

Sebastian Geyer

Qualifizierung des selektiven Lasersinterns für den Einsatz einer Industrie 4.0 Produktionsanwendung

112 - Digital Business Transformation – Technologisch-basierte industrielle Innovationen in der produzierenden Industrie

Abstract

Die von Herstellern angegebenen Materialkennwerte für generativ verarbeitete thermoplastische Kunststoffe weichen in der Regel von den tatsächlich in der Praxis ermittelten Werten¹ ab. Aus diesem Grund werden mittels Zugversuch ermittelte Festigkeitswerte den Herstellerangaben und Materialkennwerten von vergleichbaren Kunststoffen für den Spritzgussbereich gegenübergestellt. Hintergrund ist eine notwendige Qualifizierung der mittels SLS² erzeugten Bauteile für die industrielle Anwendung mit der Losgröße 1.

Keywords:

Generative Fertigung, selektives Lasersintern, Losgröße 1, Industrie 4.0, Zugversuch, Maximalkraft, Zugfestigkeit, E-Modul, Bruchdehnung,

1. Einleitung

Das generative Fertigungsverfahren, welches derzeit optimale technische Voraussetzungen für die Herstellung von Serienbauteilen hat, ist das selektive Lasersintern von Kunststoffen (Breuninger et al. 2013: 32-34), (Gebhardt 2013). Es handelt sich hierbei um formstabile, warmfeste Kunststoffe, mit denen Bauteile hergestellt werden können, deren Dichten und Festigkeiten Werte im Bereich von bis zu 90 % jener von Spritzgussteilen aus vergleichbaren Materialien erreichen (Gebhardt 2013: 184), (EOS 2014). Mit dieser Technologie können in Verbindung mit geeigneten Kunststoffen³ funktionalisierte Bauteile mit hohem Individualisierungsgrad mit Scharnieren, Schnappverbindungen, Rasten usw. in einem Stück gefertigt werden. Auch die bis zu einer gewissen Bauteildicke mögliche Flexibilität des üblicherweise verwendeten Kunststoffes⁴ kann mit diesem Verfahren genutzt werden. So können z.B. integrierte Feder oder Dämpfungselemente direkt in einem Arbeitsgang im Bauteil selbst gefertigt werden.

¹ z.B. im Rahmen einer Qualitätskontrolle ermittelt

² Selektives Lasersintern

³ z.B. Polyamide PA2200, PA3200GF

⁴ PA12

2. Ausgangslage

Die generative Fertigung von Kunststoffen, Metallen und keramischen Werkstoffen mit hohem Individualisierungsgrad ist inzwischen Stand der Technik. Weiterentwicklungen fokussieren sich in diesem Bereich, neben der Schaffung von Qualitätsstandards, meist auf die Erweiterung des Materialportfolios, die Verbesserung der Materialeigenschaften, die erzeugbare Größe der Bauteile und die Geschwindigkeit, mit der diese gefertigt werden können.

Um die Materialeigenschaften von SLS-gefertigten Bauteilen zu verbessern, können einerseits verschiedene Parameter der Maschine variiert werden, andererseits bietet das Verfahren auch Möglichkeiten, spezielle Strukturen zu generieren, um die Bauteildichte bei gleichbleibender Festigkeit zu verringern (Krall 2015). Neben der einstellbaren Heizleistung für den Bauraum, in dem der Kunststoff bis knapp unter die Schmelztemperatur vorgewärmt wird, können auch Parameter wie die Belichtungsdauer, die Belichtungsstrategie⁵ sowie die Laserleistung angepasst werden.

3. Forschungsfrage

Vom Hersteller angegebene Materialkennwerte sollen im vorliegenden Paper hinterfragt werden. Dazu werden übliche Methoden herangezogen, um Materialeigenschaften⁶ von mittels SLS generativ gefertigten Bauteilen aus teilkristallinen thermoplastischen Kunststoffen zu erheben. In einem weiteren Schritt werden die genannten Eigenschaften mit dem gegebenen Spielraum der Parameter-Einstellungen verbessert.

