



Über das Datenblatt hinaus: Einseitige Materialprüfungen können bei der Fertigung täuschen

Übersicht

Dieses Whitepaper wurde durch die Behauptungen von FFF-Wettbewerbern (Fused Filament Fabrication) über überlegene Materialeigenschaften motiviert, obwohl interne Tests von Stratasys das Gegenteil bewiesen. Diese Unstimmigkeit zwischen veröffentlichten und aufgezeigten technischen Daten geht zurück auf unterschiedliche Werkzeugbahnen und Baurichtungen mechanischer Testproben bei den Testmethoden von Stratasys und denen der Konkurrenz. Bei einem Wechsel von den standardmäßigen Werkzeugwegen von Stratasys zum optimierten unidirektionalen Werkzeugweg der Konkurrenz hatte Stratasys FDM® Nylon-CF10 gegenüber unseren veröffentlichten technischen Daten eine Steigerung der Wärmeformbeständigkeit (HDT) um 160%, eine Steigerung des Zugmoduls um 152 % und eine Steigerung der Streckgrenze um 94 %. Mechanische Druckproben mit unidirektionalen Werkzeugwegen eignen sich für den Nachweis der maximalen Festigkeit eines mit Kohlefasern gefüllten Materials, sind aber nicht repräsentativ für die Materialfestigkeit eines typischen FFF-Bauteils.

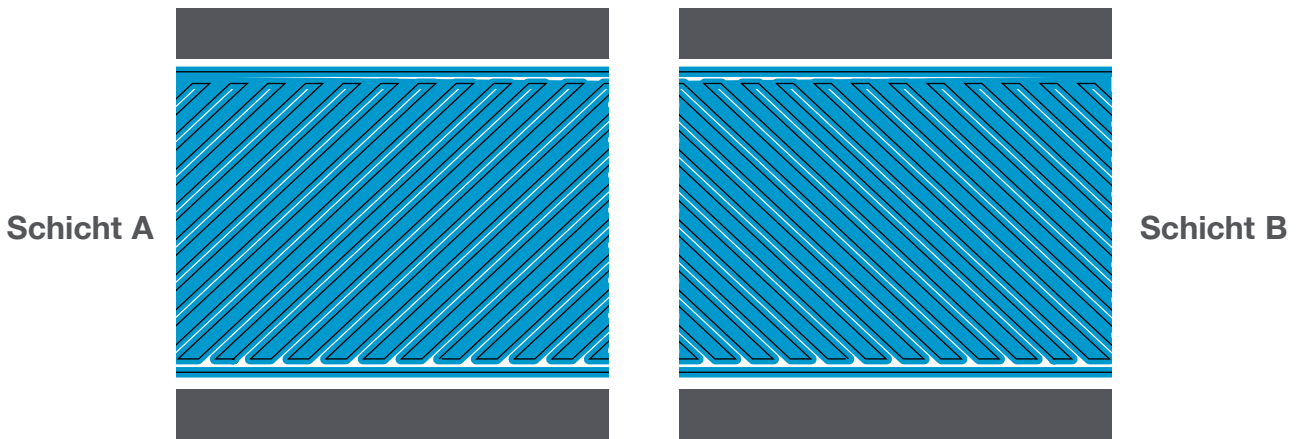
Jenseits des Datenblatts:

Einseitige Materialprüfungen können bei der Fertigung täuschen

Einführung

Stratasys testet mechanische Eigenschaften einheitlich und transparent ([siehe das Materialtestverfahren von Stratasys für standardmäßige FDM-Testverfahren](#)). Die Werkzeugwege folgen unserer standardmäßigen Generierung von Werkzeugwegen mit Schichten in einer Ausrichtung von 45°/-45° im Verhältnis zueinander. Die erste Rasterschicht liegt also im 45°-Winkel auf der **X-Y**-Ebene und die nächste Schicht liegt senkrecht zu dieser Schicht (-45°). Bei einer einfachen, rechteckigen Geometrie wäre dies abwechselnd zwischen Schicht A und Schicht B in **Abbildung 1**. Wenn man mechanische Eigenschaften mit 45°/-45°-Rastern testet, verbessert sich die isotrope Leistung der **XY**-Ebene wie bei den für große Bauteile wie etwa in der Fertigung verwendeten Werkzeugwegen.

Werkzeugwege von Stratasys für mechanische Tests



Werkzeugwege von Wettbewerbern für mechanische Tests

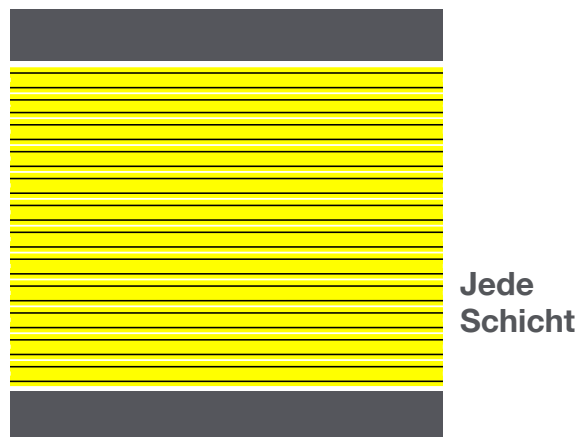


Abbildung 1 – Unterschied zwischen den Werkzeugwegen für mechanische Tests von Stratasys und Wettbewerbern. Stratasys hat Raster im 45°-Winkel mit einem senkrechten Abstand zwischen den Schichten. Wettbewerber haben bei jeder Schicht die gleichen, unidirektionalen Werkzeugwege.

Jenseits des Datenblatts:

Einseitige Materialprüfungen können bei der Fertigung täuschen

Bei der FDM-Fertigung von Bauteilen mit Stratasys wird jede Schicht einzeln hinzugefügt. Dies führt dazu, dass sich die Schichten untereinander weniger verbinden und erhöht die Festigkeit der vertikalen Richtung (Z) im Vergleich zur XY-Ebene. Wenn man mit einem verstärkten Material wie Nylon-CF10 oder ABS-CF10 druckt, kommt dieser Effekt stärker zu Geltung, weil sich die Kohlenstofffaser in den Werkzeugwegen ausrichtet und die Festigkeit der XY-Ebene erhöht. Stratasys testet mechanische Eigenschaften in den Ausrichtungen hochkant (XZ) und aufrecht (ZX) (siehe **Abbildung 2**). Die Daten der aufrechten Ausrichtung (ZX) zeigen die schlechtesten Bedingungen. Man kann die Bauteile dann für den „ungünstigsten Fall“ mit mechanischen Eigenschaften mit ausreichend Sicherheitsspielraum gestalten.

