

In dieser Ausarbeitung werden 4 wichtige 3D-Filamentwerkstoffe verglichen

PLA / PETG / HP-PO / PA



Material: **DIPRO**[®]blend H

Bildquelle: Grauts GmbH

- 1) **Polymereigenschaften**
- 2) **Chemikalienbeständigkeit**
- 3) **Dichte**
- 4) **Verstärkung GF/CF**
- 5) **Industrielle Anwendungen**
- 6) **Verarbeitung, Vortrocknung**
- 7) **Teilkristallin/Amorph**
- 8) **Recyclingfähigkeit**

1.1. PLA - Polylactid, Spezialpolyester – Polymereigenschaften, kristallin

PLA wird aus nachwachsenden Rohstoffen, z.B. Mais oder Zuckerrohr, hergestellt und ist biologisch abbaubar. Somit ist PLA für kurzlebige Artikel oder für Produkte, welche in die Umwelt geraten können, z.B. Lebensmittelverpackung, gut geeignet.

Die Steifigkeit und Festigkeit sind in einem engen Temperaturbereich hoch. Die Schlagzähigkeit ist sehr niedrig. Die Kerbschlagzähigkeit ist ebenfalls sehr niedrig.

Die Druckbarkeit ist sehr gut und einfach. Die Teile sind für industrielle Anwendungen nicht geeignet, da die Lebenszeit kurz ist und der Abbau durch UV beschleunigt wird.

1.2. PLA – Chemikalienbeständigkeit

PLA ist beständig gegenüber Öle und Fette sowie Alkohol.

PLA ist sonst, außer gegen kaltes Wasser und das auch nur kurzfristig, gegen die meisten Chemikalien nicht beständig.

Dies ist für den manchmal gewollten Abbau hilfreich, aber nicht für technische Teile, z.B. in der Autoindustrie oder Elektrotechnik, brauchbar. Die Eigenschaften bei Raumtemperatur sind kurzfristig durchaus gut, enden aber bereits bei einer Temperaturbelastung von 60 °C.

Es darf gefragt werden, ob es nachhaltig ist, wenn ein Bauteil immer wieder gedruckt werden muss, weil es stark über die Zeit abbaut.

1.3. PLA – Dichte

Häufig wird übersehen, dass die Polymerdichte auch ein Kostenfaktor ist.

Mit einer Dichte von 1,28 g/cm³ ist PLA 41 % schwerer als Polyolefine, insbesondere auch als DIPRO®blend H (High-Performance-Polyolefin). Damit gehört PLA zu den schweren Polymeren, welche nicht schwimmen.

1.4. PLA – verstärkt, z.B. mit Carbonfaser

Es gibt einige PLA-Typen, welche mit wenig CF verstärkt sind. Meist sind es kosmetische Effekte, die Teile werden schön mit glatter matter Oberfläche und etwas steifer.

Für Industrieranwendungen ebenfalls nicht geeignet. Technische Daten sind kaum vorhanden.

1.5. PLA – Industrieranwendungen

Für Anschauungsmodelle, welche keine technische Funktion haben, ist PLA gut einsetzbar. Die Bio-Abbaubarkeit steht im Widerspruch zur Langlebigkeit.

1.6. PLA – Verarbeitbarkeit und Vortrocknung

PLA ist gut verarbeitbar. Die angebrochene Spule muss aufwendig gegen Feuchte geschützt werden oder muss vorgetrocknet werden. Dies ist auch ein Kostenfaktor.

Die Restfeuchte sollte vor dem Spritzgießen maximal 0,01 % und vor der Extrusion maximal 0,025 % betragen. Feuchtemesstechnik ist beim privaten Verbraucher nicht zu erwarten.

Da die Wärmeformbeständigkeit von PLA so gering ist, besteht die Gefahr der Filamentschädigung beim Vortrocknen.

1.7. PLA – kristallin vs. amorph

Die kristallinen Anteile von PLA schmelzen zwischen 80 °C und 90 °C. Temperaturreerven zwischen Erweichung der amorphen Anteile und der DSC der kristallinen Anteile (z.B. bei PP und PA) sind hier nicht vorhanden.