4. Methodik

Um den Ist-Stand der Materialkennwerte zu erheben, müssen geeignete Prüfmethode und Prüfkörper-Geometrien ausgewählt und die Prüfkörper in vordefinierten Bereichen im Bauraum der Maschine angeordnet werden⁷. Danach erfolgt die Fertigung der Prüfkörper unter verschiedenen Vorwärmtemperaturen und die anschließende Prüfung und Ermittlung der Kennwerte mit der ausgewählten Prüfmethode.

4.1 Prüfkörperherstellung

Die Prüfkörper wurden auf einer EOS Formiga P110 in einer Schichtstärke von 100 µm im Parametersatz „Balanced“ hergestellt. Die Bauraumtemperatur wurde dabei laut Herstellervorgaben mit der sogenannten Non-Curl-Temperatur plus 4 °C –Temperatur-Offset gewählt und beträgt bei der ersten Probenreihe 166 °C (T₀). Die drei gewählten Orientierungen der Prüfkörper sind in Abb. 1, linkes Bild zu sehen. Die erste Probenreihe-XY wurde in der XY-Ebene gefertigt, wobei die Hauptachse der Prüfkörper in X-Richtung liegt. Da die Belichtungsrichtung des Lasers pro gefertigtem Layer um 90° gedreht wird, würde eine Orientierung in Y-Richtung jedoch keine Unterschiede in der Festigkeit der gefertigten Proben hervorrufen.

⁵ z.B. Füllgrad der Bauteile

⁶ Festigkeitswerte

⁷ Schrumpfwert- und Temperaturverteilung im Bauraum

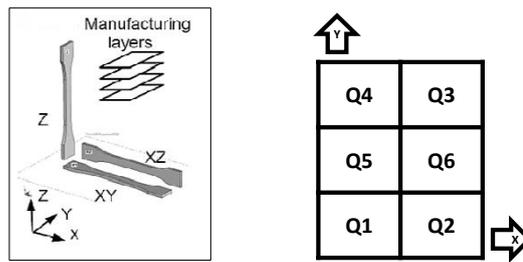


Abb.1: Bauraumorientierung der Prüfkörper

Die zweite Probenreihe wurde in XZ-Richtung gefertigt, die dritte Probenreihe in Z-Richtung. In Z-Richtung wurden statt 10 Stück, insgesamt 60 Stück Proben, die auf sechs definierte Bereiche⁸ im Bauraum aufgeteilt wurden (Abb.1, rechtes Bild), gefertigt.

4.2 Materialprüfung

Bauteilkennwerte wie die auftretende Maximalkraft F , die Zugfestigkeit σ , der Elastizitätsmodul E und die Bruchdehnung A wurden aus dem Zugversuch nach ISO 527-1 ermittelt. Die Ermittlung der Materialkennwerte erfolgte unter uniaxialer Belastung mit 5 mm/min Vorschub bis zum Bruch der Proben. Die Aufzeichnung der daraus resultierenden Primärdaten erfolgte als Kraft-Weg- und als Spannungs-Dehnungs-Signal.

