

4 Optimale Energieeinträge für die Verarbeitung unterschiedlicher kommerzieller Polyamid 11 und 12-Pulver sowie eines neu entwickelten Polyethylen-Pulvers beim Laser-Sintern

Optimal energy input ranges for laser sintering of different commercial polyamide 11 and 12 powders as well as of a new polyethylene powder

Dr.-Ing. Andreas Wegner, Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt **

**Lehrstuhl für Fertigungstechnik, Universität Duisburg-Essen*

Abstract: Das Laser-Sintern gewinnt zunehmend an Bedeutung als Kleinserienfertigungsverfahren. In den meisten Fällen werden die Bauteile aus Polyamid 12 (PA 12) gefertigt. Alternative Materialien kommen aufgrund der schwierigeren Verarbeitung kaum zur Anwendung, obwohl sie teilweise bessere Bauteileigenschaften aufweisen. Andere Kunststoffe sind überhaupt nicht verfügbar. In beiden Fällen fehlt oftmals ein ausreichendes Prozessverständnis, um Bauteile mit optimalen Eigenschaften zu erzeugen oder neue Materialien für das Laser-Sintern zu qualifizieren. Im Rahmen der Versuche werden kommerzielle PA 11- und PA 12-Materialien sowie ein Polyethylen-Pulver hinsichtlich der Einstellung optimaler Verarbeitungsbedingungen untersucht. Ziel ist es, Zusammenhänge zwischen dem Energieeintrag und wichtigen Bauteileigenschaften aufzustellen. Auf Basis der Versuchsergebnisse werden optimale Energiedichtefenster für die verschiedenen Materialien abgeleitet, innerhalb derer mit guten Eigenschaften gerechnet werden kann.

Keywords: Laser-Sintern, Prozessverständnis, Polyamid 11, Polyamid 12, Polyethylen, Robuste Prozessführung

4.1 Einleitung

Erhöhter Wettbewerbsdruck, weltweite Absatzmärkte, kürzere Produktlebenszyklen, der Wunsch nach individuellen Produkten sowie knapper werdende Ressourcen erhöhen den Druck bei der Suche nach einem geeigneten innovativen Herstellungsverfahren für Kleinserien zunehmend [1]. Additive Fertigungsverfahren etablieren sich basierend auf diesen Entwicklungen sowie durch die stetige Weiterentwicklung der Verfahren zunehmend als dieses Serienfertigungsverfahren [2]. Hierbei stellt das Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen eines der Verfahren dar, welches in naher Zukunft die Eignung für eine Serienfertigung von mechanisch belastbaren Komponenten aufweist [3]. Eines der großen Defizite des Laser-Sinterns (LS) ist hierbei die im Vergleich zum Spritzguss kleine Materialpalette mit vielen fehlenden Standardmaterialien. Obwohl mittlerweile mehrere unterschiedliche Kunststofftypen kommerziell als LS-Pulver verfügbar sind, kommt in 90 bis 95 % aller Anwendungen immer noch das Standardmaterial Polyamid 12 (PA 12) zum Einsatz [4]. Obwohl alternative Materialien teils bessere Eigenschaften bzw. eine bessere Eignung für bestimmte Anwendungen aufweisen ist

ihr Marktanteil dennoch gering. Eine Hauptursache hierfür ist die schwierigere Verarbeitung der Materialien, weshalb Anwender auch mangels Erfahrungswerte bzw. eines tiefergehenden Prozessverständnisses meist auf den Standardwerkstoff zurückgreifen. Gleichzeitig sind viele Standardkunststoffe wie PA 6, Polyethylen oder Polypropylen nicht oder nur als LS-Material mit unzureichenden Bauteileigenschaften bzw. mit einer äußerst kritischen Verarbeitung verfügbar. Ziel der vorliegenden Studie ist, Prozesswissen über die Verarbeitung und die entstehenden Bauteileigenschaften alternativer kommerzieller LS-Materialien zu schaffen und in einem zweiten Schritt neue Materialien für den Prozess zu qualifizieren. Im vorliegenden Fall werden erste Untersuchungsergebnisse zu den Bauteileigenschaften eines neu entwickelten Polyethylen-Pulvers vorgestellt.

4.2 Stand der Technik

Untersuchungen zum Einfluss von Prozessparametern auf die Bauteileigenschaften sind in der Literatur zum Laser-Sintern zahlreich vertreten. Der Fokus liegt hierbei stets auf der Verarbeitung von Standard-PA 12 vom Typ EOS PA 2200 oder 3D-Systems Duraform PA. Auch die Autoren des Beitrags haben in zahlreichen Publikationen den Einfluss verschiedener Einflussfaktoren für EOS PA 2200 untersucht [5],[6],[7],[8],[9],[10]. Diese bilden hierbei die Basis für die Untersuchungen in dieser Studie und werden als Referenz genutzt. Alternative LS-Materialien werden dagegen nur selten untersucht, obwohl insbesondere PA 11 ähnlich lange genutzt wird wie PA 12.

Keller liefert in [11] schon 1998 eine erste grundlegende Studie zu PA 11 beim Laser-Sintern, in welcher die Materialeigenschaften und die Verarbeitungseinflüsse untersucht wurden. Aufgrund der verwendeten Labor-Anlage sowie des nicht kommerziellen Materials ist ein Vergleich zu heute erhältlichen PA 11-Pulvern sowie der Verarbeitung auf aktuellen Anlagensystemen nur schwer möglich. Goodridge betrachtet in [12] die Verarbeitung von Duraform EX einem PA 11 der Firma 3D-Systems. Sie untersuchte insbesondere den Einfluss der inhomogenen Temperaturverteilung auf der Pulverbettoberfläche auf die mechanischen Eigenschaften in Aufbaurichtung. Die Ergebnisse zeigen hier eine deutlich stärkere Beeinflussung der Kennwerte als beim PA 12. Unterschiedliche Prozessparametereinstellungen wurden hierbei jedoch nicht untersucht. Gießbach analysierte dagegen für das gleiche Material den Einfluss der Energiedichte auf die Bauteileigenschaften, betrachtete allerdings nur die Kennwerte innerhalb der Bauebene [13]. Als optimale Kennwerte ermittelte er für die Zugfestigkeit 48 bis 51 N/mm² und für den E-Modul 1600 N/mm² im Fall von Energieeinträgen über 0,16 J/mm³. Optimale Bruchdehnungen von über 30 % erreichte er jedoch erst für Energiedichten von über 0,23 J/mm³. In einer ersten Studie der Autoren in [14] wurde ebenfalls der Einfluss von Prozessparametern auf die Verarbeitung von EOS PA 1101 untersucht. Als Maschine wurde hier eine durch ein neues Temperaturführungssystem modifizierte DTM Sinterstation 2500HS verwendet. Optimale Bauteileigenschaften wurden für Energiedichten zwischen 0,4 und 0,58 J/mm³ erzielt, wobei in Aufbaurich-

tung kaum Bruchdehnungen über 30 % erreicht werden. Die aktuelle Studie ergänzt diese Ergebnisse durch Betrachtung einer vom Aufbau unterschiedlichen Anlage. Zusätzlich wird die Verarbeitung eines schwarz eingefärbten PA 11 untersucht.

