS	~105	—	90–98	80
ASA	~100	—	90–98	85
HIPS	90–100	—	85	70
PP ungefüllt	-10	160–170	85–100	60
PP-GF	-10	160–170	115–140	100
PP-CF	-10	160–170	115–160	100
PE / HDPE	-110	~130	50–60	60
PA6 (trocken)	~55	215–225	150–170	80
PA66 (trocken)	~70	255–265	180–200	100
PA12	~45	175–180	140–150	90
PA612	~50	210–220	150–160	100
PA11	~45	180–190	140–150	90
PPA (ungefüllt, Filament)	~80	~230–260	75–85	70
PPA-CF (Filament)	~80	~230–260	120–200 (c)	180
PC-Mischung (allgemein)	105–150	—	95–145	100
PC-CF	142+	—	140	130
ESD-PC	143	—	135–138	120

Polymer	T _g (°C)	T _m (°C)	HDT bei 0,45 MPa (°C)	Dauerbetrieb (°C)
PEI 9085-CF	186	—	180	170
PEI 1010-CF	217	—	210	200
PEEK	143	343	160 / 240 gegläut	250
PEKK-A (amorph)	~165	—	160	150
PPS-CF	~90	~280	200+	180
PMMA	80–110	—	94	70
POM	-60	165–180	100–120	90
PVDF	-35	165–175	110	120
TPU 95A	—	~200	50–70	70
TPEE 55D	—	~200	90–110	110
PEBA 40D	—	~200	80–95	90

Tabelle A.1 — Thermischer Bereich der in diesem Band behandelten Polymerfamilien. Die Dauerbetriebstemperatur entspricht der bewährten Praxis (T_g minus 20–30 °C für amorphe Polymere; T_m minus 60 °C für teilkristalline Polymere) — nicht der absoluten Obergrenze Grenze, die näher an T_g oder HDT liegt. Verwenden Sie diese Spalte für Lebensdauerberechnungen; verwenden Sie HDT für kurzzeitige thermische Belastungen. (a) PETG ist ein amorpher Copolyester ohne echten kristallinen Schmelzpunkt; es wird in einem Schmelz-/Verarbeitungsbereich von etwa 230–250 °C und nicht bei einem definierten T_m. (b) Die PEKK-Zeile bezieht sich auf die amorphe Sorte (PEKK-A); teilkristallines PEKK weist einen höheren Dauerbetriebsbereich von etwa 220–240 °C auf, wie in §19.4 erwähnt. (c) Die PPA-Zeilen geben druckbare Filament-Grade-Werte: Kommerzielle PPA-Filamente sind druckbarkeitsmodifizierte, halbaromatische Copolymere mit einem Schmelzpunkt nahe 230–260 °C, deutlich unter den 290–320 °C von reinen Hochtemperatur-PA6T/PA9T-Harzen. Die HDT von PPA-CF ist stark belastungs- und glühabhängig – etwa 120 °C bei 1,80 MPa, steigend auf ~200 °C bei 0,45 MPa nach dem Glühen –, daher sollte das Filament-Datenblatt unter Berücksichtigung der Testbedingungen gelesen werden.

A.2 Mechanische Eigenschaften (XY-Richtung, trocken, direkt nach dem Druck)

Polymer	Dichte (g/cm³)	Zugfestigkeit (MPa)	Modul (GPa)	Dehnung (%)	Kerbschlagzähigkeit (kJ/m²)
PLA	1,24	50–70	3–4	3–8	2–4
PETG	1,23–1,27	40–50	1,9–2,1	8–25	4–8
PCTG	1,18–1,23	44–58	1,5–1,6	~220	~8–24 (b)
ABS	1,0–1,1	30–45	~2	10–40	15–25
ASA	1,05–1,1	30–45	~2	10–35	15–25
PP ungefüllt	0,90–0,91	15–25	1,0–1,4	100–600	5–15
PP-GF (15–30 %)	1,05–1,15	30–50	2,0–3,0	3–10	7–12
PP-CF (15–30 %)	0,91–1,00	25–45	2,0–4,0	3–6	10–15

Polymer	Dichte (g/cm ³)	Zugfestigkeit (MPa)	Elastizitätsmodul (GPa)	Dehnung (%)	Kerbschlagzähigkeit (kJ/m ²)
PA6 trocken	1,13	70–85	2,0–3,0	30 / 5 (Z)	5–8
PA12	1,01	45–55	1,1–1,5	30–80	4–6
PA6-CF (15–25 %)	1,15	90–130	5–9	3–6	8–12
PPA-CF (15–20 %)	~1,20	120–170	6–10	2–5	6–10
PC-Mischung	~1,20	40–65	~2,0–2,5	6–80	50–80
PC-CF (10–15 %)	~1,25	64–76	~5	~3	15–30
PPS-CF (10–20 %)	~1,30	90–110	5–12	~2	~5
PEEK ungefüllt	1,30	90–100	3,5–4,0	30–50	5–7
PEEK-CF (15–30 %)	1,35	130–170	12–15	~2	5–8
PMMA	1,18–1,20	60–75	3,0–3,5	2–5	~2
POM	1,4	65–75	2,5–3,0	10–30	6–8
PVDF	1,75–1,80	35–50	1,5–2,5	50–200	10–15
TPU 95A	1,20–1,25	30–45	~0,05	400–600	—
PEBA 40D	1,01	35–55	~0,08	400–700	—

Tabelle A.2 — Mechanische Eigenschaften der verschiedenen Polymerfamilien. Verstärkte Typen (CF, GF) weisen die höchsten Steifigkeitswerte auf, jedoch die geringste Dehnung und Kerbschlagzähigkeit — der Kompromiss zwischen Sprödigkeit und Steifigkeit ist strukturell bedingt. Die Elastomermodulwerte werden niedrig angegeben, da sich das Polymer unter der Prüfkraft verbiegt; die Zugfestigkeit bleibt als relativer Maßstab nützlich, auch wenn die Dehnung bei Elastomeranwendungen dominiert. (b) Die Kerbschlagzähigkeitswerte von PCTG variieren stark je nach Prüfverfahren (ISO 180 Izod vs. ISO 179 Charpy) und Druckausrichtung; der Bereich von ~8–24 kJ/m² umfasst die Werte aus den technischen Datenblättern der Hersteller am unteren Ende und unabhängig gemessene Proben mit flachem Druck am oberen Ende. Betrachten Sie diese Werte als ausrichtungs- und verfahrensabhängig, nicht als einen einzigen zulässigen Wert.