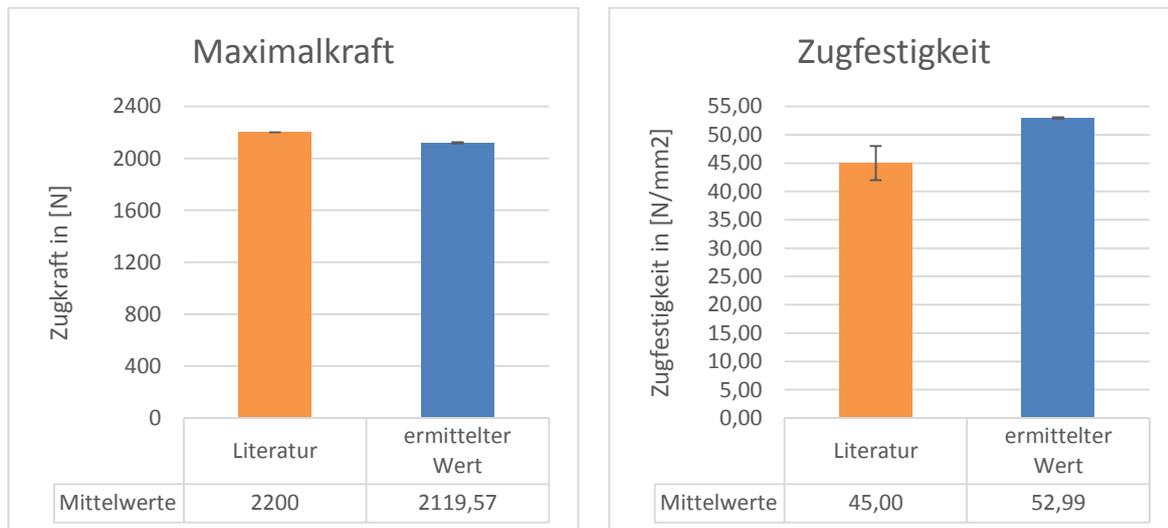


Abb.2: Maximalkraft und Zugfestigkeit in XY-Ebene

Die weitere Bearbeitung der Rohdaten und die statistische Auswertung erfolgte in MS Excel 2013. In Abb.2 bzw. Abb.3 sind die Mittelwerte und die zugehörigen Konfidenzintervalle der einzelnen Materialkennwerte in der Fertigungsrichtung XY der Proben beispielhaft dargestellt. Die grafischen Ergebnisse der Probenreihen XZ und Z sind nicht explizit aufgeführt, die genauen Werte sind jedoch in Tab.1 zusammengestellt.

⁸ Q1 – Q6

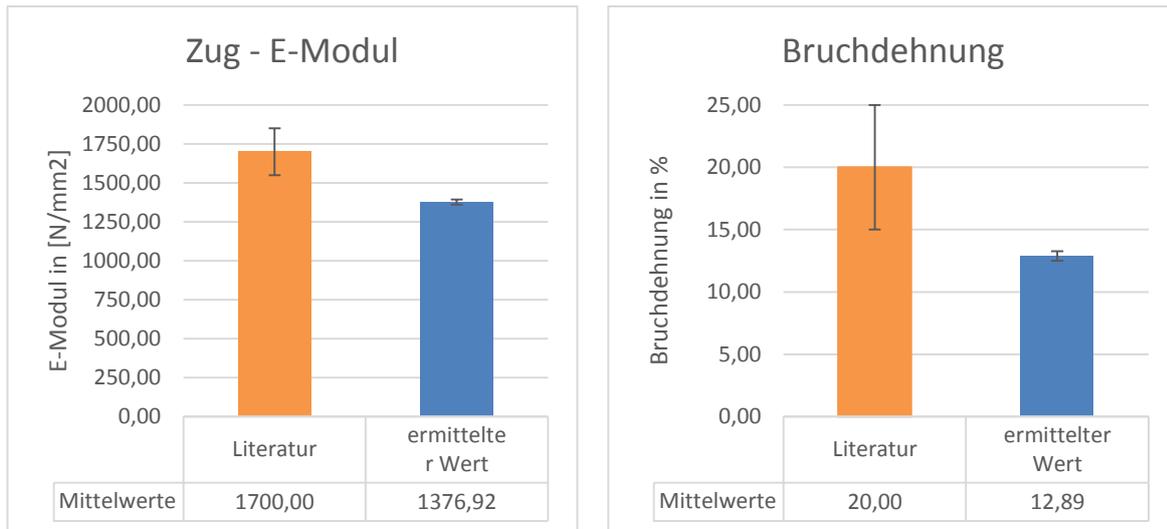


Abb.3: Zug-E-Modul und Bruchdehnung in XY-Ebene

In Tab.1 sind die im Zugversuch der drei unterschiedlichen Orientierungen ermittelten Materialkennwerte aufgelistet. In der ersten Zeile der Tabelle sind Kennwerte aus vorangegangenen Untersuchungen als Vergleichswerte⁹ dargestellt (Polak 2014). In der fünften Zeile sind die vom Hersteller angegebenen Werte (EOS 2014) und in der sechsten und letzten Zeile Vergleichswerte von Prüfstäben aus PA12, welche im Spritzgussverfahren hergestellt wurden, zu sehen (Kern 2006).

