

eingereicht/handed in: 13.11.2019
angenommen/accepted: 13.01.2020

*Livia C. Wiedau, M.Eng¹, Daniel Hesse, M.Sc.², Jonas Baumann, M.Sc.³, Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt¹, Prof. Dr.-Ing. Markus Stomme², Priv.-Doz. Dr.-Ing. Dipl.-Inform. Andreas Zabel³, Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter⁴, Prof. Dr.-Ing. Bernd Künne⁵
¹Lehrstuhl für Fertigungstechnik, Universität Duisburg-Essen, ²Lehrstuhl für Kunststofftechnologie, TU Dortmund, ³Institut für spanende Fertigung, TU Dortmund, ⁴Lehrstuhl für Produktionssysteme, Ruhr Universität Bochum, ⁵Fachgebiet Maschinenelemente, TU Dortmund*

Untersuchung des Einflusses verschiedener Nachbehandlungsmethoden auf die Eigenschaften additiv gefertigter FDM Nylon 12 Proben

Im MERCUR-Forschungsvorhaben Pr-2017-0003 „Analyse des Produktentstehungsprozesses bei der Kombination additiver und subtraktiver Fertigungsverfahren für die Herstellung von Multimaterialprodukten“ werden verschiedene Fertigungs- und Nachbehandlungsverfahren zur Verbindung der jeweiligen Vorteile miteinander kombiniert. Im Rahmen dieser Untersuchung kommt das additive Fused Deposition Modeling (FDM) mitsamt den verfahrensbedingt resultierenden, anisotropen Bauteil-eigenschaften zum Einsatz. Insbesondere der Einfluss chemischer und mechanischer Nachbehandlungsschritte auf diese Eigenschaften steht im Mittelpunkt der Untersuchungen.

Investigation of the influence of various post-treatment methods on the properties of additive manufactured FDM Nylon 12 samples

The MERCUR research project Pr-2017-0003 "Analysis of the product development process in the combination of additive and subtractive manufacturing processes for the manufacture of multi-material products" combines different manufacturing and post-treatment processes to connect the respective advantages. The additive fused deposition modeling (FDM) together with the anisotropic component properties resulting from the process are used in this investigation. The influence of chemical and mechanical post-treatment steps on these properties will be investigated.

Untersuchung des Einflusses verschiedener Nachbehandlungsmethoden auf die Eigenschaften additiv gefertigter FDM Nylon 12 Proben

L. C. Wiedau, D. Hesse, J. Baumann, G. Witt., M. Stommel, A. Zabel, B. Kuhlenkötter, B. Künne

1 EINLEITUNG

Das Interesse an additiv gefertigten Produkten wächst unabhängig von den verwendeten Verfahren weiter an. Im privaten Segment hat sich das Fused Deposition Modeling (FDM), auch bekannt als Fused Layer Modeling (FLM) oder nach DIN 52900 Materialextrusion (MEX), für die additive Fertigung von Kunststoffbauteilen etabliert. In der industriellen Anwendung findet dieses Verfahren, durch eine stetig wachsende Materialauswahl und technologische Weiterentwicklungen, immer mehr Anwendung. Industriell relevante Materialien wie Polyamid 12 (PA12), PA12-CF (mit Kohlefasern) oder Polyetherimide (PEI, Handelsname Ultem®) sind als Filament für die Materialextrusion verfügbar. Die Kombination aus dem FDM-Verfahren und der wachsenden Materialauswahl bietet das Potential, für Show-and-Tell Modelle bis hin zur Kleinserie wirtschaftlich zu sein.

Bei FDM-Bauteilen treten verstärkt anisotrope Eigenschaften in Abhängigkeit der Baurichtung auf [1–3]. Je nach Beanspruchungsrichtung müssen die Bauteile anwendungsorientiert gefertigt werden. Durch den Fertigungsprozess, das schichtweise Ablegen von aufgeschmolzenen Kunststoffsträngen, resultiert ein „Treppenstufeneffekt“ als Oberflächeneigenschaft, der sich als erhöhte Rauheit messen lässt [1, 4]. Durch diesen Effekt ist es möglich, dass Kerbwirkungen in Aufbaurichtung auftreten, welche die mechanischen Bauteileigenschaften negativ beeinflussen bzw. zum vorzeitigen Bauteilversagen führen [4]. Eine Gegenmaßnahme kann, schlussfolgernd aus bereits publizierten Versuchen, die Nachbehandlung z. B. mit Hilfe von Säuren oder Lösungsmitteln sein [5]. Ausgehend von Ergebnissen nachbehandelter laser-gesinterter PA12 Zugproben sowie nachbehandelter FDM-Zugproben aus ABS und einem PE-Copolymer lassen sich dementsprechend auch Ergebnisse der hier vorgestellten Versuchsreihe der extrudierten und nachbehandelten FDM Nylon 12 Proben erwarten [4–6]. Die Materialbezeichnung FDM Nylon 12 wird von Stratasys verwendet und ist kein reines PA12. Um die Materialeigenschaften von extrudierten und nachbehandelten Proben aussagekräftig zu beurteilen, werden unterschiedlich orientierte Zugproben gefertigt und neben einer chemischen auch einer mechanischen Nachbehandlung unterzogen. Als Ergebnis sollte sich eine Reduzierung der Kerbwirkung erwarten lassen. Die chemische Nachbehandlung erfolgt am

Lehrstuhl für Fertigungstechnik der Universität Duisburg-Essen, die mechanische Nachbehandlung findet am Institut für Spanende Fertigung (ISF) der Technischen Universität Dortmund statt, und am Lehrstuhl für Kunststofftechnologie (LKT) der Technischen Universität Dortmund werden abschließend die Zugproben auf ihre mechanischen Kennwerte geprüft und ausgewertet.

2 STAND DER TECHNIK

Derzeit existiert keine Norm für die Nachbehandlung additiv gefertigter Bauteile. Entsprechend ist eine anwendungsgerechte Auswahl von Nachbehandlungsprozessen und Parameterwerten nur auf Basis individueller Erfahrungswerte möglich. Die Auswirkung der Prozessstrategie im additiven FDM-Prozess und einer Nachbehandlung auf die spezifischen Eigenschaften additiv gefertigter FDM Nylon 12-Bauteile z. B. im Hinblick auf die mechanische Belastbarkeit wurde bisher nicht hinreichend untersucht und dokumentiert, wie dies z. B. für entsprechende ABS-Komponenten der Fall ist [5].

