

KURZVERÖFFENTLICHUNG

FaserFab - Additive Fertigung mit Fasern als Druckrohstoff

Autoren:	Dr. Erik Frank Melanie Fischer
Forschungsstelle:	DITF – Institut für Textilchemie und Chemiefasern
Erschienen:	28.02.2023
Bearbeitungszeitraum:	01.04.2020-30.09.2022

Zusammenfassung

Im Projekt FaserFab wurde erstmals der Einsatz von Garnen als Druckrohstoff in der additiven Fertigung untersucht. Hierbei wurden hochschmelzende/nichtschmelzende Kernfasern mit einer schmelzbaren zweiten Garnfraktion in einem Garn verbunden. Durch Aufschmelzen des zweiten Garns in der Düse eines modifizierten 3D-Druckers wurden die Garne Schichtweise abgelegt und zu einem 3D-Körper aufgebaut. Die generell eingesetzten Fasertypen im Projekt waren Bikomponentenfasern und Umwindgarne. Die Kerngarne können neben den Standardfasertypen wie Polyamiden oder Polyestern auch Hochleistungsfasern wie Carbonfasern, Glasfasern oder Metallfasern sein. Die Endlosfaser bringt durch hohe Orientierung Bauteile mit sehr guten mechanischen Eigenschaften hervor, da die Faser stets in Lastrichtung verlegt werden kann. Endlosfasern sind den im FDM-Druck oft beigemischten Kurzfasern signifikant überlegen.

Im Projekt wurden exemplarisch Carbonfasern als Umwindgarne hergestellt und auf Ihre Eignung im Druckprozess untersucht. Das Hauptproblem dabei waren zu hohe Filamentzahlen, was durch die hohe Steifigkeit schlechte Verarbeitbarkeit bedingte. Rein polymere Mischgarne hingegen sind wesentlich flexibler und konnten zu Druckkörpern verarbeitet werden. Die Anzahl der Umwindungen bzw. das Verhältnis von Kern- zur Schmelzefaser ist hierbei für die Durchführbarkeit entscheidend. Das Projekt konnte die Parameter für die Druckbarkeit der neuen Materialien identifizieren und die Machbarkeit des Druckverfahrens demonstrieren.

Ergebnisse

Als Grundgarne für den 3D-Druck wurden Bikomponenten- und Umwindgarne hergestellt. Alle im Projekt verwendeten Fasern wurden eigens auf den Spinnanlagen der DITF im Schmelzspinnverfahren ausgesponnen und auf die optimalen Eigenschaften im 3D-Druckprozess hin optimiert. Die Kerngarne wurden auf maximale Orientierung hin verstreckt, die Umwindgarne hingegen als Schmelzmatrix hingegen wurden nur partiell verstreckt um eine Verformung beim Ablageprozess nach der Spinndüse zu vermeiden.

Auf der hauseigenen Schmelzspinnanlage des DITF, mit einem Extruder der Marke Thermo Scientific HAAKE wurden die vier verschiedenen Polymere PA6, PA6.6 und PET bzw. PLA ausgesponnen. Die Parameter und mechanischen Kennwerte der Spinnversuche in folgender Tabelle zusammengefasst:

Spinnparameter ausgewählter Synthefasern und mechanische Kennwerte

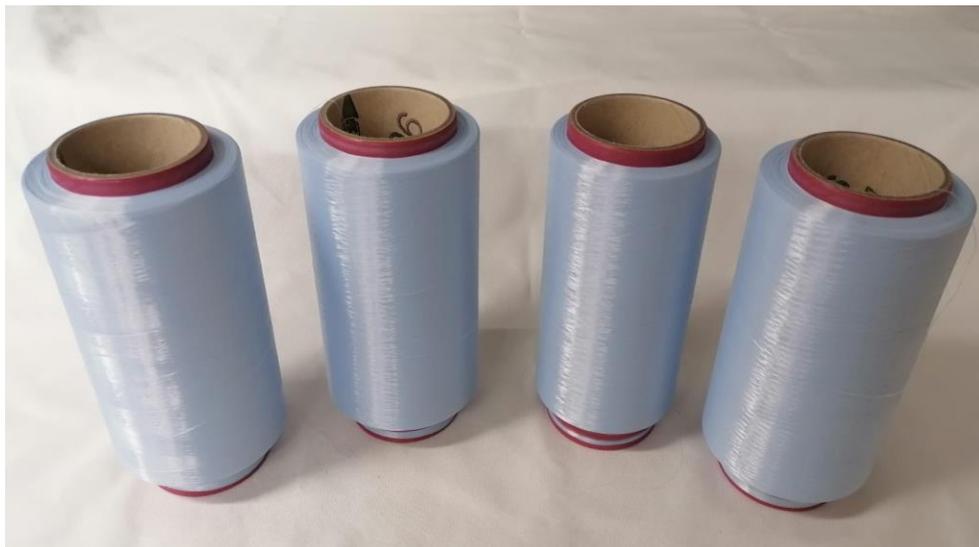
Material	Wickelgeschwindigkeit	Dehnung	Bruchdehnung	Zugfestigkeit	Feinheit	E-Modul
	m/min	%	%	cN/tex	dtex	cN/tex
PA6	4000	65	77	39	168	193
PA6.6	4000	77	93	27	169	110
PET	3000	87	94	27	169	350
PLA	1500	150	194	11	758	276

Die PA6.6 und PET Fasern wurden anschließend heiß verstreckt. Durch die Verstreckung konnten höhere Faserfestigkeiten erreicht werden, die im späteren 3D-Druckprozess Abrisse des Materials vorbeugen.

Mechanische Kennwerte der verstreckten Synthefasern

Material	Dehnung	Bruchdehnung	Zugfestigkeit	Feinheit	E-Modul	Bemerkung
	%	%	cN/tex	dtex	cN/tex	
PA6	25	31	58	114	319	heißverstreckt
PA6.6	39	47	36	118,1	178	Faktor 1,32
PET	34	41	37	125,8	641	Faktor 1,44
PLA	32	80	16	404	421	Faktor 2,04

Die Bikomponentenfasern als zweites verwendetes Grundmaterial wurden an den DITF an einer eigenen Anlage hergestellt. Hierbei wird von zwei Extrudern ein Bikomponentenspinnkopf mit PET für den Filamentkern und PBT für die Filamenthülle ein Multifilamentgarn ausgesponnen.

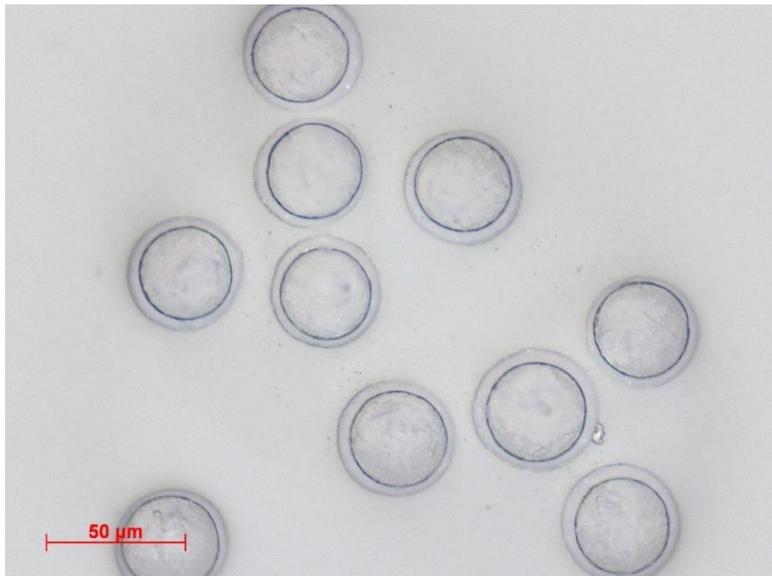


Die Spinnversuche ergaben Bikomponentenfaser mit einem optimalen Kern/Mantel-Verhältnis von 70/30. Durch das Verändern des Extruderdurchsatzes und der Wickelgeschwindigkeit konnten Spulen mit verschiedenen Filamentdicken gewickelt werden. Die Zugfestigkeit der Fasern war mit 22-24 cN/tex ausreichend hoch für die nachfolgenden Prozesse der additiven Fertigung

