

**Zum Niedertemperatur-Lasersintern von Polyamid 12 und Polyamid 6
auf einem konventionellen Anlagensystem**

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von

M.Sc. Dennis Menge
aus Wickede (Ruhr)

Tag des Kolloquiums: 20. Juni 2024

Referent: Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Schmid

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner

Danksagung

Die vorliegende Thesis entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Direct Manufacturing Research Center (DMRC) und am Lehrstuhl für Partikelverfahrenstechnik (PVT) der Universität Paderborn.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Schmid, der mir als Doktorvater die Möglichkeit zur Promotion geboten hat. Die kontinuierliche Unterstützung, die Anregungen, die konstruktiven Diskussionen sowie die entgegengebrachte Wertschätzung wusste ich stets sehr zu würdigen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Schöppner danke ich für das Interesse an meiner Arbeit sowie die freundliche Übernahme des Korreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Kullmer und Herrn Prof. Dr.-Ing. Schlüter spreche ich meinen Dank für die Mitwirkung in der Promotionskommission aus.

Bei meinen Arbeitskolleginnen und -kollegen bedanke ich mich herzlich für die sehr gute Zusammenarbeit und das ausgezeichnete Arbeitsklima. Ich habe die gemeinsame Zeit sehr geschätzt. An dieser Stelle möchte ich besonders meine Kolleginnen und Kollegen des Lasersinter-Teams Stefan Josupeit, Patrick Delfs, Christina Kummert, Helge Klippstein, Ivo Kletetzka sowie Fabian Neitzel hervorheben und Ihnen meinen Dank für den Teamgeist und den fachlichen Austausch aussprechen.

Weiterhin bedanke ich mich bei den Studierenden, die durch Ihre Studien- und Abschlussarbeiten sowie durch ihre wissenschaftliche Hilfstätigkeit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Zudem möchte ich den Industriepartnern des DMRC, sämtlichen Projektpartnern sowie den Kolleginnen und Kollegen des NRW Forschungskollegs „Leicht – Effizient – Mobil“ meinen Dank aussprechen.

Zu guter Letzt möchte ich mich herzlichst bei meiner Frau, meiner Familie und meinen Freunden für die motivierenden Worte, die fortwährende Unterstützung und die entgegengebrachte Geduld bedanken.

Paderborn, Juli 2024

Dennis Menge

Zusammenfassung

Das Polymer-Lasersintern (LS) ist ein etabliertes Additives Fertigungsverfahren, jedoch steht dem Ausbau der Anwendungsgebiete eine stark eingeschränkte Materialvielfalt entgegen. Ein Großteil der Bauteile wird bisher aus Polyamid 12 (PA12) gefertigt. Hochleistungskunststoffe befinden sich noch weitestgehend in der Forschung und sind aufgrund des erhöhten Schmelzpunkts zudem nicht auf konventionellen LS-Anlagen verarbeitbar. Spezielle Hochtemperatur-Anlagen sind kostspielig und rar. Das Niedertemperatur-LS (NTLS), bei dem die Materialien mit deutlich geringeren Bauraumtemperaturen verarbeitet werden, schafft Abhilfe und ermöglicht die Verarbeitung von Hochtemperaturwerkstoffen auf konventionellen LS-Anlagen. Die durch das geringe Aufheizen fehlende Energie wird durch den Laserenergieeintrag kompensiert. Zur Vermeidung von prozesskritischem Verzug infolge der hohen Temperaturdifferenzen im Prozess werden die Bauteile mit Supportstrukturen auf einer Bauplattform fixiert. Zudem reduziert die geringere thermische Belastung die Alterung des umliegenden Materials und erhöht so die Recyclingfähigkeit. Im Rahmen dieser Arbeit wird der NTLS-Prozess für PA12 und PA6 experimentell auf einer konventionellen LS-Anlage (EOS P396), auf welcher das PA6 im herkömmlichen LS nicht verarbeitbar ist, entwickelt. Die Verarbeitbarkeit beider Materialien im NTLS wird nachgewiesen und die mechanischen Eigenschaften unter Anpassung der Belichtungsparameter und -strategie sowohl in der Bauebene als auch in Aufbaurichtung optimiert.

Summary

Polymer laser sintering (LS) is an established additive manufacturing process, but the expansion of the application areas is limited by a highly restricted range of materials. The majority of components have so far been manufactured out of polyamide 12 (PA12). High-performance plastics are still largely at the research stage and, moreover, cannot be processed on conventional LS-systems due to their high melting point. Special high-temperature systems are expensive and rare. Low-temperature LS, in which the materials are processed at significantly lower build chamber temperatures, provides a remedy and makes it possible to process high-temperature materials on conventional LS-systems. The lack of energy due to low heating is compensated by the laser energy input. To avoid process-critical distortion due to the high temperature differences in the process, the components are fixed to a building platform with support structures. In addition, the lower thermal stress reduces the aging of the surrounding material and thus increases the recyclability. In this work, the low-temperature LS-process is developed experimentally on a conventional LS-system (EOS P396) for PA12 and PA6. PA6 cannot be processed conventionally on this system. The processability of both materials in low-temperature LS is demonstrated and the mechanical properties are optimized by adjusting the exposure parameters and strategy at the building plane as well as in the building direction.

Liste der Vorveröffentlichungen

MENGE, D.; MILAEGE, D.; HOYER, K.-P.; SCHMID, H.-J.; SCHAPER, M.: Case Study IV: Individualized Medical Technology using Additive Manufacturing. In: HORWATH, I.; SCHWEIZER, S. (Eds.): Climate Protection, Resource Efficiency and Sustainable Engineering – Transdisciplinary Approaches to Design and Manufacturing Technology, Transcript Verlag, Bielefeld, 2023, ISBN: 978-3-8376-6377-8

MENGE, D.; SCHMID, H.-J.: Low Temperature Laser Sintering with PA12 and PA6 on a standard system. *Macromolecular Symposia Journal*, Wiley-VCH GmbH, 2022. DOI: 10.1002/masy.202100397

MENGE, D.; SCHMID, H.-J.: Low Temperature Laser Sintering on a Standard System: First Attempts and Results with PA12. In: *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, 2021, S.636-644

MENGE, D.; KLIPPSTEIN, S.H.; SCHMID, H.-J.: Additive Leichtbaustrukturen für die Flugzeugkabine, Abschlussbericht, 2020. DOI: 10.2314/KXP:172529849X

MENGE, D.; WALTER, R.; SCHMID, H.-J.; BREUER, U.P.: Generative Verfahren zur Herstellung von Polymerbauteilen, FVA Forschungsvorhaben Nr. 813 I, Heft 1338, Frankfurt, 2019

KLIPPSTEIN, S.H.; DÜCHTING, A.; REIHER, T.; HENGSBACH, F.; MENGE, D.; SCHMID, H.-J.: Development, production and post-processing of a topology optimized aircraft bracket. In: *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, 2019, S.1932-1945

MENGE, D.; DELFS, P.; TÖWS, M.; SCHMID, H.-J.: Topology Optimized Heat Transfer Using the Example of an Electronic Housing. In: *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, 2018, S.687-697

MENGE, D.; JOSUPEIT, S.; DELFS, P.; SCHMID, H.-J.: Herstellbarkeit und mechanische Charakterisierung von lasergesinterten Gitterstrukturen. In: Richard, H.A.; Schramm, B.; Zipsner, T. (Eds.): *Additive Fertigung von Bauteilen und Strukturen*, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017, pp. 105–120, DOI: 10.1007/978-3-658-17780-5

JOSUPEIT, S.; DELFS, P.; MENGE, D.; SCHMID, H.-J.: Manufacturability and Mechanical Characterization of Laser Sintered Lattice Structures. In: *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, 2016, S. 2077–2086

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Einleitung und Motivation	1
2 Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1 Lasersintern von Polymeren.....	3
2.1.1 Prozess	4
2.1.2 Werkstoffe	6
2.1.3 Laserenergieeintrag	12
2.1.4 Einflüsse auf die Bauteileigenschaften	14
2.2 Verwendete Messmethoden	20
3 Stand der Forschung zum Niedertemperatur-Lasersintern.....	24
3.1 Abgrenzung vom NTLS zum konventionellen LS	24
3.2 NTLS von Polyamiden	27
3.2.1 NTLS von PA12.....	27
3.2.2 NTLS von PA11.....	29
3.3 NTLS von Hochleistungskunststoffen.....	30
3.3.1 NTLS von PEEK.....	30
3.3.2 NTLS von PPS	31
4 Forschungsbedarf, Zielsetzung und Vorgehensweise	33
4.1 Forschungsbedarf	33
4.2 Zielsetzung.....	34
4.3 Vorgehensweise	35
5 Entwicklung einer Methode für das NTLS von PA12 auf einer konventionellen LS-Anlage	36
5.1 Vorstellung des verwendeten Ansatzes	36
5.2 Rahmenbedingungen	37
5.3 Versuchsaufbau und Voruntersuchungen	39
5.3.1 Bauplattform und Anbindung	39
5.3.2 Bauraumtemperatur	46
5.3.3 Flächenenergiedichte	48
5.4 Vorstudie zur Optimierung der Belichtungsparameter mit direkter Fixierung der Prüfkörper auf der Bauplattform	50
5.4.1 Vorgehensweise und Versuchsplan.....	50

5.4.2	Ergebnisse	52
5.4.2.1	Mechanische Eigenschaften und Dichte.....	53
5.4.2.2	Bruchbilder und Mikrostruktur	56
5.4.3	Zusammenfassung, Diskussion und Prozessanpassung	59
5.5	Supportstrukturen für das NTLS	62
5.5.1	Einführung zu Supportstrukturen	62
5.5.2	Auswahl und Voruntersuchungen	64
5.5.3	Experimentelle Untersuchung der Prozessfähigkeit	66
5.5.3.1	Rahmenbedingungen und Vorgehensweise.....	66
5.5.3.2	XYZ-Orientierung	67
5.5.3.3	Weitere Orientierungen.....	72
5.5.4	Zusammenfassung und Fazit.....	74
5.6	Experimentelle Entwicklung und Optimierung von Prozessparametern für das NTLS mit Mehrfachbelichtung	76
5.6.1	Untersuchung von Einschichtprüfkörpern	77
5.6.2	Versuchsaufbau und Vorgehensweise	81
5.6.3	Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Belichtungsparameter	84
5.6.3.1	XYZ-Orientierung	85
5.6.3.2	ZXY-Orientierung	91
5.6.3.3	Variation der Hatchbelichtungsstrategie und des Hatchabstands.....	99
5.6.3.4	Bruchbilder	102
5.6.3.5	Diskussion	104
5.6.4	Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Bauraumtemperatur.....	108
5.6.5	Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Schichtdicke	111
5.6.6	Mikrostruktur	114
5.6.6.1	Kristallinität	114
5.6.6.2	CT-Aufnahmen	118
5.7	Post-Processing im NTLS-Prozess	123
5.7.1	Entpulverung und Auspacken	123
5.7.2	Entfernung von Supportstrukturen	123
5.8	Überprüfung der Materialalterung	124
5.9	Zusammenfassung zum NTLS von PA12	125
6	NTLS von Polyamid 6 – Machbarkeit und erste Ergebnisse.....	130
6.1	Rahmenbedingungen	130
6.2	Verarbeitung von PA6 im konventionellen LS-Prozess auf einer experimentellen Hochtemperatur-Anlage	133

6.3	NTLS von PA6 auf einer experimentellen und konventionellen LS-Anlage	139
6.3.1	Vorgehensweise und Rahmenbedingungen	139
6.3.2	Ergebnisse zur Verarbeitbarkeit, den mechanischen Eigenschaften und der Dichte	141
6.4	Materialalterung	145
6.5	Zusammenfassung und Diskussion zum NTLS von PA6.....	150
7	Zusammenfassung und Ausblick	152
8	Literaturverzeichnis	157
9	Anhang	170

Verzeichnis der Abkürzungen

AM	Additive Manufacturing
AP	Altpulver
CAD	Computer-Aided Design
CFK	Kohlenstofffaser- bzw. carbonfaserverstärkter Kunststoff
CT	Computertomographie
DoPM	Degree of Particle Melt
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EOS	Electro Optical Systems GmbH
FLM	Fused Layer Modeling
FP	Frischpulver / Neupulver
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HT	Hochtemperatur
IR	Infrarot
LM	Laser Melting / Laserstrahlschmelzen von Metallen
LS	Lasersintern
MVR	Melt Volume-flow Rate
NTLS	Niedertemperatur-Lasersintern
PA	Polyamid
PA11	Polyamid 11
PA12	Polyamid 12
PA6	Polyamid 6
PAEK	Polyaryletherketon
PEEK	Polyetheretherketon
PPS	Polyphenylensulfid
PSW	Prozesssoftware
r.F.	Relative Feuchtigkeit
REM	Rasterelektronenmikroskopie
RP	Recyclingpulver
SLA	Stereolithografie
STL	Surface Tessellation Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.

Verzeichnis der Formelzeichen

ΔH	J/g	Schmelzenthalpie
A_z bzw. $A_{z,einfach}$	J/mm ²	Flächenenergiedichte (Einfachbelichtung) / Andrew-Zahl
$A_{z,ges}$	J/mm ²	Gesamtenergiedichte (Mehrfachbelichtung)
b_1	mm	Breite des engen Teils des Zugprüförpers
b_2	mm	Breite an den Enden des Zugprüförpers
d	mm	Hatchabstand
D_{50}	µm	Medianwert der Partikelgrößenverteilung
E	MPa	E-Modul / Elastizitätsmodul
h	mm	Bevorzugte Dicke des Zugprüförpers
l_0	mm	Messlänge des Zugprüförpers
l_1	mm	Länge des parallelen Teils des Zugprüförpers
l_2	mm	Entfernung zwischen den breiten parallelen Seiten
l_3	mm	Gesamtlänge des Zugprüförpers
$m_{S,A}$	g	Scheinbare Masse der Probe in Luft
$m_{S,IL}$	g	Scheinbare Masse der Probe in der Eintauchflüssigkeit
n	-	Anzahl der Mehrfachbelichtungen / Belichtungsanzahl
P	W	Laserleistung
r	mm	Radius im Übergang zum Schulterbereich des Zugprüförpers
R_m	MPa	Zugfestigkeit
s	µm	Schichtdicke
T	°C	Bauraumtemperatur bzw. Pulverbetttemperatur
t	s	Schichtzeit
T_K	°C	Kristallisationstemperatur
$T_{K,onset}$	°C	Onset des Rekristallisationspeaks
T_S	°C	Schmelztemperatur
$T_{S,onset}$	°C	Onset des Schmelzpeaks
v	mm/s	Scangeschwindigkeit
ϵ	%	Bruchdehnung
ρ	g/cm ³	(Bauteil-)Dichte
ρ_{IL}	g/cm ³	Dichte der Eintauchflüssigkeit

1 Einleitung und Motivation

Die Additive Fertigung (engl.: Additive Manufacturing / AM) ist eine sich rasant entwickelnde Fertigungstechnologie, die in den letzten Jahren zum festen Bestandteil des Produktentstehungsprozesses geworden ist [VDI 3405]. Das Marktvolumen ist in den vergangenen Jahren stetig und stark gewachsen [Ass22], weiteres Wachstum wird bis 2027 prognostiziert [Sma19; AMP23]. Der Bauteilaufbau erfolgt schichtweise ohne den Einsatz von Werkzeugen ausschließlich auf Basis der 3D-Daten, sodass die Additive Fertigung eine dezentrale, individualisierte Produktion verwirklichen kann und damit eine der Schlüsseltechnologien im Zuge von Industrie 4.0 darstellt. Das Schichtbauprinzip ermöglicht eine hohe gestalterische Freiheit, die einen hohen Komplexitätsgrad, die Individualisierung sowie die Funktionsintegration in der Bauteilfertigung realisiert. So können Strukturen, die mit konventionellen Fertigungsverfahren nicht herstellbar sind, gefertigt werden. Im Gegensatz zur konventionellen Fertigung sind die Bauteilkosten nahezu unabhängig von der Stückzahl und dem Komplexitätsgrad. Neben den Potenzialen treten Herausforderungen unter anderem bei der Zuverlässigkeit, der Reproduzierbarkeit oder der geometrischen Genauigkeit auf. Neben dem Prototyping findet die Additive Fertigung Anwendung in der Serienproduktion von Endbauteilen. Schlüsselbranchen sind neben der Luft- und Raumfahrt- sowie der Automobilindustrie unter anderem auch die Medizintechnik. [SMB+17; GKS19; GRS+20]

Das Lasersintern (LS) ist eines der etabliertesten additiven Fertigungsverfahren und ist aufgrund der vergleichsweisen hohen Produktivität durch die dreidimensionale Bauteilanordnung in großen Bauräumen für die Serienproduktion von großem Interesse. Beim Lasersintern wird ein pulverförmiger Kunststoff schichtweise aufgetragen, bis geringfügig unterhalb des Schmelzpunkts vorgeheizt und zur Erzeugung des Materialverbunds selektiv mittels Laserbelichtung aufgeschmolzen. Die Vorheizung des Materials bzw. Bauraums bringt neben den unwirtschaftlichen Prozessrandzeiten wie Aufheizen und Abkühlen der Anlage entscheidende Nachteile mit sich. Zum einen tritt Alterung und damit eine Reduktion der Recyclingfähigkeit des umliegenden, nicht aufgeschmolzenen Materials auf und zum anderen schränkt die auf konventionellen LS-Anlagen übliche maximale Bauraumtemperatur von 200 °C die Materialvielfalt und -entwicklung enorm ein, weshalb der Großteil der Bauteile aus den etablierten Polyamiden 12 und 11 gefertigt wird. [SMB+17; CLW19a; Sch22]

Eine bis dato wenig erforschte und erstmals von einer japanischen Forschungsgruppe erwähnte Abwandlung des LS-Prozesses ist das Niedertemperatur-Lasersintern (NTLS), welches den genannten Nachteilen des LS durch eine geringere Bauraumtemperatur und angepasste Prozessparameter entgegenwirken kann. Die Materialalterung kann für die am Markt etablierten Materialien wie dem Polyamid 12 reduziert und die Recyclingfähigkeit im Sinne der Nachhaltigkeit erhöht werden. Das NTLS kann zudem die Verarbeitung industriell

bedeutender Hochtemperatur-Kunststoffe durch eine Bauraumtemperatur, die nicht mehr notwendigerweise nahe des Schmelzpunkts liegen muss, ermöglichen.

Für den Einstieg in die Thematik werden zunächst die relevanten Grundlagen und der Stand der Technik zum Lasersintern gegeben, da diese für die Betrachtung und Entwicklung des NTLS relevant sind. Anschließend wird der Stand der Forschung zum NTLS erarbeitet, auf Basis dessen der Forschungsbedarf, die Zielsetzung sowie die Vorgehensweise dieser Arbeit identifiziert und formuliert werden.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Die Additive Fertigung ist nach DIN 8580 aufgrund der schichtweisen und werkzeuglosen Bauteilgenerierung der ersten Hauptgruppe (Urformen) der Fertigungsverfahren zugeordnet [DIN 8580]. Die Fertigung erfolgt ausschließlich auf Basis der 3D-CAD-Daten eines Bauteils bzw. Objekts, welche in das für die Additive Fertigung gängige STL-Format (Surface Tessellation Language) überführt und nach dem sog. Slicen auf die AM-Anlage übertragen werden. Durch das Slicen werden die für die Fertigung benötigten Schichtinformationen generiert. In der Prozesskette, welche in Bild 2-1 zusammengefasst ist, schließt sich das Rüsten der Maschine, der Bauprozess und das anschließende Entfernen der Bauteile aus der Anlage sowie das Post-Processing der Bauteile an, ehe diese in die Anwendung übergehen.

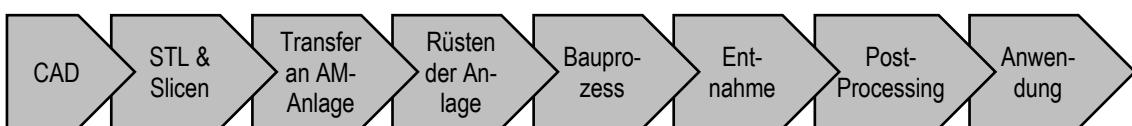


Bild 2-1: Schematische Prozesskette der Additiven Fertigung (nach [GRS+20])

Eine Einteilung der additiven Fertigungsverfahren und Definition der Begrifflichkeiten erfolgt in DIN EN ISO 52900 sowie in der VDI-Richtlinie 3405. Die Unterscheidung erfolgt nach der Werkstoffklasse, der Form des Ausgangsmaterials sowie dem verwendeten Prinzip zum Aufbau des Materialverbunds. In der Klasse der Kunststoffe gehören neben den Pulverbettverfahren wie dem Lasersintern, filamentbasierte Extrusionsverfahren wie das Fused Filament Fabrication (FFF) sowie harzbasierte Verfahren wie die Stereolithographie (SLA) zu den bekanntesten und etabliertesten Verfahren. Während LS und FFF den Materialverbund durch Aufschmelzen erzeugen, wird dieser bei harzbasierten Verfahren durch Photopolymerisation erzeugt. [GKS19; GRS+20; DIN 52900; VDI 3405]

Im Folgenden werden die Grundlagen und der Stand der Technik für das im Rahmen der Arbeit zu betrachtende und weiterzuentwickelnde Lasersintern von Kunststoffen erarbeitet und die verwendeten Messmethoden vorgestellt.