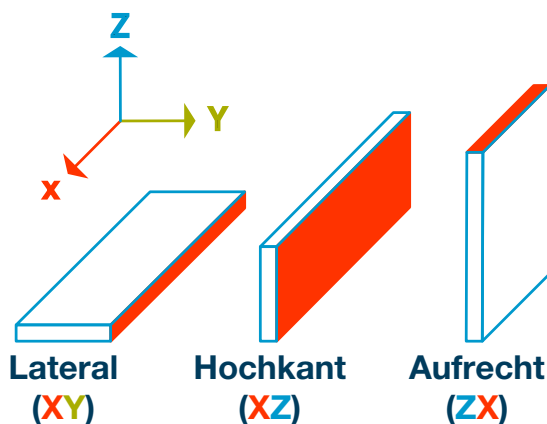
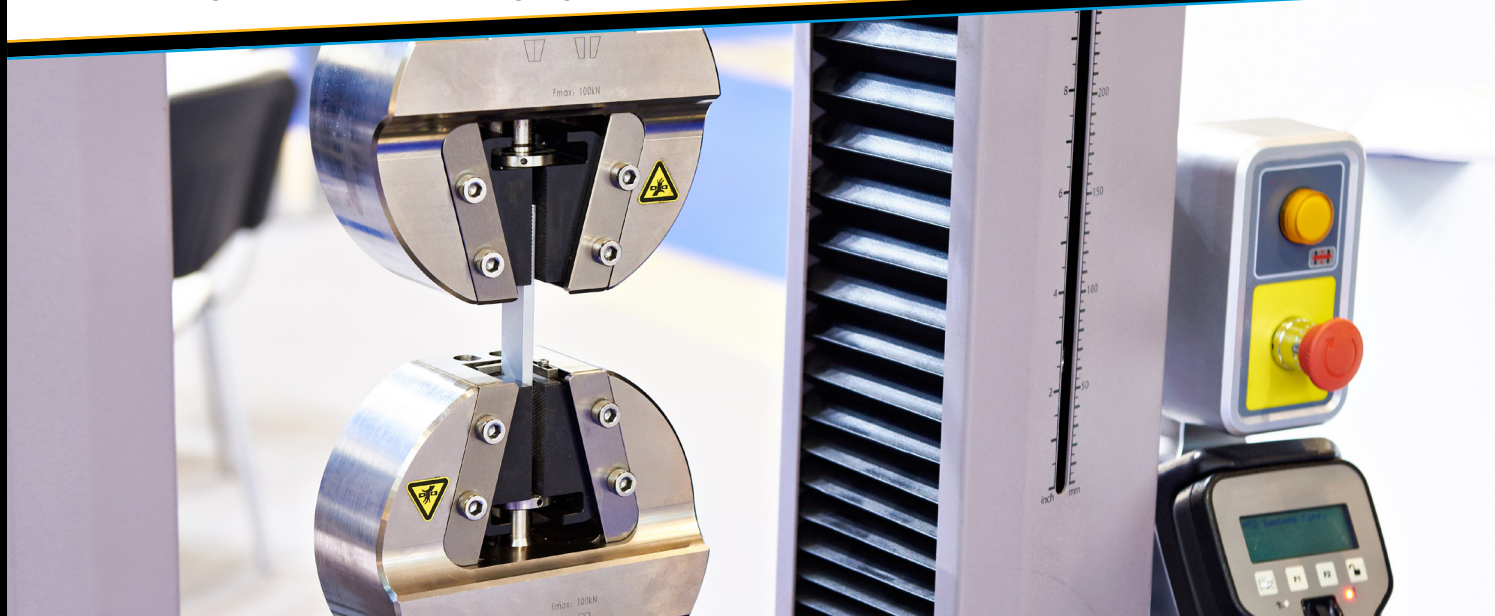


Abbildung 2 – Druckausrichtungen.

Konkurrierende FFF-Hersteller neigen dazu, mechanische und physikalische Eigenschaften aus Werkzeugwegen auszuwählen und zu präsentieren, die für die Prüfanordnung optimiert sind. Ein Wettbewerber beispielsweise stellt nur Daten für die flache Ausrichtung bereit (XY) mit unidirektionalen Werkzeugwegen wie in **Abbildung 1**. Bei verstärktem Material sorgen die ausgerichteten Kohlefasern für eine Erhöhung der Festigkeit der XY-Bauebene. Diese Methode der Optimierung von Werkzeugwegen eignet sich, um die maximale Festigkeit verstärkter Materialien aufzuzeigen. Man sollte sie jedoch mit Vorsicht nutzen, da sie nicht repräsentativ ist für die typischen Werkzeugwege und Festigkeiten von Bauteilen.

Um die verbesserte Leistung unidirektionaler Werkzeugwege aufzuzeigen, druckte Stratasys Proben aus ABS-CF10 und Nylon-CF10 und testete die Wärmeformbeständigkeit (HDT), sowie die Biege-, Zug und Kerbschlagfestigkeit. Dieses Whitepaper zeigt die Verfahren und die verbesserte Leistung der Materialien bei der Nutzung unidirektionaler Werkzeugwege.



Jenseits des Datenblatts:

Einseitige Materialprüfungen können bei der Fertigung täuschen

Testverfahren

Mit der Software Insight™ wurden Baudateien für Proben mit unidirektionalem Werkzeugweg erstellt, um die Wärmeformbeständigkeit sowie die Zug-, Biege- und Schlagfestigkeit zu testen. Die Proben wurden nach den Materialien ABS-CF10 und Nylon-CF10 getrennt. Genaue Angaben zu den Verfahrensparametern und Testmethoden sind in den nachstehenden Unterabschnitten zu finden. Soweit nicht anders angegeben wurden standardmäßige Verfahrensparameter und -standards befolgt. Bei Vergleichsproben aus diesen Materialien mit standardmäßigen 45°/-45°-Rastern wurden die Dateibearbeitungsverfahren der [Materialtestverfahren von Stratasys](#) befolgt.

Alle Baupakete wurden mit der Software Control Center™ anhand des Verfahrens des Materialtestverfahrens von Stratasys erstellt. ABS-CF10-Proben wurden mit einer F370® und Nylon-CF10-Proben wurden mit einer F370®CR produziert. Alle Materialtypen stammten aus derselben Materialcharge. Bei beiden Modellmaterialien wurde QSR Support™ genutzt. Zur Entfernung von QSR Support wurden die Nylon-CF10-Proben vier bis sechs Stunden lang in Tanks eingetaucht. Das Stützmaterial der ABS-CF10-Probe wurde manuell entfernt.

Bei jedem Material und jedem Werkzeugweg wurde anhand von zehn Proben die Zug-, Biege- und Schlagfestigkeit getestet. Die Wärmeformbeständigkeit wurde bei jedem Material für jeden Druck [0,45 MPa und 1,8 MPa (66 und 264 psi)] dreifach getestet. Nachstehend sind die Einzelheiten der physikalischen und mechanischen Tests dieser Studie aufgeführt.

Anhang A enthält eine vollständige Liste der Softwareversionen und Testgeräte.

Test der Wärmeformbeständigkeit

Die Proben des Wärmeformbeständigkeitstests hatten die Maße 127 mm x 12,7 mm x 5,1 mm (5 Zoll x 0,5 Zoll x 0,2 Zoll) und wurden in flacher Ausrichtung (XY) mit unidirektionalen Werkzeugwegen gedruckt. Hierfür wurden die Proben als „Rennstrecke“ aus kontinuierlichen Konturen produziert. Dabei wurden zwei zusammenhängende, überdimensionierte Proben mit abgerundeten Enden verbunden, wie in [Abbildung 3](#) zu sehen ist. Die halbrunden Enden wurden zugeschnitten, indem sie an den in [Abbildung 3](#) zu sehenden Stellen entfernt wurden.

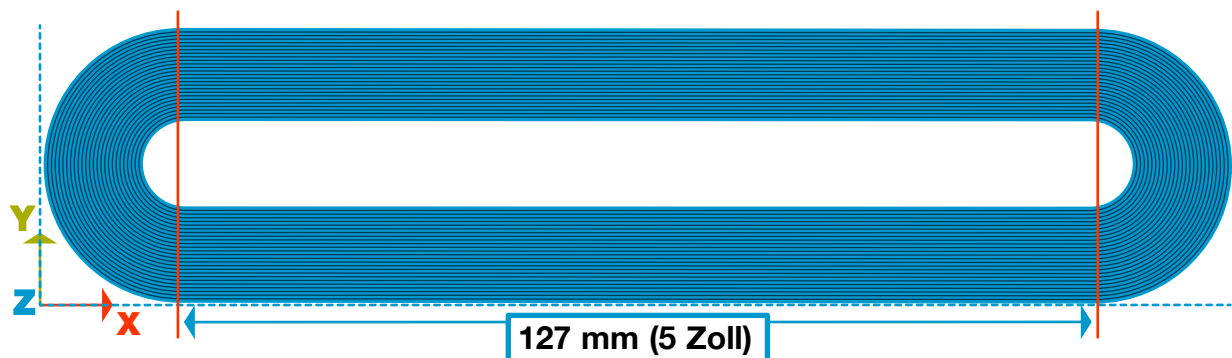


Abbildung 3 – Rennstrecke mit zwei zugehörigen Wärmeformbeständigkeitsproben für kontinuierliche Konturen. Die Halbkreise wurden abgeschnitten, sodass nur die Wärmeformbeständigkeitsprobe übrigblieb.