2.1 Probenkonzeptionierung

Um mechanische Bauteilkennwerte wie den Elastizitätsmodul oder auch Spannungs-Dehnungs-Diagramme zu ermitteln, werden in der DIN EN ISO 527-2 verschiedene Probekörpergeometrien vorgeschlagen. Diese kommen zur Bewertung der mechanischen Belastbarkeit und Ermittlung spezifischer Kennwerte im Zugversuch zum Einsatz. Hierbei wird insbesondere der Einfluss verschiedener Prozessstrategien und die Verkettung mit Nachbehandlungsmethoden untersucht. In der Literatur findet sich die Beschreibung von Untersuchungen, welche eine Abhängigkeit der mechanischen Belastbarkeit von der Extrusionsrichtung aufzeigen: Zugproben mit Schichten entlang der Belastungsrichtung weisen eine fast doppelt so hohe Zugfestigkeit auf wie Zugproben, die in z-Richtung, also quer zu den Schichten belastet werden [2, 4]. Die materialextrudierten Bauteile verfügen durch den schichtweisen Aufbau in Abhängigkeit der Schichtstärke über anisotrope Eigenschaften auf [4, 5, 7]. Der Infill-Anteil besitzt ebenso Einfluss auf die Zugfestigkeit wie die Bauteilorientierung. Mit steigendem Infill-Anteil, von 10 % bis 100 % (Maximum), sind bspw. Zunahmen hinsichtlich der Zugfestigkeit von 10 MPa bis 46 MPa möglich. [7]

Bei den stehend gefertigten Zugproben, bei der die z-Richtung als Baurichtung definiert ist, findet die Belastung hauptsächlich bei der Anbindung der einzelnen Schichten statt. Eine günstigere Belastung des Materials auf Zug findet bei liegend extrudierten Bauteilen statt. Nach Baier verstärkt eine Nachbehandlung mit einer Chemikalie die Isotropie in z-Richtung. Die Versuche wurden an ABS-Zugproben durchgeführt. [5]

2.2 Nachbehandlungsmethoden

Aufgrund der rauen Oberfläche, welche durch den Treppenstufeneffekt bedingt und prozesstypisch für das FDM-Verfahren ist, sowie der daraus resultierenden Kerbwirkungen, wird eine Oberflächenmodifikation durch die Reduzierung der Rauheit angestrebt [5]. Spanende Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter oder unbestimmter Schneide mit gebundenem wie auch mit ungebundenem Korn lassen sich zur Oberflächennachbehandlung, wie z. B. einer Glättung einsetzen [5]. Das Fräsen bietet flexible Einsatzmöglichkeiten auch zur Nachbearbeitung freigeformter Oberflächen und erlaubt hohe Abtragraten sowie eine Glättung der Oberflächen z. B. im Mikrofräsprozess auf bis zu $R_z < 1,5 \mu\text{m}$, während bei Standard-Schleifprozessen $R_z < 2 \mu\text{m}$ erzielbar ist [8].

Alternativ oder ergänzend können mithilfe des Gleitschleifens in einem Arbeitsbehälter durch Zugabe von ungebundenen Schleifkörpern und z. B. Wasser Bauteiloberflächen geglättet werden [9, 10]. Der Materialabtrag bzw. die Verfestigung der Oberflächenrandzone ist abhängig von der Geschwindigkeit der Relativbewegung zwischen Schleifkörpern und Bauteil sowie deren Masse [10]. In Abhängigkeit der geometrischen Eigenschaften und der Komplexität der Bauteile erreicht das Abrasivmedium Konturen und Flächen nicht in gleich-mäßigen Umfang. Als Abrasivmedium bieten sich z. B. Kunststoff- oder Keramik-schleifkörper an [11]. Im Rahmen von experimentellen Versuchsreihen am Lehrstuhl für Fertigungstechnik wurden durch den Einsatz von Kunststoff-schleifkörpern, bei einem Ausgangswert von ca. $R_z = 75 \mu\text{m}$, Rauheitswerte bis zu $R_z < 30 \mu\text{m}$ erreicht [12].

Eine weitere Methode, um komplexe Bauteile nachzubehandeln und zu glätten, ist die Behandlung mit einem flüssigen, chemisch reaktiven Wirkmedium. Eine Option besteht in der Verdampfung des Wirkmediums. [5,13,14]

Im Umfeld einer chemischen Nachbehandlung werden in der Literatur bereits erfolgreiche Methoden beschrieben, Oberflächen von Polymerbauteilen zu glätten. Die Oberflächenrauheit von Acrylnitril-Butadien-Styrol-(ABS)-Bauteilen lässt sich z. B. durch den Einsatz von Aceton reduzieren [5]. Hierfür kann beispielsweise ein Bauteil aus ABS in Aceton getaucht werden. Bereits nach einer Einwirkdauer von $t_w = 10 \text{ s}$ ist eine signifikante Oberflächenveränderung zu beobachten. Unternehmen wie „Zortrax“ oder „Additive Manufacturing Technologies“ bieten spezielle Systeme zum Glätten von Bauteiloberflächen aus ABS, ASA oder HIPS an [15].

Lasergesinterte Polyamid 12-Proben lassen sich erfolgreich mit Trifluoressigsäure (TFA) nachbehandeln, um z. B. eine glattere Oberfläche zu erzielen. In [6] werden fünf verschiedene Einwirkzeiten t_w betrachtet: 10 s, 30 s, 60 s, 90 s und 120 s. Nach einer Eintauchzeit von 120 s kann hier der Rauheitskennwert R_z in Aufbaurichtung im Mittel von $75 \mu\text{m}$ auf $10 \mu\text{m}$ reduziert werden. Neben TFA ist es auch möglich, durch den Einsatz von Salpeter- oder Schwefelsäure die Oberflächenrauheit zu reduzieren. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Oberflächennachbehandlung ist die Maßhaltigkeit. Versuche

haben gezeigt, dass mit TFA nachbehandelte Proben mit einer Abmessung von 4 mm x 3 mm x 10 mm eine Maßabweichung unter 1 % in Bezug auf die Ausgangsmaße aufweisen [6].