2.1 Lasersintern von Polymeren

Die AM-Technologie Lasersintern verarbeitet pulverförmige, teilkristalline Kunststoffe. Der Materialverbund wird dabei durch einen schichtweisen Auftrag und dem lokalen Aufschmelzen der Partikeln infolge eines Laserenergieeintrags geschaffen. Im Vergleich zu anderen additiven Fertigungsverfahren benötigt das Lasersintern keine Supportstrukturen zum Unterbauen von Bauteilen und zur Aufnahme von prozessinduzierten Kräften, da umliegendes durch Temperatur und Verdichtung verfestigtes Pulver die Bauteile trägt. Aufgrund dessen sind der Bauteilkomplexität wenig Grenzen gesetzt und es ist möglich, verschiedene Bauteile beliebig im Bauraum anzurichten und zu verschachteln, woraus der Vorteil der für die

Industrie interessanten hohen Produktivität resultiert. Zudem ergibt sich ein geringerer Post-Processing Aufwand, der Zeit und Kosten spart. Wesentliche Herausforderungen bestehen in der Optimierung der Prozesskette, insbesondere der Aufheiz- und Abkühlprozesse sowie dem Post-Processing, und in der Integration in industrielle Workflows. Eine Verbesserung der Prozessstabilität, Reproduzierbarkeit und Bauteilqualität wie der Oberflächengüte muss neben dem Ausbau des Materialportfolios angestrebt werden, um die Ansprüche der Industrie zu befriedigen und die Einbindung des Lasersinterns in Produktionsketten zunehmend zu realisieren. [Sch22]

Im Weiteren wird auf den Prozess, die Polymerwerkstoffe, den Laserenergieeintrag sowie die Einflüsse auf die Bauteileigenschaften im Lasersinter-Prozess eingegangen.

2.1.1 Prozess

Nach der Datenvorbereitung und Übertragung der Schichtinformationen auf die Anlage sowie dem Rüsten der Anlage beginnt der Baujob mit der mehrstündigen Aufheizphase und Inertisierung der Anlage mit Stickstoff, um konstante Ausgangsbedingungen für den Bauprozess aufzubauen und Oxidationseffekte während des Bauprozesses zu vermeiden. Der Bauprozess selbst schließt sich an die Aufheizperiode an und lässt sich in vier wesentliche, sich iterativ wiederholende Prozessschritte einteilen, welche in Bild 2-2 dargestellt sind. Zunächst trägt der Beschichter eine dünne Pulverschicht auf dem Pulverbett auf, ehe die Pulverbettoberfläche bis kurz vor den Schmelzpunkt des Materials aufgeheizt wird.

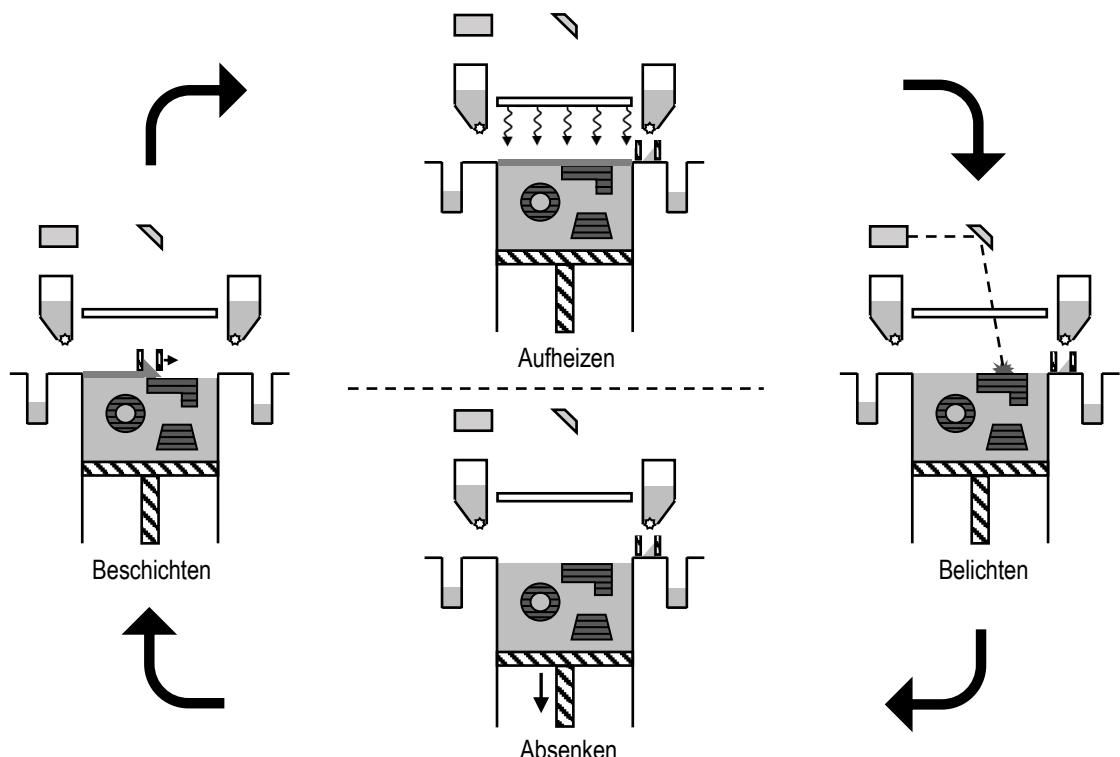


Bild 2-2: Schematische Darstellung der iterativen Fertigungsschritte des LS-Prozesses

Anschließend werden die Schichtinformationen lokal in die Pulverschicht durch Aufschmelzen mittels Laserbelichtung eingebracht. Die Bauplattform wird um eine Schichtstärke abgesenkt und die nächste Iteration beginnt. Dieser Ablauf wird bis zur Fertigstellung des Baujobs wiederholt. Der Pulverkuchen muss nach dem Bauprozess in Abhängigkeit der Höhe und Packungsdichte des Baujobs einige Stunden bis zu mehreren Tagen abkühlen, bevor die Bauteile entnommen werden können. Bei zu frühzeitiger Entnahme kann eine Reduktion der Bauteilqualität eintreten. Nach der Entnahme werden die Bauteile mittels Druckluft und Glasperlenstrahlen von restlichen Partikeln befreit.

In Bild 2-3 ist der Aufbau einer LS-Anlage schematisch aufgeführt. Zur Einbringung der zum lokalen Aufschmelzen benötigten, restlichen Energie wird bei konventionellen LS-Anlagen ein CO₂-Laser (1) mit einer Wellenlänge von 10,6 µm, welcher eine hohe Absorption im Kunststoff aufweist, verwendet. In der Scan-Einheit (2) wird der Laserstrahl durch Umlenkspiegel, eine Korrekturlinse und einen Scankopf über dem Baufeld bewegt und fokussiert. Der Beschichter (3) trägt eine möglichst homogene, dichte und ebene Pulverschicht mit einer gewählten Stärke zwischen 60 µm und 180 µm auf dem Pulverbett auf. Neben dem schematisch dargestellten Doppelklingenbeschichter kommen je nach Hersteller auch Rake oder Rollenbeschichter zum Einsatz. Beim Doppelklingenbeschichter der Firma EOS wird je nach Schichtstärke und Material zwischen flacher, runder sowie dachförmiger Klingengeometrie, die zu unterschiedlicher Verdichtung des Pulverbetts führen, unterschieden. Der Vorteil des Rollenbeschichters liegt darin, dass auch mit schlecht fließfähigem Pulvermaterial ein guter Auftrag realisiert werden kann. Das Pulver wird aus dem Pulvorrat (4) von oben durch eine Dosierwalze in den Beschichter gefördert. Ebenso kann die Pulverbereitstellung entgegen der schematischen Darstellung von unten durch Hochfahren eines Pulverreservoirs erfolgen. Das Aufheizen der Pulverbettoberfläche bis geringfügig

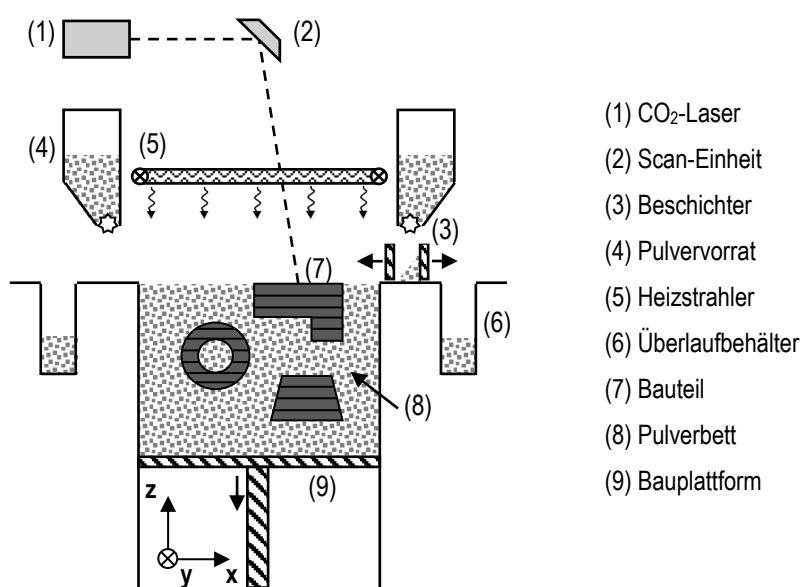


Bild 2-3: Schematischer Aufbau einer LS-Anlage

unterhalb des Schmelzpunkts des verwendeten Kunststoffs wird durch Infrarot-Heizstrahler (5) umgesetzt und die Oberflächentemperatur zur Regelung durch ein Pyrometer bestimmt. Überschüssiges Pulver wird in Überlaufbehältern (6) aufgefangen. Das Absenken um eine Schichtstärke erfolgt durch Absenken der Bauplattform (9) des Baucontainers. Auf diese Weise wachsen die Bauteile (7) Schicht für Schicht im Pulverbett (8).

2.1.2 Werkstoffe

Im Lasersintern werden Thermoplaste aufgrund der reversiblen Verarbeitbarkeit unter Temperatureinfluss verwendet. Die Partikeln werden durch den Laserenergieeintrag aufgeschmolzen und ein Bauteil bzw. eine Bauteilschicht durch das Zusammenfließen der Schmelze generiert. Thermoplaste werden in teilkristalline und amorphe Thermoplaste unterteilt. Der amorphe Zustand (Bild 2-4, links) weist eine regellose Anordnung und Orientierung der Makromolekülketten ohne Nahordnung einzelner Kettensegmente auf. Im teilkristallinen Zustand (Bild 2-4, rechts) liegen neben den amorphen Bereichen auch kristalline Strukturen vor. Die kristallinen Strukturen, auch als gefaltete Kristalllamellen bzw. Kristallite benannt, weisen eine regelmäßige Anordnung der Makromolekülketten auf. Die Kristallite sind symmetrisch angeordnet und formen die überstrukturellen Sphärolithe. Der Massenanteil der kristallinen Strukturen am Gesamtgefüge des teilkristallinen Thermoplasts wird durch den Kristallinitätsgrad wiedergegeben. [Ehr11; Kai21; Sch22; Mon22]

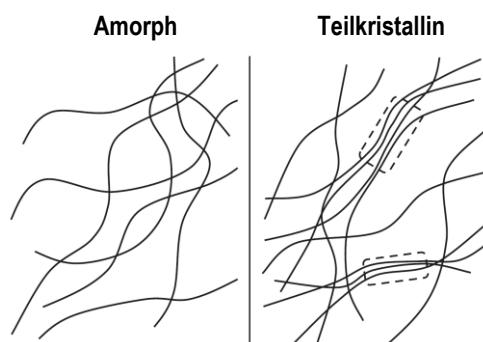


Bild 2-4: Schematische Darstellung amorpher und teilkristalliner Zustände thermoplastischer Kunststoffe [Abt16]

Anforderung an Polymer und Pulver:

Für die erfolgreiche Verarbeitung des thermoplastischen Kunststoffs im Lasersintern müssen sowohl das Polymer als auch das Pulver bzw. die Partikeln einige Anforderungen und Voraussetzungen erfüllen. Aufgrund des thermischen Verhaltens werden in der Regel teilkristalline den amorphen Thermoplasten vorgezogen, da diese einen, für den LS-Prozess nachteiligen, breiten Schmelztemperatur- bzw. Fließbereich aufweisen, welcher aufgrund des Anschmelzens umliegender Partikeln zu schlechterer Maßhaltigkeit der Bauteile und rauen Oberflächen führt [LWD+14; VDv+16]. Weiterhin zeigen amorphe Thermoplaste bis

deutlich über der Glasübergangstemperatur ein hochviskoses Verhalten, weshalb die Schmelze keine vollständige Koaleszenz ausbilden kann [Sch22]. Teilkristalline Thermoplaste hingegen weisen eine eindeutige Schmelz- sowie Kristallisationstemperatur auf. Entscheidend für die Verarbeitbarkeit ist das Prozessfenster des Materials, auch Sinterfenster genannt. Dieses liegt als Bereich zwischen den Onset-Punkten des Schmelzpeaks ($T_{S,\text{onset}}$) bei Aufheizung und des Rekristallisationspeaks ($T_{K,\text{onset}}$) bei Abkühlung in einer Wärmestromkurve (aufgenommen mit konstanten Temperaturgradienten) vor. Bild 2-5 stellt das Prozessfenster in einer schematischen Wärmestromkurve eines teilkristallinen Materials dar. Im Prozessfenster liegen feste Pulverpartikel und aufgeschmolzene, flüssige Bauteilbereiche gleichzeitig vor. Die experimentell bestimmte Wärmestromkurve kann nur bedingt auf den LS-Prozess, unter anderem aufgrund unterschiedlicher Temperaturgradienten zwischen Messung und LS-Prozess, übertragen werden. Das Prozessfenster dient jedoch als Richtwert für die zu verwendende Bauraumtemperatur.

Anhand der Punkte 1 bis 3 in Bild 2-5 können die wesentlichen Schritte des Bauprozesses aus thermischer Sicht abgebildet werden. Die Bauraumtemperatur muss notwendigerweise im Prozessfenster des Materials liegen und eine aufgetragene Schicht wird bis zum tendenziell oberen Ende des Prozessfensters nahe des Schmelzpunkts durch die IR-Strahler aufgeheizt (1). Anschließend erfolgt der Laserenergieeintrag, der die restliche zum Schmelzen benötigte Energie in die Schicht einbringt (2). Die aufgeschmolzene Bauteilschicht kühlt aufgrund von Wärmeleitung, Konvektion und dem anschließenden Schichtauftrag bis in das Prozessfenster ab und verbleibt im Zustand der unterkühlten Schmelze (3), sodass die flüssige und feste Phase im Pulverbett gleichzeitig vorliegen. Auf diese Weise kann über mehrere Schichten hinweg ein Verbund der aufgeschmolzenen Bauteilschichten erzeugt werden, da sich die Polymerketten über die Schichtgrenzen hinweg verschlaufen und

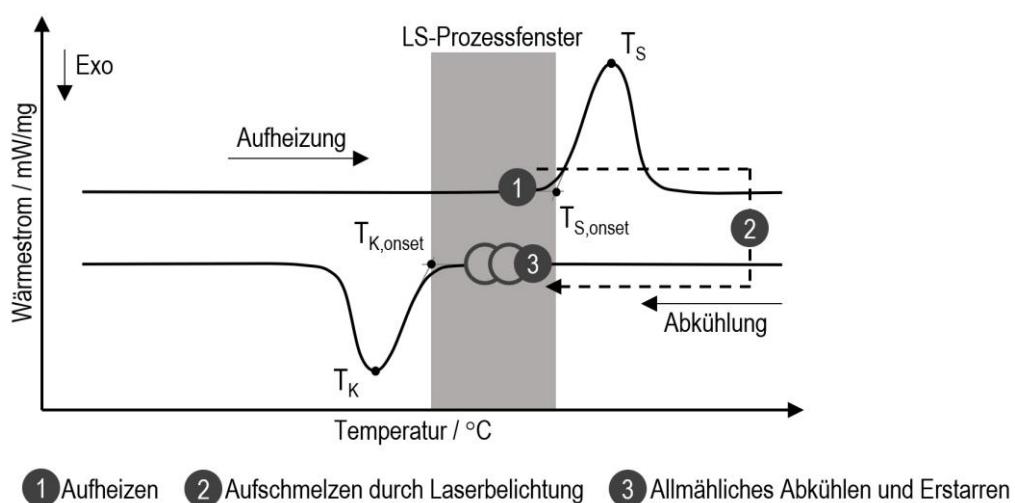


Bild 2-5: Schematische Darstellung des LS-Prozessfensters eines teilkristallinen Thermoplasts inklusive der Temperaturpunkte der wesentlichen Prozessschritte (nach [Jos19])

durchdringen können. Eine zu geringe Temperatur würde die Kristallisation der aufgeschmolzenen Bereiche hervorrufen und die Verschlaufung und Durchdringung der Polymerketten verhindern sowie Prozessfehler wie Verzug und Curling (siehe Abschnitt 2.1.4), die zum Prozessabbruch führen können, hervorrufen. Das Prozessfenster eines LS-Werkstoffs sollte für einen stabilen Bauprozess also möglichst breit sein, um nachgewiesene Temperaturschwankungen von bis zu 5 K über der Baufläche zu kompensieren [Rüs15; Weg15]. Vorteilhaft sind zudem eine hohe Schmelzenthalpie und ein schmaler Schmelzpeak, die eine klare Trennung zwischen Schmelzpool und umliegenden Pulver ermöglichen [VMH+14]. Teilkristalline Thermoplaste mit sich überschneidendem Schmelz- und Rekristallisationsbereich kommen für die Verarbeitung nicht Frage [Sch22].