Zu weniger verbreiteten PA 12-Typen, wie dem Arkema Orgasol Invent Smooth, existieren nur wenige Veröffentlichungen. Nur Dupin hat in [15],[16],[17] Zusammenhänge detaillierter untersucht, wobei er das von Exceltec modifizierte Innov PA verwendete und die Ergebnisse mit solchen für Duraform PA verglich. Fokus der Arbeiten lag hierbei insbesondere darin, den Einfluss der Porosität aufzudecken, wobei ab einer Flächenenergiedichte von $0,02 \text{ J/mm}^2$ eine niedrige Porosität erreicht wird. Betrachtet wurden Zusammenhänge jeweils für Bauteile in x-Richtung. Für Energieeinträge zwischen $0,014$ und $0,034 \text{ J/mm}^2$ steigt die Zugfestigkeit von 30 auf 51 N/mm^2 und die Bruchdehnung steigert sich von 11 auf 20 %. Diese Angaben sollen mit den Ergebnissen der in diesem Artikel dargestellten Untersuchungen verglichen werden.

Im Gegensatz zu PA 12 und PA 11 ist Polyethylen kaum für das Laser-Sintern verfügbar. Die bisher umfangreichste Studie unter Angabe von Kennwerten stammt von Rietzel [18]. Er untersuchte insbesondere die Materialeigenschaften und fand eine niedrige Schüttdichte sowie ein sehr kleines Verarbeitungsfenster für das von ihm betrachtete Versuchspulver. Die hergestellten Bauteile wiesen eine hohe Sprödigkeit mit Bruchdehnungen unter 3 % auf oder zeigten bei besseren mechanischen Eigenschaften eine hohe Formabweichung. Dabei wurden lediglich Zugstäbe innerhalb der Bauebene untersucht. Auch in [19] wird Polyethylen als Laser-Sinter-Material untersucht. Da es jedoch ausschließlich als Composite mit Hydroxyapatit verarbeitet wird, können die Daten nicht als Referenz für die vorliegenden Versuche herangezogen werden. Im Rahmen der präsentierten Studie sollen die sich in Abhängigkeit unterschiedlicher Prozessparameter einstellenden Bauteileigenschaften eines experimentellen Polyethylen-Pulver, welches kurz vor der Markteinführung steht, analysiert werden. Ziel ist, ein tiefgehendes Prozessverständnis für die Verarbeitung von PE im Laser-Sintern zu schaffen.

4.3 Versuchsbeschreibung

Im Rahmen der Studie wurde die Verarbeitung unterschiedlicher Laser-Sinter-Materialien auf einer EOS Formiga P100 untersucht. Als Materialien wurde ein Standard PA 12 vom Typ EOS PA 2200, ein PA 12 vom Typ Arkema Orgasol Invent Smooth, zwei PA 11-Pulver vom Typ EOS PA 1101 und Arkema Rilsan Invent Black sowie ein gemeinschaftlich vom Lehrstuhl für Fertigungstechnik der Universität Duisburg-Essen mit der Firma ROWAK entwickeltes Polyethylen-Pulver namens ROWAK Rolaserit PE (Korngröße $< 120 \mu\text{m}$, Hausner-Faktor $< 1,25$) betrachtet. Um optimale Verarbeitungsbereiche zu bestimmen, wurde der Einfluss der Volumenenergiedichte (Gl. 4.1 und Gl. 4.2) sowie anderer variierter Parameter auf die Bauteileigenschaften untersucht. Die entsprechend für die unterschiedlichen Materialien variierten Parameter sind in Tab. 4.1 zusammengefasst. Hierbei wurde insbesondere für PA 11 und PA 12 ein sehr großer Parameterbereich für die Volumenenergiedichte untersucht, um

sowohl Effekte einer unzureichenden Versinterung als auch erster Zersetzungseffekte zu erfassen. Um einen derart großen Variationsbereich zu erzielen, wurde jeweils ein zentral-zusammengesetzter bzw. ein optimaler Versuchsplan zugrunde gelegt, in welchem insbesondere die Laserleistung, der Hatchabstand, die Scangeschwindigkeit sowie zum Teil die Schichtdicke variiert wurden. Aufgrund des kleineren Prozessfensters bei Polyethylen wurden hier nur einzelne Versuchspunkte mit Energieeinträgen zwischen 0,17 und 0,23 J/mm³ und Hatchabständen von 0,15 und 0,2 mm realisiert. Zumeist wurde eine in x- und y-Richtung alternierende Belichtungsstrategie eingesetzt. Die Abstände zwischen Fill und Outline wurden dabei bei den Standardwerten konstant gehalten, wobei bei PA 11 entsprechend den EOS-Standardparametern mit einer doppelten Konturbelichtung gearbeitet wurde. Die Pulverbetttemperaturen wurden bei PA 11, Arkema PA 12 und PE basierend auf Voruntersuchungen optimal eingestellt, während sie für das Standard-PA 12 im Versuch entsprechend Tab. 4.1 variiert wurden. Im Rahmen der Versuche wurden jeweils die Einflüsse des Energieeintrages auf die Bauteildichte teils zusätzlich in Abhängigkeit der Scanvektorlänge (Variation der Bauteillänge, Scan nur in x-Richtung) sowie auf die mechanischen Eigenschaften innerhalb der Bauebene (x0) sowie in Aufbaurichtung (z90) analysiert. Die Bauteildichte wurde teils durch Vermessen und Verwiegen der erzeugten Dichtewürfel (Standard-PA 12: alle; Arkema-PA 12 und PA 11: 50 mm) sowie teils nach dem archimedischen Prinzip nach DIN EN ISO 1183-1 (Arkema-PA 12 und PA 11: 4 bis 25 mm; Polyethylen) bestimmt. Für jede Parametereinstellung wurden jeweils drei Dichtewürfel untersucht. Der Grund für die unterschiedlichen Messmethoden ergibt sich aus einer Anschaffung eines entsprechenden Messgerätes nach Abschluss der Versuche mit PA 2200 und basierend auf der maximal messbaren Bauteilgröße. Die Zugversuche wurden nach DIN EN ISO 527-1/-2 und DIN EN ISO 10350-1 bei Normklima durchgeführt. Als Abzugsgeschwindigkeit wurde bei PA 12 und PA 11 50 mm/min und bei PE 5 mm/min verwendet. Die Prüfungen wurden für PA 12 (Lagerung bis zum Feuchtegleichgewicht nach DIN EN ISO 291) und PE in einem externen Prüflabor mit einer Zugprüfmaschine vom Typ Zwick Z020 M (MultiXtense) durchgeführt, während die Prüfungen an den Arkema-PA 12 Zugstäben im Labor des Lehrstuhles für Kunststofftechnik (Universität Erlangen-Nürnberg) nach Lagerung bis zum Feuchtegleichgewicht nach DIN EN ISO 291 bzw. an den PA 11 Zugstäben nach Trocknung im Vakuum bei 70 °C vorgenommen wurden. Zur statistischen Absicherung wurden je Orientierung mindestens fünf Zugstäbe geprüft. Zur Auswertung werden die ermittelten Kennwerte jeweils als Funktion der Volumenenergiedichte dargestellt, wobei teilweise weitere Einflüsse wie die Schichtdicke oder der Hatchabstand berücksichtigt werden.

$$\text{Gl. 4.1} \quad \text{Flächenenergiedichte} = \frac{\text{Laserleistung}}{\text{Hatchabs t and} \cdot \text{Scangeschwindigkeit}}$$

$$\text{Gl. 4.2} \quad \text{Volumenenergiedichte} = \frac{\text{Laserleistung}}{\text{Hatchabs t and} \cdot \text{Scangeschwindigkeit} \cdot \text{Schichtdicke}}$$