Das teilkristalline Polyamid 12 besteht auf molekularer Ebene aus amorphen und kristallinen Bereichen. Über die Nebenvalenzkräfte, die physikalischer Natur sind, wird das Lösungsverhalten von Polymeren mit Wirkmedien beschrieben, dabei wird das Polymer nicht verändert [16]. Bei einer chemischen Reaktion hingegen kann ein Kettenabbau bis hin zu einer vollständigen Auflösung des Polymers stattfinden. [17]

Die kristallinen Bereiche des Polyamid 12 reagieren durch ihre molekulare Struktur nur in einem geringen Umfang mit Lösemitteln wie TFA [18]. Die Moleküle des Lösemittels können über die offene Struktur der amorphen Bereiche in das Polymer eindringen. Die Menge des Lösemittels und die Höhe der Temperatur beeinflussen die Nebenvalenzkräfte, sodass bei einem Anstieg der Nebenvalenzkräfte ein Übergang vom Quellen zum Herauslösen von Polymerketten stattfindet. Zu den Nebenvalenzkräften zählen u. a. auch die Wasserstoffbrückenbindungen [19], welche über Wasserstoff- und Sauerstoffatome entstehen. Die Moleküle der TFA besitzen drei Fluoratome. Diese weisen die höchst mögliche Elektronegativität auf, sodass die Wasserstoffbrückenbindungen in einer Reaktion mit TFA geöffnet werden können. [19–21]

Durch das Quellen und das Ablösen von Polymerketten und -fragmenten kann eine Oberfläche geglättet und die Rauheit reduziert werden.

Die Kombination verschiedener Nachbehandlungsmethoden in einer hybriden Prozesskette aus additiven und mechanisch sowie chemisch subtraktiven Fertigungstechniken weist Potenziale auf, welche im Rahmen der vorgestellten Versuchsreihe im Hinblick auf die mechanischen Bauteileigenschaften analysiert werden.

3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Das Ziel der Versuchsreihe ist die Analyse des Einflusses der Fertigungsstrategie im FDM-Prozess und den in einer kombinierten Prozesskette nachgelagerten Nachbearbeitungsverfahren auf die mechanischen Eigenschaften additiv gefertigter FDM Nylon 12-Komponenten. Hierzu werden geeignete Versuchsbauteile (Typ 1A Zugprobenkörper nach DIN EN ISO 527-2) bei Anwendung verschiedener Aufbaustrategien generiert, ggf. nachbearbeitet, hinsichtlich geometrischer und oberflächenspezifischer Eigenschaften analysiert und in Zugversuchen eingesetzt.

Die Rauheitsmessungen erfolgen mit einem Rauheitsmessgerät von Mitutoyo, dem SJ400 nach DIN 4288 mit einem Tastspitzenradius von 10 µm.

3.1 Additive Fertigung der Proben

Die Zugproben aus einem schwarzen FDM Nylon 12-Werkstoff der Firma „Stratasys“ werden auf einer für den industriellen Einsatz ausgelegten additiven Fertigungsmaschine, „Fortus 450mc“ von „Stratasys“, im FDM-Verfahren bei Variation der Bauteilorientierung gefertigt. Bei einem 100 % Infill verlaufen die extrudierten Bahnen bei den liegend gefertigten Zugproben („A“) des Typ 1A (nach DIN EN ISO 527-2) in Zugrichtung. Die Fertigung der stehend gefertigten Zugproben findet in zwei Richtungen statt, siehe „B“ und „C“ in Bild 1.

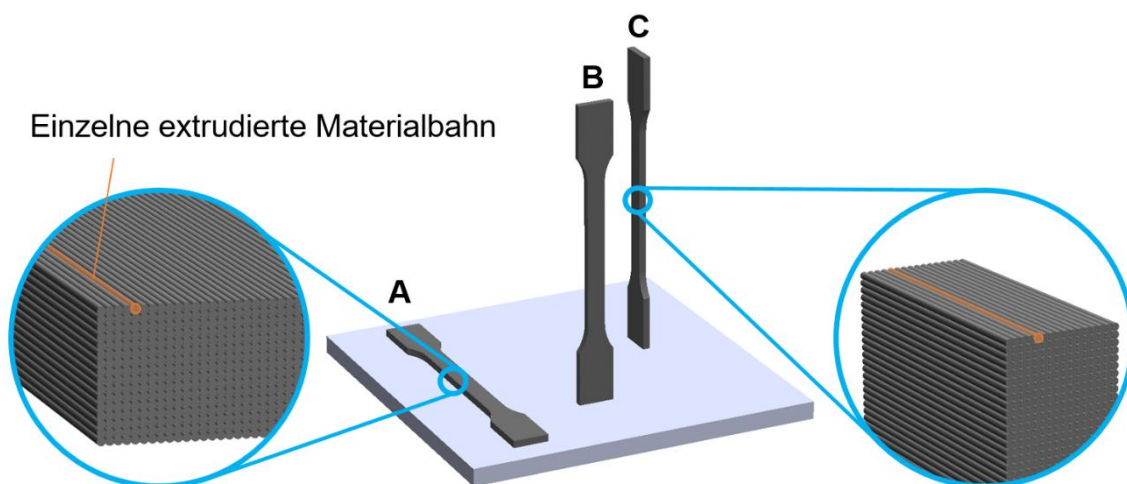


Bild 1: Schematische Darstellung der Infill-Druckstrategie verschiedener Probenvarianten

Die Höhe einer extrudierten Schicht beträgt $z_s = 0,33$ mm. Die eingesetzte Düse des Typs T20 besitzt einen Austrittsdurchmesser von $d_b = 0,52$ mm und die Zugprobekörper werden mit dem vordefinierten Parametersatz der Anlage für den Werkstoff FDM Nylon 12 extrudiert. Detaillierte Angaben sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

Düse	T20
Schichthöhe	0,3302 mm
Infillmuster	„One contour“
Konturbreite	0,5842 mm
Infillart	„solid“

Tabelle 1: Prozessparameter

Neben diesen Zugproben des Typs 1A werden zusätzlich Proben mit einem allseitigen Aufmaß von $a = 2$ mm gefertigt und in einem Fräsprozess auf die

Typ 1A Norm-Maße spanend bearbeitet. Bei den Zugproben „B“ und „C“ wird Supportmaterial um die Probe herum mit aufgebaut, um die Probe zu stabilisieren und um Defekten während der Fertigung vorzubeugen. Nach dem Fertigungsprozess lässt sich dieses in einem Laugenbad vollständig ablösen. Der Support beeinflusst die Oberflächenrauheit des Bauteils, welche dadurch glatter als ohne Support ist [5]. Bisher gibt es keine in der Literatur diskutierten Angaben über den Einfluss des Supports auf die mechanischen Eigenschaften von Zugproben, die in einem temperierten Bauraum gefertigt werden. Unter Nichtberücksichtigung des möglichen Einflusses werden die Versuche geplant und die Ergebnisse ausgewertet.