A.3 Verarbeitungsbereich

Polymer	Düse (°C)	Bett (°C)	Kammer	Trocknen	Ebene
PLA	200–220	50–60	keine	45–55 °C, 4–6 h (optional)	1
PETG	230–250	80–90	optional	60–70 °C, 4–6 h	1
PCTG	240–270	70–90	optional	65–70 °C, 4–6 h	1
ABS / ASA	240–270	95–110	geschlossen	60–70 °C, 4–6 h	2
PP-Familie	200–280	20–105	optional	ungefüllt: nicht erforderlich; GF/CF: 60–80 °C, 4–6 Std.	2
PA12 / 612 / 11	245–280	60–90	geschlossen	70–80 °C, 8–12 h	2

Polymer	Düse (°C)	Bett (°C)	Kammer	Trocknen	Ebene
PA6 / 66	260–290	90–110	passiv 40–50	80–90 °C, 10–16 h	2
PA-CF / GF	265–295	90–110	passiv 40–50	90–110 °C, 8–10 h	2
PPA (ungefüllt)	275–310	80–110	passiv 40–60	80–140 °C, 4–12 h (d)	3
PPA-CF / GF	280–320	90–120	aktiv 55–65	80–140 °C, 4–12 h (d)	3
PC-Mischung	270–290	100–115	passiv 40–50	80–100 °C, 6–8 h	2
PC-CF / GF / ESD	275–300	100–120	passiv 45–60	90–110 °C, 8–10 h	3
FR-PC	240–280	90–110	passiv 40–50	60–80 °C, 4–16 h	2
PPS-CF	320–350	110–120	aktiv 55–65	80–110 °C, 6–8 h	3
PEI-CF	350–390	140–155	aktiv 65	130–150 °C, 4–6 h	3–4*
PEEK / PEKK	380–440	140–155	aktiv 85+	120–130 °C, ≥4 h	4
PMMA	240–270	100–110	geschlossen	90 °C, 4–6 h	2
POM	210–230	100–115	optional + Belüftung	80 °C, 4–6 h	2
PVDF	230–250	90–110	optional	80 °C, 4–6 h	2
TPU / TPE	220–250	40–70	optional	50–65 °C, 4–6 h	1
TPEE	230–250	50–70	optional	65–75 °C, 6–8 h	1
PEBA	225–250	50–60	optional	70–80 °C, 6–8 h	2
PVA / BVOH	195–225	50–65	keine	45–60 °C, 8–12 h	1
PVB	215±10	70–80	keine	45 °C, 8 h	1

*Tabelle A.3 – Prozessbereich und Hardware-Stufen für die verschiedenen Polymerfamilien. Die Spalte „Stufe“ entspricht den Hardware-Definitionen in §4: Stufe 1 – Standard-Desktop, Stufe 2 – Engineering-Desktop, Stufe 3 – Engineering mit aktiver Kammer, Stufe 4 industrieller Einsatz bei extrem hohen Temperaturen (über den Prosumer-Bereich hinaus). Die Auswahl von Filamenten außerhalb der Leistungsfähigkeit der jeweiligen Hardware-Stufe führt zu unzuverlässigen Ergebnissen. *PEI-CF liegt an der Grenze zwischen Stufe 3 und Stufe 4: Es lässt sich in einer aktiven Kammer der Stufe 3 drucken, aber seine Betttemperatur von 140–155 °C und seine Düsentemperatur von 350–390 °C überschreiten den in §4 definierten Bereich der Stufe 3 (Bett ≤ 120 °C) und erfordern thermische Hardware der Stufe 4. Behandeln Sie es als Grenzfall, nicht als Standard der Stufe 3. (d) Die Trocknungsempfehlungen für PPA variieren je nach Marke: Der obere Bereich (~140 °C, 8–12 h) eignet sich für PPA-Typen mit höherem Schmelzpunkt wie Bambu PPA-CF, während die für bessere Druckbarkeit modifizierten Typen wie Siraya Fibreheart PPA eine mildere Trocknung bei 80–100 °C für 4–6 h vorsehen und eine Trocknung nur dann als notwendig erachten, wenn Anzeichen von Feuchtigkeit auftreten. Befolgen Sie das Datenblatt der jeweiligen Spule und nicht einen allgemeinen Zeitplan für die Produktfamilie.*

Anhang B – Beispiele für kalibrierte Filamentprofile

Im Labor gemessene Kalibrierungswerte für bestimmte Filamente, erfasst auf einer repräsentativen Prosumer-Anlage als Anwendungsbeispiele für den Kalibrierungsablauf in §23. Diese Werte sind **gemessen** und nicht vom Hersteller bereitgestellt; sie sollten als Ausgangspunkte für die Neukalibrierung auf der tatsächlichen Hardware des Lesers und nicht als universelle Werte betrachtet werden. Eine Abweichung von 5–10 % zwischen den einzelnen Spulen bei EM und PA ist innerhalb derselben Marke und Farbe normal.