Jenseits des Datenblatts:

Einseitige Materialprüfungen können bei der Fertigung täuschen

Bei der Bearbeitung mit Insight wurden die Parameter des Werkzeugwegs geändert und 15 Konturen angegeben. Nylon-CF10 hatte eine Konturbreite von 0,0210 Zoll und ABS-CF10 hatte eine Konturbreite von 0,0208 Zoll. Bei einer Nutzung der standardmäßigen Konturbreite von 0,02 Zoll erschien in der Mitte der Probe ein kleines Raster (siehe **Abbildung 4**). Bei den Werkzeugwegen der ABS-CF10-Probe in Insight ist eine kleine Lücke zu sehen. Wenn man die Probe drückt, kommt es auf der Oberseite bis zu einer Verringerung der Konturbreite auf 0,0208 Zoll zu einer Überfüllung. In **Abbildung 5** zeigt ein Beispiel für die Insight-Einstellungen der Wärmeformbeständigkeitsproben.

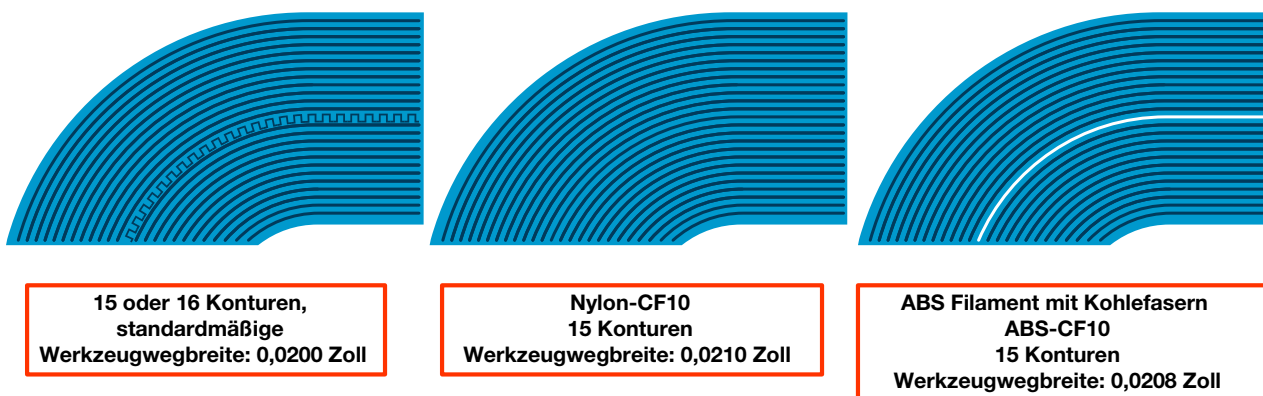
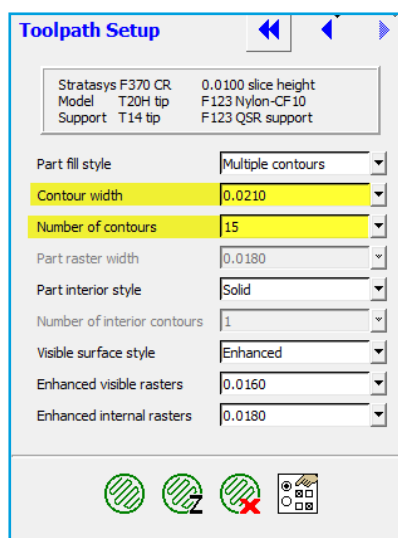


Abbildung 4 – Beispiel für Konturen der Rennstrecke der Wärmeformbeständigkeit. Bei einer Nutzung der standardmäßigen Konturbreite gab es in der Mitte der Probe ein kleineres Rastermuster. Für ABS-CF10 und Nylon-CF10 wurde die Konturbreite um 0,0008-0,0010 Zoll ausgeweitet, damit die Werkzeugwege vollkommen unidirektional sind.



Die unidirektionalen Wärmeformbeständigkeitsproben wurden mit 0,45 und 1,8 MPa (66 und 264 psi) getestet. Pro Material und Druck wurden drei Proben getestet, gemäß Verfahren B von ASTM D648 mit einer Spannweite von etwa 51 mm (etwa 2 Zoll). Vor dem Test wurden die Wärmeformbeständigkeitsproben mindestens 16 Stunden bei $70 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ($158 \text{ }^\circ\text{F} \pm 0,9 \text{ }^\circ\text{F}$) in einem Vakuumofen bei weniger als 100 mbar klimatisiert.

Abbildung 5 – Beispiel für geänderte Parameter des Werkzeugwegs bei der Wärmeformbeständigkeit. Geänderte Parameter sind gelb hervorgehoben.

Jenseits des Datenblatts:

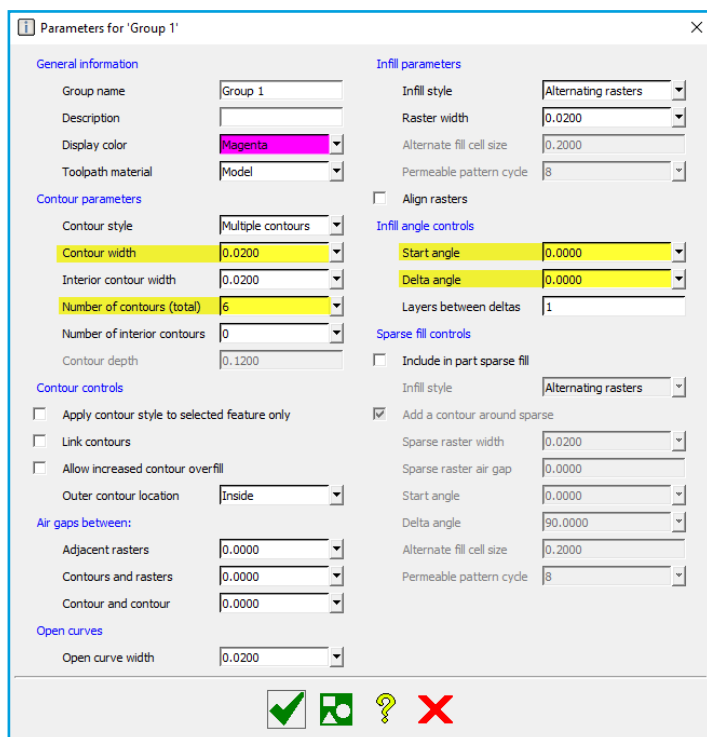
Einseitige Materialprüfungen können bei der Fertigung täuschen

Zugfestigkeit

Mechanische Zugtests wurden mit Proben gemäß ASTM D638 Typ I mit einer Dicke von 3,3 mm (0,130 Zoll) durchgeführt. Um die unidirektionalen Werkzeugwege zu erstellen, wurden alle Kurven der Zugprobe in Insight einer spezifischen Gruppe hinzugefügt. Die spezifische Gruppe war für die Anwendung eines Deltawinkels von 0 ° zur Vermeidung eines senkrechten Rasterabschnitts des Coupons bei abwechselnden Schichten erforderlich. In der spezifischen Gruppe nutzten modifizierte Werkzeugwege sechs Konturen und eine Winkelsteuerung der Füllung mit dem Startwinkel 0 ° und dem Deltawinkel 0 °. Bei Nylon-CF10 lag die Konturbreite standardmäßig bei 0,02 Zoll. Bei ABS-CF10 lag die Konturbreite bei 0,0198 Zoll wegen der Überfüllung bei einer standardmäßigen Konturbreite von 0,02 Zoll. **Abbildung 6** zeigt die Werkzeugwege der Zugcoupons mit den unidirektionalen Werkzeugwegen der verengten Bereiche. **Abbildung 7** zeigt die modifizierten Parameter der Werkzeugwege innerhalb der angewendeten spezifischen Gruppe des Bauteils.