Wie bereits zuvor erwähnt, stellt die Schmelzviskosität einen weiteren wichtigen Faktor für die Eignung des Materials für das Lasersintern dar. Die Schmelzviskosität, welche abhängig von der Temperatur und der Kettenlänge des Polymers ist, sollte für eine vollständige Koaleszenz des Materials möglichst niedrig sein. Andernfalls werden Sinterhälse gebildet und poröse Strukturen entstehen. Die Koaleszenz wird zudem durch eine geringe Oberflächenspannung zwischen Schmelze und Partikeln unterstützt. Außerdem ist eine hohe Schmelzenthalpie (ΔH) des Polymers für die Maßhaltigkeit und Konturschärfe vorteilhaft, da das unkontrollierte Aufschmelzen nahe der Kontur liegender Partikeln verhindert werden kann. Zur Aufnahme der Laserstrahlung sowie der Wärmestrahlung durch die IR-Strahler sind zudem die optischen Eigenschaften des Materials in Form eines hohen Absorptionsvermögens für den entsprechenden Wellenlängenbereich von Bedeutung. [Sch22]

Weiterhin spielen die Eigenschaften des Pulvers und der Partikeln für die Verarbeitung im LS eine entscheidende Rolle. Die Partikelgrößenverteilung und Partikelform sowie die Fließfähigkeit des Pulvers sind für einen homogenen und ebenen Pulverauftrag mit hoher Packungsdichte durch den Beschichter verantwortlich. Die Packungsdichte und Ebenheit der Schicht nehmen direkten Einfluss auf die Dichte und Oberflächenqualität der Bauteile. Die Packungsdichte ist insbesondere abhängig von der Partikelgrößenverteilung und Partikelform. Um gut fließfähig zu sein, sollte die Partikelform möglichst eine hohe Sphärität aufweisen und die Partikeloberfläche glatt und nicht zerklüftet sein. Die Partikelgrößenverteilung sollte eng und monomodal ausfallen und einen geringen Feinanteil (Partikeldurchmesser kleiner 5 μm) zur Erhöhung der Packungsdichte beinhalten. Ein zu hoher Feinanteil würde die Agglomeration dieser Partikeln begünstigen, die Fließfähigkeit herabsetzen und in einem schlechteren Pulverauftrag resultieren. Der Medianwert der Partikelgrößenverteilung (D_{50}) liegt in der Regel bei einem Durchmesser von 40 μm bis 60 μm [SAW14; VDv+16]. Die obere Grenze der Partikeldurchmesser wird grundsätzlich durch die minimal zu verarbeitende Schichtdicke gesetzt. Die Fließfähigkeit des Pulvers sollte möglichst hoch sein, um Riefen im Pulverbett, eine schlechte Packungsdichte und Anhaftungen von Partikeln am Beschichter zu vermeiden. [VKK+19; Sch22]

LS-Materialien:

Aufgrund der zuvor beschriebenen hohen und strengen Anforderungen an das Polymerpulver für die Eignung im LS zeigt sich im Vergleich zur konventionellen Kunststoffverarbeitenden Industrie eine deutlich geringere Materialvielfalt. Die dominierende und wichtigste Klasse im LS stellt seit jeher die der Polyamide (PA) dar. Nach Schmid und Tan et al. ist davon auszugehen, dass PA12 und PA11, mit deutlicher Überlegenheit des PA12, 90 % des vertriebenen LS-Materials ausmachen. Polyamide kommen sowohl in unverstärkter als auch verstärkter Form in der Regel als Dry-Blends mit z.B. Glaskugeln oder Metallpartikeln zum Einsatz. Neben den Polyamiden weisen die thermoplastischen Elastomere (TPU und TPA) einen nennenswerten Marktanteil auf. Alle weiteren Materialien wie die Hochleistungswerkstoffe PEK, PEEK, PEKK und PPS, die technischen Kunststoffe PBT, POM und PET sowie der Massenkunststoff PP, besitzen keinen nennenswerten Marktanteil oder sind Gegenstand der Forschung. Sie rücken aber zunehmend in den Fokus. Auch PA6, welches im LS für die Automobilbranche von hoher Bedeutung werden kann, ist kommerziell erhältlich, jedoch mangelt es aufgrund des hohen Schmelzpunkts ebenso wie bei den Hochleistungskunststoffen an geeigneten LS-Anlagensystemen. Einen Überblick über die kommerziell erhältlichen und in der Forschung und Entwicklung befindlichen LS-Materialien neben den im LS bisher nicht vorhandenen Materialien ist in der sog. Kunststoffpyramide in Bild 2-6 gegeben. Die Kunststoffpyramide teilt die thermoplastischen Kunststoffe von unten nach oben in Massenkunststoffe, technische Kunststoffe und Hochleistungskunststoffe mit in der Regel zunehmender Performance und zunehmenden Kosten ein. Die

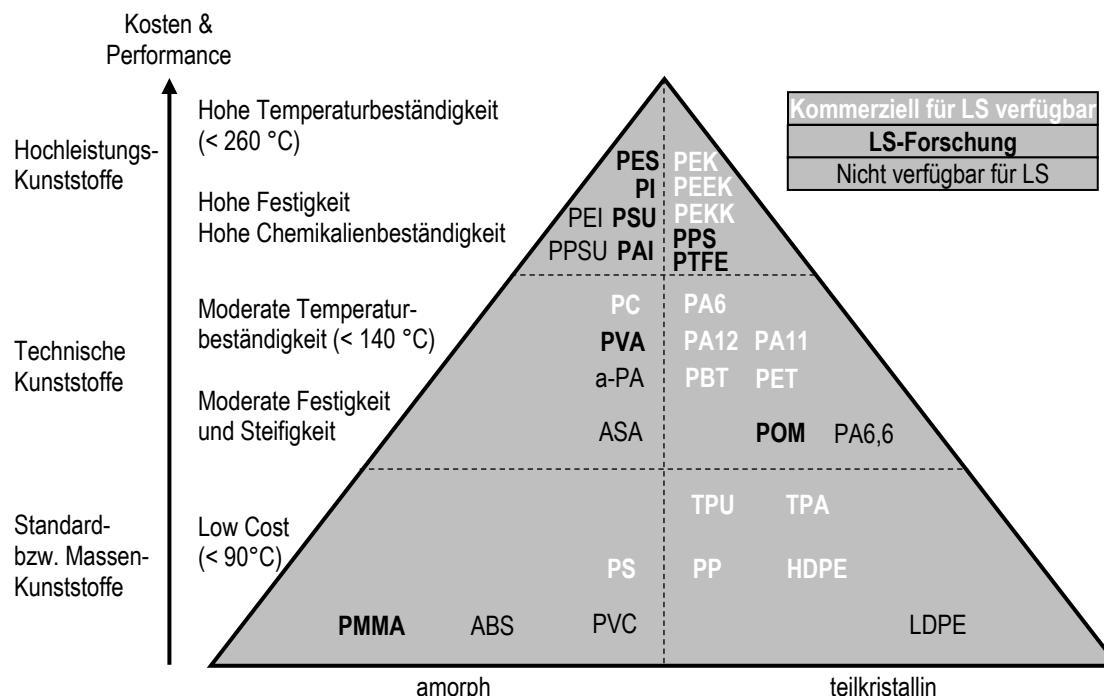


Bild 2-6: Überblick über amorphe und teilkristalline Thermoplaste in der Kunststoffpyramide (nach [TZ20; Sch22])

Polyamide sind dabei den technischen Kunststoffen zuzuordnen. Thermoplastische Elastomere werden in der Literatur unterschiedlich sowohl den Massenkunststoffen als auch den technischen Kunststoffen zugeordnet [TZZ20; Sch22].

Bei Polyamiden wird die Verlinkung in der Kettenstruktur des Polymers durch Amidgruppen gebildet, wodurch die Bezeichnung Polyamid entsteht. In Abhängigkeit der wiederkehrenden Grundeinheit wird zwischen AB-Polyamiden und AA/ BB-Polyamiden unterschieden. PA6 und PA12 gehören zu den AB-Polymeren. Die Nummerierung bei Polyamiden ergibt sich durch die Anzahl der Kohlenstoffatome in den Monomeren des Polymers. Polyamide weisen untereinander nur geringe Unterschiede in den Eigenschaften auf und zeichnen sich im Allgemeinen durch eine gute Festigkeit bei hoher Duktilität und Schlägzhägigkeit aus. Sie verfügen über gutes Verschleißverhalten und sind chemikalienbeständig. Aus diesen Gründen eignen sie sich als technische Kunststoffe für viele Anwendungen. [BBO+13; BHM19; Sch22] Hinsichtlich des LS weisen die handelsüblichen PA12-Pulver ein großes Prozessfenster auf, welches einen stabilen Prozess ermöglicht. Die Partikeln sind je nach Hersteller kartoffelförmig oder nahezu sphärisch, sodass eine gute Fließfähigkeit für einen guten Pulverauftrag vorliegt. Lasergesinterte PA12-Bauteile eignen sich besonders für Funktionsbauteile. Zudem ist PA12-Pulver je nach Hersteller als biokompatibel zertifiziert und eignet sich für den Kontakt mit Lebensmitteln. In der konventionellen kunststoffverarbeitenden Industrie ist PA6 jedoch wesentlich stärker als PA12 vertreten, weshalb das industriezeitige Verlangen nach PA6 im LS groß ist, um ein passendes Substitut für Vor- oder Kleinserien nutzen zu können. PA6 zeichnet sich durch eine hohe Warmformbeständigkeit und Ermüdungsfestigkeit sowie eine höhere Festigkeit und Steifigkeit im Vergleich zum PA12 aus. Es neigt jedoch zu höherer Wasseraufnahme, die zu abnehmender Steifigkeit bei duktilerem Verhalten führt und in der Anwendung zu bedenken ist. Aufgrund des höheren Schmelzpunkts lässt sich das PA6, wie bereits zuvor erwähnt, jedoch nicht auf konventionellen Anlagen verarbeiten. Weiterhin liegen kommerzielle PA6-Pulver ausschließlich in gemahlener Form mit scharfkantigen Partikeln mit geringer Sphärität vor und verfügen über ein kleineres Prozessfenster als PA12, sodass die Verarbeitbarkeit erschwert ist. PA6 findet vor allem in der Automobilbranche, zum Beispiel im Motorraum, Anwendung. [BBO+13; CWZ+18; BHM19; Sch22]

Interessante, jedoch aufgrund der hohen Schmelzpunkte über 300 °C auf konventionellen LS-Anlagen nicht verarbeitbare Hochleistungskunststoffe sind Polyphenylensulfid (PPS) und Polyaryletherketone (PAEK), wie das Polyetheretherketon (PEEK). PEEK ist zwar in Form des EOS PEEK HP3 kommerziell erhältlich, aber ausschließlich auf der Hochtemperatur-Anlage EOS P800 verarbeitbar [BEG15; HDK18; SMB+17; CLW19b; KYN22]. Zudem ist PEEK ein kostenintensiver LS-Werkstoff mit geringer Recyclingrate im LS [KYN21]. So-wohl PEEK als auch PPS verfügen über eine hohe Temperatur- und Warmformbeständigkeit, hohe Verschleißfestigkeit, hohe Chemikalienbeständigkeit, gute dielektrische Eigenschaften und hohe Festigkeiten. Sie sind zudem zudem inhärent flammhemmend. Der

Materialpreis (nicht als LS-Pulver) von PPS ist dabei wesentlich geringer. Anwendung finden beide Werkstoffe unter anderem in der Luft- und Raumfahrt, der Automobilindustrie, in der Medizintechnik, in Elektronikkomponenten und in Metallersatz-Anwendungen. Hinsichtlich der Eigenschaften bringen PPS und PEEK also einige Vorteile im Vergleich zu den Polyamiden mit. [BBO+13; NU15; VSM17; HDK18; KYN21]

Alterung:

Ein weiterer und zudem limitierender und kostenintensiver Faktor im LS-Prozess ist die Alterung der Polymer-Werkstoffe. Nach DIN 50035 wird die Alterung von Polymeren in irreversible chemische und physikalische Vorgänge im Material eingeteilt. Alterungsvorgänge sind sehr komplex und laufen zum Teil parallel ab. Im Lasersintern kommen im Wesentlichen sowohl im schmelzeförmigen als auch im festen Zustand die chemischen Vorgänge der Nachkondensation und des thermisch-oxidativen Abbaus vor. Aufgrund der hohen Temperatur bei langer Verweilzeit tritt im umliegenden Pulver und in der Schmelze Nachkondensation auf, bei der Polymerketten und somit Molmasse aufgebaut werden. Dieser Vorgang ist in der Schmelze zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften gewünscht, weshalb in den Polykondensaten, die durch Stufenwachstumsreaktion entstehen, die reaktiven Kettenenden nicht blockiert werden. Nachteiligerweise nimmt dadurch jedoch ebenfalls die Schmelzviskosität zu, sodass das umliegende Pulver nicht vollständig recycelt werden kann. Dieses muss zum Teil mit einem hohen Anteil an Neupulver (30 % bis 50 %) vermischt und auf ein bestimmtes Viskositätsniveau eingestellt werden. Nach der VDI-Richtlinie 3405 dient der MVR-Wert, ein Maß für die Schmelzviskosität (siehe Abschnitt 2.2), als einfache und wirtschaftliche Methode zur Bestimmung der Pulverqualität. Eine lange Verweilzeit unter sehr hoher Temperatur kann weiterhin zum Abbau von Stabilisatoren führen, woraus thermisch-oxidative Abbaureaktionen folgen. Trotz der Inertisierung der Prozesskammer verbleiben, am Beispiel der EOS P396, in der Prozesskammer wenige (ca. 2-4 %) und in der Entnahmekammer des Baucontainers einige Prozent (ca. 16 %) an restlichem Sauerstoff [Kum22]. Dabei treten im Wesentlichen unkontrolliert und schnell ablaufende Spaltungsprozesse der Polymerketten auf, die das Material enorm schädigen und die Molmasse und somit die Viskosität des Materials verringern. Oxidative Vorgänge gehen oftmals mit Verfärbungen des Materials einher. [EP07; Kai21; Sch22; DHM22; DIN 50035]

Zersetzung:

Infolge einer zu hohen und langen thermischen Belastung durch die Kombination aus Prozesstemperatur und zu hohem Laserenergieeintrag kann Zersetzung des Materials entstehen. Durch Überschreiten der aufgrund der vorhandenen Kohlenstoff-Kohlenstoff-Einfachbindungen für die meisten Makromoleküle geltenden Zersetzungstemperatur von ca. 300 bis 350 °C werden die Hauptvalenzbindungen, welche die Monomere zu Makromolekülen verbinden, abgebaut bzw. zerstört. Die Zersetzung bzw. thermische Degradation führt zur

Bildung von Poren und geht mit Verfärbungen des Materials einher [LWW+19; Kai21]. Bei PA12 beispielsweise resultiert eine Temperatur von ca. 320 °C in einem Masseverlust von ca. 1 % infolge der Zersetzung [VHH13; Weg15; WW15]. Bei 450 °C ist PA12 vollständig abgebaut [Sch22]. Vasquez et al. setzen die Zersetzung von PA12 zwischen 320 °C und 360 °C an [VHH13]. Sowohl bei PA12 als auch bei PA6 weisen Levchik et al. (nicht laserspezifisch) eine Verfärbung und Versprödung durch lange Verweilzeiten bei hohen Temperaturen nach. Dieser Vorgang wird durch im Prozess vorhandenen Restsauerstoff intensiviert und beschleunigt [LWL99].

2.1.3 Laserenergieeintrag

Nach dem Aufheizen einer neu aufgetragenen Pulverschicht bis nahe des Materialschmelzpunkts bringt der Laser die benötigte, restliche Energie zum Aufschmelzen des Materials und somit zur Erzeugung der Bauteilschicht lokal ein. Der Eintrag der Laserstrahlung erfolgt auf festgelegten Bahnen (Bild 2-7), die durch die Umlenkung und Fokussierung des Laserstrahls in der Scan-Einheit abgefahren werden. Zu unterscheiden ist hierbei zwischen dem Laserspot und dem Schmelzpool, welcher durch Wärmeleitung der durch den Laserspot eingebrachten Energie einen größeren Durchmesser hat. In der Regel erfolgt zuerst die Belichtung der Konturlinie, die um circa eine halbe Schmelzpoolbreite, dem sog. Beamoffset, von der tatsächlichen Bauteilkontur in das Bauteilinnere verlagert wird, um Maßabweichungen zu vermeiden. Das Innere der Bauteilschicht (Hatch) wird durch Belichtung der parallel verlaufenden Hatchlinien, deren Stellgröße der Hatchabstand ist, erzeugt. Bei der Umkehr der Laserverfahrerrichtung im Rahmen der Hatchbelichtung, bei der es zur Änderung der Energieeinbringung durch Abbrems- und Beschleunigungsvorgänge kommen würde, wird das sog. Skywriting verwendet. Dabei bewegt die Scan-Einheit den Laserspot unter Abschaltung der Laserleistung über das Ende der Hatchlinien hinaus. Nach der Umkehr und dem Beschleunigen bis zur festgelegten Scangeschwindigkeit wird die Leistung zu

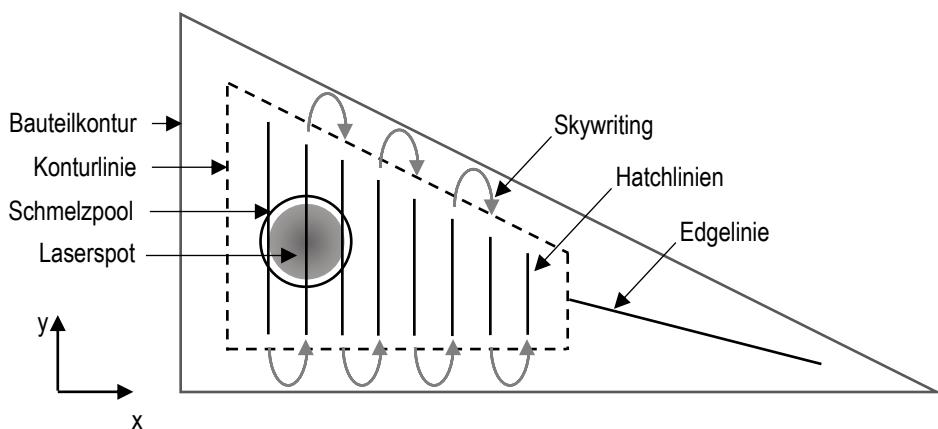


Bild 2-7: Schematische Belichtungsstrategie einer dreieckigen Bauteilschicht mit Benennung der Laserverfahrlinien (nach [RSH+12; Del20])

Beginn der Hatchlinie wieder eingeschaltet, sodass auf diese Weise stets ein konstanter Energieeintrag im Hatch erfolgt. In schmalen oder spitzulaufenden Bereichen, die für eine geschlossene Konturlinie nicht ausreichend breit sind, erfolgt die Belichtung einer Edgeline. [Sch22]

Die mittlere in den Hatch eingebrachte Energie wird durch die Flächenenergiedichte (A_z), auch Andrew-Zahl genannt, charakterisiert und berechnet sich aus der Laserleistung (P), der Scangeschwindigkeit des Lasers (v) sowie dem Hatchabstand (d). Der formelmäßige Zusammenhang lautet wie folgt [Nel93; Kad10; Sch22; DLD15]:

$$A_z = \frac{P}{v \cdot d} \quad (2-1)$$

Die Temperatur der Schmelze ist dabei direkt abhängig von der Flächenenergiedichte, weshalb die Schmelzpoolbreite ebenfalls mit steigender Flächenenergiedichte zunimmt [DDW14b; WW15]. Die Volumenenergiedichte, welche zusätzlich die Schichtdicke (s) berücksichtigt, ist im Rahmen der Arbeit nicht von Belang, sodass im Folgenden die Begriffe Flächenenergiedichte und Energiedichte synonym verwendet werden.

Bei Betrachtung des Laserenergieeintrags ist weiterhin zwischen verschiedenen Belichtungsstrategien zu unterscheiden. Am gebräuchlichsten und in den Standardparametern der LS-Anlagen verschiedener Hersteller integriert ist die in Bild 2-7 dargestellte Strategie mit von Schicht zu Schicht wechselnder Ausrichtung der Hatchlinien, welche als alternierende Kreuzbelichtung bezeichnet wird. In Schicht i sind die Hatchlinien entlang der x -Achse und in Schicht $i+1$ entlang der y -Achse ausgerichtet. Im Vergleich zur stetig gleichen Ausrichtung der Hatchlinien über alle Bauteilschichten hinweg (Parallelstrategie) resultieren daraus weniger Verzug sowie homogenere und isotropere Eigenschaften der Bauteile. Möglich ist weiterhin die Doppelbelichtung der Bauteilschichten, bei der eine Bauteilschicht vor dem erneuten Pulverauftrag zweimal mit den in Bild 2-7 dargestellten Laserverfahrlinien belichtet wird. Daraus resultiert bei gleicher, nicht angepasster Energiedichte im Vergleich zur Einfachbelichtung ein erhöhter Energieeintrag in der Bauteilschicht. Eine weitere Belichtungsstrategie sieht vor, dass innerhalb einer Schicht sich kreuzende Hatchlinien in x - und y -Ausrichtung belichtet werden. Daraus ergibt sich ebenfalls eine Doppelbelichtung der Schicht, weshalb diese Strategie als xy-Doppelbelichtung oder doppelte Kreuzbelichtung bezeichnet wird. [Kad10; WW19; Sch22]

Bei Betrachtung des Laserenergieeintrags ist zudem die Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Pulverbett zu erläutern, weshalb die optischen Eigenschaften des pulverböigen Materials eine wichtige Rolle spielen. In erster Linie ist es notwendig, dass die Wellenlänge des Lasers gut vom Material absorbiert werden kann. In der Regel werden CO₂-Laser mit einer Wellenlänge von 10,6 µm verwendet, da die meisten Polymere einen für den Aufschmelzvorgang ausreichend hohen Absorptionskoeffizienten für die genannte Wellenlänge aufweisen. Weiterhin sind die Reflexion an der Pulverschichtoberseite, welche

zu Energieverlusten führt, und die Reflexion in der Pulverschüttung zwischen den Partikeln relevant. Auch die Transmission in die Schicht und durch die Schicht hindurch in tiefere Schichten ist von Bedeutung. Für das vollständige Aufschmelzen der Partikeln und der vollständigen Koaleszenz muss in der Kontaktzeit des Lasers mit dem Material ausreichend Energie absorbiert werden. Für die Absorption durch in der Pulverschicht tiefer liegender Partikeln sowie zur Anbindung an die vorherige Schicht muss zudem genügend Energie ausreichend tief in die Schicht eindringen bzw. transmittiert werden. Neben den benannten Streueffekten ist die Eindringtiefe von der Intensität bzw. Leistung der Laserstrahlung abhängig. Bei nicht ausreichender Transmission in die Schicht kann die Oberfläche der Pulverschicht überhitzen und Zersetzung auftreten. Die Reflexionen innerhalb der Pulverschüttung belassen die Strahlung in der Schüttung, sodass diese wiederum absorbiert werden kann. Diese sog. Mehrfachstreuung in der Pulverschüttung führt zu höherer Absorption als im reinen, massiven Polymer. Absorption und Transmission sind also relevante materialspezifische Kennwerte. Zur Steigerung der Absorption werden den LS-Materialien oftmals Füllstoffe wie Ruß oder Metall- sowie Nichtmetalloxide hinzugegeben. [TKM+00; Sch22; YKI+21]

2.1.4 Einflüsse auf die Bauteileigenschaften

Der Prozess bzw. die resultierende Bauteilqualität unterliegt, wie verschiedene Ishikawa-Diagramme in der Literatur aufzeigen, enorm vielen Einflussfaktoren. Im Folgenden wird auf die im Rahmen dieser Arbeit relevanten Einflüsse und deren Auswirkungen auf die Bauteileigenschaften eingegangen. Der Fokus wird dabei auf den Laserenergieeintrag und dessen Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften und die damit verbundene Mikrostruktur gelegt. Weiterhin wird auf die Einflüsse der Bauteilarbeit im Bauraum, der Bauraumtemperatur, der Schichtdicke sowie des Alterungszustands des Pulvermaterials eingegangen. Zu bedenken ist, dass die Einflüsse verschiedener Stellgrößen oftmals nicht klar voneinander trennbar sind und sich gegenseitig bedingen. Die im Folgenden aufgeführten Einflüsse und Auswirkungen gelten im Wesentlichen für PA12.