Tab. 4.1 Untersuchte Materialien und variierte Parameter

Material	Volumen- energie- dichte	Laser- leistung	Hatch- abstand	Scan- geschwindig- keit	Pulverbett- temperatur	Schicht- dicke
	J/mm ³	W	mm	mm/s	°C	µm
EOS PA 2200	0,10 – 0,44	17,8	0,10	2750	173	80
		19,5	0,15	3500	174	100
		21,8	0,20	4250	175	120
		23,0	0,25	5000	176	150
		24,8	0,30	5750	177	180
Arkema Rilsan Invent Black	0,30 – 0,61	21	0,15	2500	170	100
		23	0,20	3000		
		25		3500		
EOS PA 1101	0,15 – 0,68	20,6	0,15	3000	185	80
		22,5	0,20	3750		100
		24,4	0,25	4500		120
Arkema Rilsan Invent Black	0,15 – 0,68	20,6	0,15	3000	185	80
		22,5	0,20	3750		100
		24,4	0,25	4500		120
EOS PA 2200	0,10 – 0,44	17,8	0,10	2750	173	80
		19,5	0,15	3500	174	100
		21,8	0,20	4250	175	120
		23,0	0,25	5000	176	150
		24,8	0,30	5750	177	180

4.4 Versuchsergebnisse

4.4.1 Polyamid 12: EOS PA 2200

Im Rahmen der Versuche werden optimale Energiedichtefenster für die Verarbeitung der untersuchten Laser-Sinter-Materialien bestimmt. Die auf Basis der Versuchsdaten ermittelten Korrelationen aus Volumenenergiedichte und Bauteileigenschaften sind für EOS PA 2200 in Abb. 4.1 bis Abb. 4.4 dargestellt.

Hohe Bauteildichten stellen sich für einen Energieeintrag von über 0,225 J/mm³ ein, Abb. 4.1. Die Höhe der maximal erreichbaren Dichtewerte hängt hierbei stark von der Scanvektorenlänge ab. Insbesondere bei kurzen Scanvektoren kann ein Absinken der erreichbaren Dichtewerte festgestellt werden. So können bei Scanvektoren von 25

und 50 mm Dichtewerte von über $0,97 \text{ g/cm}^3$ erreicht werden, während bei 5 und 10 mm nur $0,94$ bis $0,96 \text{ g/cm}^3$ gemessen werden. Als Ursache für dieses Verhalten konnte ein hoher Einfluss der Würfelgröße und somit des Oberflächen-/Volumenverhältnisses ermittelt werden (vgl. [5]).

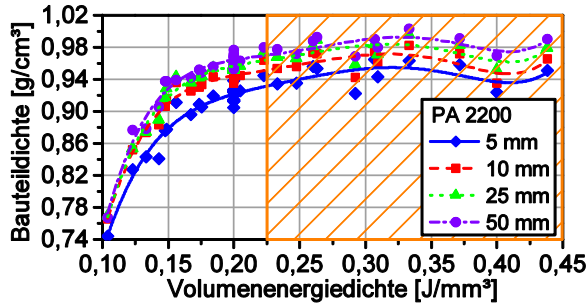


Abb. 4.1 Korrelation zwischen der Bauteildichte in Abhängigkeit der Scanvektorklänge und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von EOS PA 2200

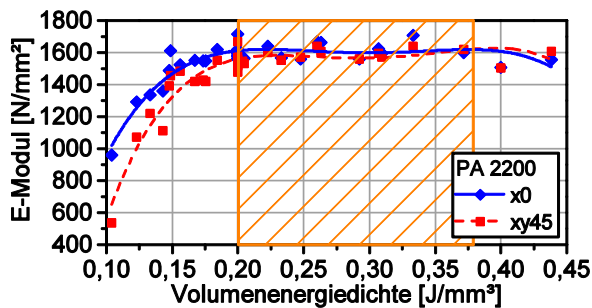


Abb. 4.2 Korrelation zwischen dem E-Modul in Abhängigkeit der Zugstaborientierung und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von EOS PA 2200

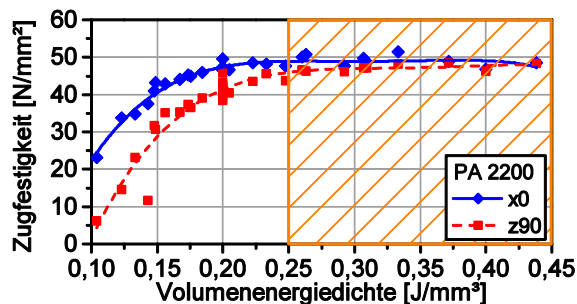


Abb. 4.3 Korrelation zwischen der Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Zugstaborientierung und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von EOS PA 2200

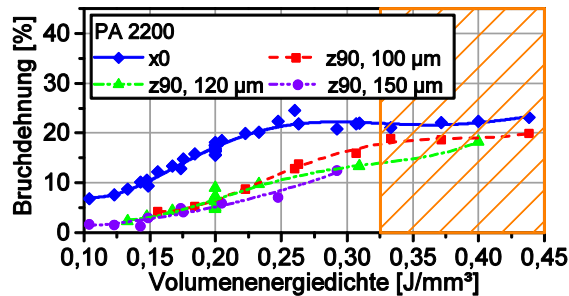


Abb. 4.4 Korrelation zwischen der Bruchdehnung in Abhängigkeit der Zugstaborientierung sowie der Schichtdicke und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von EOS PA 2200

Hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften zeigt sich ein gegenüber der Bauteildichte abweichendes Verhalten. Während für den E-Modul schon bei einem Energieeintrag von $0,20 \text{ J/mm}^3$ unabhängig von der Zugstaborientierung hohe Kennwerte zwischen 1500 und 1600 N/mm^2 erreicht werden (Abb. 4.2), erfordert die Einstellung optimierter Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen höhere Energieeinträge. So werden orientierungsunabhängige Werte für die Zugfestigkeit mit Werten zwischen 48 und 51 N/mm^2 ab einer Volumenenergiedichte von $0,25 \text{ J/mm}^3$ erzielt, Abb. 4.3. Insbesondere die Optimierung der Kennwerte in Aufbaurichtung (Orientierung z90) erfordert höhere Energieeinträge. Für die Bruchdehnung verstärkt sich dieser Effekt nochmals. Optimale Bruchdehnungen in Aufbaurichtung von ca. 19% werden hier erst oberhalb von $0,325 \text{ J/mm}^3$ erzielt (Abb. 4.4), während innerhalb der Bauebene (Orientierung x0) Werte von ca. 22% bereits ab $0,25 \text{ J/mm}^3$ erreicht werden. Gleichzeitig ergibt sich im Fall der Bruchdehnung z90 eine signifikante Abhängigkeit von der Schichtstärke. Nur für eine Schichtstärke von $0,1 \text{ mm}$, also dem niedrigsten untersuchten Wert, liegt über einen größeren Energiedichtebereich ein Plateau mit höchsten Kennwerten von ca. 19% vor, während für $0,12 \text{ mm}$ nur für eine einzelne Energiedichte und für $0,15 \text{ mm}$ für keinen Energieeintrag ähnliche Werte erreicht werden. Insbesondere für kleine Schichtstärken wird im Fall der Formiga, im Gegensatz zu anderen Anlagen (vgl. [7]) eine geringe Anisotropie der Bruchdehnung von nur ca. 15% erreicht. Eine obere Grenze für den Energieeintrag findet sich nur für den E-Modul. Hier ist oberhalb von $0,38 \text{ J/mm}^3$ ein leichter Abfall der Kennwerte festzustellen, welcher jedoch mit einem Anstieg der Bauteilporosität (vgl. [5]) korreliert. Optimale Kennwerte ergeben sich somit in einem Energiedichtefenster von $0,325$ bis $0,38 \text{ J/mm}^3$.