Abbildung 6 – Werkzeugwege des D638-Zugcoupons mit unidirektionalen Werkzeugwegen im verengten Bereich.



Mechanische Zugtests wurden gemäß ASTM D638 mit einer Kreuzkopfgeschwindigkeit von 0,2 Zoll/min durchgeführt. Das Zugmodul wird anhand von Spannungs-Dehnungswerten in Höhe von 15 % bis 35 % der Maximalbelastung berechnet. Vor dem Test wurden alle Proben mindestens 40 Stunden bei $23 \pm 2 \text{ °C}$ ($73 \text{ °F} \pm 3,6 \text{ °F}$) und einer relativen Luftfeuchte von $50 \pm 10 \text{ %}$ klimatisiert.

Abbildung 7 – Beispiel der spezifischen Gruppen für unidirektionale Zugcoupons. Modifizierte Parameter für Nylon-CF10 sind gelb hervorgehoben.

Jenseits des Datenblatts:

Einseitige Materialprüfungen können bei der Fertigung täuschen

Biegefestigkeit

Mechanische Biegetests wurden mit Proben gemäß ASTM D790 mit den Maßen 10,2 mm x 6,1 mm x 152,4 mm (0,4 Zoll x 0,24 Zoll x 6 Zoll) durchgeführt. Wie die Wärmeformbeständigkeitsproben wurden die Biegefestigkeitscoupons aus einer „Rennstrecke“ erstellt, die nur Konturen aufweisen. Die Enden wurden später abgeschnitten (siehe **Abbildung 8**). Um vollständig verstärkte Coupons zu erzielen und den Coupon auszufüllen, wurde die Konturbreite geringfügig angepasst. Bei einer Überfüllung des gedruckten Coupons wurde dieser dann verkleinert. Für die modifizierten Parameter des Werkzeugwegs in Insight wurden die Konturen auf 10 eingestellt. Bei Nylon-CF10 betrug die Konturbreite 0,0201 Zoll und bei ABS-CF10 0,02005 Zoll.

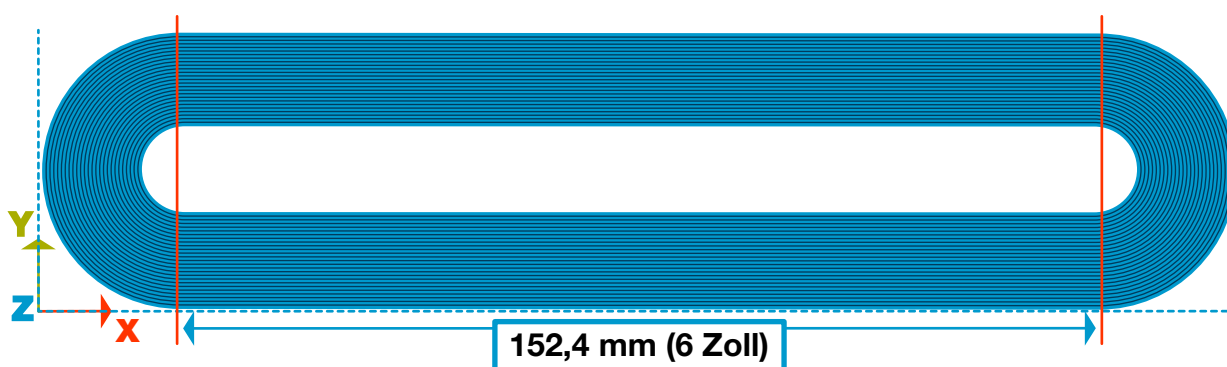


Abbildung 8 – Rennstrecke mit zwei zugehörigen Biegeproben für kontinuierliche Konturen. Die Halbkreise wurden abgeschnitten, sodass nur die Biegeprobe übrig blieb.

Mechanische Biegetests wurden mit Proben gemäß Verfahren A von ASTM D790 mit einer Spannweite von etwa 2 Zoll und einer Dehnungsgeschwindigkeit von 0,01 Zoll/min durchgeführt. Vor dem Test wurden alle Proben mindestens 40 Stunden bei $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ($73 \text{ }^\circ\text{F} \pm 3,6 \text{ }^\circ\text{F}$) und einer relativen Luftfeuchte von $50 \pm 10 \%$ klimatisiert.

Izod-Kerbschlagfestigkeit

Die Izod-Schlagfestigkeitstests wurden mit Proben gemäß ASTM D256 mit einer Dicke von 3,175 mm (0,125 Zoll) durchgeführt. Ähnlich wie bei der Zugprobe wurden die Werkzeugwege mit einer spezifischen Gruppe erstellt, um den Deltawinkel des Rasters auf 0° einzustellen. Die spezifische Gruppe hatte eine einzelne Kontur, eine feste Füllung, eine Winkelsteuerung der Füllung mit dem Startwinkel 0° und dem Deltawinkel 0° sowie standardmäßige Kontur- und Rasterbreiten. Dies führte bei jeder Schicht zu einer Coupon-Füllung wie in **Abbildung 9**.

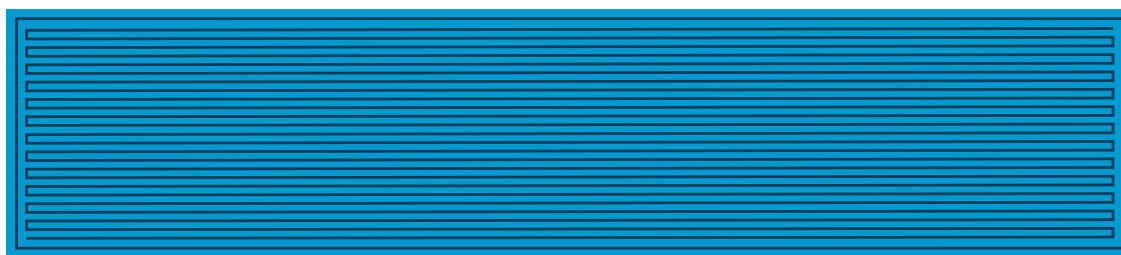


Abbildung 9 – Werkzeugwege der unidirektionalen Izod-Schlagfestigkeitsprobe.

Die Tests der Izod-Kerbschlagzähigkeit wurden gemäß Methode A von ASTM D256 mit einer Pendelleistung von 2 oder 16,1 ft*lb durchgeführt. Die Kerbe wurde nach dem Drucken gemäß ASTM D256 erstellt. Vor dem Test wurden alle Proben mindestens 40 Stunden bei $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ($73 \text{ }^\circ\text{F} \pm 3,6 \text{ }^\circ\text{F}$) und einer relativen Luftfeuchte von $50 \pm 10 \%$ klimatisiert.