Die Grenzen der Anwendung liegen bei 53 °C bis 56 °C (Quelle: Omnexus).

1.8. PLA – Recycling

Durch die hohe Dichte, welche nahe bei PETG liegt, ist die Trennung schwierig. Oft ist die Kompostierung der bessere Weg.

2.1. PETG – Polymereigenschaften, amorph (Polyethylen Terephthalat Glycol- modifiziert)

PETG wird aus Rohöl hergestellt. Die mechanischen Eigenschaften sind höher als bei PLA. Die Erweichungstemperatur liegt bei 70 °C. Die HDT-B beträgt 68 °C. Da der Thermoplast amorph ist, gibt es darüber keine thermischen Reserven wie bei teilkristallinen Polymeren. PETG ist nicht lackierbar. E-Modul und Festigkeit sind bei normalen Temperaturen gut. Die Kerbschlagzähigkeit ist moderat. Die Wasseraufnahme ist gering. PET ist aber sehr empfindlich gegen hydrolytischen Abbau bei der Verarbeitung und muss vorgetrocknet werden. Der transparente Werkstoff kann beliebig eingefärbt werden.

Eine Druckbett-Temperatur von 50 °C bis 80° C ist notwendig. Die Kammertemperatur sollte 50 °C bis 70 °C betragen (Quelle: IEAI).

2.2. PETG – Chemikalienbeständigkeit

PETG ist gegen die meisten Säuren und Laugen beständig ebenso gegen die meisten Öle und Fette.

2.3. PETG – Dichte

Auch PETG liegt ca. 40 % höher als bei Polyolefinen und DIPRO®blend H / unverstärkt. Dies ist bei der Kalkulation zu beachten. Auch PETG gehört zu den schwereren Polymeren und schwimmt nicht.

2.4. PETG – verstärkt, z.B. mit Carbonfaser

Der Verstärkungseffekt ist vorhanden aber ohne wesentliche Erhöhung der Temperaturbeständigkeit, da PETG amorph ist. Die erreichten Werte stehen nicht im Verhältnis zu den höheren Kosten.

2.5. PETG – Industrieanwendungen

Wenn die thermische Belastung unter 70 °C bleibt, ist PETG für Industrieanwendungen einsetzbar.

2.6. PETG – Verarbeitbarkeit und Vortrocknung

PETG ist etwas anspruchsvoller als PLA, aber gut zu verarbeiten mit guter Lagenhaftung. Die maximale Restfeuchte sollte bei 0,04 % liegen. Bei ca. 60 °C muss das Filament 6 h getrocknet werden.

Der Aufwand für die Trocknung und die hohe Dichte müssen bei der Kalkulation berücksichtigt werden.

Die Schrumpfung ist mit ca. 0,1% minimal und die Bauplattenhaftung ist gut. Es sind Typen mit geringen Mengen Carbonfaser am Markt verfügbar. Die Festigkeit steigt, ebenso die Steifigkeit. Die Wärmeformbeständigkeit ist nur geringfügig höher.