4.4.2 Polyamid 12: Arkema Orgasol Invent Smooth

Neben dem Standardmaterial PA 2200 wurde das Orgasol Invent Smooth von Arkema untersucht. Die aufgestellten Korrelationen aus Volumenenergiedichte und Bauteileigenschaften sind in Abb. 4.5 bis Abb. 4.8 dargestellt. Aufgrund einer starken Verzugseigung konnten niedrigere Energieeinträge als $0,3 \text{ J/mm}^3$ nicht prozessstabil reali-

siert werden. Insbesondere die Herstellung von in der Bauebene platzierten Zugstäben ist für niedrige Energieeinträge kritisch. Selbst im Bereich 0,3 bis 0,4 J/mm³ tritt noch verstärkter Verzug auf. Die nutzbaren Energiedichtebereiche liegen somit deutlich über den von Dupin [15] verwendeten Werten, obwohl das Basismaterial identisch ist.

Die Bauteildichte steigt für Scanvektorklängen zwischen 5 und 25 mm mit zunehmendem Energieeintrag von 0,985 auf 0,995 g/cm³ an, wobei für eine Volumenenergiedichte von über 0,36 J/mm³ eine hohe Dichte von 0,99 g/cm³ erreicht wird, Abb. 4.5. Für eine Scanvektorklänge von 50 mm zeigt sich dagegen aufgrund der anderen Messmethode ein anderes Verhalten mit niedrigeren Kennwerten. Die Bauteildichte nimmt hier auch erst mit zunehmender Energiedichte zu fällt aber oberhalb von 0,50 J/mm³ wieder ab. Hohe Dichten über 0,97 g/cm³ werden hier somit im Intervall von 0,36 J/mm³ bis 0,56 J/mm³ erzielt, was folglich insgesamt betrachtet zu guten Dichtewerten führt.

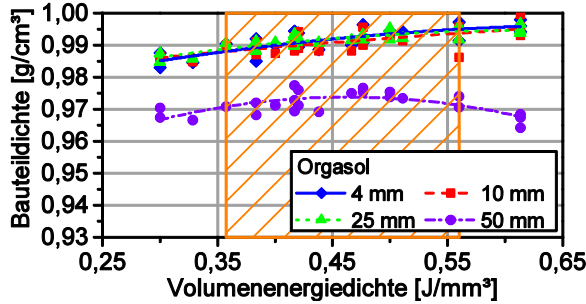


Abb. 4.5 Korrelation zwischen der Bauteildichte in Abhängigkeit der Scanvektorklänge und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von Arkema Orgasol Invent Smooth

Für den E-Modul (Abb. 4.6) ist unabhängig von der Bauteilorientierung mit zunehmender Volumenenergiedichte ein Anstieg des Kennwertes zu beobachten, welcher bei 0,5 J/mm³ sein Maximum findet. Über diesem Energieeintrag fällt der E-Modul wieder leicht ab. Optimale Kennwerte ergeben sich in einer Energiedichtespanne von 0,42 bis 0,61 J/mm³. Hierbei liegen die Kennwerte in der Bauebene (x0) mit 1600 bis 1650 N/mm² signifikant über den Werten in der Aufbaurichtung (z90) mit 1500 bis 1600 N/mm². Hierbei besteht ein Unterschied von ca. 70 N/mm² zwischen den Orientierungen. Für den Verlauf der Festigkeiten zeigt sich ein etwas anderes Verhalten, Abb. 4.7. Die Kennwerte in x-Richtung steigen nur leicht mit zunehmender Energiedichte von 45 auf 47 N/mm² für 0,61 J/mm³ an. Dagegen ist für die Aufbaurichtung für Energiedichten zwischen 0,3 und 0,45 J/mm³ ein starker Anstieg der Festigkeit von 35 auf 42 N/mm² zu beobachten. Für einzelne Einstellungen werden bereits bei 0,4 J/mm³ maximale Zugfestigkeiten für z90 im Bereich ca. 43 bis 44 N/mm² erzielt. Für hohe Energieeinträge ist auch hier ein leichter Abfall zu finden. Insgesamt werden in einem

Intervall von 0,4 bis 0,61 J/mm³ optimale Kennwerte im Bereich von 43 bis 47 N/mm² erzielt, wobei stets eine signifikante Abweichung zwischen den Orientierungen von etwa 9 % vorliegt. Hierbei fällt auf, dass die von Dupin in [15] erzielten Werte von 51 N/mm² in der Bauebene (x0) nicht erreicht werden. Gleichzeitig wurden aber keine vergleichbar niedrigen Werte von 30 N/mm² ermittelt.

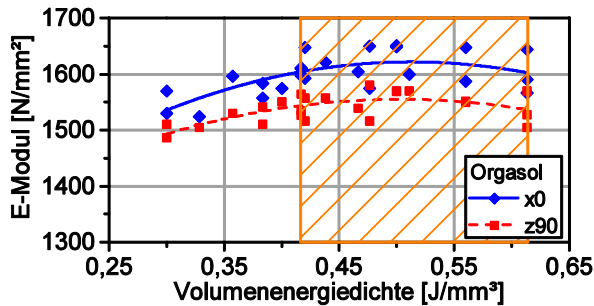


Abb. 4.6 Korrelation zwischen dem E-Modul in Abhängigkeit der Zugstaborientierung und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von Arkema Orgasol Invent Smooth

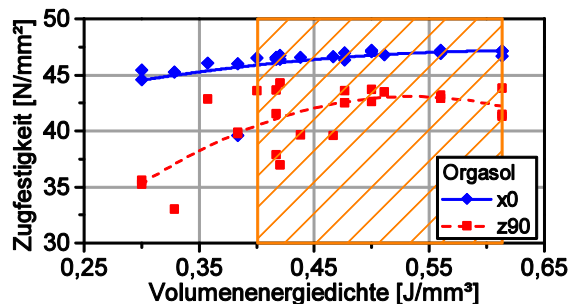


Abb. 4.7 Korrelation zwischen der Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Zugstaborientierung und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von Arkema Orgasol Invent Smooth

Die Bruchdehnung in der Bauebene zeigte einen von allen anderen Kennwerten abweichenden Verlauf, Abb. 4.8. Unabhängig vom Energieeintrag liegt die Bruchdehnung bei Werten zwischen 16 und 20 %, wobei die höchsten gemessenen Werte tendenziell für niedrigere und höhere Energiedichten erzielt werden. In Aufbaurichtung steigen die Werte im Bereich 0,3 bis 0,42 J/mm³ von 2,5 auf ca. 5 % an. Für höhere Energiedichten im Bereich 0,42 bis 0,61 J/mm³ ergibt sich ein annähernd konstantes Niveau mit optimalen Werten im Bereich 5 bis 8 %. Hierbei sind die erzielten Werte stark von den Parametereinstellungen abhängig. Die höchsten ermittelten Werte werden für 0,42 J/mm³ erzielt. Für die Bruchdehnung ergibt sich eine sehr starke Anisotropie zwischen den beiden Orientierungen. Die prozentualen Abweichungen liegen

selbst für optimale Kennwerte bei Werten von 50 bis 70 %, obwohl in der Versuchsreihe nur niedrige Schichtstärken von 100 μm verwendet wurden. Insgesamt betrachtet, ergeben sich optimale Kennwerte in einem Energiedichtefenster von 0,42 bis 0,56 J/mm^3 . Im Vergleich zu PA 2200 stellt sich jedoch ein wesentlich größeres Verarbeitungsfenster mit einer Spanne von 0,24 J/mm^3 ein.