Übersicht der Spinnversuche zu den Bikomponentenfasern aus PET/PBT

Material	wind speed	Dehnung	Zugfestigkeit	Feinheit	E-Modul
	m/min	%	cN/tex	dtex	cN/tex
PET/PBT 70/30	3000	107	24	98	281
PET/PBT 70/30	3000	121	22	171	254
PET/PBT 70/30	3000	126	23	171	255
PET/PBT 70/30	3000	122	23	173	248
PET/PBT 70/30	3000	124	24	174	272
PET/PBT 70/30	3000	130	23	262	253
PET/PBT 70/30	3000	118	22	290	246
PET/PBT 70/30	3000	124	23	291	252
PET/PBT 70/30	3000	114	22	291	266
PET/PBT 70/30	3000	122,2	22,74	295,85	255,35

Durch Anschliffe der eingebetteten Faser wurden die Ausbildung der Kern-Mantel-Struktur verifiziert. Die nachfolgende Abbildung zeigt exemplarisch den Anschliff der PET/PBT-Fasern mit einem Kern/Mantel Verhältnis von 70/30.



Querschnitt der Filamente einer Bikomponentenfaser mit einem Kern/Mantel Verhältnis von 70/30 PET/PBT

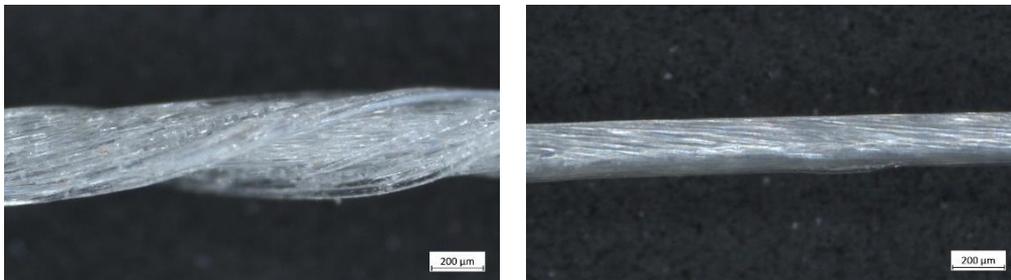
Durch spätere Erkenntnisse im 3D-Druckvorgang wurde das Kern/Mantel-Verhältnis in weiteren Spinnversuchen ebenfalls angepasst. Es zeigte sich, dass ein höherer Anteil an Mantelmaterial im Druck für weniger Fehlstellen sorgte. Für den späteren Druckprozess ist das thermische Verhalten der Faser essentiell, um die Druckparameter auf das Schmelz- und Kristallisationsverhalten der Druckfaser. Dafür wurden an exemplarischen Fasern DSC-Messungen durchgeführt. Das PBT hat einen Schmelzpunkt von 224°C, das PET von 258°C. Für den 3D-Druck ist das Temperaturfenster somit auf einen Wert zwischen 230 und 250°C limitiert.

Herstellung von Umwindegarnen

Aus den zuvor hergestellten Glattgarnen wurden auf unterschiedlichen Maschinen Umwindearne produziert. Zunächst wurden die Garne auf eine DITF-eigenen Umwindemaschine aufgebracht. Hier wurde PET im Kern, und PLA als Umwindematerial

