

Fachlicher Sachbericht

Teil I: Kurzbericht

Vorhabensbezeichnung

Steigerung der Recyclingraten von gefüllten PA66-Pulvermaterialien für das Laser-Sintern

Akronym

CyclePA66

Laufzeit des Vorhabens

03/2023 bis 08/2025

Projektkonsortium



AM Polymers



AM Rauch



AM POLYMERS GmbH
Hanns-Martin-Schleyer-Str. 9e
47877 Willich

AM-Rauch GmbH & CoKG
Werkstr. 1
76532 Baden-Baden

Technische Universität München,
Professur für
Laser-based Additive Manufacturing,
Freisinger Landstraße 52
85748 Garching

1.1 Aufgabenstellung sowie Anknüpfung an wissenschaftlichen und technischen Stand

Im pulverbettbasierten Schmelzen von Kunststoffen mittels Laserstrahlung (PBF-LB/P) sind Polymerpulver während des gesamten Bauprozesses über lange Zeiträume Temperaturen nahe dem Schmelzpunkt ausgesetzt. Diese thermische Dauerbelastung führt zu Alterungsmechanismen, welche die rheologischen, die thermischen und die schüttguttheologischen Eigenschaften des Pulvers verändern und damit das Schmelzen der Partikelsowie die resultierenden Bauteileigenschaften beeinträchtigen. Für Polyamid 12 (PA12), das den größten Marktanteil im PBF-LB/P besitzt, ist dieser Effekt hinreichend untersucht und wird industriell durch das Zumischen von 30 bis 50 % Neupulver kompensiert. Bei Hochleistungskunststoffen wie Polyetheretherketone, z.B. dem EOS PEEK HP3 (verarbeitet bei ca. 368 °C), oder glasfaserverstärktem Polyphenylsulfid, z.B. dem Toraymill PPS - GF 25 (verarbeitet bei ca. 280 °C) sind die Alterungseffekte hingegen so ausgeprägt, dass eine Wiederverwendung des Pulvers mit akzeptablen Eigenschaften praktisch nicht möglich ist.

Wie Abbildung 1 zeigt, schließt gefülltes Polyamid 66 (PA66) diese Lücke, da es bei moderaten Verarbeitungstemperaturen (250 °C) mechanische Eigenschaften auf dem Niveau dieser Hochtemperaturkunststoffe erreicht. Aufbauend auf dem etablierten Prozesswissen zu PA12 adressiert das Vorhaben die Übertragbarkeit bekannter Alterungsmechanismen auf PA66, dessen Recyclingfähigkeit aufgrund fehlender systematischer Daten bislang unzureichend ist. Die Aufgabenstellung besteht darin, das Alterungsverhalten von PA66 in Abhängigkeit von Temperatur, Zeit und Sauerstoffeinfluss grundlegend zu untersuchen, phänomenologische Materialmodelle zu entwickeln und darauf basierend Material- sowie Prozesskonzepte für eine robuste Wiederverwendbarkeit abzuleiten. Damit wird die Grundlage geschaffen, das industrielle Potenzial von PBF-LB/P für komplexe, funktionsintegrierte und hochbelastete Bauteile (wie Pumpenkomponenten oder Filtergehäuse) mit leistungsfähigen und zugleich nachhaltigen PA66-Werkstoffen zu erschließen.

1.2 Ablauf des Vorhabens

Im Projekt CyclePA66 arbeiteten Industrie und Forschung entlang der gesamten Wertschöpfungskette zusammen, um ein stabilisiertes, gefülltes PA66-Pulver für den industriellen PBF-LB/P-Serieneinsatz zu entwickeln. Zu Beginn erfolgt die Definition durch den Anwendungspartner AM-Rauch der anwendungs- und prozesseitigen Anforderungen an das Material, das Pulver und das Bauteil, während AM POLYMERS und die Technische Universität München die daraus abgeleiteten Anforderungen an Material, Pulver und Prozess spezifizierten. Aufbauend darauf analysierte die Technische Universität München die Alterungsmechanismen mittels Ofenalterungsversuchen und leitete Stabilisierungs- und Recyclingansätze ab, während AM POLYMERS geeignete Füllstoff- und Compoundkonzepte entwickelte, PA66-Compounds herstellte, diese zu Pulvern aufbereitete und charakterisierte.

Parallel optimierten AM POLYMERS und AM-Rauch die Anlagentechnik und die Prozessführung, grenzten das Verarbeitungsfenster über systematische Parameterstudien ein und überführten die Ergebnisse in robuste Prozessbedingungen. Abschließend fertigte AM-Rauch Demonstratorbauteile,

zur werkstoff- und prozesstechnischen Bewertung unter praxisnahen Bedingungen, während die Technische Universität München das zugrunde liegende Alterungsverhalten modellierte, validierte und die Recyclingstrategie absicherte. Durch diese arbeitsteilige und komplementäre Zusammenarbeit wurden Materialentwicklung, Prozessverständnis und industrielle Validierung nahtlos verzahnt.