Bauteilarbeit im Bauraum:

Durch den schichtweisen Aufbau zeigen additiv gefertigte Bauteile richtungs- bzw. orientierungsabhängige Eigenschaften, sodass in der Additiven Fertigung zwischen verschiedenen in DIN EN ISO 52921 definierten Bauteil-Orientierungen, dargestellt in Bild 2-8, unterschieden wird [DIN 52921]. Die Extremfälle stellen die XYZ-Orientierung, bei der die Bauteile in der Bauebene liegen, und die ZXY-Orientierung, bei der die Bauteile in Aufbaurichtung orientiert sind, dar. Zwischen den beiden Orientierungen treten anisotrope mechanische Eigenschaften, die am ausgeprägtesten bei der Bruchdehnung vorliegen, auf. Zugfestigkeit und E-Modul unterscheiden sich nur geringfügig [GS97; BWL+14; Jos19; Sch22; HBW17; MH11]. Die Bruchdehnung ist besonders sensitiv, was hohe Standardabweichungen in

vielen Untersuchungen belegen. Kleine Fehler in der Schicht oder den Zwischenschichtbereichen, wie nicht vollständig aufgeschmolzene Partikeln, die sich vorzugsweise in der Bau-ebene anordnen, haben große Auswirkungen auf die Bruchdehnung [SGU11; Lei12; SFL+17]. Durch Steigerung der Laserenergiedichte kann die Anisotropie der mechanischen Eigenschaften reduziert werden [CML07; HBW17]. Die richtungsabhängigen Eigenschaften sind bei der Bauteilauslegung zu beachten [Sch22].

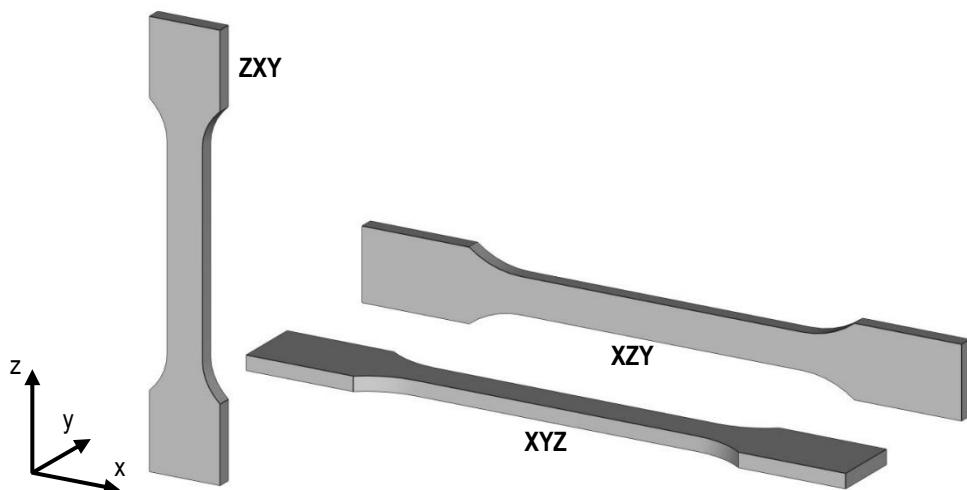


Bild 2-8: Bauteil-Orientierung in der Additiven Fertigung nach DIN EN ISO 52921 (nach [DIN 52921])

Mikrostruktur und Laserenergieeintrag:

Die Eigenschaften lasergesinterter Bauteile sind in hohem Maße abhängig von der Mikrostruktur. Einen entscheidenden Einfluss nimmt die Mikrostruktur auf die mechanischen Eigenschaften. Durch unvollständiges Aufschmelzen und unvollständiger Koaleszenz der Partikeln bzw. der Polymerschmelze während des Energieeintrags tritt Porosität in der Struktur auf, die mit einer Abnahme der Dichte einhergeht. Im Zuge dessen wird in der Literatur auch vom Degree of Particle Melt (DoPM) gesprochen. Die erhöhte Porosität und nicht aufgeschmolzene Partikeln führen zu reduzierten mechanischen Eigenschaften. Insbesondere in ZXY-Orientierung führt dies, dadurch dass sich die nicht aufgeschmolzenen Partikeln zwischen den Bauteilschichten anordnen, zur Versprödung und einer geringen Bruchdehnung von weniger als 10 % [MZH08; GLG10; Lei12; DLB+12; BWL+14; SFL+17; Sch22]. Zudem verfügen die nicht aufgeschmolzenen Partikeln über eine höhere Kristallinität als die umliegende Struktur, wodurch diese als Kristallisationskeime wirken und eine homogene Kristallisation im Bauteil behindern. Interkristalline Bereiche haben einen positiven Einfluss auf die Festigkeit. Die Grenzflächen zwischen den Sphärolithen gehen jedoch mit der bereits zuvor aufgeführten geringen Bruchdehnung einher [ZHK+06; Lei12; ZYS+15].

Der Laserenergieeintrag nimmt einen wesentlichen Einfluss auf die Koaleszenz der Partikel und Schmelze sowie die Koaleszenz der Bauteilschichten. Wie in Bild 2-9 dargestellt, tritt mit steigender Energiedichte bis zur optimalen Energiedichte in Stufe 5 zunehmende Koaleszenz bzw. ein zunehmender DoPM in der Bauteilschicht und über die Schichtgrenzen in Aufbaurichtung hinaus auf. Daraus ergeben sich, wie zuvor beschrieben, eine höhere Dichte und bessere mechanische Eigenschaften. Zudem sinkt die Anisotropie zwischen den Orientierungen mit zunehmender Energiedichte. [CML07; Kad10; SGU11; DLB+12; Lei12; RH14; Weg15; DPC+16; HBW17; GWW+19]

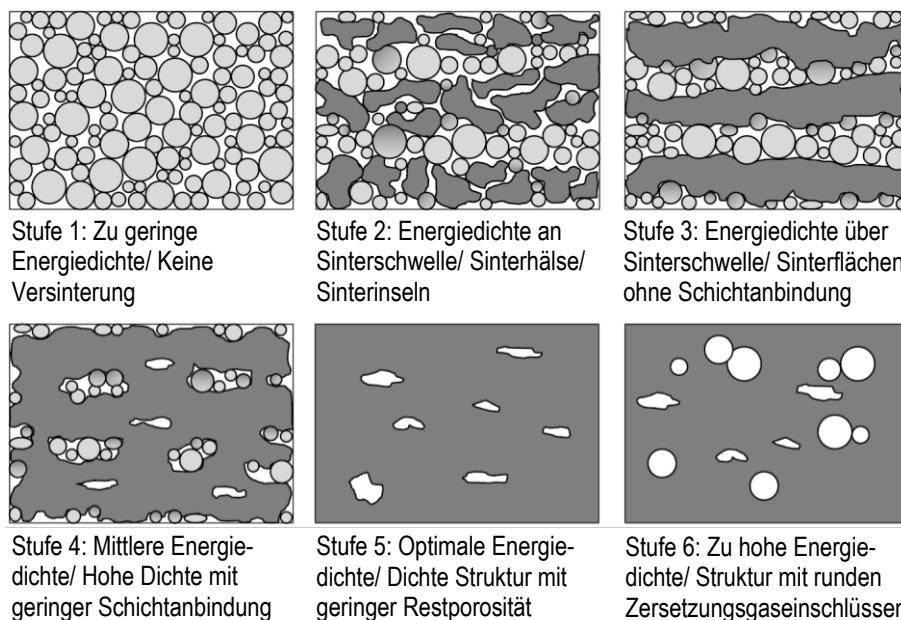


Bild 2-9: Schematische Darstellung der Bauteilmikrostruktur in Abhängigkeit des Laserenergieeintrags [Weg15]

Wie in Bild 2-10 von Kummert dargestellt, gibt es keine klar definierte, optimale Energiedichte sondern einen optimalen Energiedichtebereich, in dem sich die Bauteileigenschaften

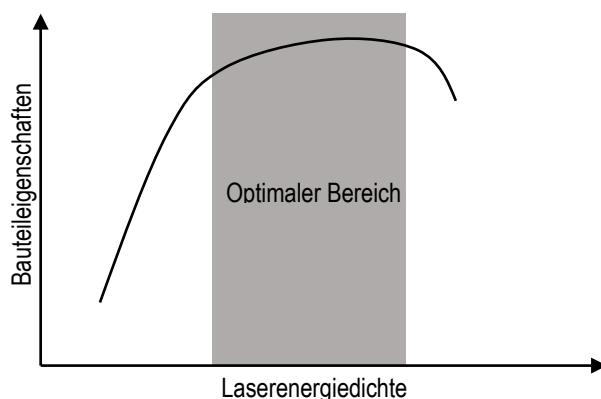


Bild 2-10: Bauteileigenschaften in Abhängigkeit der Laserenergiedichte (schematisch) [Kum22]

durch Anpassung der Energiedichte und der zugehörigen Belichtungsparameter oder -strategie nur geringfügig ändern. Weiterhin führt ein zu intensiver Energieeintrag zu reduzierter Dichte und reduzierten Bauteileigenschaften infolge von thermischer Schädigung bzw. Abbau der Polymerketten sowie durch Ausgasung entstehende sphärische Poren, wie in Stufe 6 in Bild 2-9 dargestellt [SGU11; DWD14; Weg15; DPC+16; KS18]. Die thermische Zersetzung kann ab ca. 300 °C in der Schmelze auftreten. Zur Vermeidung von übermäßiger Schädigung sollte ein durch die Zersetzung resultierender Masseabfall von 1 %, der bei PA12 bei ca. 320 °C eintritt, nicht überschritten werden [VHH13; Weg15; WW15].

Die Laserenergiedichte setzt sich, wie in Abschnitt 2.1.3 erläutert, aus der Laserleistung, der Scangeschwindigkeit und dem Hatchabstand zusammen, weshalb diese Parameter ebenfalls die Bauteileigenschaften beeinflussen können. Sofern nur einer der Belichtungsparameter geändert wird, ändert sich die Energiedichte und die zuvor erläuterten Einflüsse treten ein. Bei konstanter Energiedichte zeigt die Variation des Hatchabstands unter Anpassung der Laserleistung, sofern die Überlappung der Schmelzpoolbahnen vorhanden ist, nahezu keinen Einfluss auf die Dichte und mechanischen Eigenschaften. Bei konstanter Energiedichte zeigt die Laserleistung auf die Zugfestigkeit einen stärkeren Einfluss als die Scangeschwindigkeit und der Hatchabstand [Kad10]. Höhere Scangeschwindigkeiten mit Anpassung der Laserleistung, um die Konstanz der Energiedichte zu wahren, führen zu geringerer Dichte und geringeren mechanischen Eigenschaften. Zurückzuführen ist dies auf die unter anderem von der Scangeschwindigkeit abhängigen Temperaturverteilung im belichteten Bereich, die aus der Energieabsorption und Wärmeleitung resultiert. Eine hohe Scangeschwindigkeit kann also nicht durch eine erhöhte Laserleistung kompensiert werden. Die Partikeln werden nicht vollständig aufgeschmolzen und zusätzlich kann lokal auf der Pulverschichtoberseite Zersetzung durch die hohe Laserleistung und damit verbundene Temperatur auftreten. Zu beachten ist also, dass die Energiedichte die mittlere eingebrachte Energie angibt, aber zudem Wärmeleitung und Zeit ein wichtiger Faktor sind [PVB+10; BGE11; DDW14a; DLD15; LDD17; WDL+18; BBW+13; Sch22]. Kaddar und Wegner et al. weisen nach, dass die Doppelbelichtung des Hatchs zu besserer Dichte und mechanischen Eigenschaften sowie zu höheren Bruchdehnungen von bis zu 20 % in ZXY-Orientierung und damit zu isotropen mechanischen Eigenschaften führt [Kad10; WW19]. Josupeit zeigt, dass Zugfestigkeit und Dichte mit zunehmender Schichtzeit (Zeit zwischen zwei Beschichtungsvorgängen) ansteigen. Der E-Modul und die Bruchdehnung zeigen keine Abhängigkeit von der Schichtzeit [Jos19].

Bauraumtemperatur:

Die Bauraumtemperatur sollte im Prozessfenster (siehe Abschnitt 2.1.2) des verwendeten Materials liegen, da andernfalls Prozessfehler auftreten und die Prozessstabilität enorm gefährdet ist. Bei zu geringer Temperatur im Bauraum tritt das sog. Curling auf, welches mittig in Bild 2-11 dargestellt ist. Insbesondere die ersten Bauteilschichten neigen bei zu

geringer Bauraumtemperatur direkt nach dem Aufschmelzen oder dem erneuten Pulverauftrag zur Rekristallisation und ungleichmäßigen Schwund. Infolgedessen wölben sich die Bauteilränder oder -ecken nach oben aus dem Pulverbett heraus, sodass das finale Bauteil eine Deformation auf der Unterseite aufweist. Die Oberseite des Bauteils weist keine Deformation auf, da sich die Wölbung der Bauteilränder durch die Anbindung neu erzeugter Schichten an die Vorherigen zunehmend reduziert und schließlich nicht mehr auftritt. Intensives Curling hingegen hat einen sofortigen Baujobabbruch zur Folge, da die aus dem Pulverbett herausstehenden Bauteilebereiche vom Beschichter erfasst werden, das Bauteil herausgerissen und das Pulverbett zerstört wird. Verzug (Bild 2-11, rechts) tritt in der Abkühlphase nach der vollständigen Erzeugung des Bauteils durch ungleichmäßigen Schwund auf und ist unter anderem auch auf Temperaturdifferenzen und zu geringe Temperaturen im Pulverbett zurückzuführen. Im Gegensatz zum Curling verformt sich das gesamte Bauteil. [SSS12; CLW19a; Sch22; TC01] Bei zu hoher Bauraumtemperatur verfestigt sich das Pulverbett stark und Risse im Pulverbett entstehen [Sch22]. Um Curling und einen möglichen Prozessabbruch durch die ungleichmäßige Temperaturverteilung mit Differenzen von bis zu 5 K über der Baufläche [Rüs15; Weg15] zu vermeiden, wird die Bauraumtemperatur bei Materialien am oberen Ende des Prozessfensters angesetzt.

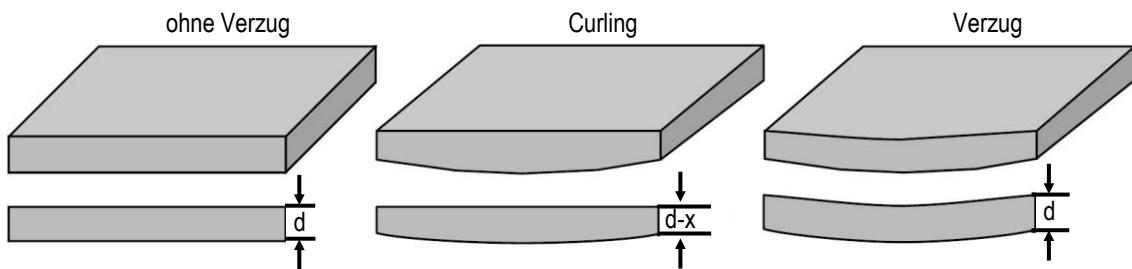


Bild 2-11: Bauteilverformungen – Curling und Verzug [Sch22]

Weiterhin verbessert eine hohe Temperatur am oberen Ende des Prozessfensters den Aufschmelzgrad und die Koaleszenz der Partikeln. Die belichtete Schicht kühlt durch den Pulverauftrag weniger stark ab und die neue Schicht wird schnell erhitzt, wodurch die Schmelze besser zusammenfließt, die Porosität reduziert und der Verbund über die Schichtgrenzen gestärkt wird. Eine höhere Dichte und bessere mechanische Eigenschaften sind die Folge [JPR08; Lei12; HBW17; SFL+17; LWW+19]. Durch verschiedene Untersuchungen zu Temperaturunterschieden über dem Baufeld und Auswertung der mechanischen Eigenschaften können bessere mechanische Eigenschaften bei höheren Temperaturen ebenfalls bestätigt werden. Dabei zeigt sich insbesondere eine höhere Bruchdehnung bei höherer Temperatur [CAB+11; GTH12; WW13; WW19]. Weiterhin tritt durch die hohen Temperaturen und den aufgrund der schlechten Wärmeleitfähigkeit des Pulverbetts langsame Abkühlprozess Nachkondensation und Nachkristallisation in den Bauteilen auf, welche sich ebenfalls positiv auf die Bauteileigenschaften auswirken [Sch22].

Schichtdicke:

Mit abnehmender Schichtdicke zeigt sich eine vollständigere Aufschmelzung und ausgeprägtere Koaleszenz der Partikeln [Lei12], sodass die mechanischen Eigenschaften ebenfalls positiv beeinflusst werden. Die Zugfestigkeit und Dichte nehmen mit sinkender Schichtdicke zu. Auch der E-Modul und die Bruchdehnung zeigen geringfügig steigende Werte [JPR08; Kad10; Rüs15; Jos19; Sch22].

Kristallinität:

Die Eigenschaften lasergesinterter Bauteile sind weiterhin abhängig von der zur Mikrostruktur gehörenden im Prozess entstehenden Kristallinität, die vor allem Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und die Maßhaltigkeit der Bauteile nimmt [SLS+04; KLK+07]. Ein steigender Kristallinitätsgrad, also der Anteil an kristallinen Strukturen am Gesamtvolume, führt generell zum Anstieg der Festigkeit und Steifigkeit bei gleichzeitiger Abnahme der Duktilität. Die Abnahme der Duktilität resultiert aus dem abnehmenden Anteil der für die Duktilität sorgenden amorphen Bereiche [KH03; Zar07; MZH08; BBO+13; Kum22; Kai21]. Die Ausbildung kristalliner Strukturen ist zeit- und temperaturabhängig und ist deshalb vor allem von den Abkühlbedingungen im Verarbeitungsprozess abhängig. Durch niedrige Abkühlraten während der Erstarrung, welche im LS-Prozess vorliegen, nimmt die Kristallinität zu, sodass LS-Bauteile tendenziell eine hohe Kristallinität aufweisen [PZB+01; RDK+11; GTH12; BHM19]. Außerdem verschiebt sich der Rekristallisationsbeginn zu höheren Temperaturen bei geringer Abkühlrate, wodurch der Zeitraum für die Kristallisation zusätzlich verlängert wird [Ehr04; ZWD18]. Durch diese Bedingungen entstehen im LS-Prozess große Sphärolithe in der Bauteilstruktur, welche nachteilig für die Bauteileigenschaften und die Isotropie der Eigenschaften sind. Die Steifigkeit steigt an, jedoch nehmen Zugfestigkeit und Bruchdehnung ab [Sch22]. Wie bereits beim Einfluss durch die Mikrostruktur erläutert, beeinträchtigen zudem die nicht vollständig aufgeschmolzenen Partikeln, welche eine höhere Kristallinität als die LS-Bauteilstruktur aufweisen und als Kristallisationskeime dienen, die homogene Kristallisation in der Bauteilstruktur [ZHK+06; Lei12; ZYS+15]. Außerdem wirken die Grenzen der Bauteilschichten als Barriere für eine schichtübergreifende, homogene Kristallisation, worauf die im Vergleich zum Spritzguss geringere Duktilität zurückzuführen ist [Sch22].