B.1 Referenz-Hardwarekonfiguration

Alle unten aufgeführten Werte wurden auf einem einzelnen geschlossenen CoreXY-Prosumer-Drucker mit einer 0,4-mm-Düse mit gehärteter Spitze (PCD-Spitze für die CF-verstärkten und abrasiven Typen, gehärteter Stahl für die ungefüllten technischen Polymere) in einer Konfiguration mit aktiver Kammer gemessen, die eine Umgebungstemperatur von 45–55 °C ermöglicht. Vor jeder Kalibrierung wurde eine Trocknung pro Spule gemäß dem Protokoll in §3.5 durchgeführt. Die hier beschriebenen Kalibrierungen verwendeten die Califlower Mk2 XY-Schrumpfungsmethodik und die in §23.4 beschriebene EM-Methode zur Wandmessung an 12 Proben. Wenn eine andere Düsendgröße verwendet wurde (0,6 mm High-Flow), ist dies im Eintrag zum jeweiligen Profil vermerkt.

B.2 Kalibrierte Profile (Technische Kunststoffe)

Filament	Düse (°C)	Bett (°C)	Max. Vol. (mm³/s)	EM	PA	XY Schrumpfung (%)
Prusament PC Blend	275	110	~10	1,045	0,025	—
Prusament ASA (in Bearbeitung)	260	105	9,5	1.030	ausstehend	ausstehend
Kexcelled K8 PC	270	105	~10	1,049	0,045	—
3D-Fuel Pro PCTG	265	85	~10	0,937	0,053	0,20
Spectrum PCTG Mattschwarz CF (0,4 mm)	245	85	11	0,960	abgestimmt	0,20
Overture Easy Nylon (CoPA)	245	50	11	1,000	0,030	0,25
Polymaker Fiberon PA6-CF20	290	95	~9	0,898	abgestimmt	0,20
iglidur I150-PF (PA6 tribologisch)	245	60	4	1,030	0,01–0,06	—
Siraya Tech TPU 64D	260	45	5	0,970	abgestimmt	—

Tabelle B.1 — Im Labor gemessene Kalibrierungsprofile für eine Düse mit 0,4-mm-PCD-Spitze oder aus gehärtetem Stahl. Die Bettoberfläche variiert je nach Polymerfamilie gemäß §24; die oben genannten Werte gehen von der in diesem Kapitel empfohlenen Bettoberfläche aus. Das Prusament-ASA-Profil befindet sich zum Zeitpunkt der Erstellung noch in Arbeit; Druckvorlauf und XY-Schrumpfung stehen noch aus.

B.3 Kalibrierte Profile (0,6-mm-Hochleistungsdüse)

Filament	Düse (°C)	Bett (°C)	Kammer (°C)	Max. Vol. (mm³/s)	EM	PA
Overture ASA (0,6 mm HF)	265	95	45	14	abgestimmt	0,025
Polymaker Fiberon PET-GF15 (0,6 mm HF)	290	80	55–60	13	abgestimmt	0,030
Polymaker Fiberon PPS-CF10 (0,6 mm Diamondback)	350	120	55–65	~10	abgestimmt	abgestimmt

Tabelle B.2 – 0,6-mm-High-Flow-Profil, bei denen anstelle der Standarddüse von 0,4 mm die größere Düse verwendet wurde. Einstellungen für den Überhang-Lüfter: 40 % für PET-GF15 (reduziert das Fadenziehen bei der High-Flow-Konfiguration mit längerer Schmelze); 0 % für ASA und PPS-CF (die Haftung zwischen den Schichten reagiert bei dieser Düsengröße empfindlich auf Abkühlung).

B.4 Hinweise zum Arbeitsablauf

Der Druckvorschub sollte am besten pro Filament gespeichert werden und nicht als ein einziger maschinenweiter Wert, damit die richtige Kompensation mit dem Material mitwandert, anstatt eine manuelle Neujustierung zwischen den Filamenten zu erfordern. Die meisten Firmware-Implementierungen bieten eine Möglichkeit, dies zu tun: einen filamentbezogenen Start-G-Code-Befehl (zum Beispiel `M900 K...` bei Marlin, `M572 D0 S...` bei RepRapFirmware und Prusa Buddy-Firmware oder das `SET_PRESSURE_ADVANCE`-Makro bei Klipper) oder ein filamentbezogenes Feld im Slicer-Profil bei Druckern, die den Wert in der Firmware verwalten. Die oben genannten Profile wurden mit dem Wert im Filament-Start-G-Code erfasst; der Leser sollte den Mechanismus verwenden, den seine eigene Firmware und sein Slicer bereitstellen. Die Schräglagenkorrektur, bei der der Rahmen als nicht rechtwinklig gemessen wird, wird entweder in der Firmware oder als G-Code-Nachbearbeitungsschritt angewendet und anhand eines gedruckten Schräglagen-Kalibrierungsmodells validiert; der Restwert nach der Korrektur bei der Referenzaufstellung lag unter 0,02°. Die Z-Schrumpfkompensation wurde bei den meisten Profilen bewusst übersprungen, bei denen die Maßgenauigkeit der Z-Achse bereits innerhalb der technischen Toleranz für die beabsichtigte Anwendung lag; eine Messung lohnt sich nur dort, wo hohe Teile ein enges Z-Maß einhalten müssen.

Anhang C – Markenverzeichnis

Alphabetisches Verzeichnis der in diesem Band genannten Filamentmarken mit ihren primären Produktfamilien und den Kapitelverweisen, in denen sie vorkommen. Marken, die nur in einem Kapitel behandelt werden, sind einmal aufgeführt; Marken, die mehrere Polymerfamilien umfassen, sind mit Angabe der primären Anwendungssachse aufgeführt.