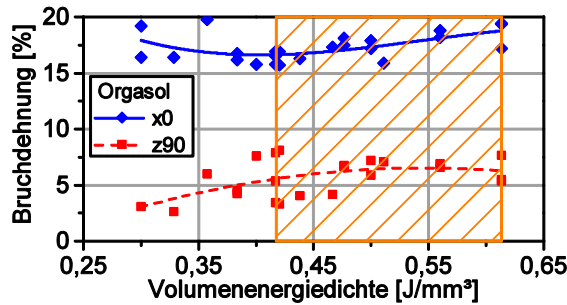


Abb. 4.8 Korrelation zwischen der Bruchdehnung in Abhängigkeit der Zugstaborientierung und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von Arkema Orgasol Invent Smooth

4.4.3 Polyamid 11: EOS PA 1101

Für EOS PA 1101 zeigt sich ein im Vergleich zu PA 2200 und Orgasol ein stark abweichendes Verhalten, vgl. Abb. 4.9 bis Abb. 4.12. Aufgrund des deutlich größeren Betrachtungsraumes von 0,15 bis 0,68 J/mm^3 zeigen alle Kennwerte einen Abfall der Kennwerte hin zu hohen Energiedichten, welcher vermutlich durch das Eintreten von Zersetzungseffekten bedingt wird. Für die Bauteildichte (Abb. 4.9) ergeben sich optimale Dichtewerte über 1,01 g/cm^3 unabhängig von der Scanvektorstärke für Energieeinträge zwischen 0,25 und 0,45 J/mm^3 , also in einem vergleichbaren Energiedichtebereich wie für PA 2200, wobei hier keine höheren Energiedichten betrachtet wurden. Die Abhängigkeit von der Scanvektorstärke ist bei PA 1101 deutlich schwächer ausgeprägt. Ursache hierfür ist, dass die Dichte der Würfel mit 4 bis 25 mm Scanvektorstärke mit Hilfe des archimedischen Prinzips gemessen wurden. Dadurch entfällt der Einfluss der hohen Oberflächenrauheit beim Laser-Sintern. Nur die Dichte der Würfel mit 50 mm Scanvektorstärke wurden wie für PA 2200 ebenfalls durch Vermessen der Körper bestimmt, weshalb sich hier ein Unterschied zu den anderen Messwerten einstellt. Auffällig ist das Verhalten beim höchsten Energieeintrag von 0,68 J/mm^3 . Während sich für längere Scanvektoren von 25 und 50 mm ein deutlicher Abfall der Dichte zeigt, liegen die Dichtewerte für 4 und 10 mm auf einem deutlich höheren Niveau. Dies widerspricht Erkenntnissen aus [5], [10], dass insbesondere zu kurzen Scanvektoren hin die Maximaltemperaturen beim Belichten stark ansteigen und somit im Falle zu hoher Energieeinträge verstärkte Zersetzungseffekte im Material verursachen. Der dargestellte Verlauf könnte wiederum durch das Messverfahren bedingt sein, da bei einer sehr hohen Bauteilporosität die Messflüssigkeit ins Bauteil eindringen kann.

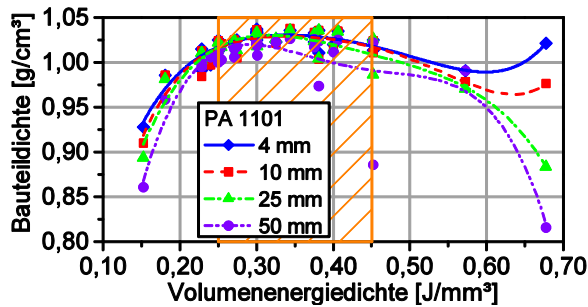


Abb. 4.9 Korrelation zwischen der Bauteildichte in Abhängigkeit der Scanvektorlänge und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von EOS PA 1101

Für den E-Modul ergibt sich das optimale Energiedichtefenster mit geringer Anisotropie von 0,225 bis 0,46 J/mm³ bei Werten von 1600 bis 1800 N/mm² (Abb. 4.10), wobei die Kennwerte in Aufbaurichtung stets über den Werten innerhalb der Bauebene liegen. Wird die Zugfestigkeit betrachtet, verschiebt sich nur die untere Energiedichtegrenze auf 0,25 J/mm³ (Abb. 4.11). Hierbei zeigt sich, dass nur für Schichtdicken von 80 bzw. 100 µm eine geringe Anisotropie erreicht werden kann, während für 120 µm stets ein Absinken der Kennwerte in Aufbaurichtung zu beobachten ist. Gleichzeitig liegen die Werte bei einer Schichtstärke von 100 µm annähernd auf dem Niveau der Bauebene, sodass sich hier eine geringere Anisotropie einstellt als für 80 µm. Als optimale Kennwerte werden 50 bis 54 N/mm² erzielt. Die Bruchdehnung (Abb. 4.12) zeigt eine noch stärkere Abhängigkeit von der Schichtstärke. Während sich innerhalb der Bauebene optimale Werte von 40 bis 50 % einstellen, hängen die erzielbaren Werte in Aufbaurichtung stark von der verwendeten Schichtstärke ab. Nur für Schichtstärken von 80 bzw. 100 µm werden Bruchdehnungen über 30 % erreicht. Für 120 µm ergeben sich in jedem Fall schlechtere Werte bis maximal 26 %. Optimale Kennwerte ergeben sich in einem, im Vergleich zu den anderen Bauteileigenschaften, deutlich kleineren Energiedichtefenster von 0,3 bis 0,42 J/mm³, wobei für eine Schichtstärke von 100 µm maximale Bruchdehnungen in Aufbaurichtung an der unteren Grenze des Bereiches und für 80 µm an der oberen Grenze gefunden werden. Werden die Flächenenergieeinträge (Gl. 4.1) ausgewertet, zeigen sich allerdings nahezu identische Werte von ca. 0,03 bis 0,034 J/mm². Die prozentuale Abweichung zwischen den Orientierung ergibt sich innerhalb des optimalen Bereiches zu unter 30 % und liegt somit deutlich höher als beim PA 2200, wobei jedoch insgesamt betrachtet deutlich höhere Bruchdehnungswerte wie für PA 12 erreicht werden.