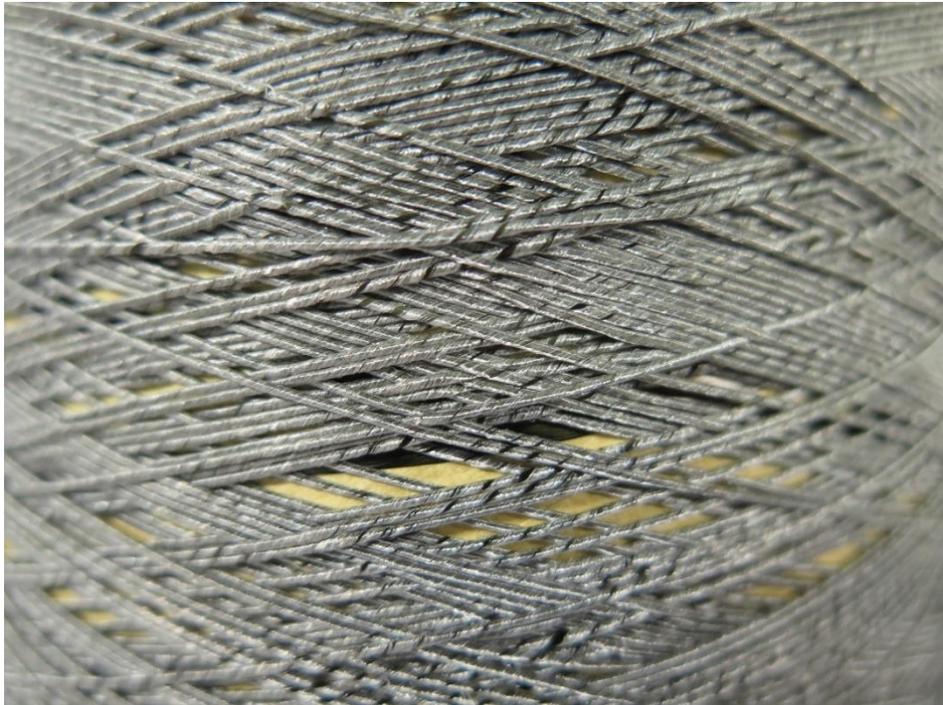
4_8

genutzt. Bei einer Wickelgeschwindigkeit von 15 m/min konnten maximal 530 Umwindungen/m angewendet werden, bevor die Faser begann sich zu kräuseln. Die Zielstellung hierbei war eine umwundene Faser die den Kern nahezu vollständig, gleichmäßig abdeckt. So kann im Druckvorgang ein gleichmäßiger Schmelzefluss des Matrixmaterials gewährleistet werden. Die folgenden Abbildungen zeigen eine lichtmikroskopische Aufnahme des Unwindegarns, sowie das gleiche Garn nach einem Aufschmelzversuch bei 200°C. Das resultierende Garn ist homogen und zeigt eine glatte Oberflächenstruktur und sollte in dieser Form in der additiven Fertigung verlegbar sein.



Zusätzlich wurden auch Umwindegarne mit Carbonfaserkern (1K-PAN-basierte Carbonfasern) hergestellt. Aufgrund des höheren Faserdurchmessers wurde auch hier PLA als Mantel benutzt. Das Carbonumwindegarn konnte mit bis zu 500 Turns/m hergestellt werden.

Zusätzlich wurden Umwindegarne mit einer 3K Carbonfaser im Kern und PA6 als Mantel, und Carbon/PLA-Garne mit 800 Turns/m mit doppelter Umwindung hergestellt werden. Dadurch konnte der Drall im Garn minimiert und eine bessere Abdeckung des Kernmaterials erlangt werden.