Marke	Hauptproduktfamilien	Kapitel
3D-Fuel	Pro PCTG (Tritan), ReFuel PCTG, PETG, PLA	6, 7, 8
3DXTech	CarbonX (PEEK, PEKK, PEBA, PA6-CF, PC-CF, PPS-CF, HTN, PETG-CF); ThermoX (PEEK, PEKK, PEI 9085-CF, PEI 1010-CF, PSU, PPSU); FluorX PVDF; 3DXSTAT ESD-Safe PC; FibreX PPA+GF15	13, 14, 15, 16, 17, 18, 19
American Filament	PCTG, PETG (Schwerpunkt Lebensmittelkontakt in den USA)	8
AzureFilm	PC-ABS, PETG, PLA, ABS (europäische Budget-Klasse)	15
Bambu Lab	PC, PC FR, PPS-CF, PPA-CF, PAHT-CF, PA6-CF, PA6-GF, TPU 95A, TPU für AMS, Support W	13, 14, 15, 16, 18, 20
BCN3D	PAHT CF15, BVOH; hauptsächlich für das BCN3D-Drucker-Ökosystem	14, 20
Braskem	FL900PP-CF (recyceltes CF), FL500PP-GF, FL100PP, FL105PP, FL300PE	11, 12
colorFabb	LW-PLA, PLA/PHA, allPHA, nGen-Copolyester	6, 7, 21
Crealify	Generische „Nylon“-Artikelnummern (auf CoPA-/PA6-Basis), preisgünstige technische Filamente	13
eSun	PVA, eTPU-95A, generisches Nylon (CoPA), generische technische Filamente (günstige Preisklasse)	13, 16, 20
Essentium	PCTG (Tritan)	8
Fiberlogy	PCTG, Nylon PA12, PA12-GF, PP, R PP (recycelt), Inox metallgefüllt	7, 8, 11, 13
Fillamentum	PP 2320, Porthcurno PP-GF (aus dem Meer geborgen), NonOilen PLA/PHA, PMMA	11, 17, 21
Flashforge	PPS-CF (LUVOCOM), PPA-CF, PEEK (eingeschränkt)	14, 18, 19
FormFutura	AthenaX (PCTG-Klasse), ApolloX (ASA), TitanX (ABS), Centaur PP, Atlas Support	7, 10, 11, 20
Forward AM (BASF)	Ultrafuse PC/ABS FR, PC GF30, TPU 64D/85A/95A, PEBA	15, 16
Gizmo Dorks	Acetal (POM)	17
Kexcelled	K8 PC, PLA der K-Klasse und technische Typen	15
Nanovia	PC-Familie (PC-CF- und PC-ABS-Varianten); französische Spezialität	15
NinjaTek	NinjaFlex 85A, Cheetah 95A, Armadillo 75D	16
Nobufil	PCTG, farbenorientiertes europäisches Spezialprodukt	8
Overture	Easy Nylon (CoPA), ASA, PETG, generische technische Kunststoffe	10, 13

Marke	Hauptproduktfamilien	Kapitel
Polymaker	PolyMax PC, PolyLite PC, PC-ABS, PC-PBT, PolyMide CoPA, Fiberon PA6-CF20, PA612-CF15, PA6-GF25, PPS-CF10, PolyFlex TPU, PolyMax TPU, PolyDissolve S1, PolyTerra PLA, PolyMax PETG	6, 7, 13, 15, 16, 18, 20
PPprint	P-Filament 721, P-Support 279, P-Surface 141 (PP-System)	11
Prusament	PC Blend, PC Blend CF, PC Space Grade Black, ASA, PETG, PVB, PA11-CF Carbon Fiber, PP CF, PP GF, PLA	6, 7, 10, 11, 13, 15, 21
Qidi	PAHT-CF / PAHT-GF (auf PPA-Basis)	14
Raise3D	Industrielles PPA CF, PPA GF, abbrechbares PPA-Stützmaterial	14
Recreus	FilaFlex 60A/70A/82A/95A, PP3D, PP-GF	11, 16
SainSmart	TPU 95A, generische flexible Materialien (Preissegment)	16
Siraya Tech	Fibreheart PPA, PPA-CF, PPA-CF Core, Mecha PA6-CF, NylonPro CoPA, TPU 64D, Pro Flex 85A, geschäumte TPU-Produktreihe, geschäumtes PLA „Mushroom“	13, 14, 16
Spectrum	Premium PCTG, PCTG CF10, PCTG GF, HDPE, PC CF, PC/PTFE, PC/ABS FR V0, PMMA, ABS, ASA, PLA	7, 8, 10, 12, 15, 17
Sunlu	TPU 95A, PETG, PLA, generisches Nylon (Einstiegsklasse)	7, 11, 13, 16
Tangled Filament	PCTG (aggressive Preisgestaltung)	8
Wörtlich	Primalloy PVA, BVOH	20

Anhang D – Zusammengefasste Referenzen

Quellenverzeichnis für die im gesamten Band zitierten Datenwerte, Methoden und Referenzen. Gemäß dem redaktionellen Grundsatz in §1.3 lautet die Zitierhierarchie: an erster Stelle das Datenblatt des Filamentherstellers, an zweiter Stelle das Datenblatt des Harzherstellers, an dritter Stelle peer-reviewte Literatur und unabhängige Tests, wobei Marketingmaterialien der Anbieter an das Ende der Quellenliste verwiesen werden. Sofern ein stabiler, kanonischer Speicherort existiert, wird die URL unten zusammen mit dem Datum der letzten Überprüfung (Mai 2026) angegeben. Technische Datenblätter für Filamente werden versioniert, und ihre Dokumentpfade ändern sich mit Aktualisierungen der Anbieter-Websites; für diese wird die offizielle Domain des Herstellers als stabiler Einstiegspunkt angegeben, anstatt eines Deep-Links, der veralten wird, und der Leser sollte davon ausgehen, dass das aktuelle TDS alle hier zitierten Zahlen ersetzt. Diese Liste erhebt keinen Anspruch auf die Herkunft der Versionen für einzelne Angaben: Einzelne numerische Werte wurden aus derjenigen TDS-Revision entnommen, die während der Erstellung aktuell war, und diese Revision ist nicht immer wiederauffindbar. Behandeln Sie die Zahlen in diesem Band als Ausgangspunkte, die anhand der aktuellen Herstellerangaben überprüft werden müssen, genau wie in §1.3 und im Vorwort angegeben.