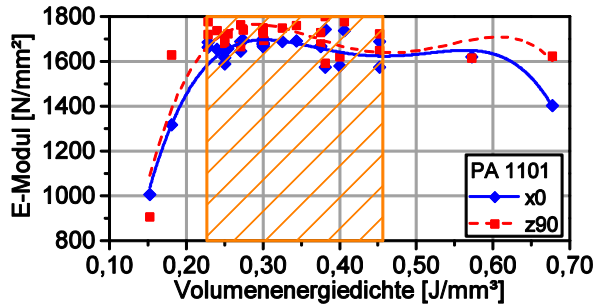


Abb. 4.10 Korrelation zwischen dem E-Modul in Abhängigkeit der Zugstaborientierung und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von EOS PA 1101

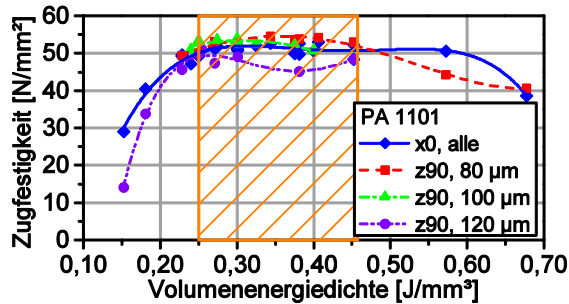


Abb. 4.11 Korrelation zwischen der Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Zugstaborientierung und der Schichtstärke und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von EOS PA 1101

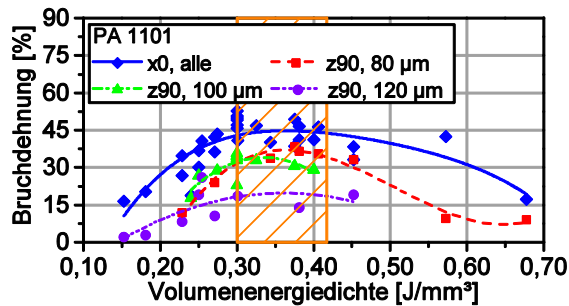


Abb. 4.12 Korrelation zwischen der Bruchdehnung in Abhängigkeit der Zugstaborientierung sowie der Schichtdicke und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von EOS PA 1101

Das optimale Energiedichtefenster bestimmt sich somit entsprechend der Einstellung optimaler Bruchdehnungswerte zu 0,3 bis 0,42 J/mm³ und ist somit fast doppelt so groß wie für PA 2200. Somit lässt sich für PA 1101 einfacher eine robuste Prozessfüh-

lung einstellen. Im Vergleich zur Studie aus [14] zum selben Material verschiebt sich das Energiedichtefenster zu niedrigeren Energieeinträgen und verkleinert sich gleichzeitig. Allerdings können entgegen der vorherigen Studie für zahlreiche Parametersätze Bruchdehnungen in Aufbaurichtung mit Werten über 30 % erreicht werden.

4.4.4 Polyamid 11: Arkema Rilsan Invent black

Als weiteres Material wurde ein schwarz eingefärbtes PA 11 vom Typ Arkema Rilsan Invent Black betrachtet. Die zugehörigen Ergebnisse sind in Abb. 4.13 bis Abb. 4.16 dargestellt. Hierbei ergibt sich gegenüber dem uneingefärbten PA 1101 ein noch robusteres Prozessverhalten. Zersetzungseffekte scheinen hier weniger stark in Erscheinung zu treten. Für die Bauteildichte werden in einem Volumenenergiedichtebereich von 0,25 bis 0,63 J/mm³ hohe Werte erreicht, Abb. 4.13. Hierbei zeigen sich kaum Unterschiede zwischen den Verläufen für 4 bis 25 mm Scanvektorlänge. Lediglich die Werte für 50 mm liegen aufgrund des anderen Messverfahrens niedriger.

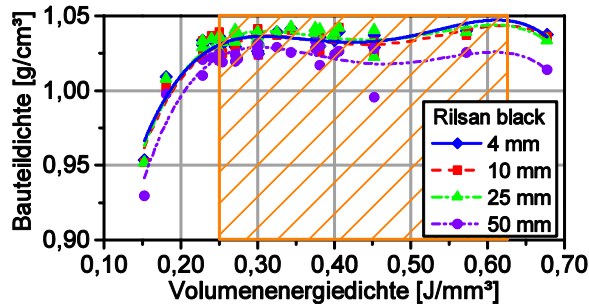


Abb. 4.13 Korrelation zwischen der Bauteildichte in Abhängigkeit der Scanvektorlänge und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von Arkema Rilsan Invent Black

Auch für den E-Modul zeigt sich ein robusteres Verhalten, Abb. 4.14. Für Energiedichten zwischen 0,23 und 0,58 J/mm³ wird ein annähernd konstantes Kennwertniveau von 1600 bis 1800 N/mm² erzielt, wobei die E-Modulwerte der Aufbaurichtung stets über den entsprechenden Werten der Bauebene liegen. Auch für die Zugfestigkeit ergibt sich ein großes nutzbares Energiedichtefenster zwischen 0,25 und 0,68 J/mm³, wobei optimale Kennwerte in Aufbaurichtung nur für Schichtdicken von 80 bzw. 100 µm erreicht werden, Abb. 4.15. Hierbei werden orientierungs-unabhängig Werte zwischen 52 und 54 N/mm² erzielt. Dagegen zeigt sich für Schichtstärken von 120 µm für Energiedichten von 0,25 bis 0,4 J/mm³ ein Abfall der Kennwerte.

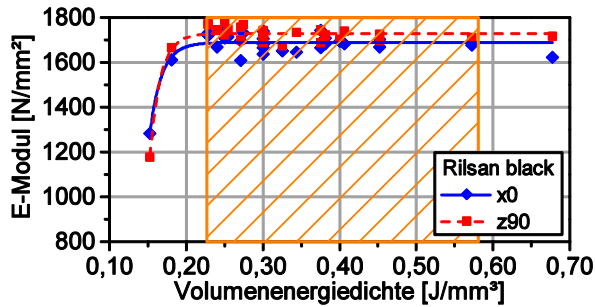


Abb. 4.14 Korrelation zwischen dem E-Modul in Abhängigkeit der Zugstaborientierung und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von Arkema Rilsan Invent Black

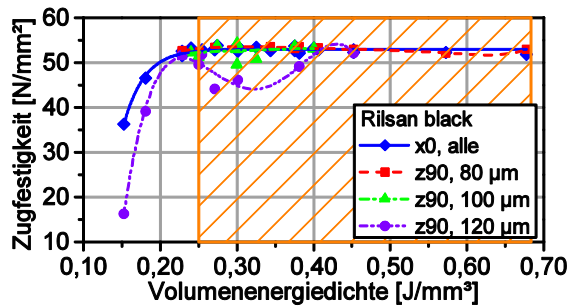


Abb. 4.15 Korrelation zwischen der Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Zugstaborientierung sowie der Schichtdicke und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von Arkema Rilsan Invent Black

Im Fall der Bruchdehnung wird in der Bauebene unabhängig von der Schichtstärke im Bereich von 0,3 bis 0,58 J/mm³ ein konstantes Kennwertniveau von ca. 38 % und damit im Vergleich zu PA 1101 etwas niedrigere Werte erreicht, Abb. 4.16. Die Bruchdehnung in Aufbaurichtung hängt wiederum stark von der Schichtstärke ab. Für eine Schichtstärke von 120 µm kann nur für den höchsten Energieeintrag von 0,45 J/mm³ eine Bruchdehnung von über 30 % eingestellt werden. Ansonsten liegen die Kennwerte hier stets unter 20 %. Für Schichtstärken von 100 µm werden insbesondere in einem Bereich von 0,3 bis 0,4 J/mm³ Kennwerte zwischen 25 und 34 % erzielt. Bei Schichtstärken von 80 µm werden sogar noch höhere Bruchdehnungen von 34 bis 36 % erreicht. Die prozentuale Abweichung beträgt hierbei teilweise unter 10 %, so dass hier die geringste Anisotropie aller Materialien im Vergleich erreicht wird. Hierzu ist im Vergleich zu 100 µm ein höherer Energieeintrag von 0,38 bis 0,58 J/mm³ erforderlich, wobei die notwendigen Flächenenergieeinträge wie für PA 1101 wiederum den Werten für 100 µm ähneln. Insgesamt betrachtet, wird eine optimale und robuste Prozessführung für Energieeinträge zwischen 0,3 und 0,58 J/mm³ und Schichtstärken von 80 bzw. 100 µm erzielt. Somit ist das robuste Energiedichtefenster für Rilsan In-

vent Black nochmals größer als für PA 1101.