Werkstoff	Maximalkraft, F [N]	Zugfestigkeit, σ_B [N/mm ²]	Zug E-Modul [N/mm ²]	Bruchdehnung, A [%]
PA2200 ermittelt		44,88 ± 016	1618,16 ± 80.20	15,11 ± 0.96
PA2200 XY	2119,57 ± 4,77	52,99 ± 0,12	1376,92 ± 16,68	12,89 ± 0,39
PA2200 XZ	2089,88 ± 6,55	50,75 ± 0,16	1250,99 ± 11,70	16,08 ± 0,41
PA2200 Z (Q1)	1995,79 ± 2,33	49,89 ± 0,06	1238,08 ± 7,38	9,97 ± 0,22
PA2200 (EOS)		45 ± 3	1700 ± 150	20 ± 5
PA12		46	1500	280

Tab.1: ermittelte Materialkennwerte im Vergleich mit Literaturangaben

An den ermittelten Kennwerten ist zu erkennen, dass die angegebenen Werte der Herstellerfirma grundsätzlich nicht erreicht werden konnten. Lediglich die Zugfestigkeit der geprüften Bauteile in XY-, XZ- und Z (Q1)-Richtung konnten gegenüber den Herstellerangaben übertroffen werden. Bei den ermittelten Ergebnissen handelt es sich bislang jedoch um eine Momentaufnahme bei einer dezidierten Bauraumtemperatur ($T_0=166\text{ °C}$), die in weiterer Folge durch weitere ident gefertigte Prüfkörper bei bereits definierten Bauraumtemperaturen (Tab.2) ergänzt werden soll.

⁹ Alle Ergebnisse aus den Fertigungsrichtungen XY, XZ und Z wurden hier gemeinsam gemittelt

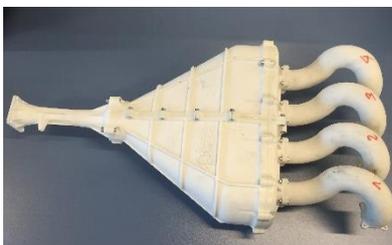
Temperatur	XY	XZ	Z (Q1 – Q6)
T1 = 166,5 °C	10	10	60
T2 = 167 °C	10	10	60
T3 = 167,5 °C	10	10	60
T4 = 168 °C	10	10	60
T5 = 168,5 °C	10	10	60
T6 = 169 °C	10	10	60
T7 = 169,5 °C	10	10	60
T8 = 170 °C	10	10	60
Summe	90	90	540

Tab.2: Probenplan für definierte Bauraumtemperaturen

Bei den dargestellten Ergebnissen handelt es sich um den derzeitigen Stand der Untersuchungen. Es folgen noch weitere Materialprüfungen, die laut Tab.2 durchgeführt werden.

4.3 Anwendungsbeispiele

Durch die Verwendung generativ gefertigter Bauteile im Rahmen mehrerer Versuchsreihen innerhalb verschiedener konkreter Anwendungsfälle wurden die Materialeigenschaften der gefertigten Bauteile subjektiv überprüft. So wurden die meisten Bauteile für ein Rennfahrzeug der Formula-Student-Serie¹⁰ gefertigt. Hierbei handelt es sich um Bauteile, welche mitunter starken statischen, dynamischen und thermischen Belastungen ausgesetzt sind und erst bei Bruch oder Beschädigung strukturell überarbeitet, angepasst¹¹ und neu gefertigt wurden.



$d^{12} = 5 \text{ mm}$, $m = 2654 \text{ g}$



$d = 1,5 \text{ mm}$, $m = 514 \text{ g}$



$d = 2,5 \text{ mm}$, $m = 470 \text{ g}$

Abb.4: Iterationsstufen der Ansaugbrücke mit beschädigtem Bauteil (Mitte)

So ist diese iterative Entwicklung besonders beim Ansaugtrakt des Formula Student Fahrzeugs ersichtlich. Dieser hat sich seit dem Start des Formula Student Teams im Jahr 2013 durch den konstanten Know-how-Aufbau im Bereich der generativen Fertigung mittels SLS stark verändert. Dies ermöglichte eine Gewichtsreduktion vom ersten gefertigten Bauteil im Jahr 2013 bis zum Letztstand

¹⁰ Formula Student Austria. <https://fsaustria.at/>

¹¹ Erhöhen der Bauteildicke etc.