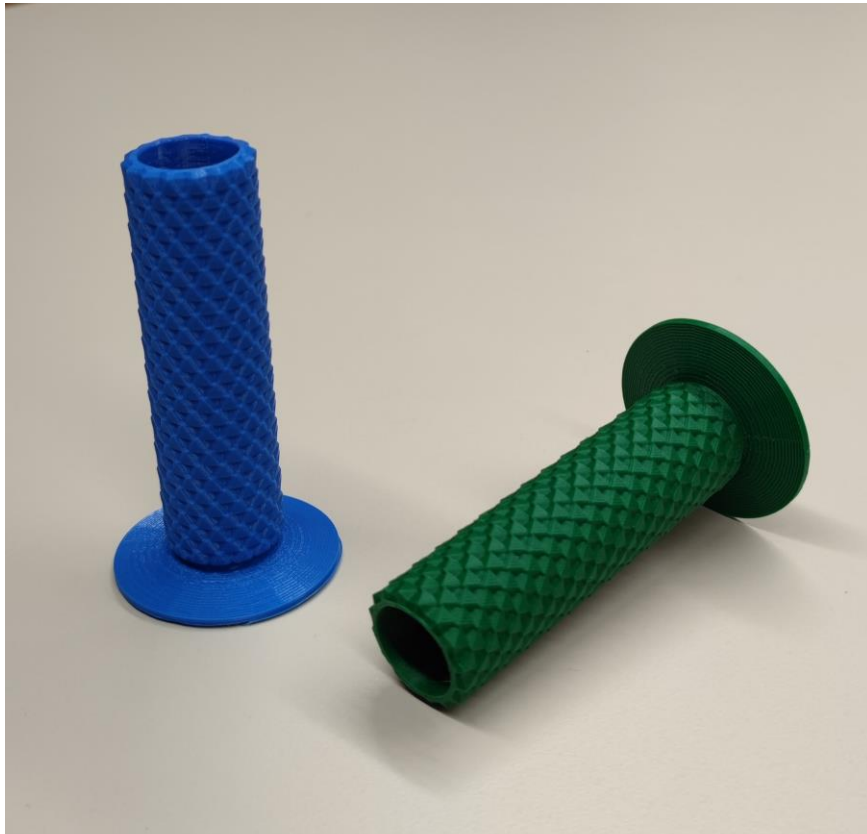
2.7. PETG – kristallin vs. amorph

PETG ist amorph und daher sehr maßhaltig. Über der Tg von ca. 70 °C sind keine Anwendungen möglich.

2.8. PETG – Recyclingfähigkeit

PETG ist gut recycelfähig.

3.1. DIPROblend H, High-Performance-Polyolefin – Polymereigenschaften, teilkristallin



Material: DIPRO®blend H, unverstärkt

Bildquelle: Grauts GmbH

Polyolefine sind die am besten verfügbaren Polymere. Die Dichte liegt mit ca. $0,9 \text{ g/cm}^3$ niedrig und die Polymere schwimmen. Im Vergleich zu PLA und PETG sind Polyolefine 40 % leichter. Die Produkte müssen nicht vorgetrocknet werden, was die Handhabung der Spulen signifikant erleichtert. Der Verzug ist jedoch groß und unmodifiziert nicht für die AF einsetzbar.

DIPRO®blend H ist eine Entwicklung von **ROTFELD/DIPRO®mat** und weist folgende Besonderheiten auf:

- Sehr geringe Formschrumpfung und dadurch höchste Präzision. Die Schrumpfung friert bei einer Masstemperatur von 160 °C sofort nach der Formfüllung oder nach der Filamentablage ein, woraus der geringe Verzug resultiert.
- Die Schlag- und Kerbschlagzähigkeit ist unerreicht ohne Verlust der Wärmeformbeständigkeit.
- Werkstoffe zwischen 90 Sh A und E-modul 11.000 MPa (Zugmodul) sind serienreif.
- Die Lagenhaftung ist sehr gut auch ohne Bauraumheizung.
- Durch die Eigenschaften und die einfache Verarbeitung sind **DIPRO®blend H**-Werkstoffe für Industrie und private Verarbeitung möglich. In vielen Fällen kann sogar Polyamid ersetzt werden.

- Hart/Weich-Verbindungen mit TPS, **DIPRO®flex** und TPO sind möglich.



Material: DIPRO®blend H / GF 15 % + DIPRO®flex S60
Bildquelle: DIPROmat GmbH

- Für dauernde Außenanwendungen sind UV-stabilisierte Typen im Einsatz.

3.2. DIPRO®blend H – Chemikalienbeständigkeit

Bei Raumtemperatur ist **DIPRO®blend H** gegenüber den meisten Fetten und Ölen beständig, ebenso gegenüber Säuren und Laugen, außer oxydierenden Säuren wie Salpetersäure. Lösbar ist **DIPRO®blend H** in halogenierten Lösungsmitteln, in cyclischen Kohlenwasserstoffen und Aromaten.