Jenseits des Datenblatts:

Einseitige Materialprüfungen können bei der Fertigung täuschen

Ergebnisse und Analyse

Zur Veranschaulichung der Ergebnisse der unidirektionalen Tests wurden zum Vergleich der mechanischen Leistung Daten aus den Datenblättern der Materialien oder andere nach den Materialtestverfahren von Stratasys getestete Datensätze berücksichtigt. Auf Anfrage sind die Rohdaten der unidirektionalen Daten erhältlich. **Anhang B** enthält Tabellen mit den britischen Maßeinheiten.

Wärmeformbeständigkeitstests

Wärmeformbeständigkeit bedeutet, dass ein Material ab einer bestimmten Temperatur weich wird oder sich verformt. Sie ist ein Indikator für Hitzebeständigkeit. Mit ihrer Hilfe kann man die Höchsttemperatur ermitteln, der ein Material standhält, ohne sich erheblich zu verformen oder zu brechen.

Tabelle 1 enthält die Daten der Wärmeformbeständigkeit von ABS-CF und Nylon-CF. Bei den unidirektionalen Werkzeugwegen mit 45 °/-45 ° kommt es bei ABS-CF10 bei beiden Druckhöhen zu einer schrittweisen Erhöhung. Bei Nylon-CF10 kommt es zwischen den unidirektionalen und standardmäßigen Werkzeugwegen zu einer bedeutenden Erhöhung um etwa 160 %. Erwähnenswert ist auch das höhere Ergebnis bei den unidirektionalen Werkzeugwegen im Vergleich zu den ausgeformten Wärmeformbeständigkeitsdaten. Durch die Ausrichtung der Kohlenstoffasern entlang der Werkzeugwege statt der eher zufälligen Verteilung beim Spritzgussverfahren wird bei der Wärmeformbeständigkeit ein um 13 % bis 14 % höheres Ergebnis erzielt.

	Wärmeformbeständigkeit (°C)			
	ABS Filament mit Kohlefasern ABS-CF10		Nylon-CF10	
	Niedrig (0,45 MPa)	Hoch (1,8 MPa)	Niedrig (0,45 MPa)	Hoch (1,8 MPa)
Unidirektionale Werkzeugwege (XY-Ausrichtung)	117	112	153	133
Standardmäßige Werkzeugwege (45/-45, XY-Ausrichtung)	112	111	58	52
Ausgeformt	100	99	109	105

Tabelle 1 – Wärmeformbeständigkeit von ABS-CF10 und Nylon-CF10

Zugfestigkeit

Zugtests prüfen die Festigkeit, Widerstandsfähigkeit und Dehnungsfähigkeit durch Ziehen am Ende des Probestücks bis zum Bruch. **Tabelle 2** enthält die Zugdaten der unidirektionalen Werkzeugwege und die Daten der **XY**-Coupons mit normalen Werkzeugwegen (45 °/-45 °) auf denselben Maschinen und mit denselben Materialchargen wie bei den unidirektionalen Werkzeugwegen. Bei beiden Materialien kommt es bei den unidirektionalen Werkzeugwegen zu einer Erhöhung der Zugfestigkeit, Streckgrenze und Bruchspannung sowie einer Verringerung der Dehnungswerte. Dies ergibt Sinn, denn dank der an der Achse ausgerichteten Kohlenfaser verbessert sich die Festigkeit und verringert sich die Dehnfähigkeit des Matrixmaterials der Spannungsachse.

Jenseits des Datenblatts:

Einseitige Materialprüfungen können bei der Fertigung täuschen

Bei ABS-CF10 führen die unidirektionalen Werkzeugwege gegenüber den standardmäßigen Werkzeugwegen zu einer Erhöhung der Streckgrenze und Bruchspannung um 25 % sowie einer Erhöhung des Elastizitätsmoduls um 71 %. Bei Nylon-CF10 erhöhen sich mit unidirektionalen Werkzeugwegen der Elastizitätsmodul um 152 % und die Streckgrenze um 94 %.

Zudem sind die Zugdaten relativ eng, wie **Abbildung 10** veranschaulicht – Die Streckgrenze erhöht sich durch die Nutzung unidirektionaler Werkzeugwege. Der Variationskoeffizient (COV), also die Standardabweichung dividiert durch den Mittelwert, des gesamten Zugmoduls und der Streckgrenze der **XY**-Zugdaten liegt bei unter 4 %.

Bei ABS-CF10 führen die unidirektionalen Werkzeugwege gegenüber den standardmäßigen Werkzeugwegen zu einer Erhöhung der Streckgrenze und Bruchspannung um 25 % sowie einer Erhöhung des Elastizitätsmoduls um 71 %. Bei Nylon-CF10 erhöhen sich mit unidirektionalen Werkzeugwegen der Elastizitätsmodul um 152 % und die Streckgrenze um 94 %.

Werkzeugwege	ABS Filament mit Kohlefasern ABS-CF10		Nylon-CF10	
	Unidirektional	Standardmäßig 45/-45	Unidirektional	Standardmäßig 45/-45
Elastizitätsmodul (GPa)	5,22	3,04	6,03	2,39
Streckgrenze (MPa)	44,9	35,8	68,1	35,1
Fließdehnung (%)	1,2	3,0	4,0	5,6
Bruchspannung (MPa)	44,6	35,6	64,4	20,0
Bruchdehnung (%)	1,2	3,0	5,1	8,2

Tabelle 2 – Zugdaten von ABS-CF10 und Nylon-CF10 in der XY-Ausrichtung

Durch Werkzeugwege beeinflusste Streckgrenze

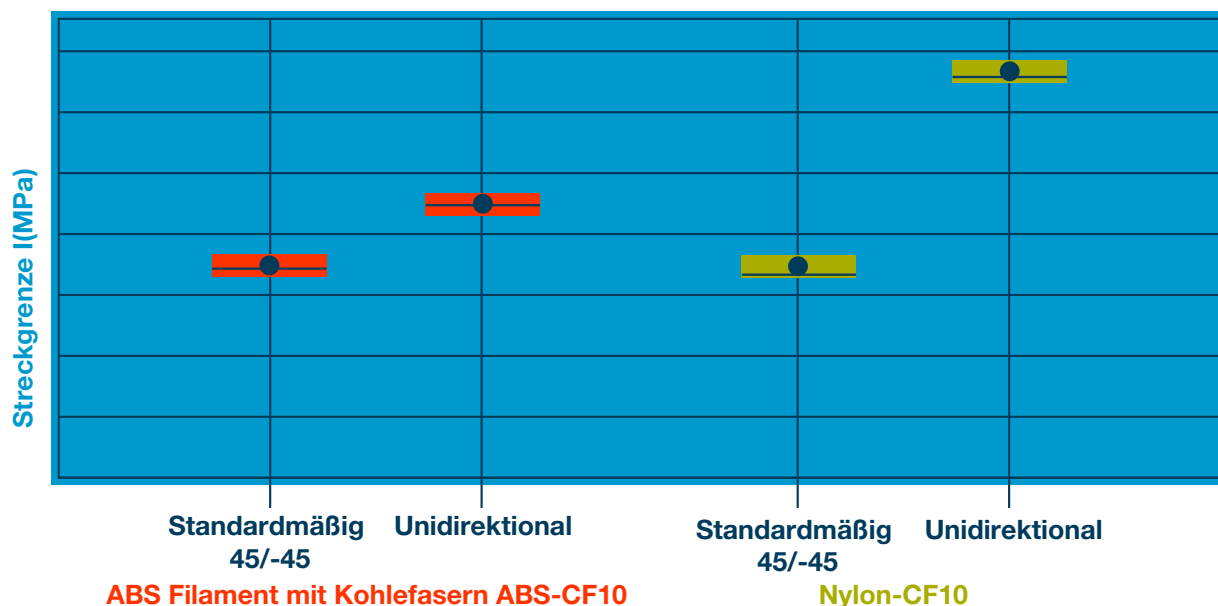


Abbildung 10 – Die Streckgrenze erhöht sich durch die Nutzung unidirektionaler Werkzeugwege.