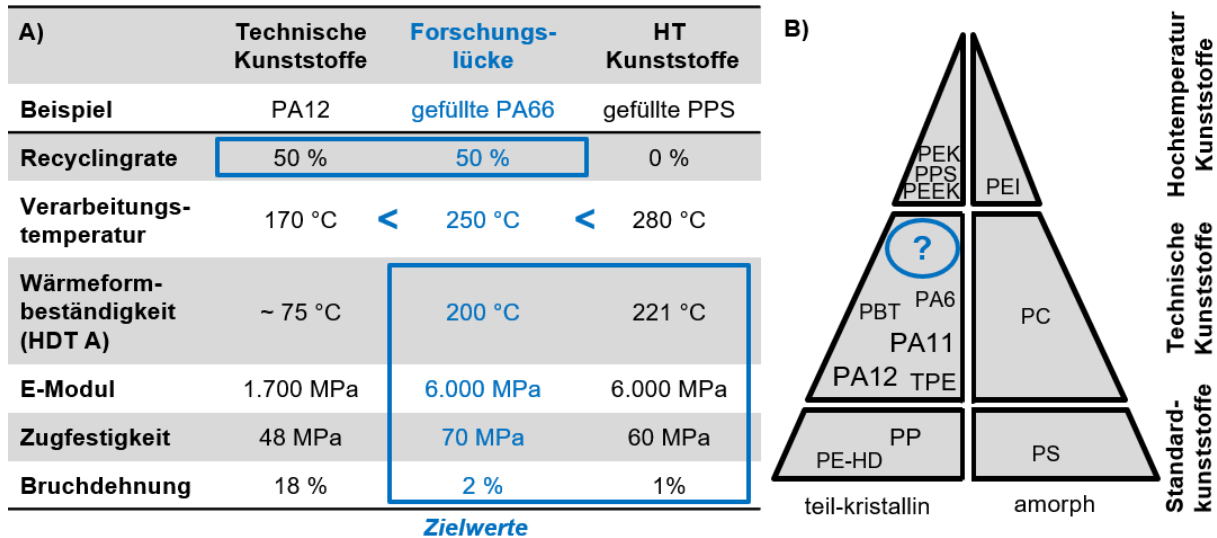


Abbildung 1: Einordnung gefüllter PA66-Pulver im Vergleich zu technischen und Hochleistungskunststoffen für den PBF-LB/P-Prozess: A) Vergleich wesentlicher Materialkennwerte und Prozessparameter von PA12, gefülltem PA66 (Zielmaterial in CyclePA66) und gefülltem PPS; und B) Schematische Darstellung der Positionierung gefüllter PA66-Pulver innerhalb der am Markt verfügbaren PBF-LB/P Materialien.

1.3 Wesentliche Ergebnisse

Die im Projekt entwickelten gefüllten und stabilisierten PA66-Compounds zeigen im PBF-LB/P ein verbessertes Gleichgewicht zwischen Thermooxidation und Festphasennachkondensation. Wie in Abbildung 2 dargestellt, erreichen stabilisierte kohlefasergefüllte Varianten, beispielsweise Rolaserit® PA66-CP08-CF04, die definierten mechanischen Kennwerte. Das ermittelte Prozessfenster erlaubt eine stabile Prozessführung, während phänomenologische Materialmodelle auf Basis von Ofenalterungsversuchen belegen, dass insbesondere der Stabilisatoranteil sowie Prozessstemperatur und Sauerstoffgehalt maßgeblich die Intensität der Alterungsmechanismen beeinflussen. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse eine ausgeprägte Anisotropie, da die Festigkeiten bereits im Neupulverzustand in z-Richtung unter denen der Bauebene liegen. Auch 1:1-Mischungen aus Neu- und Gebrauchtpulver weisen verminderte mechanische Kennwerte auf. Grund hierfür ist die alterungsbedingte Erhöhung der Schmelzviskosität, welche Porenbildung begünstigt. Eine Anpassung des Stabilisatoranteils verbessert die chemische Beständigkeit, kann zugleich die Viskosität erhöhen. Damit entsteht ein Zielkonflikt zwischen verbesserter Alterungsstabilität und ausreichender Fließfähigkeit zur Erzielung einer dichten Bauteilmorphologie. Die systematische Analyse dieser Wechselwirkungen bildet die Grundlage für die industrielle Weiterentwicklung von PA66-Pulvern.

Rolaserit® PA66-CP08-CF04:

Verarbeitungstemperatur	248 °C mit großem Prozessfenster: $\Delta T = 16.9 \text{ K}$
HDT A	230 °C
E-Modul (entlang X)	> 7000 MPa
Zugfestigkeit (entlang X)	> 90 MPa (Neupulver) > 68 MPa (50 % recyceltes Material)

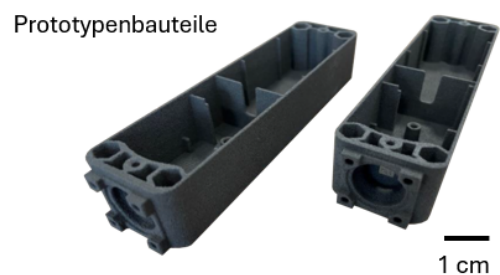


Abbildung 2: Kenndaten und Demonstratorbauteile des kohlefasergefüllten Rolaserit® PA66-CP08-CF04

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt unter dem Förderkennzeichen 03XP0546C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei den Autoren.