Im Versuchsplan, s. Tabelle 2, sind in der ersten Spalte gemäß Bild 1 die Bezeichnungen für die Aufbaurichtung zu entnehmen. In der zweiten Spalte ist die Nachbehandlungsart vermerkt.

Aufbaurichtung	Nachbehandlung
A	Mechanisch, auf Endmaß gefräst
A	Chemisch, 60 s TFA
A	Mechanisch, auf Endmaß gefräst + Chemisch, 60 s TFA
A	Keine (unbeh. → Referenzproben)
B	Mechanisch, auf Endmaß gefräst
B	Chemisch, 60 s TFA
B	Keine (unbeh. → Referenzproben)
C	Mechanisch, auf Endmaß gefräst
C	Chemisch, 60 s TFA
C	Keine (unbeh. → Referenzproben)

Tabelle 2: Versuchsplan

3.2 Probennachbearbeitung

Die spanende Nachbearbeitung der FDM Nylon 12-Bauteile erfolgt am Institut für Spanende Fertigung auf einem „DMG HSC75“ Bearbeitungszentrum. Die Schnittgeschwindigkeit wird für das torusförmige Fräswerkzeug mit dem Durchmesser $d = 12$ mm und einem Eckenradius von $r = 1,5$ mm auf $v_c = 700$ m/min und die Zustellung auf $a_p = 0,5$ mm und $a_e = 4$ mm bei einem Zahnvorschub von $f_z = 0,1$ mm festgelegt.

Ergänzend zur spanenden Nachbehandlung oder als alleiniges Nachbehandlungsverfahren kommt die chemische Nachbehandlung zum Einsatz. Sie wird durch den Einsatz von Trifluoressigsäure (TFA) unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Untersuchungen durchgeführt [6]. TFA zählt zu den starken organischen Säuren und besitzt eine ätzende Wirkung. Sie weist einen stechenden Geruch auf und ist nur mit großer Vorsicht zu verwenden. Auf

eine persönliche Schutzausrüstung bestehend aus Handschuhen, Schutzbrille und Arbeitskleidung sollte neben einer Abluft an dem Arbeitsplatz geachtet werden. Nach einem Hautkontakt mit der Säure sollte die Körperstelle mit reichlich fließend Wasser abgespült werden. [22]

Aufgrund der Ergebnisse aus Vorversuchen und der Analyse der Querschnitte unter dem Mikroskop liegt die Einwirkzeit für die vorgestellte Versuchsreihe bei $t_w = 60$ s. Bei dieser Einwirkzeit hat ein ausreichender Glättungsvorgang stattgefunden, ohne dass ein Eindringen der Säure in das Bauteilinnere auftritt. Ein Eindringen der Säure über Fehlstellen zwischen den einzelnen Kunststoffschichten löst das Material im Bauteilinneren an, wobei sich die Säure nur gehemmt verflüchtigt und daher zu ungünstigen Gefügeveränderungen führen kann. Bei diesem Vorgang verliert das Material im Inneren seine definierte Struktur und härtet verlangsamt aus, sodass es zu einer geringeren mechanischen Belastbarkeit der nachbehandelten Komponente kommt. Chemisch nachbehandelte Proben werden im Rahmen der vorgestellten Untersuchung für 60 s in Trifluoressigsäure getaucht und anschließend mit einem neutralisierend wirkenden Medium von Säurerückständen gereinigt, um die Einwirkung der TFA zu unterbrechen.

3.3 Zugversuche

Die Prüfung der Probekörper findet an einer Universalprüfmaschine „Shimadzu Autograph AG-X plus“ des LKT statt. Diese wird um ein System zur digitalen Bildkorrelation der Fa. „Limes“ erweitert, sodass eine orts aufgelöste, messtechnische Erfassung der Probendehnung während der Belastung möglich ist. Der gesamte Prüfaufbau ist in Bild 2 dargestellt. Hierzu sind die Probekörper mit einem kontrastreichen, stochastischen Muster im Messbereich präpariert, s. Vergrößerung in Bild 2.

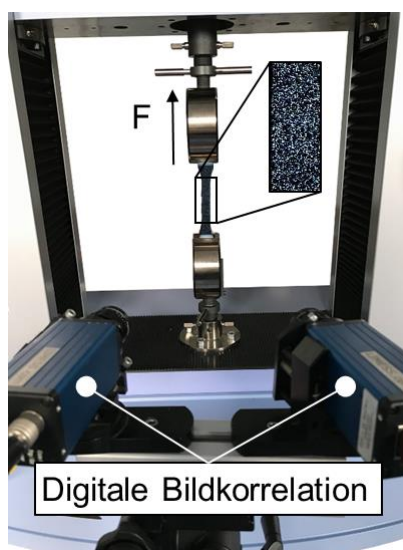


Bild 2: In Universalprüfmaschine eingespannter Zugprobekörper mit digitaler Bildkorrelation

Vor der Prüfung werden die Proben, die in Bild 3 exemplarisch dargestellt sind, konditioniert sowie anschließend im Normklima bei $T_N = 23 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$ und bei einer Prüfgeschwindigkeit von $v_z = 1 \text{ mm/min}$ unidirektional in Zugrichtung bis zum Bruch belastet. Zur statistischen Absicherung der Ergebnisse und zur Evaluierung stochastischer Störeinflüsse werden fünf Probekörper je Variante eingesetzt.

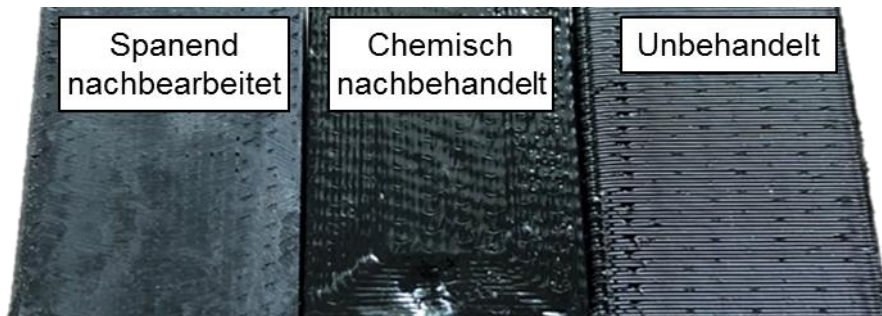


Bild 3: Probekörper, v.l.n.r.: spanend nachbearbeitet, chemisch nachbehandelt, unbehandelt

4 ERGEBNISSE

Die Rauheit der nachbehandelten Proben nimmt durch Anwendung einer chemischen oder mechanischen Nachbehandlung signifikant ab. In Bild 4 sind die gemessenen Rauheitskennwerte R_z für jeden Probentyp dargestellt.