D.1 Unabhängige Testdatensätze

MyTechFun-Datenbank für vergleichende Filamenttests. Ein unabhängig zusammengestellter Datensatz mit Zugfestigkeits-, Schichthaftungs- und thermischen Messungen für eine große Anzahl von Filamenten, getestet auf einer einzigen Referenzmaschine mit einheitlicher Testgeometrie. Er dient als nützliche markenübergreifende Plausibilitätsprüfung der von den Herstellern in den TDS veröffentlichten Werte. Die Datenbank ist Eigentum ihres Autors und wird an die Patreon-Unterstützer des Projekts weitergegeben; die spezifischen Messwerte werden in diesem Band nicht wiedergegeben. Leser, die die zugrunde liegenden Zahlen wünschen, sollten diese direkt vom MyTechFun-Projekt (mytechfun.com und dem zugehörigen Patreon) unter den Bedingungen dieses Projekts beziehen. In §13.7 und §14.11 werden allgemein die Muster erörtert, die solche unabhängigen Tests offenbaren – in Datenblättern überbewertete Steifigkeit der gedruckten Teile und je nach Testmethode abweichende Wärmewerte –, ohne dass Zahlen aus der Datenbank zitiert werden.

Fehlerbehebungsanalyse der Prosumer-Drucker-Community. Die statistische Analyse des Autors von ~910 von der Community gemeldeten Fehlerbehebungs-Threads zu einem einzelnen Prosumer-Druckermodell, klassifiziert in 15 Problemkategorien. In den Polymerkapiteln als empirische Grundlage für die relative Häufigkeit von Fehlermodi (VFA, Verlust der Schichthaftung, Bettadhäsion, Verziehen) über Polymerfamilien hinweg zitiert. Methode und Klassifikator sind in der veröffentlichten Abhandlung des Autors dokumentiert; siehe den Revisionshinweis in D.5, wo Errata und Begleitmaterial nachverfolgt werden.

Methodik zur Dimensionskalibrierung des Califlower Mk2. Eine XY-Schrumpfungstestgeometrie mit mehreren Merkmalen, die zusammen mit der in diesem Band verwendeten Kalibrierungsmethodik in Community-Modell-Repositorien veröffentlicht wurde. Bietet sowohl externe als auch interne Dimensionsprüfungen zur Abstimmung der Schrumpfungskompensation. Das Modell und die begleitenden Methodikhinweise sind im Printables-Profil des Autors veröffentlicht (Zugriff im Mai 2026).

D.2 Technische Datenblätter der Hersteller

Die TDS-Daten für Filamente stammen aus den von den Herstellern auf ihren offiziellen Websites und Händlerportalen veröffentlichten Dokumenten. Die wichtigsten Herstellerreferenzen, die in diesem Band verwendet werden:

Hersteller	Produktfamilien mit zitierten TDS-Daten
3D-Fuel	Pro PCTG, ReFuel PCTG
3DXTech	CarbonX, TheraX, FluorX, 3DXSTAT-Produktfamilien
AzureFilm	PC-ABS

Hersteller	Produktfamilien mit angegebenen TDS-Daten
Bambu Lab	PC, PC FR, PPA-CF, PAHT-CF, PA6-CF, PA6-GF, TPU 95A
Braskem	FL900PP-CF, FL500PP-GF, FL100PP, FL105PP, FL300PE
Eastman	Tritan TX1001-Harz TDS (grundlegende PCTG-Referenz)
Fiberlogy	PCTG, PA12, PP, R PP
Fillamentum	PP 2320, PLA-PHA NonOilen
Forward AM (BASF)	Ultrafuse PC/ABS FR, PC GF30, TPU, PEBA
NinjaTek	NinjaFlex, Cheetah, Armadillo
Polymaker	PolyMax PC, PC-ABS, PC-PBT, Fiberon PA, PolyDissolve, PolyTerra, PolyMax PETG
PPprint	P-Filament 721, P-Support 279
Prusament	PC Blend, PC Blend CF, PC Space Grade, ASA, PETG, PVB, PA11-CF, PP CF, PP GF, PLA
Recreus	FilaFlex-Produktlinie
Siraya Tech	Fibreheart PPA/PPA-CF/PPA-CF Core, TPU 64D, Schaumstoff-Produktlinie
Spectrum	PCTG, PC CF, PC/PTFE, PC/ABS FR V0, HDPE, PMMA

Tabelle D.1 – Quellen für Hersteller-TDS nach Filamentfamilie. Jeder Hersteller veröffentlicht aktuelle technische Datenblätter auf seiner offiziellen Domain (z. B. bambulab.com, prusa3d.com, polymaker.com, 3dxtech.com, fiberlogy.com, spectrumfilaments.com, basf-forward-am.com, eastman.com); diese Domains sind der stabile Einstiegspunkt und waren die im Mai 2026 überprüfte Live-Quelle. Deep Links zu einzelnen TDS-PDFs werden bewusst nicht aufgeführt, da Anbieter die Dokumentpfade häufig ändern – im Gegensatz zu einer früheren Fassung dieses Anhangs werden jedoch die oben genannten offiziellen Domains angegeben, damit die Quelle auffindbar ist. Wenn in einem Datenblatt eine Version angegeben ist, wird diese im Text zitiert (zum Beispiel zitiert Tabelle 14.6 das Bambu Lab PPA-CF TDS V1.0); ist dies nicht der Fall, sollte die Angabe als die zum Zeitpunkt der Erstellung aktuelle Version betrachtet und anhand des aktuellen TDS überprüft werden.