Alterungszustand des Materials:

Weiterhin nimmt die Qualität des verwendeten Pulvermaterials Einfluss auf die resultierenden Bauteileigenschaften. Aus vorherigen Prozessen recyceltes Material weist jedoch aufgrund der langen und hohen thermischen Belastung Alterungserscheinungen hauptsächlich in Form von Nachkondensation, dem Aufbau von Polymerketten, auf, wodurch die Schmelzviskosität ansteigt. Eine höhere Schmelzviskosität führt zu geringerer Koaleszenz der Schmelze, die mit einer Reduktion der Dichte und der mechanischen Eigenschaften

sowie mit Defekten bzw. Einfallstellen in der Bauteiloberfläche, der sog. Orangen haut, einhergeht. Aus den genannten Gründen wird das recycelte Material mit Neupulver aufgefrischt, sodass die Schmelzviskosität sinkt und die Bauteileigenschaften auf das gewünschte Maß steigen. [GDS+02; JPR08; DY09; WW12; WDK+14; WD16; Rüs15; Jos19; Del20; Sch22]

2.2 Verwendete Messmethoden

Die im Rahmen dieser Arbeit zur Charakterisierung der Material- und Bauteileigenschaften verwendeten Messmethoden werden im Folgenden aufgeführt und erläutert.

Zugversuch:

Der quasistatische Zugversuch nach DIN EN ISO 527 dient dazu, die mechanischen Eigenschaften in Form der Zugfestigkeit (R_m), des E-Moduls (E) sowie der Bruchdehnung (ε) zu ermitteln [DIN 527-1]. Zum Einsatz kommt die Universalprüfmaschine Instron 5569 mit einer 5 kN Kraftmessdose und optischer Dehnungsmessung mittels Videoextensometer. Im Wesentlichen wird der Prüfkörpertyp 1BA verwendet, dessen Form und Maße aus Tabelle 2-1 und Bild 2-12 entnommen werden können. Die Prüfgeschwindigkeit im linear elastischen Bereich zur Bestimmung des E-Moduls beläuft sich auf 0,25 mm/min. Zur Bestimmung der Zugfestigkeit wird die Geschwindigkeit auf 25 mm/min erhöht (Wechselwert $\varepsilon=0,3\%$). Geprüft werden gemäß Norm mindestens fünf Prüfkörper unter normalklimatischen Bedingungen. Breite und Dicke der Zugstäbe werden mit einem Messschieber bestimmt. Wenn nicht anders erwähnt, werden die Prüfkörper vor der Zugprüfung für mindestens 88 Stunden im Normklima (23 °C und 50 % r.F.) nach DIN EN ISO 291 konditioniert [DIN 291].

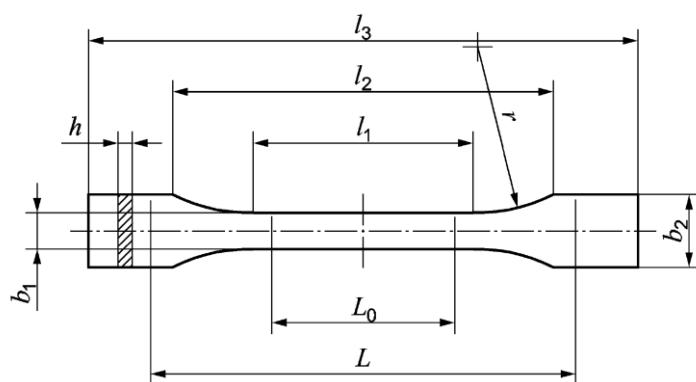


Bild 2-12: Form und Maße der verwendeten Zugprüfkörper [DIN 527-2]

Tabelle 2-1: Maße der verwendeten Zugprüfkörper in mm [DIN 527-2]

		Prüfkörpertyp	1BA	1A
l_3	Gesamtlänge		75	170
l_1	Länge des parallelen Teils		$30 \pm 0,5$	80 ± 2
r	Radius		30	24 ± 1
l_2	Entfernung zwischen den breiten parallelen Seiten		58 ± 2	$109,3 \pm 3,2$
b_2	Breite an den Enden		$20 \pm 0,2$	$20 \pm 0,2$
b_1	Breite des engen Teils		$10 \pm 0,5$	$10 \pm 0,2$
h	Bevorzugte Dicke		2	$4 \pm 0,2$
L_0	Messlänge		$25 \pm 0,5$	$75 \pm 0,5$

Dichtemessung:

Die Bauteildichte wird nach dem archimedischen Prinzip durch Eintauchen der Prüfkörper in eine Flüssigkeit, in diesem Fall Ethanol, nach DIN EN ISO 1183-1 ermittelt. Dabei wird mit der Präzisionswaage Sartorius CPA224S das Probengewicht an Luft ($m_{S,A}$) sowie im Ethanolbad ($m_{S,IL}$) gemessen und die Bauteildichte (ρ) unter Verwendung der Dichte von Ethanol (ρ_{IL}) mit Formel 2-2 berechnet [DIN 1183-1].

$$\rho = \frac{m_{S,A} * \rho_{IL}}{m_{S,A} - m_{S,IL}} \quad (2-2)$$

Im Rahmen der Arbeit werden Teile der geprüften Zugstäbe aus dem Übergangsbereich von Mess- zum Schulterbereich abgetrennt und als Prüfkörper verwendet.

Dynamische Differenzkalorimetrie:

Die dynamische Differenzkalorimetrie, kurz DSC (engl.: Differential Scanning Calorimetry), nach DIN EN ISO 11357-3 wird zur Untersuchung des Aufschmelz- und Kristallisierungsverhaltens teilkristalliner Thermoplaste durch Messung des Wärmestroms bei konstantem Temperaturgradienten über der Zeit bzw. der Temperatur verwendet. Eine Pulverprobe von ca. 5 mg wird unter konstantem Druck und Stickstoffspülung mit einer Aufheizrate von 10 bis 20 K/min bis auf mindestens 30 K über der extrapolierten Endschmelztemperatur aufgeheizt, für 5 min isotherm gehalten und anschließend mit gleichem Temperaturgradienten auf Raumtemperatur abgekühlt [DIN 11357-3]. Für PA12 wird eine obere Temperaturgrenze von 230 °C und für PA6 von 300 °C eingestellt. Verwendet wird die DSC 214 Polyma der Netzsch-Gerätebau GmbH. Aus der Messung resultieren eine Aufheizkurve mit endothermem Aufschmelzpeak und eine Abkühlkurve mit exothermem Kristallisationspeak, welche den Wärmestromverlauf über der Temperatur abbilden. Bei PA6 wird die DSC-Messung zur Bestimmung des Prozessfensters zwischen den Onset-Punkten von Schmelze- und Kristallisierungsbereich, wie bereits in Abschnitt 2.1.2 in Bild 2-5 beschrieben, genutzt. Bei PA12 wird ausschließlich die Aufheizkurve verwendet und der Aufschmelzpeak zur Bestimmung der für die Kristallinität repräsentativen Schmelzenthalpie ausgewertet. Zur

Bestimmung der Schmelzenthalpie wird die Fläche zwischen Peak und extrapolierte Basislinie, die die vom Bediener markierte Peakbeginn- und Peakendtemperatur verbindet, durch die Software bestimmt und die Schmelzenthalpie berechnet. In der Regel liegt die Basislinie der Messkurve vor und hinter dem Schmelzpeak nicht auf einer Höhe, sodass die Basislinie hinter dem Peak, wie in Bild 2-13 dargestellt, durch lineare Regression in Bereiche niedrigerer Temperatur extrapoliert werden muss. Durch Festlegung der Peakbeginn- und Peakendtemperatur sowie durch das Extrapolieren der Basislinie ergeben sich hohe Messunsicherheiten.

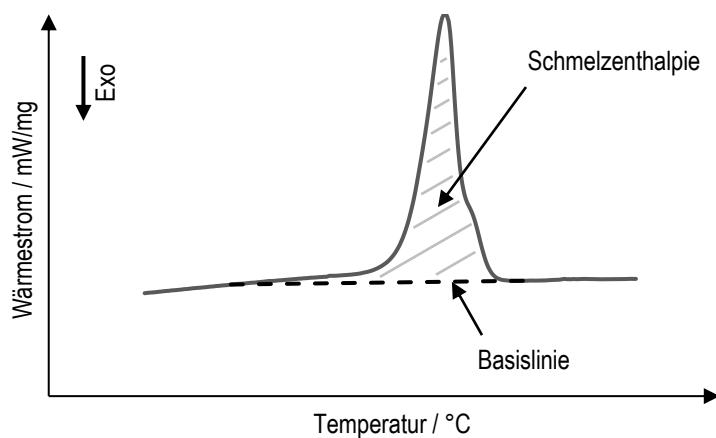


Bild 2-13: Auswertung des Schmelzpeaks einer Wärmestromkurve zur Bestimmung der Schmelzenthalpie

Schmelze-Volumenfließrate:

Die Schmelze-Volumenfließrate, kurz MVR (engl.: melt volume-flow rate), ist ein Maß für die Viskosität der Schmelze und gibt im Rahmen dieser Arbeit Aufschluss über die Materialalterung durch Nachkondensation oder thermisch induzierten Abbau der Polymerketten. Nach DIN EN ISO 1133-1 wird die MVR durch Extrudieren einer Kunststoff-Schmelze durch eine im Plastometer befindliche Düse unter definierter Last bei definierter Temperatur bestimmt. Dabei wird die Zeit, die der mit der Last versehene Messkolben für eine festgelegte Messstrecke benötigt, aufgezeichnet und die MVR, angegeben in $\text{cm}^3/10\text{min}$, berechnet [DIN 1133-1]. Genutzt wird das Fließprüfgerät Mflow des Herstellers Zwick. Für PA12 und PA6 wird eine Prüftemperatur von 235°C und eine Prüflast bzw. ein Prüfgewicht von 5 kg verwendet. Die Pulverprobe (4-5 g) wird vor der Messung bei 105°C für 30 min im Ofen getrocknet.

Bildgebende Messmethoden:

Im Weiteren werden verschiedene bildgebende Verfahren verwendet, deren Funktionsweise im Allgemeinen bekannt ist. Zur Auswertung werden ausschließlich Bilder generiert und analysiert und keine speziellen Auswertemethoden verwendet. Zur Generierung von mikroskopischen Aufnahmen und hochauflösenden Bildern sowie zur Messung von Verzug

kommt das 3D-Makroskop VR-3100 von Keyence zum Einsatz. Weiterhin werden Raster-elektronenmikroskopie-Aufnahmen (REM) von Bruchflächen gezogener Zugstäbe mit dem REM der Firma Phenom World sowie mit dem Zeis Ultra Plus erstellt. Dafür wird die Bruchstelle vom restlichen Teil des Prüfkörpers abgetrennt und mit der Bruchfläche nach oben zeigend auf dem Probenhalter befestigt. Zur Visualisierung der Mikrostruktur werden Computertomographie-Aufnahmen (CT) mit dem Phoenix Nanotom S von General Electric im Messbereich von Zugstäben erzeugt.

3 Stand der Forschung zum Niedertemperatur-Lasersintern

Das Lasersintern von teilkristallinen Kunststoffen bei niedrigen Bauraumtemperaturen wird im Rahmen dieser Arbeit als Niedertemperatur-Lasersintern (NTLS) bezeichnet. Im Folgenden wird der Stand der Forschung zum NTLS dargestellt. Dabei wird der Prozess zum konventionellen LS abgegrenzt und es werden verschiedene Ansätze bzw. Herangehensweisen aus der Forschung beschrieben. Zudem wird auf die Verarbeitung und die resultierenden Material- und Bauteileigenschaften verschiedener Polyamide (PA11 und PA12) sowie verschiedener Hochleistungs- bzw. Hochtemperatur-Kunststoffe (PEEK und PPS) eingegangen.

3.1 Abgrenzung vom NTLS zum konventionellen LS

Beim konventionellen LS wird das teilkristalline Kunststoffmaterial, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, mit einer Bauraumtemperatur, die im Prozessfenster zwischen Schmelze- und Kristallisationspeak liegt, verarbeitet. Dadurch verbleiben die durch den Laserenergieeintrag aufgeschmolzenen Bereiche über einige Bauteilschichten hinweg im metastabilen Zustand der unterkühlten Schmelze. Frühzeitiges Erstarren und das damit einsetzende sog. Curling einzelner Bauteilschichten, insbesondere der ersten Bauteilschichten, sowie der Verzug des gesamten Bauteils kann auf diese Weise verhindert und damit die notwendige Prozesssicherheit gewährleistet werden [Sch22]. Curling, bei dem sich ein aufgeschmolzener Bereich während der Erstarrung durch ungleichmäßige Abkühlung zwischen Ober- und Unterseite verzieht und aufgrund dessen aus der Pulverbettoboberfläche herausragt, würde unweigerlich zum Prozessabbruch führen, da der Beschichter mit dem gecurlten Bereich kollidieren und diesen rausreißen würde [TC01; SSS12; CLW19a; Sch22]. Nach Fertigstellung des Baujobs kühlen die Bauteile langsam und unter Prozessatmosphäre verzugsfrei im Pulverkuchen ab [Sch22].

Je nach Material kann das Prozessfenster unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Einige Materialien wie z.B. PA12 weisen ein großes Prozessfenster von ca. 30 K auf [Sch22]. Andere Materialien hingegen wie z.B. PA6 verfügen über ein Prozessfenster von wenigen Kelvin (10-15 K) [LS17] und wieder andere Materialien wie z.B. PPS weisen kein Prozessfenster auf, da sich der Schmelze- und Kristallisationspeak überschneiden [CLW19b]. Die Verarbeitbarkeit im konventionellen LS erfordert jedoch ein möglichst großes Prozessfenster, um einen stabilen Prozess zu garantieren, da, insbesondere bei größeren Bauräumen, Temperaturschwankungen von mehreren Kelvin über der Baufläche auftreten können [NHI+12; WW13; Weg15; Rüs15]. Dies ist ein Grund, weshalb die Materialentwicklung komplex und aufwändig ist und die Materialvielfalt im LS stark eingeschränkt ist. Hochleistungs- bzw. Hochtemperatur-Kunststoffe (HT-Kunststoffe) wie PEEK mit einem Schmelzpunkt von ca. 370 °C stellen zudem hohe Anforderungen an die Komponenten einer LS-Anlage, so dass spezielle Hochtemperatur-Anlagen (HT-Anlagen) entsprechend kostenintensiv sind

[NHI+12; CLW19b]. Eine kommerzielle Anlage mit einer maximalen Bauraumtemperatur von 385 °C ist die EOS P800, auf welcher sich das EOS PEEK HP3 verarbeiten lässt [BEG15; HDK18; SMB+17]. Konventionelle LS-Anlagen weisen je nach Hersteller eine maximale Bauraumtemperatur von 200 °C [SMB+17; KYN21] bis 280 °C [Far23] auf. Mitunter aus diesem Grund besteht der Großteil der LS-Anwendungen aus der Werkstoffgruppe der Polyamide, insbesondere PA12 und teilweise aus PA11 [Geb16; WCD+18; TZZ20; Sch22]. Die begrenzte Auswahl an polymeren Werkstoffen und insbesondere an Hochleistungspolymeren verwehrt die Ausweitung der Anwendungsbereiche [CLW19b].

Durch die hohen Verarbeitungstemperaturen wenige Kelvin unterhalb des Schmelzpunkts des jeweiligen Materials ergibt sich ein weiterer Nachteil des LS-Prozesses. Das nicht aufgeschmolzene, umliegende Material wird über einen langen Zeitraum thermisch belastet und dadurch gealtert, sodass es nicht vollständig recycelt werden kann und mit Neupulver aufgefrischt werden muss [Sch22]. Die Bauraumtemperatur stellt dabei den einflussreichsten Faktor für die Alterung des Materials dar [KLS+08; DY09; CGH+01]. Die Auffrischungsrate unter anderem bei Polyamiden beträgt in der Regel 30 % bis 50 %. Andere Werkstoffe wie PEEK können beispielsweise nicht recycelt werden, sodass ausschließlich Neupulver verwendet werden kann (Auffrischungsrate von 100 %). Ohne Auffrischung des Pulvers treten oberflächliche Defekte in Form der sog. Orangenhaut, eine erhöhte Oberflächenrauheit sowie reduzierte mechanische Eigenschaften, insbesondere Dichte und Bruchdehnung, auf [GDS+02; JPR08; DY09; WW12; WDK+14; WD16; Rüs15; Jos19; Del20; Sch22]. Die Kosten des Baujobs bzw. der darin enthaltenen Bauteile steigen entsprechend mit sinkender Recyclingrate an [JLH+15; DY09]. Die Bauteil-Packungsdichte eines Baujobs beträgt aufgrund von einzuhaltenden Abständen und Schwierigkeiten in der Anordnung der Bauteile durchschnittlich ca. 10 % des gesamten Pulverbetts. Daraus resultiert, dass der hinzuzufügende Neupulveranteil dem drei- bis fünffachen des Bauteilvolumens entspricht. Kigure et al. nehmen daher an, dass die Menge des hinzuzufügenden Neupulvers der durch Bauteile entnommenen Menge entspräche, wenn eine Auffrischungsrate von 10 % möglich wäre [KN17]. Aufgrund der Pulverbettdichte von LS-Pulvern von 45 bis 55 % [Sch22] und einer Bauteildichte von mehr als 92 % [RSH+12; DLB+12], ist jedoch von einer Auffrischungsrate von ca. 20 % bei einer Bauteil-Packungsdichte von 10 % auszugehen. Weiterhin wird an Bauteilen anhaftendes Pulver aufgrund erhöhter thermischer Belastung ebenfalls entsorgt und muss ersetzt werden. Die thermische Schädigung des Materials ist also sowohl aus Wirtschaftlichkeits- als auch aus Nachhaltigkeitsaspekten bedenklich.

Das Niedertemperatur-Lasersintern, dessen Temperaturbereich schematisch in einer DSC Wärmestromkurve in Bild 3-1 dargestellt ist, kann den angesprochenen Problematiken des LS-Prozesses entgegenwirken. Die verringerten Bauraumtemperaturen können die thermische Belastung und Alterung des Materials verringern oder ggf. verhindern und damit die Recyclingfähigkeit verbessern [KN17]. Weiterhin können geringere Bauraumtemperaturen die Verarbeitung von Hochtemperatur-Materialien auf im Vergleich zu Hochtemperatur-

Anlagen kostengünstigen, ggf. modifizierten, konventionellen LS-Anlagen ermöglichen [CLW19b]. Auch das notwendige, möglichst große Prozessfenster eines im LS zu verarbeitenden teilkristallinen Kunststoffs wird obsolet, wenn die Verarbeitung bei einer Temperatur unterhalb der Kristallisationstemperatur stattfinden kann [CLW19b]. Daraus ergibt sich ein enormer Vorteil für die Materialentwicklung und die damit einhergehende Materialvielfalt, wodurch eine Erweiterung des Anwendungsspektrums resultieren kann. Die Schwierigkeiten des NTLS-Prozesses bestehen in dem durch die geringen Bauraumtemperaturen induzierten Verzug bzw. induziertes Curling und dem Energieeintrag des Lasers, welcher den geringeren Energieeintrag infolge der reduzierten Prozesstemperatur kompensieren muss, ohne das aufzuschmelzende Material zu zersetzen. Die Literatur offenbart mehrere Ansätze für die Verarbeitung von teilkristallinen Kunststoffen auf einer LS-Anlage bei niedrigen Bauraumtemperaturen kleiner als der Kristallisationstemperatur.