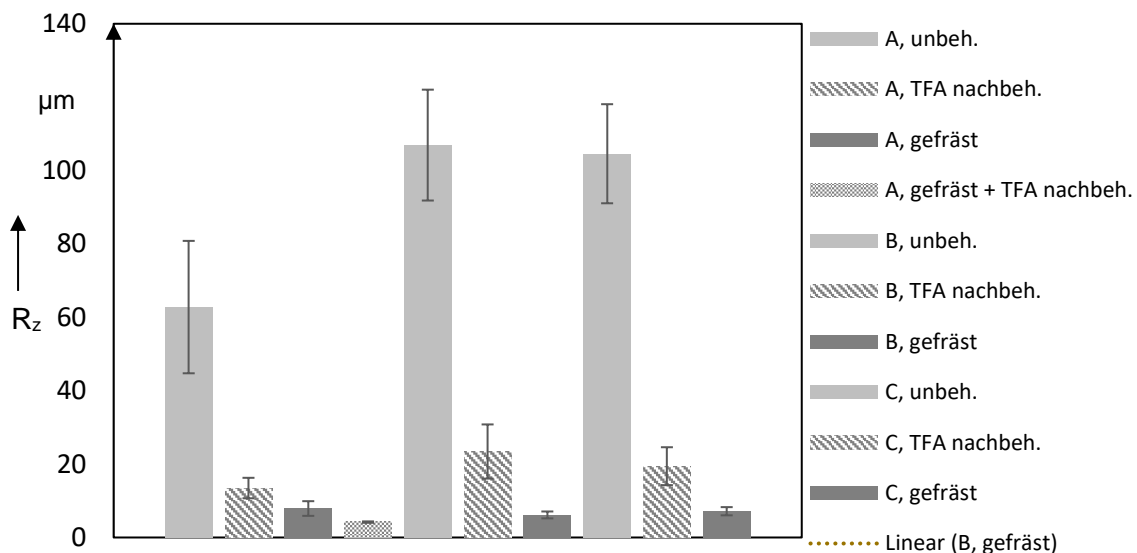


Bild 4: Rauheitskennwerte R_z von unbehandelten und chemisch nachbehandelten FDM Nylon 12 Proben

Die Erfassung der Rauheitskennwerte findet für jeden Probentyp entlang der späteren Belastungsrichtung und somit entlang der Probenlängsachse statt. Während für den liegend gefertigten Probentyp „A“ die Rauheit entlang einer einzigen Bahn gemessen wird, überfährt die Messspitze bei den übrigen Typen mehrere Schichten, was in Rauheitswerten von $R_z > 100 \mu\text{m}$ resultiert. Durch eine chemische Nachbehandlung lässt sich dieser Wert auf etwa $R_z = 20 \mu\text{m}$ reduzieren. Die gefrästen Proben weisen einen Rauheitswert von ca. $R_z = 7 \mu\text{m}$ auf.

Die in Bild 5 dargestellten Zusammenhänge zeigen die Ergebnisse der Zugversuche in Spannungs-Dehnungs-Diagrammen. Während die Dehnungen bei der Belastung gemessen werden, findet die Ermittlung der Spannungen aus den realen Querschnittsflächen und den gemessenen Kraftverläufen statt. Aufgrund der Inhomogenität und Fehlstellen wie Luftporen, welche additiv gefertigte Bauteile prozessbedingt aufweisen können, erfolgt die Ermittlung der Querschnittsflächen nicht basierend auf den äußeren Abmessungen. Anhand präparierter Proben werden vielmehr die Flächen aus der Betrachtung der Probenquerschnitte mithilfe eines Mikroskops sowie einer zugehörigen, rechnergestützten Flächenanalyse bestimmt. Als Bezugsquerschnitt werden ungeprüfte Proben der drei Bauarten herangezogen, die an typischen Stellen im Messbereich für die Flächenbestimmung gemessen worden sind. So ist gerade bei den „B“- und „C“-Probekörpern ein interlaminares Versagen des Schichtverbunds der dominierende Bruchmechanismus, sodass die gemessene Kraft auf die Kontaktfläche zwischen den Schichten zu Ermittlung der Spannung bezogen worden ist.

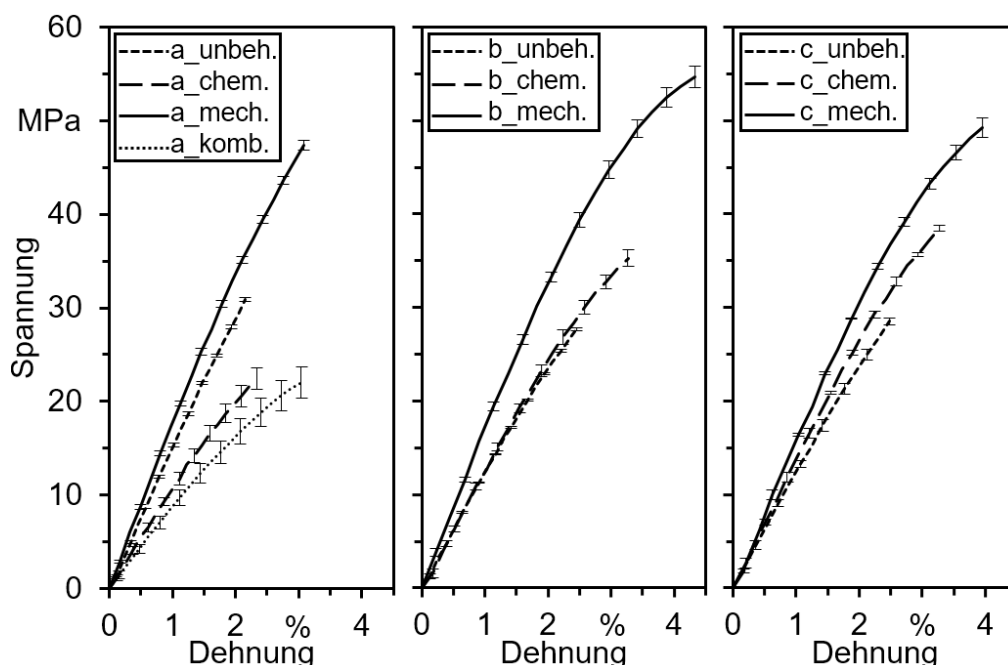


Bild 5: Spannungs-Dehnungs-Diagramme der Nachbehandlungsmethoden je Fertigungsrichtung