D.3 Referenzdaten der Harzhersteller

Daten aus den TDS der Basispolymere werden von den Harzherstellern zitiert, wenn das Filament-TDS keine Angaben zu einer relevanten Eigenschaft enthält und das Filament eindeutig auf einer dokumentierten Harzsorte basiert. Die wichtigsten genannten Harzhersteller mit ihren offiziellen Materialdaten-Domains (Stand: Mai 2026):

- **Eastman** – Tritan, Amphora, Eastar-Copolyester-Typen (eastman.com; Produktkatalog unter productcatalog.eastman.com).
- **Covestro** – Makrolon-Polycarbonat (covestro.com / solutions.covestro.com).
- **SABIC** – Lexan PC, ULTEM PEI (sabic.com).
- **BASF** – Elastollan TPU, Ultramid PA, Ultrason PSU/PPSU (basf.com; Forward AM unter basf-forward-am.com).
- **Arkema** – Pebax PEBA, Kynar PVDF (arkema.com; hpp.arkema.com für die Kynar-Fluorpolymer-Familie).
- **Solvay / Syensqo** – Radel PPSU, Ryton PPS, KetaSpire PEEK, AvaSpire PAEK (syensqo.com, ehemals solvay.com Spezialpolymere).

- **DuPont** – Zytel- und Zytel HTN-Polyamide, Delrin POM (dupont.com; Hinweis: Delrin und die HTN-Produktreihe wurden veräußert und sind möglicherweise unter den Domains der Nachfolgeunternehmen zu finden).
- **Victrex** – PEEK 450G und verwandte Typen (victrex.com).
- **Kuraray** – Genestar PA9T (kuraray.com).

Die TDS- und SDS-Dokumente zu diesen Harzen sind versioniert; geben Sie für Audit-Zwecke die auf dem abgerufenen Dokument angegebene Version an.

D.4 Normungsgremien und Arbeitssicherheit

Prüfverfahren-Normen werden anhand ihrer Normnummer zitiert, die als stabile Kennung dient; die Volltexte sind im Katalog der herausgebenden Stelle erhältlich. **Mechanische Prüfungen:** ISO 527 (Zugfestigkeit), ISO 178 (Biegefestigkeit), ISO 179 / ISO 180 (Charpy- / Izod-Schlagzähigkeit); ASTM D638 (Zugfestigkeit), ASTM D790 (Biegefestigkeit), ASTM D256 (Izod) – ISO-Normen über iso.org, ASTM-Normen über astm.org. **Thermische Prüfungen:** ISO 75 / ASTM D648 (HDT), ISO 306 / ASTM D1525 (Vicat), ASTM D3418 (DSC), ASTM D955 (Formschrumpfung). **Optik und Oberfläche:** ASTM D1003 (Trübung und Lichtdurchlässigkeit), ASTM D785 (Rockwell-Härte). **Entflammbarkeit:** UL94 (Flammtest, über ulse.org), EN45545 (Brandschutz für Schienenfahrzeuge, über cen.eu / nationale Normungsgremien).

Raumluft und Emissionen. ANSI/CAN/UL 2904, „Standard Method for Testing and Assessing Particle and Chemical Emissions from 3D Printers“ (erste Ausgabe, 2019) – UL Standards & Engagement, ulse.org; Hintergrund und die zugrunde liegende Forschung von UL Chemical Safety / Georgia Tech unter chemicalinsights.ul.org. NIOSH, „Ansätze für sicheres 3D-Drucken: Ein Leitfaden für Nutzer von Makerspaces, Schulen, Bibliotheken und kleine Unternehmen“, DHHS (NIOSH) Veröffentlichung Nr. 2024-103, unter cdc.gov/niosh/docs/2024-103/. NIOSH-Bericht zur Bewertung von Gesundheitsrisiken 2017-0059-3291, „Evaluation of 3-D printer emissions and personal exposures at a manufacturing facility“, unter cdc.gov/niosh/hhe/ (reports/pdfs/2017-0059-3291.pdf). Alle abgerufen im Mai 2026.

Lebensmittelkontakt und Biokompatibilität. US-amerikanische FDA-Vorschriften zum Lebensmittelkontakt gemäß 21 CFR Part 177 (polymerspezifische Unterabschnitte), über ecfr.gov; NSF/ANSI 51 (Materialien für Lebensmittelausrüstung) und NSF/ANSI/CAN 61 (Komponenten für Trinkwassersysteme), über nsf.org. FDA, „Technische Überlegungen zu additiv gefertigten Medizinprodukten – Leitfaden für die Industrie und Mitarbeiter der Food and Drug Administration“ (fertiggestellt am 5. Dezember 2017; Aktenzeichen FDA-2016-D-1210), über fda.gov. ISO 10993-1, „Biologische Bewertung von Medizinprodukten – Teil 1: Bewertung und Prüfung im Rahmen eines Risikomanagementprozesses“, über iso.org. Alle abgerufen im Mai 2026. Wie

§8.9 und §19.4 betonen, beziehen sich Zertifizierungen für den Kontakt mit Lebensmitteln und die Biokompatibilität auf eine bestimmte Harzsorte oder ein zugelassenes Produkt und einen validierten Prozess – nicht allgemein auf Filamente.