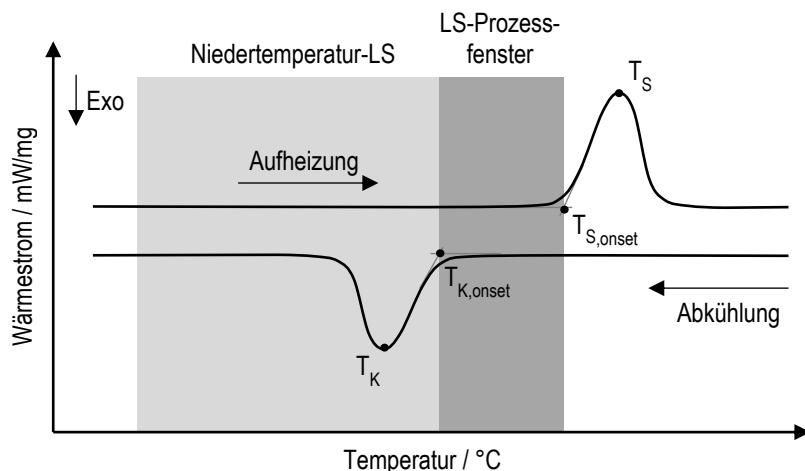


Bild 3-1: Schematische Darstellung des Temperaturbereichs im NTLS in einer DSC Wärmestromkurve von teilkristallinen Polymeren

Die japanische Forschergruppe der Universität Tokyo im Kern um Niino, Kigure und Yamauchi verfolgt einen erstmalig in [NHI+11] aufgeführten Ansatz, der ähnlich zum bekannten Laserstrahlschmelz-Prozess von Metallpulvern (Laser Melting, kurz LM) abläuft. Beim LM-Prozess erfolgt im Gegensatz zum LS keine Vorwärmung bis nahe des Materialschmelzpunkts. Der LM-Prozess findet bei einer nahezu kalten Bauumgebung statt und die Bauteile werden zur Vermeidung von Verzug und Wärmestau auf einer Bauplattform fixiert. Die resultierenden Eigenspannungen werden in der Regel durch Spannungsarmglühen im Anschluss an den Prozess abgebaut. Zur Fixierung der Bauteile werden beim LM sog. Supportstrukturen verwendet, die dem Verzug entgegenwirken und die Verformungskräfte aufnehmen. Die Supportstrukturen dienen weiterhin dazu, Überhänge zu unterbauen. Im Anschluss an den Bauprozess werden die Bauteile von der Bauplattform und den Supportstrukturen getrennt, weshalb die Supportstrukturen in der Regel dünn und fein ausgeprägt sind [KMV+08; JBA+12; Geb13]. Niino et al. verwenden zur Curling vermeidenden

Fixierung der Bauteile an einer Bauplattform aus demselben oder einem artverwandten Kunststoff des zu verarbeitenden Materials, um Bauteile durch Steuerung der Belichtungsparameter ohne Vorheizung oder bei geringen Bauraumtemperaturen zu erzeugen [NHI+11; KN17]. Ein komplett vorheizungsfreier Bauprozess weist zudem den Vorteil auf, dass er im Gegensatz zum konventionellen LS-Prozess unanfällig für Prozessunterbrechungen bspw. infolge von Stromausfällen ist [NHI+11].

Auch die Airbus Innovation Group verfolgt einen ähnlichen Ansatz und arbeitet in Kooperation mit dem Materialhersteller Lehmann&Voss&Co und dem LSS Laser-Sinterservice an der Entwicklung des sogenannten ThermoMelt-Prozesses, der die Verarbeitung von Hochtemperaturmaterialien wie PPS und PAEK bei niedrigen Bauraumtemperaturen mit Fixierung an einer Bauplattform ermöglichen soll. Der Prozess ist von Airbus patentiert [Leh16; Käf19].

Chatham et al. verzichten beim NTLS-Prozess auf die Anbindung der Bauteile an eine Bauplattform und steuern den Prozess über eine erhöhte Energieeinbringung durch den Laser. Sie führen jedoch nicht auf, wie Curling und Verzug verhindert werden [CLW19b]. Schlücht et al. verzichten ebenfalls auf die Fixierung der Bauteile und verfolgen einen Ansatz, bei dem fraktale Belichtungsstrategien mit quasisimultaner Belichtung unterschiedlicher Bauteilsegmente genutzt werden. Dabei findet ein sukzessiver, homogener Temperaturanstieg in den belichteten Segmenten einer Bauteilschicht statt, wodurch Curling und Verzug vermieden werden können [SGD22]. Bei der Fertigung von Multimaterial-Bauteilen, bei der das höherschmelzende Material notwendigerweise niedriger als standardmäßig vorgeheizt werden kann, verwenden Laumer et al. zur Vermeidung von Curling und Verzug den Ansatz des Vorheizens mittels Laserbestrahlung. Quasisimultan erfolgt die eigentliche Belichtung des Multimaterialbauteils [LSA+15]. Im Folgenden werden die wesentlichen Forschungsergebnisse materialspezifisch für Polyamide und Hochleistungskunststoffe aufgeführt.

3.2 NTLS von Polyamiden

In der Klasse der Polyamide wurde das Lasersintern bei niedrigen Bauraumtemperaturen im Wesentlichen mit PA12 und in Teilen mit PA11 untersucht. Zunächst wird auf die in der Literatur aufgeführten Erkenntnisse zu PA12 eingegangen, ehe die Ergebnisse zu PA11 erläutert werden.

3.2.1 NTLS von PA12

Die NTLS-Forschung von PA12, welches im konventionellen LS bei einer Bauraumtemperatur um 170 °C [BEG16; EOS22b] verarbeitet wird und dessen Kristallisation ab etwa 150 °C [BEG16; Kum22] einsetzt, wird dominiert durch die japanische Forschungsgruppe um Niino, Kigure und Yamauchi. Diese Gruppe bedient sich einer eigens entwickelten

Methode, bei der Bauteile auf einer Bauplattform aus PA12 zur Vermeidung von Curling fixiert werden [NHI+11]. Untersuchungen von Niino et al. auf einer experimentellen LS-Anlage ohne Vorheizen des Pulverbetts zeigen unter Verwendung von netzförmigen Supportstrukturen mit Konturabstützung die Prozessierbarkeit bzw. Machbarkeit der Methode [NHI+11]. Ohne Vorheizen sind eine reduzierte relative Dichte mit 87,4 % und eine daraus resultierende reduzierte Zugfestigkeit von 67 % sowie ein reduzierter E-Modul von 50 % zur LS-Referenz zu verzeichnen. Die Bruchdehnung weist einen zur LS-Referenz deutlich erhöhten Wert mit 26 % (LS-Referenz: 11 %) auf, dessen Ursache nicht erläutert wird [NHI+12]. Mit zunehmender Bauraumtemperatur kann die relative Dichte bis auf 95 % bei 130 °C erhöht werden [HIN14]. Die Laser-Belichtung erfolgt mit geringer Laserleistung (7,5 W bis 10 W), geringer Scangeschwindigkeit (1530 mm/s) und geringem Hatchabstand (30 µm bis 60 µm) beim vorheizungsfreien Prozess ($A_z=0,16 \text{ J/mm}^2$) sowie bei Bauraumtemperaturen bis 130 °C ($A_z=0,11 \text{ J/mm}^2$) [NHI+11; NHI+12; HIN14].

Kigure et al. realisieren auf einer konventionellen Anlage (RaFaEl300C von Aspect) mit einer Bauraumtemperatur von 130 °C eine maximale relative Dichte von 99 % bei einer Flächenenergiedichte von 0,06 J/mm² im Gegensatz zur LS-Referenz von 97 % [KN17]. Die zugehörige Zugfestigkeit beträgt 44 MPa (LS-Referenz: 45 MPa), der E-Modul 1500 MPa (LS-Referenz: 1750 MPa) und die Bruchdehnung 34 % (LS-Referenz: 18%). Die Zugfestigkeit und Bruchdehnung unterliegen starken Schwankungen [KYN19]. Die in diesem und dem vorigen Absatz aufgeführten mechanischen Kennwerte gelten ausschließlich für in der Bauebene orientierte Prüfkörper (XYZ-Orientierung).

Die Ursache für die geringeren Festigkeiten und Steifigkeiten bei erhöhter Duktilität ist in der Mikrostruktur zu finden [NHI+11; KYN19]. Dünnschnitte zeigen, dass das Material im Gegensatz zum LS vollständig aufgeschmolzen wurde und keine unaufgeschmolzenen Partikeln zurückbleiben. Kleine sphärische Poren sind jedoch wahrnehmbar [NHI+12]. Vergrößerte, sphärische Poren zeigen sich bei mit zu hoher Energiedichte erzeugten, spröden und vergilbten Bauteilen, welche durch Zersetzungsvorgänge entstehen [NHI+12; NHI+11]. Die Verteilung der Poren lässt sich als Ursache für die auftretenden Schwankungen vermuten [KYN19]. Im Gegensatz zum LS, bei dem Sphärolithe um nicht aufgeschmolzenen Partikeln (Kristallisationskeime) herum zu erkennen sind, zeigen Dünnschnitte vom NTLS eine glattere Mikrostruktur, die auf eine geringere Kristallisation aufgrund der hohen Abkühlrate schließen lässt [NHI+12; KYN19]. Die den Kennwerten von Kigure et al. zugehörige Kristallinität beläuft sich auf 31% im Gegensatz zur LS-Referenz mit 35 % [KYN19].

Hinsichtlich der Maß- und Formhaltigkeit zeigen sich bei Untersuchungen zur Wanddicke und zum Lochdurchmesser geringere Aufmaße durch geringere Sinterung oder Verschmelzung umliegender Partikeln aufgrund höherer Temperaturgradienten zwischen Pulverbett und aufgeschmolzenem Bauteilbereich [NHI+12]. Durch eine Wärmebehandlung (80°C für 30 min) vor der Ablösung von der Bauplattform kann der Verzug von Bauteilen aus dem

vorheizungsfreien Prozess reduziert werden [NHI+11]. Der NTLS-Prozess zeigt eine geringere Oberflächenrauheit, da die aufgeschmolzenen Bereiche vor dem Auftrag der neuen Pulverschicht erstarren und die aufgetragenen Partikeln dadurch nicht an der Oberfläche haften. Hinsichtlich der Recyclingfähigkeit des Materials zeigt sich bei einer Bauraumtemperatur von 130 °C anhand des MVR-Werts und der relativen Bauteildichte, dass eine reduzierte Auffrischungsrate von 10 % ausreichend ist [KN17].

Schlicht et al. können die Machbarkeit des Ansatz der quasimultanen, fraktalen Belichtung einzelner Segmente zur Bauteilfertigung ohne Anbindung an eine Bauplattform auf einer experimentellen LS-Anlage bei einer Pulverbetttemperatur von 75 °C nachweisen [SGD22]. Es ist ein homogener Temperaturanstieg in einzelnen belichteten Segmenten des Bauteilquerschnitts mit reduzierten Temperaturspitzen [GSD21] und anschließend geringer Abkühlrate sowie eine begrenzte, segmentweise Schrumpfung zu erkennen, aus der die Vermeidung von Curling und Verzug des Bauteils realisiert wird. Eine relative Dichte von 98,5 % bei reduzierter Kristallinität kann erzielt werden [SGD22].

3.2.2 NTLS von PA11

Yamauchi et al. untersuchen die Verarbeitung von PA11 im NTLS auf einer konventionellen LS-Anlage mit Faserlaser (RaFaEl 300F von Aspect) nach der von Niino et al. in Abschnitt 3.1 aufgezeigten Methode. Konventionell wird PA11 bei einer Bauraumtemperatur um 185 °C verarbeitet. Die Kristallisation tritt ab 165 °C ein [BEG16]. Der Faserlaser weist den Vorteil einer höheren Präzision durch einen geringen Spotdurchmesser mit 170 µm im Vergleich zu typischen Spotdurchmessern von CO₂-Lasern mit 300 bis 500 µm auf. Zur Einbringung der Energie wird dem Material ein Absorber beigemischt. Mit dem Faserlaser kann eine maximale relative Dichte von 99 % bei einer Bauraumtemperatur von 140 °C erzielt werden [YKN16], wohingegen mit einem CO₂-Laser unter Fokussierung des Spots auf einen ähnlichen Spotdurchmesser (130 µm) lediglich eine relative Dichte von maximal 95 % realisierbar ist [HIN14]. Der CO₂-Laser wird im oberen Bereich der Pulverschicht zu stark absorbiert, sodass Zersetzung in den Bereichen auftreten kann. Der untere Teil der Schicht erfährt nicht ausreichend Energie zum vollständigen Aufschmelzen [HIN14]. Mit dem Faserlaser und dem Anteil des Absorbers kann die Eindringtiefe und Absorption gesteuert werden [YKN16]. Yamauchi et al. zeigen weiterhin, dass höhere Bauraumtemperaturen bei konstanter Energiedichte des Lasers aufgrund späterer Kristallisation und damit einhergehender längerer Zeit in der Schmelze zu einer höheren Bauteildichte führen. Eine Reduktion der Dichte mit zunehmender Schichtzeit ist ebenfalls detektierbar und kann darauf zurückgeführt werden, dass bei kürzerer Schichtzeit die anschließende Beschichtung und Belichtung zeitnaher erfolgt und daher der Wärmeverlust aus der vorherigen Schicht geringer ist. Die noch vorhandene Wärme trägt zum Aufschmelzen der neuen Bauteilschicht und dem Schichtverbund bei [YKN16]. Beispielsweise beträgt die relative Dichte 95 % bei einer Schichtzeit von 5 s und 82 % bei einer Schichtzeit von 45 s [YNK17]. Mit zunehmender

Querschnittsfläche des Bauteils nimmt die Dichte zu und mit zunehmender Aspect Ratio (Seitenverhältnis von Länge zu Breite) nimmt die Dichte ab. Zurückzuführen ist dies auf die schnellere Wärmeabfuhr aus kleineren Querschnitten und Querschnitten mit hoher Aspect Ratio an das umliegende Pulver und der daraus resultierenden kürzeren Zeit zur Ausbildung der Schicht mit fließfähiger Schmelze [YNK17]. Sowohl die Bauteilgeometrie als auch die Schichtzeit wirken sich damit beim NTLS entscheidend auf die Bauteildichte aus.

3.3 NTLS von Hochleistungskunststoffen

Im Folgenden wird der Stand der Forschung zum NTLS von Hochleistungs- bzw. Hochtemperatur-Kunststoffen gegeben. Zunächst werden die Erkenntnisse zu PEEK und anschließend zu PPS aufgeführt.

3.3.1 NTLS von PEEK

Im konventionellen LS benötigt PEEK je nach Material und Hersteller eine Bauraumtemperatur zwischen 330 °C und 365 °C. Die Kristallisation setzt zwischen 300 °C und 340 °C ein [BEG16]. Niino et al. zeigen die erfolgreiche Verarbeitung von PEEK mittels Fixierung auf einer Bauplattform bei einer Bauraumtemperatur von 200 °C auf einer experimentellen LS-Anlage mit CO₂-Laser und einem Laserspotdurchmesser von 130 µm. Zunächst vorhandene Rauchbildung und braune, verbrannte Bauteile können durch Defokussierung des Laserspots (bis auf 560 µm), die einen schonenderen Energieeintrag bei unveränderter Laserenergiedichte zur Folge hat, verhindert werden. Zudem zeigt sich eine Erhöhung der relativen Dichte mit abnehmender Schichtdicke, da insbesondere bei der größten Schichtdicke von 100 µm die Eindringtiefe des Lasers nicht ausreichend hoch ist. Eine maximale relative Dichte von 96 % kann erreicht werden [NU15].

Kigure et al. weisen die Verarbeitung von PEEK unter Anbindung an einer Bauplattform auf einer konventionellen Anlage (RaFaEl300C) mit einem defokussierten Laserspotdurchmesser von 820 µm bei einer Pulverbetttemperatur von 170 °C und 200 °C nach. Die relative Dichte steigt mit zunehmender Pulverbetttemperatur und abnehmender Schichtdicke an. Bei 200 °C und einer Schichtdicke von 50 µm und 70 µm ergibt sich eine maximale relative Dichte von 97 %. Für in der Bauebene orientierte Prüfkörper belaufen sich die maximalen mechanischen Eigenschaften auf eine Zugfestigkeit von 80 MPa, einen E-Modul von 3100 MPa und eine Bruchdehnung von 6 % [KYN21] (Spritzguss-Referenz: R_m=100 MPa, E=3700 MPa und ε=30-50 % [Ehr07; Evo22]; LS-Referenz: R_m=~83 MPa, E=~3400 MPa und ε=~2 % [RKD09]). Tendenziell zeigen sich bessere mechanische Eigenschaften bei der geringeren Schichtdicke von 50 µm und im Gegensatz zur Dichte bei der geringeren Temperatur von 170 °C. Die Bruchdehnung unterliegt hohen Schwankungen. Sowohl die Dichte als auch die mechanischen Eigenschaften steigen mit wachsender Flächenenergiedichte bis zu einem gewissen Energiedichteniveau (0,2-0,225 J/mm²) an, ehe Reduktion

eintritt. Zersetzung ist nur an der Oberfläche und nicht in Form von sphärischen Poren nachweisbar, jedoch treten insbesondere bei niedrigeren Temperaturen und höheren Schichtdicken längliche, diagonale Poren auf, die auf das Fließ- und Erstarrungsverhalten des Materials zurückzuführen sind [KYN21]. Weiterhin zeigen Kigure et al., dass auftretende Zersetzungssphänomene bei kleinen Laserspotdurchmessern mittels Verringerung der Laserintensität durch Defokussierung des Spots, abgeleitet aus dem LM-Prozess von Metallen [BHK+17; LFL+22], bei gleichbleibend hoher Laserenergiedichte (ähnlich zu [NU15]) unterdrückt werden können [KYN22]. Simulationsgestützte Abschätzungen zeigen, dass kleinere Spotdurchmesser höhere Temperaturen im belichteten Bereich erzeugen. Ein großer Spotdurchmesser verlangsamt die Wärmezufuhr und führt zu niedrigeren Temperaturen im belichteten Bereich [KYN22]. Darauf aufbauend weisen experimentelle Untersuchungen eine steigende relative Dichte mit zunehmendem Spotdurchmesser und gleichzeitig zunehmender Energiedichte bei 170 °C und einer Schichtdicke von 100 µm bis zum Maximalwert von 86 % bei einem Spotdurchmesser von 1281 µm und Energiedichten von 0,25 J/mm² und 0,3 J/mm² auf [KYN22]. Ein größerer Laserspotdurchmesser ruft jedoch einen nachteiligen Effekt auf die Maßhaltigkeit hervor [KYN22].

3.3.2 NTLS von PPS

PPS weist für den konventionellen LS-Prozess kein Prozessfenster auf, weshalb die Verarbeitung im LS nicht möglich ist. Die Schmelz- bzw. Kristallisationstemperatur liegen in etwa bei 280 °C bzw. 255 °C [CLW19b]. Ito et al. weisen die Verarbeitung von PPS mittels Fixierung auf einer Bauplattform auf einer experimentellen LS-Anlage bei einer Pulverbetttemperatur von 200 °C nach [IN16]. Neben einem CO₂-Laser mit klassischem Gauß-Profil wird ein CO₂-Laser mit Top-Hat-Profil verwendet, welches beim LS gänzlich unbekannt jedoch beim LM von Metallen durchaus bekannt ist [OFA+16]. Das Top-Hat-Profil reduziert die Peakintensität der Laserstrahlung und liefert eine konstante Intensität über die Laser-spotbreite (Rechteck-Profil). Mittels Top-Hat-Profil lässt sich bei gleicher Energiedichte eine höhere relative Dichte von 95,6 % im Vergleich zum Gauß-Profil mit 92,6 % erzielen. Bei der Zugfestigkeit von in der Bauebene orientierten Prüfkörpern zeigt sich ebenfalls mit 64,5 MPa ein höherer Wert im Vergleich zu 47,2 MPa beim Gauß-Profil. Im Dünnschnitt lässt sich bei den mit dem Top-Hat-Profil gefertigten Bauteilen der Schichtaufbau nicht nachweisen, was auf einen besseren Schichtverbund hindeuten kann. Daraus ergibt sich die Vermutung der Autoren, dass das Top-Hat-Profil eine höhere Eindringtiefe in das Pulverbett bewirkt. Eine Begründung wird nicht gegeben. [IN16]

Chatham et al. verdeutlichen die Verarbeitung von PPS auf einer konventionellen LS-Anlage (DTM Sinterstation) bei einer Raumtemperatur von 230 °C ohne Fixierung der Bauteile an eine Bauplattform. Aus Einschichtprüfkörpern wird eine zum vollständigen Aufschmelzen benötigte Flächenenergiedichte von 0,066 J/mm² identifiziert. Ab einer Flächenenergiedichte von 0,088 J/mm² tritt Rauch und eine dunkle Verfärbung der Prüfkörper auf.

Bei Prüfkörpern mit unveränderlicher Querschnittsfläche in Baurichtung lässt sich damit eine relative Dichte von 98 % realisieren. Bei sich ändernder Querschnittsfläche ist eine geringere relative Dichte von 89 % zu verzeichnen. Die Vermutung der Autoren für eine höhere Dichte bei sich nicht verändernden Querschnitten liegt in der lokalen Konzentration der Wärme durch die wiederholte Belichtung des gleichen Bereichs je Schicht in Kombination mit der geringen Wärmeleitfähigkeit von Pulver und Polymer. Bei sich verändernden Querschnitten, wie z.B. bei komplexen Strukturen oder anders orientierten Prüfkörpern, ändert sich der Belichtungsbereich schichtweise und die Konzentration der Wärme findet in geringerem Maße statt. Diese Vermutung lässt sich anhand der schlechteren mechanischen Eigenschaften bei um 10° zum Pulverbett geneigten Prüfkörpern ($R_m=51 \text{ MPa}$, $E=2350 \text{ MPa}$, $\varepsilon=2,2\%$) im Vergleich zu in der Bauebene orientierten Prüfkörpern ($R_m=62 \text{ MPa}$, $E=2440 \text{ MPa}$, $\varepsilon=3,3\%$) verifizieren. Nicht zu vernachlässigen ist bei den um 10° geneigten Prüfkörpern jedoch die zunehmende Anzahl an Grenzflächen. [CLW19b]

4 Forschungsbedarf, Zielsetzung und Vorgehensweise

Zum NTLS-Prozess sind wenige Forschungsergebnisse, die im Wesentlichen durch eine japanische Forschungsgruppe geprägt sind und unter bestimmten, schlecht übertragbaren Rahmenbedingungen entstanden sind, vorhanden (Kapitel 3). Erste Veröffentlichungen sind bereits vor über 10 Jahren erschienen, der Stand der Forschung zeigt jedoch, dass der Prozess bis dato nur unzureichend untersucht ist. Im Folgenden wird daher der Forschungsbedarf aufgedeckt, die Zielsetzung dieser Arbeit daraus abgeleitet und die Vorgehensweise beschrieben.