Die liegend gefertigten „A“-Probekörper weisen erwartungsgemäß vergleichsweise hohe Steifigkeiten von etwa $E_{\text{unbeh.}} = 1500 \text{ MPa}$ auf und brechen bei einer Dehnung von etwa $\epsilon_{\text{unbeh.}} = 2,1 \%$. Die chemisch nachbehandelten „A“-Proben verlaufen mit einem E-Modul von $E_{\text{Chem.}} = 1075 \text{ MPa}$ flacher und brechen bei einer etwa 0,3 % höheren Dehnung $\epsilon_{\text{Chem.}}$. Die spanend nachbearbeiteten Proben erreichen hingegen signifikant höhere Steifigkeiten von etwa $E_{\text{Mech.}} = 1783 \text{ MPa}$ und brechen erst bei $\epsilon_{\text{Mech.}} = 3,1 \%$ Dehnung. Eine Kombination aus chemischer und spanender Nachbehandlung ergibt den Verlauf mit der geringsten Steifigkeit, wenngleich die Bruchdehnung ähnlich der spanend nachbearbeiteten Probekörper ist.

Hinsichtlich der stehend gefertigten „B“- und „C“-Probekörper werden die geringsten Steifigkeiten, Festigkeiten sowie Dehnungen bei den unbehandelten Proben beobachtet. Mit ca. $E_{\text{unbeh.}} = 1240 \text{ MPa}$ liegen beide Verläufe nahezu gleichauf, unterscheiden sich jedoch bei der maximalen Dehnung um etwa 0,9 %. Die chemische Nachbehandlung führt in beiden Fällen eine Steigerung der Bruchdehnungen herbei, ohne die Steifigkeiten signifikant zu beeinflussen. Eine deutliche Erhöhung der Steifigkeiten und der Dehnungen resultiert aus der spanenden Nachbearbeitung, wodurch ein E-Modul von bis zu $E_{\text{Mech.}} = 1715 \text{ MPa}$ und eine Dehnung von bis zu $\epsilon_{\text{Mech.}} = 4,4 \%$ möglich werden. Die Steifigkeiten liegen somit im Bereich der spanend nachbearbeiteten „A“-Probekörper.

Bei Betrachtung der Rauheitskennwerte aus Bild 4 wird gerade anhand der „B“- und „C“-Proben eine Korrelation deutlich. Die Oberflächenrauheit ist bei unbehandelten Proben am höchsten und verringert sich durch eine chemische oder spanende Nachbehandlung. Somit wird die These für diese FDM Nylon 12-Probekörper bestätigt, dass eine Verringerung der Rauheitskennwerte zu einer Erhöhung der Maximaldehnung eines Zugprobekörpers infolge der verringerten Kerbwirkung führt.

Auffällig ist hingegen der Anstieg der Steifigkeiten der spanend nachbearbeiteten Probekörper. Dieser folgt aus dem Wärmeeintrag in die Probe während der Zerspanung und kann anhand von Bild 6 erklärt werden.

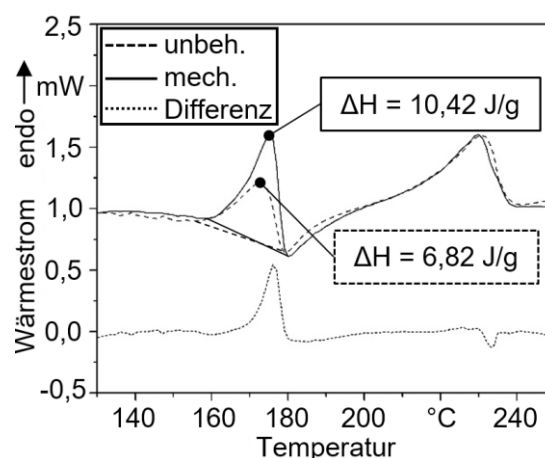


Bild 6: Thermogramm der unbehandelten und spanend bzw. mechanisch nachbearbeiteten Proben