D.5 Redaktioneller Umfang und Kontext der Überarbeitung

Dieser Band wurde im Mai 2026 zusammengestellt, wobei die Markenumfragen auf den Stand von Anfang 2026 und die Kalibrierungsprofile auf die vom Autor in den Jahren 2025–2026 auf seiner Prosumer-Hardware gemessenen Werte zurückgehen. Die Grundlagen der Polymerchemie und die physikalischen Prinzipien des Prozesses bleiben korrekt; die Markenumfragen, Preisspannen und die Verfügbarkeit spezifischer Produkte werden sich jedoch ändern und sollten für Beschaffungsentscheidungen anhand aktueller Anbieterangaben überprüft werden. Korrekturen und Aktualisierungen werden im GitHub-Repository des Autors zusammen mit der zugrunde liegenden Kalibrierungsmethodik und dem zugehörigen Fork der Slicer-Kalibrierungsversion nachverfolgt.

Anhang E – Lizenz und Nutzungsbedingungen

Dieses Dokument wird unter der **Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International-Lizenz (CC BY-NC-ND 4.0)** veröffentlicht. Der vollständige Rechtstext und die Zusammenfassung in einfacher Sprache werden von Creative Commons unter creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/ veröffentlicht. Die nachstehende Zusammenfassung erläutert, was diese Lizenz in der Praxis bedeutet; bei Abweichungen zwischen dieser Zusammenfassung und dem offiziellen Lizenztext ist der offizielle Text maßgebend.

E.1 Was Sie tun dürfen

- **Herunterladen und aufbewahren.** Sie dürfen dieses Dokument kostenlos herunterladen, speichern und auf jedem Gerät lesen.
- **Teilen Sie es unverändert.** Sie dürfen das Dokument in jedem Medium und Format kopieren und weiterverbreiten – beispielsweise indem Sie die PDF-Datei mit anderen teilen oder zum kostenlosen Download bereitstellen –, sofern es sich um das vollständige, unveränderte Dokument handelt.
- **Es frei für Ihre eigene Arbeit nutzen.** Sie dürfen die hier enthaltenen Informationen ohne Einschränkung auf Ihre eigenen Entscheidungen bezüglich Druck, Kalibrierung und Materialauswahl anwenden.

E.2 Bedingungen und Einschränkungen

- **Namensnennung.** Wenn Sie das Dokument weitergeben, müssen Sie die Autorenangabe („hyiger“) und diesen Lizenzhinweis unverändert beibehalten und dürfen nicht den Eindruck erwecken, der Autor unterstütze Sie oder Ihre Nutzung des Dokuments.
- **Nicht kommerziell.** Sie dürfen das Dokument weder ganz noch teilweise für kommerzielle Zwecke nutzen. Es darf nicht verkauft, in ein kostenpflichtiges Produkt oder eine kostenpflichtige Dienstleistung eingebunden, hinter einer Paywall platziert oder in erster Linie zum Erlangen eines kommerziellen Vorteils oder einer finanziellen Vergütung verwendet werden.
- **Keine Bearbeitungen.** Wenn Sie das Dokument remixen, umgestalten, anpassen oder anderweitig darauf aufbauen, dürfen Sie das geänderte Material nicht verbreiten. Teilen Sie es als vollständiges Originaldokument, nicht als Auszüge, die als neues Werk neu verpackt wurden. (Kurze Zitate zu Rezensionen-, Kommentierungs-, Lehr- oder ähnlichen Zwecken, soweit dies durch geltende urheberrechtliche Ausnahmen wie Fair Use oder Fair Dealing zulässig ist, sind von dieser Lizenz unberührt.)

E.3 Keine Gewährleistung und Haftungsbeschränkung

Dieses Dokument wird „wie besehen“ und „wie verfügbar“ ausschließlich zu allgemeinen Informations- und Bildungszwecken bereitgestellt. Soweit gesetzlich zulässig, übernimmt der Autor keinerlei Gewährleistungen jeglicher Art in Bezug auf das Dokument – weder ausdrücklich, stillschweigend, gesetzlich vorgeschrieben noch anderweitig –, einschließlich, aber nicht beschränkt auf Gewährleistungen hinsichtlich der Richtigkeit, Vollständigkeit, Eignung für einen bestimmten Zweck oder Fehlerfreiheit. Dieser Haftungsausschluss „wie besehen/wie verfügbar“ ist Teil der CC BY-NC-ND 4.0-Lizenz und wird hier zur Klarheit erneut aufgeführt.

Beim 3D-Druck kommen hohe Temperaturen, bewegliche Maschinen, elektrische Geräte, Lösungsmittel und Materialemissionen zum Einsatz. Die in diesem Dokument beschriebenen Prozesse, Temperaturen, Chemikalien und Einstellungen bergen ein reales Risiko für Personenschäden, Sachschäden und Geräteschäden. Die Materialdaten sind aus Herstellerdatenblättern und anderen Quellen zusammengefasst, die sich im Laufe der Zeit ändern und Fehler enthalten können. **Sie sind für Ihre eigene Sicherheit verantwortlich und müssen alle Informationen überprüfen, bevor Sie sich darauf verlassen.** Befolgen Sie das Sicherheitsdatenblatt und das technische Datenblatt für Ihr spezifisches Filament, die Dokumentation für Ihre spezifische Hardware sowie die für Ihren Arbeitsbereich geltenden Richtlinien zum Umgang mit Chemikalien und zur Belüftung.

Soweit dies nach geltendem Recht zulässig ist, übernimmt der Autor („hyiger“) keine Haftung für Verluste, Verletzungen oder Schäden jeglicher Art, die sich aus der Nutzung oder dem Vertrauen auf dieses Dokument oder die darin enthaltenen Informationen ergeben. Die Nutzung

dieses Dokuments erfolgt ausschließlich auf eigene Gefahr.