4.1 Forschungsbedarf

Zwei entscheidende Nachteile des LS-Prozesses sind die geringe Materialvielfalt und die geringe Recyclingrate des nicht aufgeschmolzenen Pulvermaterials. Hochleistungs- bzw. Hochtemperatur-Materialien sind gefragt, werden erforscht und erscheinen vereinzelt auf dem Markt wie z.B. das EOS PEEK HP3. Sie sind jedoch nur auf speziellen und kostspieligen LS-Anlagen, wie vermutlich der einzigen kommerziellen Anlage zur Verarbeitung von PAEK Werkstoffen der EOS P800 mit einer maximalen Bauraumtemperatur von 385 °C, verarbeitbar [CLW19b; KYN22; BEG15; SMB+17; HDK18]. Konventionelle Anlagen mit maximalen Bauraumtemperaturen von 200 °C bis 280 °C stoßen dabei an ihre Grenzen [SMB+17; CLW19b; KYN21]. Um dennoch HT-Kunststoffe auf konventionellen Anlagen zu verarbeiten und die Recyclingfähigkeit von Standard-Werkstoffen wie PA12 zu verbessern, tritt das NTLS in Erscheinung.

Für die in Kapitel 3 aufgeführten Forschungsergebnisse werden im Wesentlichen experimentelle Anlagenaufbauten genutzt, die unter anderem mit veränderlichen Laserspotdurchmessern oder unterschiedlichen Laser-Intensitäts-Profilen ausgestattet sind. Zum Einsatz kommen weiterhin die DTM Sinterstation und die Aspect RaFaEi300 mit CO₂- und Faser-Laser als konventionelle LS-Anlagen, die jedoch im Hinblick auf einen möglichen industriellen Einsatz des NTLS-Prozesses einen geringen Stellenwert im Markt innehaben. Auf konventionellen LS-Anlagen der Maschinenhersteller EOS und 3D-Systems, die den globalen Markt nahezu vollständig beherrschen, sowie Farsoon, der ebenfalls über einen erwähnenswerten Marktanteil verfügt [Sch22], wurde der NTLS-Prozess bisher nicht untersucht. Durch die Unterschiede in den Anlagenaufbauten sind die Forschungsergebnisse aus der Literatur nur schwer auf konventionelle LS-Anlagen der genannten Hersteller übertragbar.

Verglichen mit dem konventionellen LS-Prozess zeigen die Forschungsergebnisse zum NTLS von PA12 ein weitestgehend geringeres und unzureichendes Dichteniveau sowie geringere Festigkeiten und Steifigkeiten bei erhöhter Duktilität in Abhängigkeit verschiedener Prozessparameter. Die erhöhte Duktilität bzw. Bruchdehnung ergibt sich aus einer nachgewiesenen geringeren Kristallinität. Bei den Werkstoffen PA11, PEEK und PPS sind

ebenfalls ein geringeres Dichteniveau sowie bei PEEK und PPS geringere Festigkeiten und Steifigkeiten bei ähnlich sprödem Materialverhalten wie im LS festzustellen. Generell unterliegen die in der Literatur aufgeführten Messwerte starken Schwankungen, die in Kombination mit den schlechteren mechanischen Eigenschaften einem industriellen Einsatz, der reproduzierbare Eigenschaften voraussetzt, entgegensprechen. Zudem werden die in der Literatur aufgeführten mechanischen Eigenschaften ausschließlich für in der Baubene orientierte Prüfkörper (XYZ-Orientierung) bestimmt. Für die Auslegung von Bauteilen sind jedoch die mechanischen Eigenschaften in Aufbaurichtung entscheidend, da diese aufgrund des Schichtverbunds die schwächsten Werte der anisotropen Eigenschaften aufweisen. Im Sinne der Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit wäre es zudem wünschenswert die durch Kigure et al. für den NTLS-Prozess von PA12 bei 130 °C nachgewiesene reduzierte Auffrischrate von 10 % [KN17] weiter zu reduzieren und durch Prozessoptimierung eine vollständige Recyclingfähigkeit des Materials zu realisieren. Das Pulver könnte nach dem Bauprozess ohne aufwändigen Auffrischprozess direkt wiederverwendet werden. Aufgrund der gefertigten Bauteile und dem damit einhergehenden Pulververbrauch müsste dem Kreislauf jedoch in regelmäßigen Abständen Pulver mit gleichem MVR-Wert hinzugefügt werden.

4.2 Zielsetzung

Das aus dem Forschungsbedarf abgeleitete Ziel dieser Arbeit ist es, den NTLS-Prozess auf einer auf dem Markt weit verbreiteten Anlage, in diesem Fall einer unmodifizierten EOS P396, mit dem Material PA12 zu entwickeln, auf Prozessierbarkeit zu untersuchen und den Prozess zu optimieren. PA12 bietet zum Einstieg auf der EOS P396 im Vergleich zu kommerziellen und experimentellen HT-Materialien den Vorteil, dass es im LS-Prozess wissenschaftlich umfangreich untersucht ist und auch im NTLS-Prozess Forschungsergebnisse veröffentlicht sind. Weiterhin weist es im Vergleich zu HT-Materialien eine gute Verfügbarkeit auf und ist vergleichsweise kostengünstig zu beziehen. Die Bauteileigenschaften sollen durch Optimierung der Prozessparameter, insbesondere der Belichtungsparameter und -strategie, maximiert und den im LS-Prozess generierbaren Bauteileigenschaften angenähert werden. Dabei sollen neben der Bauraumtemperatur verschiedene Einflüsse wie Schichtzeiten und die Schichtdicke in die Untersuchungen einfließen. Im Fokus sollen neben der Untersuchung von in der Baubene orientierten Bauteilen auch weitere Orientierungen vor allem in Aufbaurichtung stehen. Weiterhin wird das Ziel verfolgt, die Prozesstemperatur bei gleichzeitig adäquaten Bauteileigenschaften so einzustellen, dass die thermische Schädigung des nicht aufgeschmolzenen, umliegenden Materials vollständig verhindert und eine vollständige Recyclingfähigkeit realisiert werden kann.

Weiterhin sollen die gewonnenen Erkenntnisse zum NTLS-Prozess auf einer EOS P396 auf das Material PA6 übertragen werden. Das gewählte PA6 ist aufgrund der notwendigen Bauraumtemperatur von über 200 °C im konventionellen LS nicht auf einer EOS P396

verarbeitbar. Durch die Verarbeitung des PA6 im NTLS soll also eine Erweiterung des Materialportfolios für die EOS P396 angestrebt werden.

4.3 Vorgehensweise

Um die angestrebten Ziele dieser Arbeit zu realisieren, wird zunächst die Verarbeitbarkeit des wissenschaftlich umfangreich untersuchten PA12 im NTLS experimentell auf der EOS P396 untersucht und im Zuge dessen eine Methodik entwickelt. Abschließend wird diese Methodik auf die Verarbeitung von PA6 im NTLS übertragen.

Zur Umsetzung des NTLS von PA12 auf der EOS 396 werden die Bauteile zur Vermeidung von Curling und Verzug an einer Bauplattform fixiert. Aus diesem Grund wird mit Voruntersuchungen zur Bauplattform und der Anbindung an dieser sowie zur Bauraumtemperatur und einer ersten Eingrenzung der bei reduzierter Bauraumtemperatur erhöhten Flächenenergiedichte begonnen. Darauf aufbauend wird eine Vorstudie zur Optimierung der Belichtungsparameter hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften und Dichte von in XYZ-Orientierung direkt und flächig auf der Bauplattform fixierten Zugstäben bei zuvor festgelegter, deutlich reduzierter Bauraumtemperatur durchgeführt. Um die flächige Fixierung der Bauteile zu umgehen und weitere Orientierungen sowie komplexere Bauteile fertigen zu können, werden Supportstrukturen und die zugehörigen Belichtungsparameter zur Anbindung gegen Curling und Verzug entwickelt. Anschließend erfolgt eine umfangreiche Entwicklung und Optimierung von Prozess- bzw. Belichtungsparametern für die XYZ- und ZXY-Orientierung unter Anwendung von Mehrfachbelichtung jeder Bauteilschicht zur Steigerung der Koaleszenz des Materials und somit der Dichte und mechanischen Eigenschaften. Im Zuge dessen werden die Einflüsse der verschiedenen Belichtungsparameter wie der Energiedichte, der Laserleistung, der Scangeschwindigkeit, des Hatchabstands sowie der Belichtungsanzahl ermittelt. Zudem werden die Einflüsse der Schichtzeit, der Bauraumtemperatur und der Schichtdicke untersucht und weiterhin die Mikrostruktur betrachtet. Im Anschluss wird das Post-Processing des NTLS beleuchtet und die im Prozess auftretende Alterung des umliegenden Materials bewertet.

Auf Basis der Ergebnisse zu PA12 und der entwickelten Methode mit Mehrfachbelichtung wird die Verarbeitbarkeit von PA6 im NTLS experimentell untersucht. Nach der generellen Machbarkeitsuntersuchung werden die Belichtungsparameter in geringem Umfang variiert und die resultierende Dichte sowie die resultierenden mechanischen Eigenschaften ermittelt. Im Weiteren wird die Materialalterung des PA6 grundlegend betrachtet.

5 Entwicklung einer Methode für das NTLS von PA12 auf einer konventionellen LS-Anlage

In den vorangegangenen Kapiteln ist der Stand der Forschung zum NTLS mit verschiedenen Ansätzen, Materialien und (experimentellen) LS-Anlagen sowie der daraus resultierende Forschungsbedarf mit abgeleiteter Zielsetzung dieser Arbeit dargelegt. Im Rahmen dieses Kapitels wird auf die Untersuchung des NTLS von PA12 auf einer konventionellen, unmodifizierten LS-Anlage eingegangen.

Zunächst werden der verwendete Ansatz für die Verarbeitung von PA12 bei niedrigen Bauraumtemperaturen sowie die Rahmenbedingungen vorgestellt. Zur generellen Machbarkeitsuntersuchung des Ansatzes unter den gegebenen Rahmenbedingungen werden anschließend Voruntersuchungen und eine Vorstudie zur Anpassung von Belichtungsparametern aufgezeigt. Nachfolgend wird die experimentelle Entwicklung prozessfähiger Supportstrukturen veranschaulicht. Auf die Vorarbeiten aufbauend folgt in Abschnitt 5.6 der Kern des Kapitels in Form der Entwicklung und Optimierung von Belichtungsparametern sowie eine Einflussanalyse weiterer Prozessparameter hinsichtlich der resultierenden Bauteileigenschaften.

5.1 Vorstellung des verwendeten Ansatzes

Zur Verarbeitung von PA12 bei im Vergleich zum konventionellen LS verringerten Bauraumtemperaturen wird die in Kapitel 3.1 angesprochene Methode, bei der Bauteile ähnlich zum LM-Prozess mittels Supportstrukturen an eine Bauplattform angebunden werden, grundlegend verwendet. Die Bauraumtemperaturen sind aufgrund der in Kapitel 3.1 aufgeführten Vorteile geringer als das für den LS-Prozess benötigte, materialspezifische Prozessfenster zwischen den Onset-Punkten des Schmelze- und Kristallisationspeaks (Bild 3-1). Aufgrund dessen liegt das Material nach dem Aufschmelzvorgang nicht über einen längeren Zeitraum im metastabilen Zustand der unterkühlten Schmelze, wie im LS vor, und neigt zur vorzeitigen Kristallisation. Das durch die vorzeitige Kristallisation hervorgerufene Curling der ersten Bauteilschichten und der Verzug des gesamten Bauteils soll durch die Fixierung der Bauteile durch Supportstrukturen an eine in die LS-Anlage integrierte Bauplattform verhindert werden und die Prozessfähigkeit sicherstellen. Die Unterschiede des NTLS zum LS sind im schematischen Anlagenaufbau in Bild 5-1 dargestellt und benannt. Aufgrund des geringeren Temperatur- und damit einhergehenden Energieniveaus im Pulverbett bzw. auf der Pulverbettoberfläche wird im Gegensatz zum LS die für den Aufschmelzvorgang benötigte Energie größtenteils über die Laserstrahlung bereitgestellt, weshalb im NTLS eine Anpassung der Belichtungsparameter zu einer höheren Laserenergie-dichte erfolgt. Aufgrund der Anpassungen im Prozess ergeben sich im Vergleich zum LS Änderungen in der Prozesskette. In der Datenvorbereitung müssen die Bauteile zusätzlich mit Supportstrukturen versehen werden. In der Nachbearbeitung erfolgt nach der

Entpulverung des Baujobs das Lösen der Bauteile von der Bauplattform und das Entfernen (ggf. mit spanender Bearbeitung) der Supportstrukturen.

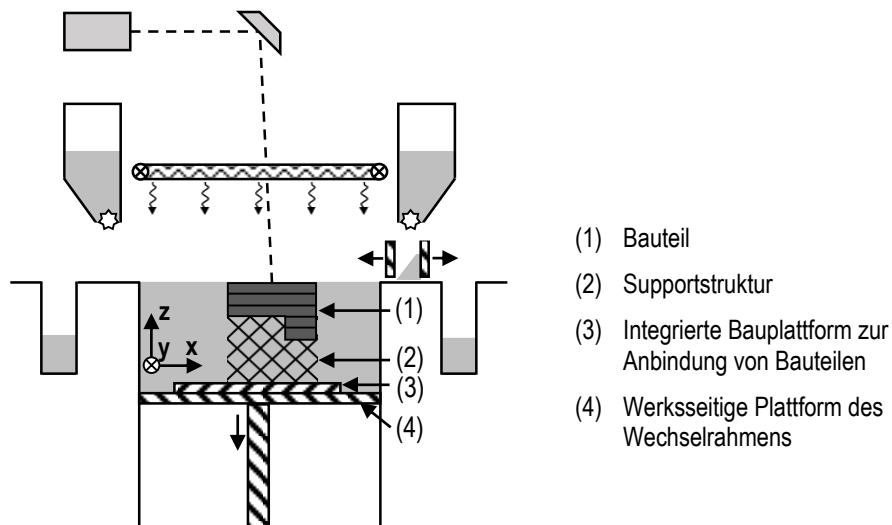


Bild 5-1: Prozesstechnische Anpassungen im NTLS-Prozess verglichen zum LS-Prozess (vgl. Bild 2-3)

5.2 Rahmenbedingungen

Zur Untersuchung des NTLS-Prozesses wird eine EOS P396 LS-Anlage des Herstellers EOS GmbH, welche zum Zeitpunkt der Untersuchungen die neueste Anlagengeneration der EOS P3 Anlagen ist, verwendet. Die wichtigsten Merkmale der EOS P396 sind in Tabelle 5-1 aufgeführt. Die P396 ist ein geschlossenes System, das im Rahmen dieser Arbeit durch den optional erhältlichen Parametereditor die Anpassung der Belichtungsparameter zulässt. Festzuhalten ist ebenfalls, dass die P396 über einen Doppelklingenbeschichter verfügt, welcher Nachteile im Auftrag von schlecht fließfähigem Pulver aufweist [Sch22] und weniger Fehler in der Prozessführung im Vergleich zum Rollenbeschichter hinsichtlich leichtem Curling verzeiht. Die Datenvorbereitung für die Baujobs der experimentellen Untersuchungen erfolgt in der Software Magics der Firma Materialise GmbH, auf die für den NTLS-Prozess spezifische Vorgehensweise wird in Abschnitt 5.4.1 eingegangen.

Tabelle 5-1: Relevante technische Daten einer EOS P396 [EOS22a]

Bauvolumen	mm ³	340 x 340 x 600
Lasertyp und -leistung	W	CO ₂ , 70
Max. Bauraumtemperatur	°C	200
Mögliche Schichtdicken	µm	60, 100, 120, 150, 180
Max. Scangeschwindigkeit	mm/s	6000
Temperaturmessung an der Pulverbettoberfläche		Punktpyrometer
Beschichtersystem		Doppelklingenbeschichter

Materialseitig wird auf das PA12 Material der Firma EOS GmbH mit der Handelsbezeichnung PA2200 zurückgegriffen. Im Zuge der Untersuchungen wird das Material nach Herstellervorgaben mit einem Mischungsverhältnis von 50 % Frischpulver (FP) und 50 % Recyclingpulver (RP) aus dem konventionellem LS-Prozess verwendet [EOS15]. Bei diesem Mischungsverhältnis stellt sich je nach Zustand des Recyclingpulvers ein MVR-Wert von ca. 36 bis 40 cm³/10min (235 °C, 5 kg) [Rüs15] bzw. 25 bis 42 cm³/10min (235 °C, 5 kg) nach einem Ringversuch des Vereins Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) [VDI 3405-1.1] ein. Verarbeitet wird das PA2200 auf einer EOS P396 im konventionellen LS-Prozess standardmäßig bei einer Bauraumtemperatur von ca. 170 °C bis 180 °C, einer Schichtdicke von 120 µm und einem durch den Bediener nicht einsehbaren und anpassbaren Belichtungsparameterset der EOS GmbH [EOS15]. Tabelle 5-2 führt die im Rahmen dieser Arbeit relevanten Eigenschaften aus dem Datenblatt des PA2200, die wahre Dichte von PA12 und relevante Temperaturen aus einer DSC-Wärmestromkurve auf.

Tabelle 5-2: Material- und LS-Bauteileigenschaften des PA2200

Mechanische Eigenschaften		Wert		Quelle
Zugfestigkeit*	MPa	48	(XYZ-Orientierung)	[EOS22b]
		42	(ZXY-Orientierung)	
E-Modul*	MPa	1650	(beide Orientierungen)	[EOS22b]
Bruchdehnung*	%	18	(XYZ-Orientierung)	[EOS22b]
		4	(ZXY-Orientierung)	
Thermische Eigenschaften				
Schmelztemperatur	°C	176		[EOS22b]
Schmelzpeak	°C	191		[Kum22]
Beginn der Schmelze ($T_{S,\text{onset}}$)	°C	165		[Kum22]
Kristallisationspeak	°C	135		[Kum22]
Beginn der Kristallisation ($T_{K,\text{onset}}$)	°C	149		[Kum22]
Weitere Eigenschaften				
Dichte (lasergesintert)*	g/cm ³	0,930	(EOS-Methode)	[EOS22b]
		0,991	(Archimedes)	[Rüs15]
Wahre Dichte PA12	g/cm ³	1,01 - 1,03		[Kei06; BHM19; YKI+21; BBO+13]

* Schichtdicke: 120 µm, EOS Part Property Profile Balance, Mischungsverhältnis: 50 % FP und 50 % RP

5.3 Versuchsaufbau und Voruntersuchungen

Um den NTLS-Prozess auf einer EOS P396 LS-Anlage umsetzen zu können, müssen zunächst einige Voruntersuchungen zur Erarbeitung der weiteren Rahmenbedingungen umgesetzt werden. Dazu zählen Untersuchungen an der zu integrierenden Bauplattform hinsichtlich der Verwendbarkeit im Prozess und der prozessfähigen Bauteilhaftung. Zudem erfolgen erste Untersuchungen der Verarbeitbarkeit, um die Prozessparameter für die darauffolgenden Untersuchungen abzustecken. Die Untersuchungen und Daten dieses Abschnitts sind zum Teil im Rahmen der studentischen Arbeiten von Erlemeier [Erl19] und Radke [Rad21] entstanden.

5.3.1 Bauplattform und Anbindung

Anforderungen:

Nach der zuvor beschriebenen Methode muss der LS-Anlage für den NTLS-Prozess eine Bauplattform zur Fixierung der Bauteile hinzugefügt werden. Für eine ausreichende Prozessfähigkeit muss die Bauplattform verschiedene Anforderungen erfüllen. Zunächst muss die Bauplattform absolut eben und zudem zum Beschichter ausrichtbar sein, um eine möglichst homogene erste Pulverschicht mit konstanter Schichtdicke über die gesamte Plattform realisieren zu können. Kernanforderung ist, dass die ersten Bauteilschichten im Prozess einen starken Verbund mit der Plattform eingehen können, um das Lösen und einhergehende Curling der ersten Bauteilschichten sowie den Verzug des gesamten Bauteils im weiteren Prozessfortschritt zu vermeiden. Die Plattform selbst darf sich im Prozess aufgrund der Prozesstemperaturen oder bei starkem Verzug von Bauteilen bei gleichzeitig starker Haftung nicht verziehen. Wünschenswert wäre zudem eine gute Ablösbarkeit der Bauteile von der Bauplattform im Anschluss an den Prozess, was grundsätzlich im Gegensatz zur vorher genannten Kernanforderungen einer guten Bauteilhaftung steht.