Jenseits des Datenblatts:

Einseitige Materialprüfungen können bei der Fertigung täuschen

Biegefestigkeit

Bei Biegefestigkeitstests wird die Biege- bzw. Verformungsresistenz eines Materials bei einer Dreipunktbelastung evaluiert. Das Ergebnis zeigt, wie bruch- oder rissresistent ein Material gegenüber Biegekräften ist und liefert Erkenntnisse zu seiner strukturellen Integrität und Belastbarkeit unter realen Bedingungen. **Tabelle 3** enthält die Daten zur unidirektionalen Biegefestigkeit und die Biegefestigkeit ist in **Abbildung 11** zu sehen. Mit einem Variationskoeffizienten von weniger als 4 % bei der Bruchdehnung und Biegefestigkeit bis zum Bruch sind die Daten der zehn Proben mit den einzelnen Materialien gut reproduzierbar.

Biegefestigkeit von XY-Probestücken aus Nylon-CF10 mit unidirektionalen Werkzeugwegen		
	ABS Filament mit Kohlefasern ABS-CF10	Nylon-CF10
Elastizitätsmodul (GPa)	4,96	6,96
Biegedehnung beim Bruch (%)	2,6	3,4
Biegespannung beim Bruch (MPa)	89,3	138,2

Tabelle 3 – Biegefestigkeit von ABS-CF10 und Nylon-CF10 in der XY-Ausrichtung mit unidirektionalen Werkzeugwegen

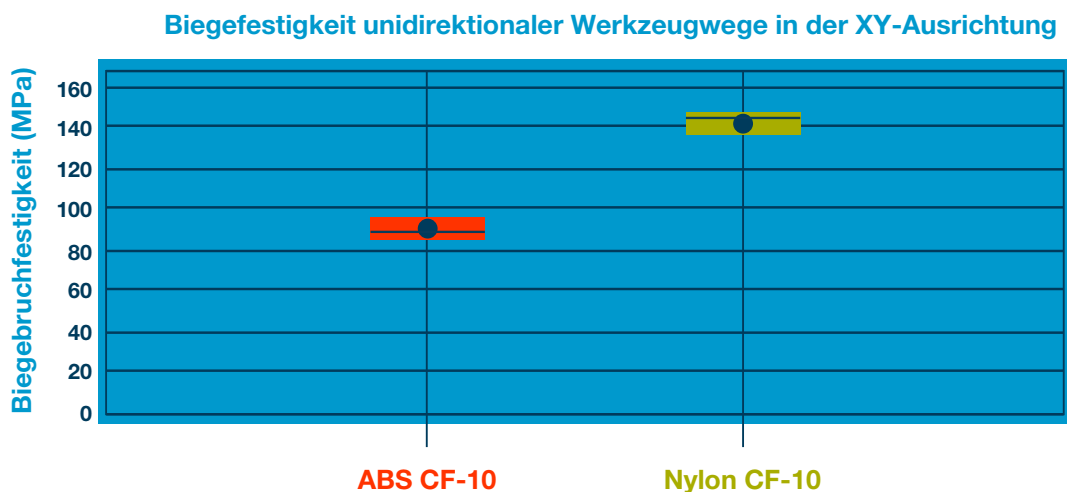


Abbildung 11 – Biegespannung beim Bruch unidirektionaler Werkzeugwege mit XY-Ausrichtung.

Jenseits des Datenblatts:

Einseitige Materialprüfungen können bei der Fertigung täuschen

Izod-Kerbschlagfestigkeit

Die Izod-Kerbschlagtestmethode dient der Feststellung der Schlagfestigkeit eines Materials durch Messung der erforderlichen Energie eines Pendelschlags für den Bruch eines angekerbten Probestücks. Hieraus ergibt sich die Belastbarkeit gegenüber plötzlichen Schlag- oder Stoßlasten und man erhält Erkenntnisse zur Härte und Bruchfestigkeit. Dieser Test ist nützlich bei der Auswahl von Material für Anwendungen, bei denen es Bedenken gibt in Bezug auf Schläge oder dynamische Belastung. Man kann so sicherstellen, ob das ausgewählte Material etwaigen Schlägen ohne Totalausfall standhält.

Tabelle 4 enthält die Schlagdaten für ABS-CF10 und Nylon-CF10. Die Daten der standardmäßigen Werkzeugwege sind die Daten des Materialdatenblatts. Beim Drucken mit unidirektionalen Werkzeugwegen in flacher Ausrichtung erhöht sich die gemessene maximale Schlagzähigkeit von ABS-CF10 bzw. Nylon-CF10 um 54 % bzw. 26 %. Bei FDM verbinden sich die Schichten untereinander weniger. Deshalb ist die vertikale Richtung (**Z**) schwächer als die (flache) **XY**-Ebene. Würde Stratasys nur die unidirektionalen Daten ausweisen, hätte Nylon-CF10 eine 7,5-mal höhere Schlagzähigkeit als in der aufrechten (**XZ**)-Orientierung. ABS-CF10 hätte eine 3,9-mal höhere Schlagzähigkeit. Die tatsächliche Materialfestigkeit eines realen Bauteils, bei dem es Bedenken in Bezug auf die dynamische Belastung gibt, würde hierdurch von Grund auf falsch wiedergegeben. Bei der Gestaltung von Bauteilen muss man auch die Materialfestigkeit der **Z**-Richtung berücksichtigen, um geeignete Grenzwerte und Sicherheitsfaktoren zu gewährleisten.

Beim Drucken flach ausgerichteter, unidirektionaler Werkzeugwege erhöht sich die Schlagzähigkeit von ABS-CF10 bzw. Nylon-CF10 um 54 % bzw. 26 %. Bei realen Bauteilen ist aber die vertikale Festigkeit entscheidend, daher würde es die tatsächliche Materialfestigkeit falsch wiedergeben.

Aus Gründen der Sicherheit und Funktionalität muss bei der Gestaltung die Festigkeit der X-, Y- und Z-Richtung berücksichtigt werden.

Izod-Schlagzähigkeit von ABS-CF10 und Nylon-CF10 (J/m)			
Druckausrichtung	Werkzeugwege	ABS Filament mit Kohlefasern ABS-CF10	Nylon-CF10
Flach (XY)	Unidirektional	79,2	272
Hochkant (XZ)	Standardmäßig (45 °/-45 °)	51,4	202
Senkrecht (ZX)	Standardmäßig (45 °/-45 °)	20,3	36,3

Tabelle 4 - Daten der Izod-Schlagzähigkeit

Jenseits des Datenblatts:

Einseitige Materialprüfungen können bei der Fertigung täuschen

Vergleich mit dem nächsten Wettbewerber

Dieses Whitepaper geht auf Behauptungen zu besseren Materialeigenschaften von Wettbewerbern zurück. Wenn man unsere Materialien mit unidirektionalen Werkzeugwegen testet, ergibt sich ein klares Bild mit besser geeigneten Vergleichsmöglichkeiten. Die Gegenüberstellung der unidirektionalen mechanischen Daten zu ABS-CF10 und Nylon-CF10 und der ausgewiesenen mechanischen Daten des Wettbewerbers in [Tabelle 5](#) veranschaulicht dies. Sofern nicht anders angegeben stammen die Materialdaten des Wettbewerbers direkt aus dem neusten Materialdatenblatt des Wettbewerbers (Anfang 2022).