E.4 Marken und Materialien Dritter

Markennamen, Produktnamen, Firmennamen und Normbezeichnungen in diesem Dokument sind Eigentum ihrer jeweiligen Inhaber und dienen ausschließlich der Identifizierung und Beschreibung. Ihre Verwendung impliziert keine Zugehörigkeit zu, Förderung durch oder Billigung seitens dieser Inhaber. Diese Lizenz umfasst den Text und die Originaltabellen dieses Dokuments; sie gewährt keine Rechte an Marken, Datenblättern, Normtexten oder anderem referenziertem Material Dritter, die weiterhin ihren eigenen Bedingungen unterliegen.

Index

Polymerbezeichnungen, Eigenschaften, Verfahren und chemische Begriffe mit Verweisen auf die entsprechenden Hauptseiten – Seiten, auf denen der Begriff ausführlich behandelt und nicht nur beiläufig erwähnt wird. Das Markenverzeichnis befindet sich in Anhang C; dieses Verzeichnis umfasst Materialien und Konzepte. Jede Seitenzahl ist ein individueller Link zur entsprechenden Seite.

A

ABS [13](#), [15](#), [33](#), [34](#), [35](#), [36](#), [37](#), [45](#)

Glühen [12](#), [18](#), [56](#), [59](#), [70](#), [86](#), [107](#)

ASA [13](#), [33](#), [34](#), [35](#), [36](#), [37](#), [101](#), [107](#)

B

Betthaftung [98](#), [112](#)

BPA (Bisphenol-A) [64](#)

Klebstoffe für die Bauplatte (Magigoo usw.) [44](#), [98](#), [99](#), [100](#), [101](#), [102](#)

Bauplattenoberflächen (PEI, Garolite, strukturiert) [58](#), [77](#), [98](#), [99](#), [100](#), [102](#), [103](#)

BVOH [88](#), [89](#)

C

Kalibrierungsablauf [34](#), [95](#), [118](#), [124](#)

Kohlefaserverstärkung (CF) [30](#)

CHDM (Cyclohexandimethanol) [8](#), [21](#), [23](#), [25](#)

Reibungskoeffizient (COF) [110](#), [111](#)

CoPA (Copolyamid) [48](#), [51](#), [120](#)

Kristallinität [7](#), [10](#), [12](#), [23](#), [29](#), [59](#), [64](#)

D

Trocknung (Feuchtigkeitsentfernung) [11](#), [59](#)

E

Bruchdehnung [42](#) Emissionen

(UFP, VOC) [15](#)

ESD / elektrostatische Ableitung [66](#), [71](#)

F

Flammwidrigkeit (UL94) [67](#), [83](#)

geschäumte Filamente [18](#), [74](#), [77](#), [78](#), [79](#)

G

Glasübergang (Tg) [33](#)

H

Hardware-Ebenen [6](#), [13](#), [83](#), [85](#), [117](#)

Wärmeformbeständigkeitstemperatur (HDT) [7](#), [12](#), [24](#), [41](#), [61](#), [64](#), [65](#)

beheizte Kammer [13](#), [86](#)

HIPS [33](#), [34](#), [35](#), [36](#), [105](#)

I

iglidur (igus-Tribopolymer) [110](#), [111](#), [112](#)

L

Schichthaftung / Zwischenschichtverschweißung 10, 43, 90

M

maximaler Volumenstrom 95

Schmelzpunkt (T_m) 54

Feuchtigkeitsempfindlichkeit

11, 77

Multimaterialdruck 104

N

Kerbschlagzähigkeit / Izod 64

Düsematerialien (Messing, gehärtet, PCD) 13, 31, 66

P

PA11 48, 51

PA12 48, 49, 51

PA6 (Nylon 6) 48, 49, 50, 51, 53, 55, 57, 58

PA612 48, 51

PA66 (Nylon 66) 48

PAEK-Familie 86, 87

PC (Polycarbonat) 64

PC/ABS-Legierung 64, 67

PCL (Polycaprolacton) 90

PCTG 7, 8, 13, 22, 23, 25, 26, 27

PE (Polyethylen) 46

PEBA (Pebax) 74, 75, 76, 77, 78, 79, 93, 94

PEEK 10, 12, 13, 86, 87, 120

PEI (ULTEM-Klasse) 11, 36, 44, 50, 58, 69, 70, 77

PEKK 86, 87, 115

PET (Polyethylenterephthalat) 29, 30, 31

PET-CF 29, 30

PET-GF 29, 30, 31

PETG 7, 13, 21, 22, 23, 25, 27, 29

PHA 90, 100

PLA 11, 12, 16, 18, 19, 21, 29, 78

PMMA (Acryl) 80

POM (Acetal) 80, 81, 111, 112

PP (Polypropylen) 11, 39

PPA (Polyphthalamid) 8, 12, 13, 54, 55, 56, 57, 58

PPS 13, 83, 85, 93, 120

PPSU 83, 84

PSU (Polysulfon) 83, 84

PV-Grenzwert 110

PVA 88, 89, 101

PVB 90, 91

PVDF (Kynar) 80, 81, 82

S

Shore-Härte 75, 76

lösliche Trägermaterialien 88, 89

T

Zugfestigkeit [18](#)

TPEE [74](#)

TPU [74](#), [75](#), [76](#), [77](#), [78](#), [79](#), [99](#), [120](#)

tribologische Filamente [110](#), [111](#)

Tritan (Eastman) [23](#), [25](#), [26](#)

V

Dampfglättung [33](#), [36](#)

W

Schrägstellung [10](#), [33](#), [35](#), [39](#), [59](#), [100](#), [101](#)