Dargestellt sind die mithilfe der dynamischen Differenzkalorimetrie (DSC) aufgenommenen Thermogramme der unbehandelten und nachbearbeiteten Probekörper. Für Einwaagen von etwa $m = 5 \text{ mg}$ sind den Zugstäben Teilproben entnommen und bei einer Aufheizrate von 10 °C/min aufgeschmolzen worden. Nach dem Prinzip der dynamischen Leistungsdifferenzkalorimetrie findet gleichzeitig die Prüfung eines leeren Referenztiegels in einem zweiten Ofen statt. Die Differenz der je Ofen benötigten Leistung zum Erreichen der Temperatur gibt Aufschluss über endo- oder exotherme Vorgänge, sodass sich bspw. die hier dargestellte, benötigte Leistung zum Aufschmelzen der kristallinen Strukturen messtechnisch erfassen lässt. Von Interesse ist der Bereich des ersten endothermen Peaks bei $T_{pm} = 175 \text{ °C}$, der das Aufschmelzen der kristallinen Phase eines PA12 kennzeichnet [23]. Der zweite endotherme Peak bei $T_{pm} = 230 \text{ °C}$ ist einem Kunststoff mit einem höheren Schmelzbereich zuzuordnen, sodass es sich bei dem untersuchten Filament um ein Blend handelt. In [24] ist ein vergleichbares Thermogramm mit gleichen charakteristischen Kristallitschmelztemperaturen für ein Blend aus PA12 und PA6 ermittelt worden, sodass diese Werkstoffkombination auch für das vorliegende FDM Nylon 12 möglich ist. Dieser letzte Bereich weist jedoch keinerlei Änderung durch die Nachbearbeitung auf und wird deshalb vernachlässigt. Den Unterschied der auf die Probenmasse bezogenen Flächenintegrale und damit der Schmelzeenthalpien ΔH_m im Bereich des ersten Peaks belegen qualitativ verschiedene Kristallisationsgrade der Proben. Somit unterliegt der Randbereich der Probekörper infolge der spanenden Nachbearbeitung einer morphologischen Veränderung. Da für diese Veränderung Temperaturen oberhalb der Kristallitschmelztemperatur notwendig sind, ist zusätzlich ein nachträgliches, thermisches Verbinden der Schichten denkbar. Dieser Wärmeeintrag führt zu einer Erhöhung der Bauteilsteifigkeiten um etwa 38 % bzgl. der Fälle „B“ und „C“ und resultiert schließlich in nahezu isotropen Bauteileigenschaften hinsichtlich der Steifigkeiten aller drei Orientierungen.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Im additiven FDM-Verfahren gefertigte Bauteile, weisen prozessbedingte Strukturierungen auf der Bauteiloberfläche auf, die meist in ausgeprägt anisotropen mechanischen Bauteileigenschaften resultieren. Bislang wird häufig lediglich mithilfe der Orientierung des Bauteils im Bauraum die maximale Festigkeit erreicht, was für komplexe Lastfälle jedoch selten möglich ist. Da die mechanischen Eigenschaften auch mit der Oberflächenstruktur und einhergehenden Kerbeffekten korrelieren, werden verschiedene Nachbehandlungsmethoden untersucht. Neben chemisch nachbehandelten Zugprobekörpern fand auch ein Vergleich von spanendbearbeiteten mit unbehandelten Zugprobekörpern aus FDM Nylon 12 bei variierten Fertigungsorientierungen statt. Gerade hinsichtlich der Fälle, bei denen die Kraft nicht die Bahnen, sondern die interlaminaeren Verbindungen belastet, und

die gleichzeitig die höchsten Rauheitskennwerte aufweisen, ist es möglich, mit beiden Methoden infolge der Verringerung der Rauheit eine Erhöhung der Festigkeitskennwerte zu erreichen. Bei der spanenden Nachbearbeitung kann zusätzlich eine morphologische Veränderung der Randschicht, wodurch eine signifikante Erhöhung der Steifigkeit resultiert, beobachtet werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen somit Ansätze auf, wie FDM-Bauteile durch die Nutzung effektiver Nachbehandlungsmethoden auch für komplexe Lastfälle eingesetzt werden und sogar isotrope Bauteileigenschaften aufweisen können. Für komplexe Bauteile muss hingegen die Störkontur und Erreichbarkeit der Werkzeuge bei der spanenden Bearbeitung wie dem Fräsen berücksichtigt werden, wodurch die chemische Nachbehandlung aufgrund der werkzeuglosen Funktionsweise Vorteile auf Kosten einer geringeren Verbesserung der mechanischen Kennwerte hat.

6 AUSBLICK

Im Rahmen weiterer Untersuchungen sind beide Nachbehandlungsmethoden weiter zu analysieren und zu optimieren. Gerade vor dem Hintergrund der Prozesssicherheit, welche für eine industrielle Anwendung vorauszusetzen ist, besteht diesbezüglich Bedarf. Zusätzlich ist es geplant, anhand von anderen Kunststoffen die Gültigkeit der Ergebnisse zu überprüfen. Diesbezüglich ist die Verwendung eines amorphen Kunststoffs wie ABS als Ergänzung zum Stand der Technik relevant. Durch die Überlagerung der morphologischen Änderung in Form von veränderten Kristallisationsgraden und der möglicherweise gestärkten interlaminaeren Verbindung infolge des Aufschmelzens der Randschicht wird so die morphologische Änderung vermieden und der Einfluss des Aufschmelzens isoliert betrachtet. Durch eine Erweiterung des Messaufbaus um eine thermische Analyseverfahren lassen sich zudem die Prozesstemperaturen messen und besser quantifizieren. Weiterhin wird eine Studie zu den Parametern der spanenden Bearbeitung durchgeführt, um am Beispiel ausgewählter Kunststoffe den Verstärkungseffekt zu optimieren. Im Zuge dessen sind weitere Lastfälle zu betrachten, um Bearbeitungsempfehlungen für verschiedene Belastungsarten formulieren zu können.

Aufgrund der Vorteile der chemischen Nachbehandlung (Erreichbarkeit von Winkeln, Hinterschnitten und engen Zwischenräumen) gegenüber anderen Nachbehandlungsmethoden, wie z. B. dem Gleitschleifen müssen die Einflüsse der Trifluoressigsäure auf additiv gefertigte Bauteile noch weiter untersucht werden. Neben den Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften gilt es weiterhin einen möglichen Langzeiteinfluss der Säure auf FDM Nylon 12 festzustellen.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken dem Mercator Research Center Ruhr (MERCUR), der Stiftung Mercator für die Förderung des Forschungsprojekts mit dem Titel „Analyse des Produktentstehungsprozesses bei der Kombination additiver und subtraktiver Fertigungsverfahren für die Herstellung von Multimaterialprodukten“, ebenso wie den übrigen Projektpartnern der Ruhr-Universität Bochum (LPS) und der Technischen Universität Dortmund (ME).

Literatur

- [1] Gebhardt, A., Kessler, J., Thurn, L. 3D-Drucken: Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM)
Carl Hanser Verlag, München, 2016
DOI: 10.3139/9783446448452
- [2] Richard, H. A., Schramm, B., Zipsner, T. Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen
Springer Verlag, Wiesbaden, 2017
DOI: 10.1007/978-3-658-17780-5
- [3] Ahn, S.-H., Montero, M., Odell, D., et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS
In: Rapid Prototyping Journal 8 (2002), S. 248–257
DOI: 10.1108/13552540210441166
- [4] Franke, R., Schob, D., Ziegenhorn, M. Prüfverfahren und numerische Simulation von mechanischen Eigenschaften 3D-gedruckter thermoplastischer Kunststoffe
Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen (2017), S. 137–158
DOI: 10.1007/978-3-658-17780-5_9
- [5] Baier, O. Optimierung von FLM - Bauteilen durch chemische Nachbearbeitung sowie deren Einsatz in der Galvanik
Dissertation am Lehrstuhl Fertigungstechnik, Universität Duisburg-Essen, 2016
- [6] Wörz, A., Wiedau, L. C., Wudy, K., et al. Influence of chemical postprocessing on mechanical properties of laser-sintered polyamide 12 parts
DOI: 10.1515/polyeng-2019-0110
In: *Journal of Polymer Engineering*, vol. 39, no. 9, S. 830–837, 2019
- [7] Wiedau, L. C., Meyer, L., Wegner, A., et al. Chemisches Nachbehandeln von Laser-Sinter-Proben – Einflussuntersuchung von verschiedenen Säuren auf die Oberflächentopologie
In: Proceedings of the 15th Rapid.Tech Conference Carl Hanser Verlag, München, 2018, S. 267-282
DOI: 10.3139/9783446458123.017