Dauerkontakt mit Benzin und Diesel ist nicht zu empfehlen.

3.3. DIPRO®blend H – Dichte

Ein oft übersehener drastische Vorteil ist die sehr geringe Dichte von ca. 0,89-0,91 g/cm³. Dies ist bei Berechnung des Volumenpreises zu berücksichtigen. Gefüllte Werkstoffe liegen entsprechend höher.

3.4. DIPRO®blend H – Verstärkung, GF/CF

DIPRO®blend H ist im Gegensatz zu PETG ein teilkristalliner Thermoplast. Durch Verstärkung mit Spezialglasfasern, welche hohe Querfestigkeit bringen, können vor allem die thermischen Werte drastisch verbessert werden. Sprünge bis 70 °C in der HDT-B-Verbesserung sind normal. Carbonfaser werden gelegentlich verlangt, sind aber aus unserer Sicht nicht so effektiv wie bei PA.



Material: DIPRO®blend H / GF

Bildquelle: GRAUTS GmbH

3.5. DIPRO®blend H – Industrieanwendungen

DIPRO®blend H ist für Industrieanwendungen ebenso wie für private Nutzung geeignet. Die Möglichkeit Hart/Weich-Verbindungen einfach im Drucker herzustellen, ist ein Argument für die vielfältige Nutzung. Das Alterungsverhalten ist sehr gut. Stabilisierungen können angepasst werden. Für die Industrienutzung ist die hohe Wärmeformbeständigkeit der Spezialglasfaser-verstärkung mit einer HDT-B (Wärmeformbeständigkeit) bis 155 °C möglich.

3.6. DIPRO®blend H – Verarbeitung und Vortrocknung

Die High-Performance-Polyolefine müssen nicht vorgetrocknet werden. Dadurch wird die Handhabung angebrochener Spulen sehr einfach.



Material: DIPRO®blend H / GF15 %, ultrazäh

Bildquelle: DIPROmat GmbH

3.7. DIPRO®blend H – kristallin vs. amorph

DIPRO®blend H ist teilkristallin und hat durch die Polymermodifikation geringe Formschrumpfung. Durch die teilkristalline Struktur sind vor allem die hohen mechanischen und thermischen Werte möglich.

3.8. DIPRO®blend H – Recycling

DIPRO®blend kann mit allen bekannten Polyolefinen gemeinsam recycelt werden.

4.1. DIPRO®mid C-Präzisionspolyamide, teilaromatisch, bis 25 % GF und 15 % CF – Polymereigenschaften

Polyamide sind Konstruktionswerkstoffe. Polarität und Wasseraufnahme hängen von der Anzahl der C-Atome in der sich wiederholenden Amid-Gruppe ab. Polyamide mit wenig Wasseraufnahme, wie PA11 und PA12, sind relativ unpolar und haben moderate Festigkeit bei wenig Wasseraufnahme dafür gute Zähigkeit.

PA 66 und PA6 sind wiederum relativ polar und haben hohe Festigkeit aber viel Wasseraufnahme. Die Wasseraufnahme beeinflusst wiederum die Tg.

DIPRO[®]mid C ist ein teilaromatisches Blend mit DSC von 211 °C und sehr wenig Einfluss der Wasseraufnahme auf die Eigenschaften und sehr geringer Formschrumpfung. Mehrere Polymerfamilien für Spritzguss und 3D-Druck stehen zur Verfügung.

Faserverstärkungen bis 62 % mit hervorragender Oberfläche werden von DIPRO[®]mat für den Spritzguss produziert.

Wer technische Teile mit hohen Eigenschaften herstellen will, muss sich mit solider Trocknungstechnik beschäftigen. Ideal sind Trockenlufttrockner für die Spulen. Das Angebot ist noch relativ übersichtlich.