Bei der Durchsicht von [Tabelle 5](#) ist die dargestellte Datenbreite zu beachten. Bei den Materialien der Wettbewerber steht jeder Datenpunkt für dreifache Tests, also nur drei Proben. Die Wärmeformbeständigkeitstests von ABS-CF10 und Nylon CF10 umfassen drei Proben, aber die Materialeigenschaften der Zug-, Biege- und Schlagfestigkeit enthalten Daten von zehn Proben. Die Daten zu den herkömmlichen mechanischen Tests in den FDM-Materialdatenblättern von Stratasys beziehen sich auf mindestens 30 Probestücke (drei Geräte x 10 Coupons). Die Materialdaten von Stratasys beruhen also auf drei Mal so vielen Daten, aber unsere herkömmlichen Materialdatenblätter enthalten zehn Mal so viele Daten wie bei diesem Wettbewerber.

Die Testergebnisse zur Zugfestigkeit ergeben, dass die Materialien von Stratasys ein höheres Zugmodul und eine höhere Zugfestigkeit haben, die des Wettbewerbers hingegen eine höhere Bruchdehnung. Es läuft auf Folgendes hinaus: bei einer höheren Materialfestigkeit und Widerstandsfähigkeit gegenüber kraftbedingten Verformungen sinkt die Dehnbarkeit bzw. Dehnfähigkeit. Der Zugmodul von ABS-CF10 und Nylon-CF10 ist ungefähr doppelt so hoch wie bei Materialien der Wettbewerber. Das deutet darauf hin, dass die Materialien von Stratasys steifer sind, stärkeren Kräften standhalten und sich weniger stark verformen.

Bei den Biegetests haben ABS-CF10 und Nylon-CF10 im Ergebnis einen höheren Biegemodul und eine höhere Bruchspannung als die Materialien des Wettbewerbers. Dies deutet darauf hin, dass diese Materialien der Dreipunkt-Biegebeanspruchung eher standhalten und sich bei einer vorhandenen Belastung weniger stark verformen. Die Kohlefasern von ABS-CF10 und Nylon-CF10 sind länger als die Materialien der Wettbewerber. Daher können sie vorhandenen Biegekräften besser standhalten.

Für die Wärmeformbeständigkeit bei 0,45 MPa weist der Wettbewerber in seinem Materialdatenblatt 145 °C aus. Nylon-CF10 hat einen geringeren Wert (153 °C) und ABS-CF10 hat einen höheren Wert (117 °C). Für die Wärmeformbeständigkeit bei 1,8 MPa stellt der Wettbewerber keine Leistungsdaten bereit. Stratasys hat die Wärmeformbeständigkeit des Materials jedoch mit höherem Druck getestet. Bei 1,8 MPa hatte das Material eine Wärmeformbeständigkeit von 71 °C. Das ist ein Temperaturrückgang von 51 % im Vergleich zur Wärmeformbeständigkeit des Materials bei geringerem Druck. Bei ABS-CF10 und Nylon-CF10 sinkt die Temperatur der Wärmeformbeständigkeit bei höherem Druck lediglich um 4 % bzw. 13 %.

Das Material des Wettbewerbers hat eine höhere Schlagzähigkeit als ABS-CF10 und Nylon-CF10. Wenn man dieselbe Testmethode nutzt, eignen sich die Werte besser für den Vergleich mit dem Material des Wettbewerbers.

Dieses Whitepaper wurde durch die Behauptung von Wettbewerbern, über bessere Materialeigenschaften zu verfügen, motiviert. Wenn man unsere Materialien mit unidirektionalen Werkzeugwegen testet, ergibt sich ein klares Bild mit besser geeigneten Vergleichsmöglichkeiten.

Jenseits des Datenblatts:

Einseitige Materialprüfungen können bei der Fertigung täuschen

Vergleich der mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Materialien von Stratasys und konkurrierender Materialien

	Materialeigenschaften	ABS Filament mit Kohlefasern ABS-CF10	Nylon-CF10	Konkurrierendes Material 1	Konkurrierendes Material 2
Zugfestigkeit ²	Elastizitätsmodul (GPa) ¹	5,22	6,03	2,4	3,0
	Streckgrenze (MPa)	44,9	68,1	40	41
	Fließdehnung (%)	1,2	4,0	Nicht ausgewiesen	Nicht ausgewiesen
	Bruchspannung (MPa)	44,6	64,4	37	40
	Bruchdehnung (%)	1,2	5,1	25	18
Biegefestigkeit	Elastizitätsmodul (GPa)	4,96	6,96	3,0	3,6
	Biegefestigkeit beim Bruch (%)	2,6	3,4	Nicht ausgewiesen	Nicht ausgewiesen
	Biegespannung beim Bruch (MPa)	89,3	138	71	71
Wärmeformbeständigkeit	Wärmeformbeständigkeit - 0,45 MPa (°C)	117	153	145	145
	Wärmeformbeständigkeit - 1,8 MPa (°C)	112	133	105 (Labortests von Stratasys ³)	Nicht ausgewiesen
Schlagfestigkeit	Izod-Kerbschlagzähigkeit (J/m)	79,2	272	330	Nicht ausgewiesen

Tabelle 5 - Vergleich der mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Materialien von Stratasys und konkurrierender Materialien

Notes:

- Der Zugmodul von ABS-CF10 und Nylon-CF10 wird berechnet anhand von Spannungs-Dehnungs-Werten zwischen 15 % und 35 % der maximalen Belastung. Es ist nicht bekannt, in welchem Bereich die Werte des Zugmoduls des Materials des Wettbewerbers berechnet werden.
- Der Formdruck der Proben aus ABS-CF10 und Nylon-CF10 erfolgte mit unidirektionalen Werkzeugwegen. Die Zugcoupons aus dem Material des Wettbewerbers wurden zugeschnitten.
- Bei Wärmeformbeständigkeitstest weist der Wettbewerber den höheren Druck nicht aus. Dieser Wert wurde bei Tests von Stratasys nach ihren Methoden für 1,8 MPa ermittelt. Messungen der Wärmeformbeständigkeit bei 0,45 MP von Stratasys waren ihren ausgewiesenen Werten sehr ähnlich.

Jenseits des Datenblatts:

Einseitige Materialprüfungen können bei der Fertigung täuschen

Fazit

Werkzeugwege haben einen großen Einfluss auf die mechanischen und physikalischen Eigenschaften. Die Kunden additiver Fertigungsunternehmen müssen sich die vorgelegten Daten daher genau ansehen, um die Materialeigenschaften genau vergleichen zu können.

Durch den Wechsel von standardmäßigen (45 °/-45 °) zu unidirektionalen Werkzeugwegen konnten wir bei den Materialien ABS-CF10 und Nylon-CF10 drastische Leistungsänderungen aufzeigen. Die Wärmeformbeständigkeit von Nylon-CF10 erhöhte sich durch die Änderung der Werkzeugwege sowohl bei 0,45 MPa als auch bei 1,8 MPa. Die Zugfestigkeit von ABS-CF10 erhöhte sich im Elastizitätsmodul um 71 %. Bei Nylon-CF10 erhöhten sich das Elastizitätsmodul mit unidirektionalen Werkzeugwegen um 152 % und die Streckgrenze um 94 %. Dies sind keine geringfügigen Änderungen der Festigkeit und letztlich der Leistung von Bauteilen, sondern ist ein entscheidender Unterschied im Vergleich zu konkurrierenden Materialien, die stets mit optimierten unidirektionalen Werkzeugwegen getestet werden. Mechanische Tests müssen mit Probestücken durchgeführt werden, die den Bauteilgeometrien entsprechen, vor allem dann, wenn es um Grenzwerte geht. Optimierte Werkzeugwege in der stärksten Ausrichtung zeigen die größtmögliche Festigkeit. Dies entspricht aber nicht unbedingt der tatsächlichen Festigkeit des Bauteils. Daher sollte es keine standardmäßige Testmethode sein.