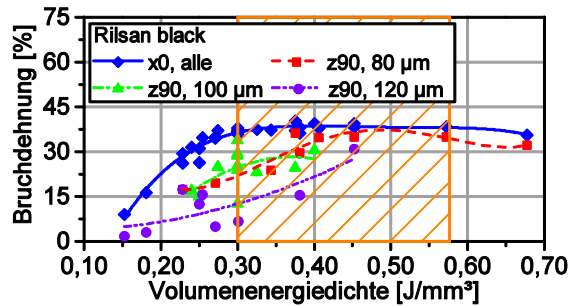


Abb. 4.16 Korrelation zwischen der Bruchdehnung in Abhängigkeit der Zugstaborientierung sowie der Schichtdicke und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von Arkema Rilsan Invent Black

4.4.5 Polyethylen: ROWAK Rolaserit PE

Des Weiteren wurde ein experimentelles Polyethylen-Pulver untersucht. Die für dieses Material ermittelten Kennwerte sind in Abb. 4.17 bis Abb. 4.20 dargestellt. Trotz vorheriger Studien zu Polyethylen im Laser-Sintern zeigen die dargestellten Kennwerte hierbei erstmals überhaupt Kennwerte für die Aufbaurichtung, während zuvor stets nur die mechanischen Eigenschaften innerhalb der Bauebene betrachtet wurden. Bezüglich der Dichte zeigen die betrachteten Parameter keinen signifikanten Einfluss. Die Bauteildichte liegt unabhängig von der Energiedichte und dem Hatchabstand bei Werten von 0,920 bis 0,925 g/cm³, Abb. 4.17.

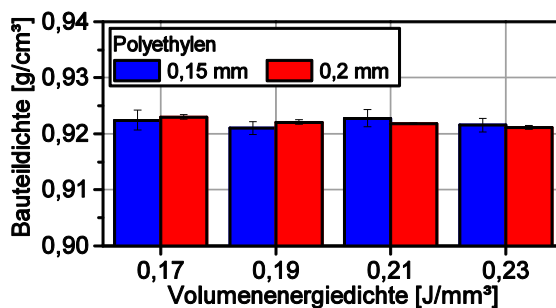


Abb. 4.17 Korrelation zwischen der Bauteildichte für unterschiedliche Hatchabstände und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von ROWAK Rolaserit PE

Für den E-Modul des untersuchten Polyethylen zeigen sich dagegen deutlichere Unterschiede. Insbesondere für eine Energiedichte von 0,17 J/mm³ und einen Hatchabs-

tand von 0,15 mm kann unabhängig von der Orientierung ein E-Modul von 1240 N/mm² erzielt werden, Abb. 4.18. Für alle anderen Parametersätze sind die Abweichungen zwischen der Bauebene und der Aufbaurichtung dagegen größer. Für die Zugfestigkeit werden innerhalb der Bauebene nahezu unabhängig von den Parametern Werte von 18 bis 20 N/mm² erreicht, Abb. 4.19. In Aufbaurichtung liegen die Werte bei etwa 15 N/mm² und somit ca. 16 bis 25 % niedriger. Eine Variation der Parameter führt hierbei zu keinerlei signifikanten Veränderung der Kennwerte.

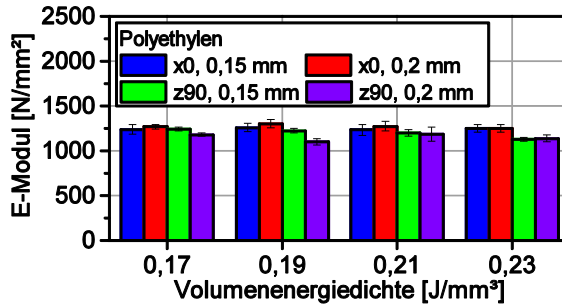


Abb. 4.18 Korrelation zwischen dem E-Modul in Abhängigkeit der Zugstaborientierung für unterschiedliche Hatchabstände und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von ROWAK Rolaserit PE

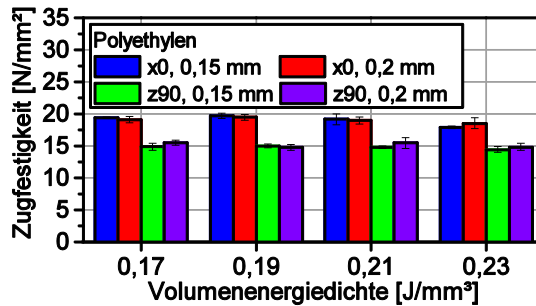


Abb. 4.19 Korrelation zwischen der Zugfestigkeit in Abhängigkeit der Zugstaborientierung für unterschiedliche Hatchabstände und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von ROWAK Rolaserit PE

Dementgegen bewirken die untersuchten Parametereinstellungen für die Bruchdehnung eine stärkere Veränderung der Kennwerte, Abb. 4.20. Für einen Hatchabstand von 0,15 mm steigt die Bruchdehnung innerhalb der Bauebene mit abnehmendem Energieeintrag auf bis zu 5,5 % bei einer Volumenenergiedichte von 0,17 J/mm³ an. Dagegen wird für einen Hatchabstand von 0,2 mm fast unabhängig von der Energiedichte eine Bruchdehnung für x0 von ca. 4,5 % erreicht. In Aufbaurichtung liegen die

Werte bei ca. 2,5 % für einen Hatchabstand von 0,15 mm bzw. 3,0 % für 0,2 mm, wobei die Kennwerte kaum durch den Energieeintrag beeinflusst werden. Der Grad der Anisotropie schwankt hierbei zwischen 33 und 50 %. Insgesamt betrachtet, werden die besten Bauteileigenschaften jedoch bei einer Parameterkombination von 0,17 J/mm³ und 0,15 mm Hatchabstand erzielt. Hierbei treten größere prozentuale Abweichungen zwischen den Orientierungen auf als bei den anderen untersuchten Materialien. Untersuchungen in [7] zeigen jedoch, dass auch für PA 12 eine ähnlich starke Anisotropie auftreten kann.

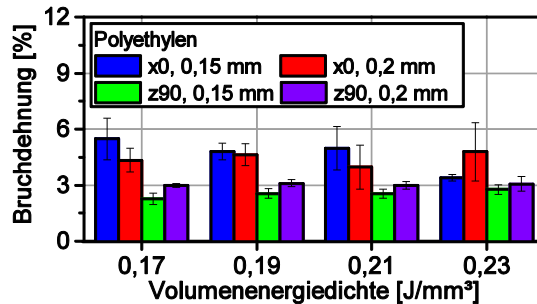


Abb. 4.20 Korrelation zwischen der Bruchdehnung in Abhängigkeit der Zugstaborientierung für unterschiedliche Hatchabstände und der Volumenenergiedichte für die Verarbeitung von ROWAK Rolaserit PE