Polarität, Wasseraufnahme und Festigkeit hängen leider zusammen. Für den 3D-Druck verwenden wir nur Spezial-Glasfaser, welche 30 % höhere Querfestigkeit erzeugen und den Verzug minimieren.

Strahlenvernetzbar **DIPRO[®]mid**-Typen sind auf Anfrage lieferbar.

4.2. DIPRO[®]mid C – Chemikalienbeständigkeit

Polyamide sind polar und gegen verdünnte Laugen, aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe, Kraftstoffe sowie gegen Alkohole, Ester, Ketone, Fette und Öle beständig.

Angegriffen wird PA von Säuren und oxydierenden Chemikalien. Die Polarität verursacht je nach PA die Wasseraufnahme.

4.3. DIPRO[®]mid C – Dichte

Die Dichte von PA liegt zwischen der Dichte von PBT, PETG, PLA und Polyolefinen.

4.4. DIPRO[®]mid C – Verstärkung



Material: DIPRO[®]mid C / 15 % CF

Bildquelle: GRAUTS GmbH

Durch die Polarität ist eine gute Anbindung an die Glasfaser- und Kohlefaser-Verstärkung möglich, besser als bei allen vorgenannten Polymeren. Die Spezialfasern mit 30 % höheren Querfestigkeitswerten in Verbindung mit der Polymermodifikation ermöglichen fast 0 % Schwindung und höchste Präzision.



Material: DIPRO[®]mid QC4H2GF5T1*900G / 25 % GF

Bildquelle: Q.BIG 3D GmbH

4.5. DIPRO[®]mid C – Industieanwendungen

Für Private Nutzer empfehlen wir eher **DIPRO[®]blend H/GF** wegen der problemlosen Verarbeitung.

Für industrielle Nutzung ist diese neue Präzisions-Polyamid-Familie hervorragend geeignet (siehe 4.1).

Es werden sehr hohe Festigkeiten und Steifigkeiten erreicht bei minimaler Schwindung.

Der professionelle Verarbeiter sollte mit der Trocknungstechnik für PA vertraut sein.

Es hat sich gezeigt, dass bei der Filamentverarbeitung etwas höhere Feuchtwerte als beim Spritzguss funktionieren (bis 0,4 % Filamentfeuchte).

4.6. DIPRO[®]mid C – Verarbeitung, Vortrocknung

Bei der Verarbeitung von Standardpolyamid sind große Schwindungsunterschiede (längs/quer) ungünstig für Präzisionsteile. Das Einfrieren der Düsen und die Wasseraufnahme mit drastischem Einfluss auf die Eigenschaften begrenzen manche Anwendungen.

Die Eigenschaften aus den DIN/ISO-Datenblättern sind immer in Faserrichtung. Quer zur Faser existieren nur noch 60 % der Eigenschaften wie Zugfestigkeit und E-Modul. Bei **DIPRO[®]mid C** sind die Quereigenschaften 25 % bis 30 % besser.

Mit der Polymerentwicklung von **DIPRO®mid C** sind alle o.g. Probleme beseitigt.

Vortrocknung auch von Spulen ist unerlässlich. Das Verarbeitungsfenster im Vergleich zu nicht modifiziertem PA ist sehr groß. Feuchtemesstechnik sollte vorhanden sein.

4.7. DIPRO®mid C – kristallin vs. amorph

DIPRO®mid C ist teilkristallin mit kontrollierter Erstarrungsgeschwindigkeit und relativ niedrigem DSC-Schmelzpunkt von 211 °C.

4.8. DIPRO®mid C – Recycling

DIPRO®mid C ist gut recycelbar und mit allen PA66, PA6 und COPA-Typen mischbar.

***DIPRO®mat**, powered by **ROTFELD-Consulting**, ist das einzige Produktionsunternehmen, welches 3D-Thermoplaste für die Additive Fertigung und mit entsprechenden Polymeranpassungen auch für den Spritzguss und die Extrusion produziert.*

Damit ist der fließende Übergang von Prototypen oder Kleinserie zur industriellen Serienproduktion sichergestellt.