- [8] N. N. What is the influence of infill, layer height and infill pattern on my 3D prints?
In: Arts et Métiers ParisTech, 2015
- [9] Kamplade, K., Schumann, S., Biermann, D. Grundlegende Untersuchungen des Feinschleifens von unverstärkten, thermoplastischen Kunststoffen
In: Schleifen+Polieren, Band 3, S. 36–45, 2018
- [10] Schmid, M. Selektives Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen: Technologie, Prozesse und Werkstoffe
Carl Hanser Verlag, München, 2015
DOI: 10.3139/9783446445505
- [11] N. N. Betriebsanleitung Tellerfliehkraftmaschine CF 1x18, Firma Otec
- [12] Schmid, M., Simon, C., Levy, G. N. Finishing of SLS-Parts for Rapid Manufacturing (RM) – A Comprehensive Approach, Schweiz, 2009
- [13] Wiedau, L. C., Meyer, L., Wegner, A., et al. Einflussuntersuchung von verschiedenen Nachbehandlungsmethoden auf die Oberflächentopologie von laser-gesinterten Polyamid 12 Proben
In: Proceedings of the 16th Rapid.Tech Conference Carl Hanser Verlag, München, 2019, S. 228-243
DOI: 10.3139/9783446462441.017
- [14] Reinhardt, T. Entwicklung einer ganzheitlichen Verfahrenssystematik bei der Qualifizierung neuer Werkstoffe für das Laser-Sintern am Beispiel Polypropylen
Dissertation am Lehrstuhl Fertigungstechnik, Universität Duisburg-Essen, 2016
- [15] Cunico M. W. M., Cunico, M. M., de Carvalho, J. Study of Vapourised Solvent Attack on Additive Manufacturing Part Surface
Proceedings of the 26th International Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF 2015) 2015, S. 1709 - 1729
- [16] N. N. Zortrax Apoller Smart Vapor Smoothing-Gerät (SVS), Firma Zortrax, 2019
- [17] Hopmann, C., Michaeli, W. Einführung in die Kunststoffverarbeitung
Carl Hanser Verlag, München, 2017
DOI: 10.3139/9783446453562

- [18] Abts, G. Kunststoff-Wissen für Einsteiger, Carl Hanser Verlag, München 2016, 2016
DOI: 10.3139/9783446451049
- [19] Menges, G.,
Haberstroh, E.,
Michaeli, W.,
et al. Menges Werkstoffkunde Kunststoffe
Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München,
2011
DOI: 10.3139/9783446443532
- [20] Kaiser, W. Kunststoffchemie für Ingenieure: Von der Synthese
bis zur Anwendung
Carl Hanser Verlag, München, 2016
- [21] Schwister, K. Taschenbuch der Chemie: Mit zahlreichen Bildern
und Tabellen
Carl Hanser Verlag, München, 2010
- [22] Vollhardt, K. P. C.,
Schore, N. E. Organische Chemie
Wiley-VCH, Weinheim, 2011
- [23] Ehrenstein, G. W.,
Riedel, G.,
Trawiel, P. Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik
Carl Hanser, München, 2004
- [24] Salmoria, G. V.,
Leite, J. L.,
Paggi, R. A. The microstructural characterization of PA6/PA12
blend specimens fabricated by selective laser
sintering
Polymer Testing, Vol. 28, 2009
DOI: 10.1016/j.polymertesting.2009.06.010

Bibliography

DOI 10.3139/O999.02022020
Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics
Technology 16 (2020) 2; page 63–80
© Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG
ISSN 1864 – 2217

Stichworte:

Additive Fertigung, Materialextrusion, chemische Nachbehandlung, spanende Nachbearbeitung, Zugproben

Keywords:

Additive Manufacturing, Materialextrusion, chemical post-treatment, machining, tensile specimen

Autor / author:

Livia C. Wiedau, M.Eng. (1. Autor)
Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt (2. Autor)
Lehrstuhl Fertigungstechnik
Universität Duisburg-Essen
Lotharstr. 1
47057 Duisburg

E-Mail: gerd.witt@uni-due.de
Webseite: www.uni-due.de
Tel.: +49 (0)203/379-3360
Fax: +49 (0)203/379-1530

Herausgeber / Editors:Editor-in-Chief

Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gottfried W. Ehrenstein
Lehrstuhl für Kunststofftechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9
91058 Erlangen
Deutschland
Tel.: +49 (0)9131/85 - 29703
Fax: +49 (0)9131/85 - 29709
E-Mail: ehrenstein@lkt.uni-erlangen.de

Europa / Europe

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer, verantwortlich
Lehrstuhl für Kunststofftechnik
Universität Erlangen-Nürnberg
Am Weichselgarten 9
91058 Erlangen
Deutschland
Tel.: +49 (0)9131/85 - 29700
Fax: +49 (0)9131/85 - 29709
E-Mail: drummer@lkt.uni-erlangen.de

Amerika / The Americas

Prof. Prof. hon. Dr. Tim A. Osswald, verantwortlich
Polymer Engineering Center, Director
University of Wisconsin-Madison
1513 University Avenue
Madison, WI 53706
USA
Tel.: +1 608/263 9538
Fax: +1 608/265 2316
E-Mail: osswald@engr.wisc.edu

Verlag / Publisher:

Carl-Hanser-Verlag GmbH & Co. KG
Wolfgang Beisler
Geschäftsführer
Kolbergerstraße 22
D-81679 München
Tel.: +49 (0)89/99830-0
Fax: +49 (0)89/98480-9
E-Mail: info@hanser.de

Redaktion / Editorial Office:

Dr.-Ing. Eva Bittmann
Jannik Werner, M.Sc.
E-Mail: redaktion@kunststofftech.com

Beirat / Advisory Board:

Experten aus Forschung und Industrie, gelistet unter
www.kunststofftech.com