4.5 Zusammenfassung

Im Rahmen der Studie wurden fünf unterschiedliche Laser-Sinter-Materialien darunter auch ein experimentelles noch nicht kommerzielles Polyethylen-Pulver untersucht. Zu den verschiedenen Materialien wurden jeweils Verarbeitungsversuche mit unterschiedlichen Prozessparametereinstellungen durchgeführt. Auf Basis der Ergebnisse zeigt sich, dass die beiden betrachteten alternativen kommerziellen Polyamid 11-Materialien sowie das Arkema PA 12 gegenüber dem Standard-Polyamid 12 ein teilweise deutlich größeres Verarbeitungsfenster aufweisen. Insbesondere sind die Materialien weniger anfällig gegen zersetzungsbedingte Effekte und weisen somit eine wesentlich höhere Energiedichtegrenze auf. Dieser Effekt ist beim Arkema Rilsan Invent Black besonders ausgeprägt. Des Weiteren zeigt sich, dass durch Verwendung von Polyamid 11 eine deutlich höhere Bruchdehnung teils sogar mit einer geringeren Anisotropie als bei PA 12 erzielt werden kann, während sich für das alternative PA 12 eine deutlich stärkere Anisotropie einstellt. Dennoch zeigte sich im Rahmen der Verarbeitungsversuche auch, dass bei der Verarbeitung von PA 11 und insbesondere auch dem Arkema PA 12 auf der EOS Formiga P100 vor allem bei massiven Teilen mit einem verstärkten Verzug zu rechnen ist. Für die Verarbeitung von Polyethylen wurde im Rahmen der Studie erstmals eine umfassendere Betrachtung zu den Bauteileigenschaften insbesondere auch zu Kennwerten in Aufbaurichtung durchgeführt.

Es zeigte sich für das noch experimentelle Material eine robuste problemlose Verarbeitung. Die hergestellten Teile zeigen entgegen anderen Ergebnissen zu Polyethylen keine extreme Sprödigkeit. Die Bauteile weisen bei einer sehr guten Formhaltigkeit eine ausreichende Duktilität selbst in Aufbaurichtung sowie für einfache Prototypen gut geeignete Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte auf. Insgesamt betrachtet, konnte das Prozesswissen beim Laser-Sintern insbesondere für die Verarbeitung alternativer und neuer Laser-Sinter-Materialien erweitert werden.

In Zukunft soll das Prozesswissen für die untersuchten Materialien noch erweitert werden. So sind Untersuchungen zu den Langzeiteigenschaften der Polyamid 11-Typen geplant. Gleichzeitig sollen die Verarbeitungsbedingungen des Polyethylen noch weiter erforscht und die Kommerzialisierung vorangetrieben werden.

4.6 Danksagungen

Teile der Langfassung wurden in einem gemeinschaftlichen Projekt zwischen dem Lehrstuhl für Fertigungstechnik der Universität Duisburg-Essen und dem Lehrstuhl für Kunststofftechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg erarbeitet. Das IGF-Vorhaben (17945N) mit dem Titel „Ressourcenschonende Kleinserienproduktion durch Kunststoff-Laser-Sintern - Stabilisierung der Langzeiteigenschaften von lasergesinterten Bauteilen“ der Forschungsvereinigung Institut für Energie und Umwelttechnik e.V. (IUTA) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

4.7 Literaturverzeichnis Kapitel 4

- [1] Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion - Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen, München, Carl Hanser Verlag, 2011.
- [2] Wohlers, T.: Wohlers Report 2011 – State of the Industry, Fort Collins, Colorado, Wohlers Associates Inc., 2011.
- [3] VDI 3405 Blatt 1, Additive Fertigungsverfahren, Rapid Manufacturing – Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen: Güteüberwachung, 2012.
- [4] Goodridge, R.D.; Tuck, C.J.; Hague, R.J.M.: Laser Sintering of Polyamides and other Polymers, In: Progress in Material Science, Bd. 57 (2012) Nr. 2, S. 229-267.
- [5] Wegner, A.: Theorie über die Fortführung von Aufschmelzvorgängen als Grundvoraussetzung für eine robuste Prozessführung beim Laser-Sintern von Thermoplasten, Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2015.
- [6] Wegner, A.; Grimm, T.; Witt, G.: Improvement of the Reproducibility of Laser Sintered Polyamide 12 Parts by Establishment of Robust Processing Conditions using Propagation of Error Method, In: Demmer, A. (Hrsg.): Proceedings of the Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference 2014, Berlin, 2014.
- [7] Wegner, A.; Witt, G.: Laser Sintered Parts with Isotropic Mechanical Properties, In: Technical Paper - Society of Manufacturing Engineers TP12PUB43, 2012, S. 1-16.

- [8] Wegner, A.; Witt, G.: Ursachen für eine mangelnde Reproduzierbarkeit beim Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen, In: RTejournal, Bd. 10 (2013).
- [9] Wegner, A.; Witt, G.: Correlation of Process Parameters and Part Properties in Laser Sintering using Response Surface Modeling, In: Physics Procedia, Bd. 39 (2012), S. 480-490.
- [10] Wegner, A.; Witt, G.: Understanding the Decisive Thermal Processes in Laser Sintering of Polyamide 12, In: Proceedings of the Polymer Processing Society 30th Annual Meeting PPS-30, Cleveland, Ohio (USA), Polymer Processing Society, 2014, S. S15-228.
- [11] Keller, B.: Rapid Prototyping: Grundlagen zum selektiven Lasersintern von Polymerpulver, Dissertation, Universität Stuttgart, 1998.
- [12] Goodridge, R.D.; Hague, R.J.M.; Tuck, C.J.: An Empirical Study into Laser Sintering of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE), In: Journal of Materials Processing Technology, Bd. 210 (2010), S. 72-80.
- [13] Griebßbach, S.: Korrelation zwischen Materialzusammensetzung, Herstellungsbedingungen und Eigenschaftsprofil von lasergesinterten Polyamid-Werkstoffen, Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 2012.
- [14] Wegner, A.; Harder, R.; Witt, G.; Drummer, D.: Determination of Optimal Processing Conditions for the Production of Polyamide 11 Parts using the Laser Sintering Process, In: International Journal of Recent Contributions from Engineering, Science & IT (iJES), Bd. 3 (2015) Nr. 1, S. 5-12.
- [15] Dupin, S.: Etude Fondamentale de la Transformation du Polyamide 12 par Frittage Laser: Mécanismes Physico-Chimiques et Relations Microstructures/ Propriétés, Dissertation, Universität Lyon, 2012.
- [16] Dupin, S.; Lame, O.; Barrès, C.; Charneau, J.-Y.: Microstructural Origin of Physical and Mechanical Properties of Polyamide 12 Processed by Laser Sintering, In: European Polymer Journal, Bd. 48 (2012) Nr. 9, S. 1611-1621.
- [17] Dupin, S.; Barrès, C.; Lame, O.; Boutaous, M.; Charneau, J.-Y.: Fundamental Study of the Processing of Polyamide 12 by Selective Laser Sintering: Analysis of the Relations between Polymer Features, Process Conditions and Final Properties of Parts, In: Proceedings of the Polymer Processing Society 29th Annual Meeting PPS-29, Nürnberg (Deutschland), Polymer Processing Society, 2013.
- [18] Rietzel, D.: Werkstoffverhalten und Prozessanalyse beim Laser-Sintern von Thermoplasten, Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2011.
- [19] Hao, L.; Savalani, M.; Zhang, Y.; Tanner, K.E.; Harris, R.A.: Effects of Material Morphology and Processing Conditions on the Characteristics of Hydroxyapatite and High-Density Polyethylen Bio-composites by Selective Laser Sintering, In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications, Bd. 220 (2006), S. 125-137.

Neue Entwicklungen in der Additiven Fertigung
Beiträge aus der wissenschaftlichen Tagung der
Rapid.Tech 2015

Witt, G.; Wegner, A.; Sehr, J.T. (Hrsg.)
2015, VIII, 175 S. 14 Abb., Hardcover
ISBN: 978-3-662-48472-2