Nahaufnahme des doppelt umwundenen Carbon-Umwindegarns

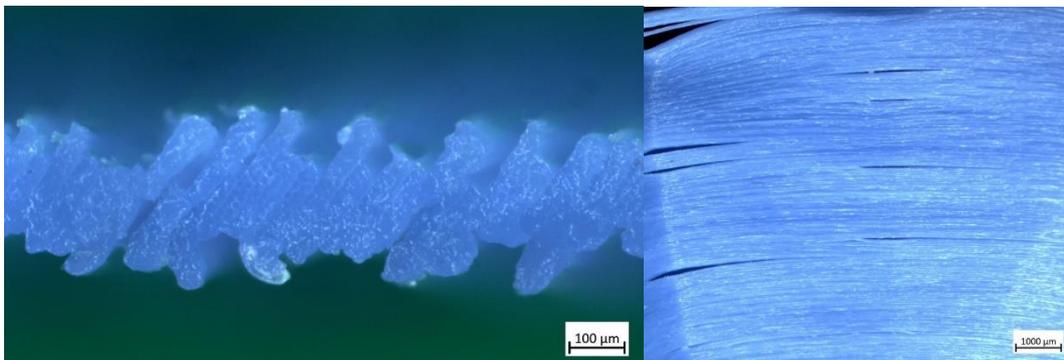
Die Carbon-Umwindegarne hatten durch die notwendige 3K Carbonfaser im Kern einen zu großen Durchmesser für die Druckerdüse. Selbst, als große 0,8 mm Düsen zum Einsatz kamen konnte das Material nicht gedruckt werden, da das Garn riss. REM-Aufnahmen des extrudierten Materials zeigten, dass die Menge des Umwindematerials nicht ausreichte, um die Carbonfaser vollständig zu durchtränken. Ein weiteres Problem stellt die große Steifigkeit eines solchen Carbonfaserbündels dar. Bei der Ablenkung an der Druckdüse wirkt, trotz einer Abrundung der Düse im Projekt als Modifikation, eine hohe Scherung auf die die Faser ein, was leicht zu Brüchen der Fasern führen kann. Sehr geringe Filamentzahlen werden hier eine bessere Verrarbeitbarkeit bewirken.

3D-Druckversuche

Die Druckgeschwindigkeit von Umwinde- und Bikomponentengarnen lagen bei Verwendung von handelsüblichen Düsen bei 15-25 mm/s. Das ist vergleichsweise langsam, gegenüber standardisiertem Druckfilament. Der Druck könnte aber beschleunigt werden, wenn die effektive Heizstrecke in der Düse verlängert wird. Dies ist in den Versuchen im Projekt noch nicht gelungen. Eine zukünftig nutzbare Methode wäre ein

punktueller Erhitzen an der Druckstelle etwa durch Laserstrahlung oder ein anderes Verfahren zur Erwärmung der Polymere. Bei Kernfasern aus Metall wäre auch eine induktive Erhitzung denkbar. Das Erwärmen mit Laser wäre dabei sehr flexibel und gut steuerbar. Durch den Laser könnten sehr viel mehr Energie pro Zeiteinheit eingebracht werden als durch den reinen Wärmeübergang am Metallkontakt.

Beim Drucken der Bikomponentenfaser war auffällig, dass die Druckbauteile Fehlstellen in den Druckschichten aufwiesen. Das war ebenfalls auf einen Mangel an Matrixpolymer zurückzuführen, weswegen die nachfolgenden Bikomponenten-Spinnversuchsdüse mit 70% Mantelanteil gesponnen wurden.



Mikroskopischer Querschnitt von Druckschichten
aus PET/PBT Bikomponentengarn

Durch die geringe Filamentanzahl von 32 Filamenten wurde die Faser gefacht. Die besten Druckergebnisse erzielten hier die zweifach gefachten Fasern mit einem Gesamttiter von 600dtex. Diese Faser hatte ein Kern/Mantel-Verhältnis von 30/70.

Die Drucktemperatur war durch den sehr ähnlichen Schmelzpunkt der beiden Materialien schwer zu bestimmen. Mithilfe einer DSC-Messung konnte eine optimale Drucktemperatur von 220 bis 245°C bestimmt werden. Hierbei zeigten 240°C das beste Druckverhalten, eventuell, weil kurz unter dem Schmelzpunkt des PET auch dessen Faseroberflächen leicht erweichten und sich inniger mit dem PBT aus der Schmelzmatrix verbunden hatten. In der bereits gezeigten DSC-Messung der PET/PBT-Fasern lässt sich die optimale Temperatur von 240°C damit erklären.

Danksagung

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 21163N der Forschungsvereinigung
Forschungskuratorium Textil e.V., Reinhardtstraße 14-16, 10117
Berlin wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur
Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines
Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Der Abschlussbericht des Forschungsvorhabens 21163N ist an den Deutschen Instituten
für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF) erhältlich.

Ansprechpartner

Dr. Erik Frank, erik.frank@web.de