Anhang A – Softwareversionen, Testgeräte und Kalibrierungsverlauf

	ABS Filament mit Kohlefasern ABS-CF10	Nylon-CF10
Verarbeitungssoftware	Insight 16.10 (Build 4372)	
Komprimierungssoftware für Baugruppen	Control Center 16.10 (Build 4372)	
Drucker-Seriennummer für Baugruppen	D80022	D80005
Druckersoftware (Backend)	2.5.5966.0	2.6.5976.0
Materialinformationen	Bauteilnummer: 333-90310 Seriennummer: 630755611 Herstellungsdatum: 04. Jun. 2022 Charge: 112995	Bauteilnummer: 333-90450 Seriennummer: 676936711 Herstellungsdatum: 13. April 2023 Charge: 114590

Tabelle 6 – Softwareversionen, Geräteinformationen und Materialinformationen

-	Ausstattung	Seriennummer	Kalibrierungsdatum
Zugtest	MTS Criterion 43	5001678	15/6/2023
Zuglastzelle	10kN Load Cell LPS-104C	1010933	16/6/2023
Dehnungsmesser	2 in Extensometer 634-28E-24	10574728	15/6/2023
Biegetest	MTS Criterion 43	5000462	14/6/2023
Biegelastzelle	5kN Load Cell LPS-503C	1021979	14/6/2023
Wärmeformbeständigkeit	DMA Q300	0800-1786	29/3/2023
Schlagtest	Tinuis Olsen 892 Impact Tester	195795	31/1/2023

Tabelle 7 – Testgeräte und Kalibrierungsdatum

Jenseits des Datenblatts:

Einseitige Materialprüfungen können bei der Fertigung täuschen

Anhang B – Tabellen mit britischen Maßeinheiten

Werkzeugwege	Wärmeformbeständigkeit (°F)			
	ABS Filament mit Kohlefasern ABS-CF10		Nylon-CF10	
	Niedrig (66 psi)	Hoch (264 psi)	Niedrig (66 psi)	Hoch (264 psi)
Unidirektionale Werkzeugwege (XY-Ausrichtung)	242	233	307	271
Standardmäßige Werkzeugwege (45/-45, XY-Ausrichtung)	234	233	136	126
Ausgeformt	212	210	228	221

Tabelle 1 – Wärmeformbeständigkeit von ABS-CF10 und Nylon-CF10 (britische Maßeinheiten)

Werkzeugwege	ABS Filament mit Kohlefasern ABS-CF10		Nylon-CF10	
	Unidirektional	Standardmäßig 45/-45	Unidirektional	Standardmäßig 45/-45
Elastizitätsmodul (ksi)	756	441	875	347
Streckgrenze (psi)	6500	5200	9880	5100
Fließdehnung (%)	1,2	3,0	4,0	5,6
Bruchspannung (psi)	6470	5170	9330	3230
Bruchdehnung (%)	1,2	3,0	5,1	8,2

Tabelle 2 – Zugdaten von ABS-CF10 und Nylon-CF10 in XY-Ausrichtung (britische Maßeinheiten)

Biegefestigkeit von XY-Probestücken mit unidirektionalen Werkzeugwegen		
	ABS-CF10	Nylon-CF10
Elastizitätsmodul (ksi)	719	1010
Biegedehnung beim Bruch (%)	2,6	3,4
Biegespannung beim Bruch (ksi)	13,0	20,0

Tabelle 3 – Biegefestigkeit von ABS-CF10 und Nylon-CF10 in XY-Ausrichtung mit unidirektionalen Werkzeugwegen (britische Maßeinheiten)

Izod-Schlagzähigkeit von ABS-CF10 und Nylon-CF10 (ft*lb/in)			
Druckausrichtung	Werkzeugwege	ABS Filament mit Kohlefasern ABS-CF10	Nylon-CF10
Flach (XY)	Unidirektional	1,48	5,10
Hochkant (XZ)	Standardmäßig (45 °/-45 °)	0,962	3,79
Senkrecht (ZX)	Standardmäßig (45 °/-45 °)	0,381	0,68

Tabelle 4 – Daten der Izod-Schlagzähigkeit (britische Maßeinheiten)

Jenseits des Datenblatts:

Einseitige Materialprüfungen können bei der Fertigung täuschen

	Materialeigenschaften	ABS Filament mit Kohlefasern ABS-CF10	Nylon-CF10	Konkurrierendes Material 1	Konkurrierendes Material 2
Zugfestigkeit ²	Elastizitätsmodul (ksi) ¹	756	875	348	435
	Streckgrenze (psi)	6500	9880	5800	5950
	Fließdehnung (%)	1,2	4,0	Nicht ausgewiesen	Nicht ausgewiesen
	Bruchspannung (psi)	6470	9330	5370	5800
	Bruchdehnung (%)	1,2	5,1	25	18
Biegefestigkeit	Elastizitätsmodul (ksi)	719	1010	435	522
	Biegefestigkeit beim Bruch (%)	2,6	3,4	Nicht ausgewiesen	Nicht ausgewiesen
	Biegespannung beim Bruch (psi)	13000	20000	10300	10300
Wärmeformbeständigkeit	Wärmeformbeständigkeit - 66 psi (°F)	243	307	293	293
	Wärmeformbeständigkeit - 264 psi (°F)	233	271	160 (Labortests von Stratasys ³)	Nicht ausgewiesen
Schlagfestigkeit	Izod-Kerbschlagzähigkeit (ft*lb/in)	1,48	5,10	6,18	Nicht ausgewiesen

Tabelle 5 - Vergleich der mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Materialien von Stratasys und konkurrierender Materialien (britische Maßeinheiten)

Notes:

- Der Zugmodul von ABS-CF10 und Nylon-CF10 wird berechnet anhand von Spannungs-Dehnungs-Werten zwischen 15 % und 35 % der maximalen Belastung. Es ist nicht bekannt, in welchem Bereich die Werte des Zugmoduls des Materials des Wettbewerbers berechnet werden.
- Der Formdruck der Proben aus ABS-CF10 und Nylon-CF10 erfolgte mit unidirektionalen Werkzeugwegen. Die Zugcoupons aus dem Material des Wettbewerbers wurden zugeschnitten.
- Bei Wärmeformbeständigkeitstest weist der Wettbewerber den höheren Druck nicht aus. Dieser Wert wurde bei Tests von Stratasys nach ihren Methoden für 1,8 MPa ermittelt. Messungen der Wärmeformbeständigkeit bei 0,45 MP von Stratasys waren ihren ausgewiesenen Werten sehr ähnlich.

USA – Hauptniederlassung

7665 Commerce Way
Eden Prairie, MN 55344, USA
+1 952 937 3000

ISRAEL – Hauptniederlassung

1 Holtzman St., Science Park
P.O. Box 2496
Rehovot 76124, Israel
+972 74 745 4000

EMEA

Airport Boulevard B 120
77836 Rheinmünster, Deutschland
+49 7229 7772 0

Südasien

1F A3, Ninghui Plaza
No.718 Lingshi Road
Shanghai, China
Tel.: +86 21 3319 6000



KONTAKTIEREN SIE UNS.

www.stratasys.com/contact-us/locations

stratasys.com

Zertifiziert nach ISO 9001:2015