¹² Wandstärke

2016 um insgesamt 82 %. Die angeführten Verbesserungen wurden durch Anpassungen der funktionalen Geometrie¹³ und durch Wandstärkenreduktion erreicht.

Ein weiterer konkreter Anwendungsfall ist die Erzeugung von Positiv- sowie Negativformen für das Laminieren von Kohlefaserverbundwerkstoffen. Hier zeichnet sich die generative Fertigung mittels SLS durch ihren hohen Individualisierungsgrad im Bereich der Fertigung von Einzelstücken aus.



Abb.5: Verfahrensschritte Lüfter-Gehäuse

So konnte eine vierteilige Positivform für ein Lüfter-Gehäuse eines Motorradkühlers in Losgröße 1 gefertigt werden. Nach geringen Nacharbeiten, die in Abb. 5 zu sehen sind, konnte das gewünschte Bauteil aus CFK laminiert und durch die Trennung der Formhälften ohne Beschädigung der Form und des Bauteils entformt werden.

5. Resultate / weitere Schritte

Die Untersuchung der mit den Standardeinstellungen¹⁴ der Maschine hergestellten Prüfkörper hat gezeigt, dass die dabei ermittelten Materialkennwerte durchschnittlich unter den vom Hersteller angegebenen Werten liegen. Im Vergleich zu Standard-PA12 liegen die Werte teilweise über den Erwartungen, allein bei der Bruchdehnung ist eine große Abweichung zu beobachten. Nach der Erhebung von Materialkennwerten lasergesinterter Bauteile in drei verschiedenen Orientierungen im Raum ist die Untersuchung weiterer Proben mit gleicher Anordnung und Lage im Bauraum, jedoch schrittweise erhöhter Bauraumtemperatur der Maschine geplant¹⁵. Dabei sollen Bereiche im Bauraum identifiziert werden, die bezogen auf andere Bereiche und im Vergleich mit den Kennwerten, welche die Herstellerfirma zur Verfügung stellt, besondere Charakteristika aufweisen. Dies soll dazu beitragen, Bauteile optimal im Bauraum anzuordnen, um gezielt gewünschte Materialeigenschaften zu erreichen. Des Weiteren soll hinterfragt werden, ob mittels generativer Fertigung hergestellte Bauteile in Hinblick auf eine individualisierte Produktion mit der Losgröße 1 sinnhaft sind.

¹³ CFD-optimiertes Luftvolumen und strategisch platzierte Verstärkungsrippen

¹⁴ Von EOS empfohlene Bautemperatur und Parametersatz

¹⁵ Siehe Probenplan Tab.2

Literaturliste/Quellenverzeichnis:

J. Breuninger, R. Becker, A. Wolf, S. Rommel, A. Verl (2013): Generative Fertigung mit Kunststoffen. Springer Vieweg, Berlin Heidelberg,. S. 32 – 34.

Gebhardt, Andreas (2013): Generative Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 248-260.

EOS GmbH (2014): Produktinformation EOSINT P/ PA2200-Pulver. EOS GmbH, Krailling. S. 2.

Schmid, Manfred (2010): Kunststoffe für Selektives Lasersintern. In: PLASTICS.NOW! Juni2010, 24-25.

Polak, Philipp (2014): Prüfung von Materialparametern lasergesinterter Prüfstäbe aus Kunststoff. FH Campus Wien, Wien. S. 42 – 54.

Krall, Stephan (2015): Vergleich der Werkstoffeigenschaften (Festigkeit) unterschiedlicher Leichtbau-Prüfkörper. FH Campus Wien.

Kern GmbH (2016): Datenblatt PA12. <http://www.kern.de/cgi-bin/riweta.cgi?nr=1176&lng=1>, (04.02.2016)