Anbindungsmöglichkeiten bzw. mögliche Fügeprinzipien:

Um die Kernanforderungen der prozessfähigen Bauteilhaftung an der Bauplattform zu erfüllen, werden zwei Ansätze verfolgt. Zum einen wird die Haftung auf einer Metall- und zum anderen auf einer Kunststoffplattform betrachtet.

Bei der Kunststoff-Metall-Verbindung handelt es sich um einen thermischen Hybridfügeprozess. Problematisch sind bei der Kunststoff-Metall-Verbindung generell die unterschiedlichen Schmelztemperaturbereiche und die chemische Unverträglichkeit der Werkstoffe, weshalb eine stoffschlüssige Verbindung ausgeschlossen und nicht von einem Schweißverfahren gesprochen werden kann. Der hier vorliegende Prozess ähnelt dem thermischen Fügeprozess des Laserstrahlfügens. Durch das Aufschmelzen der dünnen Kunststoffschicht, wird die Metalloberfläche durch die Schmelze benetzt und die Schmelze dringt in die oberflächlichen Strukturen der Metallplattform ein. Eine formschlüssige Verbindung

zwischen Kunststoff und Metalloberfläche entsteht. Neben der mechanischen Adhäsion können ebenfalls physikalische und chemische Wechselwirkungen entstehen [Flo11; Gro09; Str21].

Im Fall der Kunststoff-Kunststoff-Verbindung handelt es sich um einen Schweißprozess von Thermoplasten, der nach DIN 35230 als ein Verfahren definiert ist, welches durch Aufschmelzen der Fügepartner eine dauerhafte, stoffschlüssige Verbindung erzielt [DIN 35230]. Die Verbindung entsteht durch Verkettung und Verknäueln der Polymerketten an den Grenzflächen [FST14]. Eine wesentliche Einschränkung ist, dass in der Regel nur gleichartige bzw. chemisch kompatible Thermoplaste miteinander schweißbar sind [FST14]. Aus diesem Grund weisen Polyamide eine gute Schweißbarkeit untereinander auf, sodass das im Zuge der Untersuchungen genutzte PA12 grundsätzlich mit PA6, PA6.6, PA11 und PA12 schweißbar ist [Kle11; Pot04; BBO+13]. Das Schweißen einer dünnen Pulverschicht an eine Bauplattform ähnelt dabei dem Kunststoff-Schweißprozess des Laserstrahlschweißens [FST14].

Integration einer Bauplattform in die EOS P396 und Ablage der ersten Pulverschicht:

Den Anforderungen ist zu entnehmen, dass die zu integrierende Bauplattform ausrichtbar sein muss, damit die erste Schicht mit möglichst homogener Schichtstärke auf dem gesamten Baufeld aufgetragen werden kann. Das liegt daran, dass die als Basis dienende Plattform des Wechselrahmens in der EOS P396 (siehe Bild 5-1) nicht vollends parallel zum Beschichter ausgerichtet ist. Für den konventionellen Prozess ist dies nicht notwendig und daher nicht vorgesehen, da zu Beginn eine mehrere Millimeter dicke Bodenschicht abgelegt wird und sich dadurch die Parallelität zum Beschichter einstellt. Zur Ausrichtung der zu untersuchenden Plattformen wird eine 10 mm dicke Justierplattform aus Aluminium als Basis in die Anlage integriert (siehe Bild 5-2). Über versenkte Stellschrauben lässt sich die Parallelität einstellen.

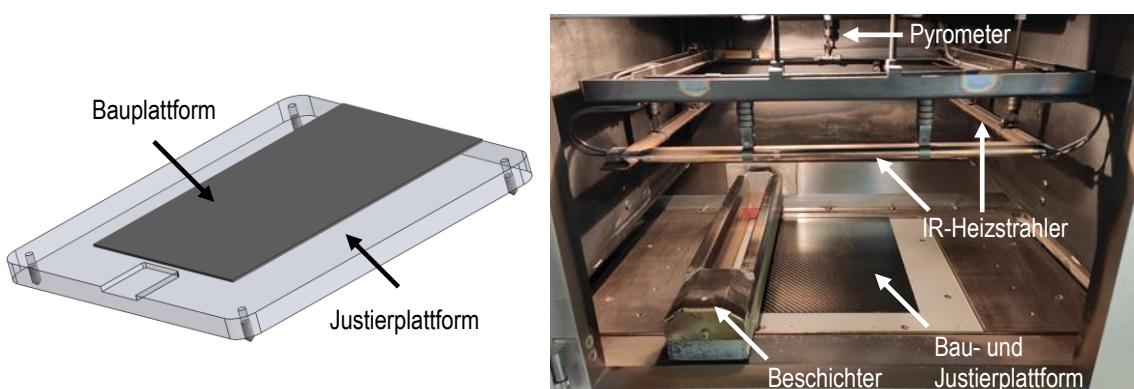


Bild 5-2: Modell der Bau- und Justierplattform (links) und Bauraum mit integrierter, exemplarischer Bau- und Justierplattform (rechts) (nach [MS21])

Die Ausrichtung erfolgt im Zuge des Rüstens der Anlage bei der Ablage der ersten Pulverschicht. Der Ablage der ersten Schicht kommt eine hohe Relevanz zu, da angenommen werden kann, dass sie einen hohen Einfluss auf die Bauteilanbindung hat. Es wird weiterhin erwartet, dass sich eine möglichst dünne erste Schicht positiv auf die Anbindung auswirkt. Zur Erzeugung einer möglichst dünnen, homogenen Schicht wird zunächst eine dicke Pulverschicht ($> 1 \text{ mm}$) aufgetragen. Anschließend wird die Schichtdicke durch sukzessives Anheben der werksseitigen Plattform und Abschaben mit dem Beschichter reduziert. Dies wird zunächst in größeren Schritten von 200 bis 500 μm und, sobald die Plattform durch die Pulverschicht erkennbar ist, in kleineren Schritten von 50 μm , bis ein Kratzen des Beschichters an der Plattform wahrnehmbar ist, durchgeführt. Im letzten Schritt kann auf der zuletzt kratzfreien Position nachbeschichtet werden, um final eine homogene und möglichst dünne Schicht zu erhalten. Stellt sich während dieses Ablaufs heraus, dass die Schichtdicke über der Baufläche, z.B. von links nach rechts, durch ungleich ausgeprägtes Durchschimmern der Bauplattform deutlich inhomogen ist (siehe Bild 5-3, links) muss die Ausrichtung der Bauplattform angepasst werden. Dafür werden die Stellschrauben freigelegt und die Plattform auf Basis der wahrgenommenen Ausprägung der Verkippung ausgerichtet. Anschließend wird der Prozess zur Generierung der ersten Schicht erneut durchgeführt und währenddessen auf anhaltende Verkippung geprüft. Dieses Vorgehen wird wiederholt bis eine zufriedenstellende erste Pulverschicht, wie in Bild 5-3 (rechts) dargestellt, erzeugt werden konnte. Vorteilhaft für dieses Vorgehen ist eine zum weißen Pulver kontrastreiche Farbe der Bauplattform. Zum Vorheizen der Anlage wird bei ausgerichteter Plattform erneut eine dicke Pulverschicht appliziert, um im vorgeheizten Zustand eine frische erste Schicht zu generieren, da sich die Plattform und das Pulver durch das Vorheizen ausdehnen und je nach Temperatur die Bildung von Agglomeraten oder Schollen auftreten kann. Die erste Beschichtung des Prozesses würde die homogene Schicht zerstören oder der Beschichter mit der Plattform kollidieren, weshalb die erneute Ablage der ersten Schicht nach dem Vorheizen unabdingbar ist.

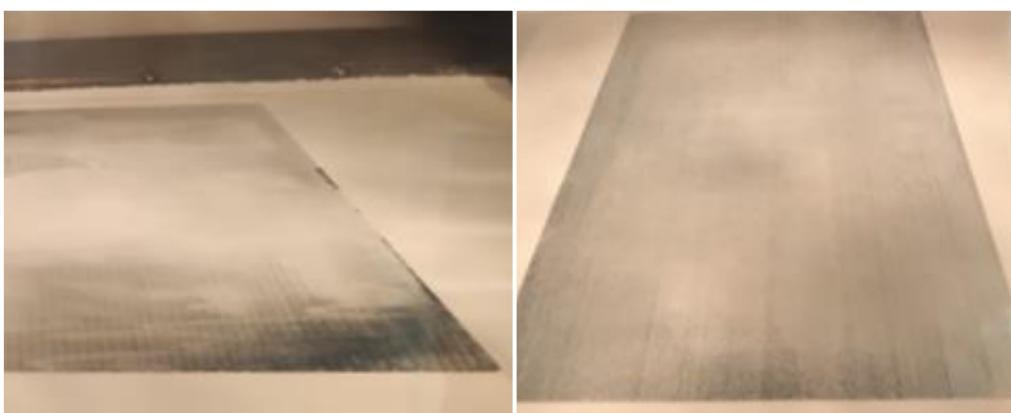


Bild 5-3: Inhomogene erste Schicht (links) und homogene erste Schicht (rechts) [MS21]

Untersuchung der Prozessfähigkeit verschiedener Bauplattformen:

Auf Basis der definierten Anforderungen und der möglichen Fügeprinzipen werden verschiedene Bauplattformen ausgewählt. Für die Kunststoff-Metall-Verbindung wird eine Aluminiumplattform verwendet. Hinsichtlich der Kunststoff-Kunststoff-Verbindung durch Schweißen werden verschiedene thermoplastische Bauplattformen auf Basis von PA6 und PA12 betrachtet, was dem Vorgehen nach [NHI+11] ähnelt. Für die Untersuchungen wird ein breiter Parameterraum verschiedener Bauraumtemperaturen ($T=60-150\text{ }^{\circ}\text{C}$) und Belichtungsparameter ($P=30-50\text{ W}$, $v=2000-5000\text{ mm/s}$, $d=0,14\text{ mm}$) stichprobenartig auf die verschiedenen Plattformen angewendet, da zu diesem Stand der Untersuchungen keine Erfahrungen mit dem NTLS-Prozess vorliegen und es ausschließlich um eine potenzielle Anbindung an die Bauplattform oder um die Anwendbarkeit der Bauplattform selbst geht. Zum Einsatz kommen zunächst einfache, würfel- oder quaderförmige Prüfkörper und im späteren Verlauf Zugstäbe des Typs 1BA und 1A (Tabelle 2-1), die ohne Supportstrukturen direkt auf der Bauplattform angebunden werden sollen. Zum Teil wird an dieser Stelle auf Erkenntnisse zur Bauplattform, die in späteren Untersuchungen ungewollt in Erscheinung treten, eingegangen.

Die Untersuchung der Kunststoff-Metall-Verbindung mit einer Aluminiumplattform, welche im Vorfeld zu einer möglichen Verbesserung der mechanischen Adhäsion durch Strahlen mit Korund aufgeraut wird [Flo11], zeigt zunächst, dass die Werkstoffe eine feste Verbindung eingehen können. Es stellt sich jedoch heraus, dass dieser Vorgang nicht reproduzierbar ist und die Anbindung nur stellenweise und nicht flächig erzielt werden kann. Dadurch können nur wenige Schichten aufgetragen und belichtet werden, ehe der Beschichter mit den belichteten Bereichen kollidiert. Die stellenweise angebundenen Bereiche des PA12 sind in Bild 5-4 zu erkennen. Sie zeigen eine derart starke Haftung, dass sie ohne Weiteres nicht durch Strahlverfahren abgetragen werden können. Aufgrund der fehlenden flächigen und reproduzierbaren Haftung wird die Aluminiumplattform jedoch nicht weiter in Betracht gezogen.



Bild 5-4: Unvollständige und nicht reproduzierbare Anbindung des PA12 an der Aluminiumplattform (Bild links aus [MS21])

Im Zuge der Untersuchung der Kunststoff-Kunststoff-Verbindung werden zunächst spritzgegossene PA6-Plattformen und eine heißgepresste PA12 Plattform (aus PA2200) auf Eignung getestet. Die Plattformen werden lose auf die Justierplattform gelegt oder mit dieser verschraubt. Insbesondere bei höheren Bauraumtemperaturen neigen die Plattformen, sowohl im losen als auch im mittig verschraubten Zustand dazu, sich an den Ecken nach oben zu verziehen, siehe Bild 5-5 (links unten). Bei der Verschraubung entlang des Randbereichs ist eine Wölbung im Zentrum der Plattform wahrnehmbar, siehe Bild 5-5 (links oben). Die Bauplattformen sind uneben und daher für den Prozess unbrauchbar. Die auftretenden Probleme sind auf die thermische Ausdehnung und Schwindung der Kunststoffe zurückzuführen. Abhilfe bei dieser Problematik schafft eine flächige Anbindung der PA-Plattformen zur Justierplattform mit Hilfe eines Hochtemperatur-Silikons. Das Silikon ist elastisch und lässt die thermische Ausdehnung zu, hält aber gleichzeitig die Plattform in der Ebene. Aufgrund der Schweißbarkeit der Polyamide lassen sich auf der Bauplattform Prüfkörper aufbauen und eine funktionsfähige Anbindung erzielen, wie in Bild 5-5 (rechts) zu erkennen.



Bild 5-5: Verzogene Bauplattformen aus PA12 (oben, links) und PA6 (unten, links) sowie angebundene Prüfkörper auf mit Silikon befestigter PA6-Plattform (rechts) (Bild links unten aus [MS21])

Da die Kunststoff-Plattformen grundsätzlich zur besseren Handhabbarkeit nicht an die Justierplattform angebunden werden sollen, um einen einfachen Tausch der Plattformen zu ermöglichen, werden die sich durch eine hohe Steifigkeit auszeichnenden Organobleche in Betracht gezogen. Organobleche bestehen aus einem Kohlenstoff- oder Glasfasergewebe und einer das Gewebe umschließenden thermoplastischen Matrix [HOZ+22]. Aufgrund des Faser-Gewebes sollte der Verzug der Plattform unter Temperatureinwirkung im Prozess unterbunden werden. Zum Einsatz kommen hier CFK- und GFK-Organobleche aus der Produktreihe Tepex® dynalite der Firma Bond Laminates GmbH mit PA6 als Matrixmaterial und einem Faservolumenanteil von 50 %. Die Untersuchungen mit einem auf der Justierplattform unbefestigtem Organoblech zeigen zunächst eine nach dem Vorheizen ebene Bauplattform mit guter Anbindung der ersten Schichten der Prüfkörper. Im Verlauf des Bauprozesses kann jedoch beobachtet werden, dass die Bauteiloberseiten bzw. -kanten

teilweise aus dem Pulverbett herauskommen, was während des Bauprozesses zur Kollision mit dem Beschichter und zum Prozessabbruch führt. Die Ursache kann nach dem Auspacken, also dem Entfernen des umliegenden Pulvers identifiziert werden. Durch die zum unkomplizierten Wechsel nicht vorhandene Anbindung der Organoblech-Bauplatzform zur Justierplatzform konnte das Organoblech dem Verzug des Bauteils nicht standhalten und verformt sich ebenfalls, siehe Bild 5-6 (oben). Die Anbindung des Bauteils zum Organoblech, hat sich währenddessen nicht gelöst, hält also den Verzugskräften stand und lässt sich daher als sehr gut bewerten. Um dem Verhalten entgegenzuwirken, lässt es sich nicht vermeiden die Organoblech-Platzform an die Justierplatzform anzubinden. Aufgrund der schwierigen Handhabbarkeit von Silikon, wie der gleichmäßigen Auftragung oder der Entfernung, wird ein temperaturstabiles, doppelseitiges Klebeband des Herstellers 3M (Typ: HB 5952F) zur großflächigen Anbindung des Organolechs verwendet. Die Untersuchung zeigt, dass die Verformung des Organolechs verhindert und eine sehr gute, prozessfähige Bauteilanbindung realisiert werden kann, siehe Bild 5-6 (unten). Zudem können die Bauteile trotz der guten Anbindung problemlos mit einem Spachtel von der Platzform gelöst werden. Untersuchungen an einem PA12-CFK-Organoblech derselben Produktreihe zeigen zwar ebenfalls eine gute, prozessfähige Anbindung, jedoch ist diese so stark, dass die Bauteile nicht zerstörungsfrei abgelöst werden können. Aus diesem Grund wird im Folgenden ein Organoblech mit PA6-Matrix unabhängig von Kohlenstofffaser- oder Glasfasergewebe für den NTLS-Prozess genutzt. Für eine erfolgreiche Anbindung kommen z.B. eine Raumtemperatur von 100 °C, eine Laserleistung von 50 W, eine Scangeschwindigkeit von 5000 mm/s und ein Hatchabstand von 0,14 mm mit daraus resultierender Flächenenergiedichte von 0,071 J/mm² zum Einsatz. Grundsätzlich lassen sich, wie im weiteren Verlauf der Arbeit zu vernehmen, verschiedene Parametersets mit entsprechend ausreichend hoher Flächenenergiedichte für eine erfolgreiche Bauteilanbindung nutzen.

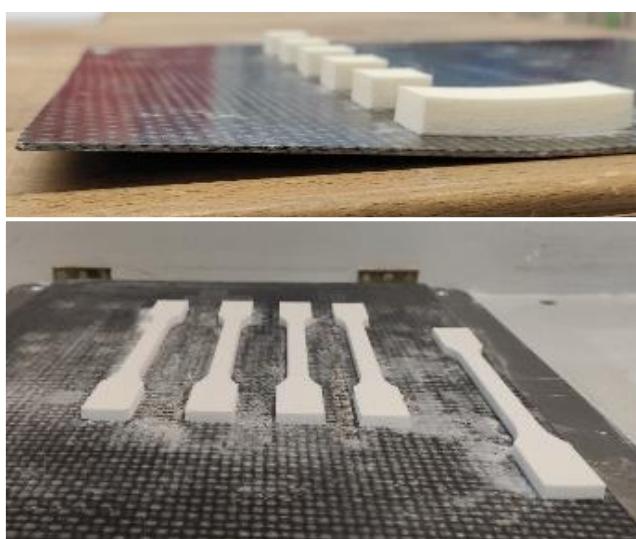


Bild 5-6: Durch Bauteilverzug verzogenes, nicht fixiertes Organoblech (oben) und fixiertes, prozessfähiges Organoblech (unten) [MS21]

Aus den Untersuchungen zur Anbindung an eine Organoblech-Bauplattform ist entscheidend festzuhalten, dass eine bessere Anbindung der jeweils ersten Bauteilschicht durch mehrfache Belichtung (drei- bis fünffach) mit jeweils der gegebenen Energiedichte generiert werden kann. Eine einfache Belichtung mit gegebener Energiedichte führt in der Regel zum Curling der ersten Bauteilschicht und anschließendem Prozessabbruch, da keine ausreichende Verbindung zur Plattform hergestellt werden kann. Nach Untersuchungen von Laumer et al. liegt die Absorption der CO₂-Laserstrahlung bei 90-95 % im Pulverbett von PA2200 [LSN+16], woraus jedoch lediglich eine geringe Eindringtiefe der Strahlung von 80 bis 110 µm resultiert [YKI+21], sodass je nach tatsächlicher Dicke der ersten Pulverschicht die Eindringtiefe nicht ausreichend ist, um ein vollständiges Verschweißen der Plattform-Oberfläche mit der ersten Schicht zu erhalten. Durch Mehrfachbelichtung ist möglicherweise der Schweißprozess durch die zusätzlich eingebrachte und dadurch akkumulierte Energie stärker ausgeprägt. Außerdem stellen Laumer et al. und Heinl et al. fest, dass die Schmelze von PA12 aufgrund geringerer Streueffekte eine höhere Transmission als die nicht aufgeschmolzene Pulverschicht aufweist. Die Streuung in der kristallinen Struktur sowie zwischen den Partikeln in der Pulverschüttung wird durch den Aufschmelzvorgang, der die kristallinen Strukturen auflöst, reduziert bzw. verhindert [CY05; Fri07; LSB+15; HLB+18]. Infolge der höheren Transmission kann die Laserstrahlung in den darauffolgenden Belichtungsschritten tiefer in die Schmelzeschicht und insbesondere die Bauplattform eindringen und dadurch den Schweißverbund verbessern. Vorteilhaft ist zudem die schwarze Färbung des Polyamid-Organoblechs, welches die Absorption der Laserstrahlung erhöht.

Einfluss der Dicke der ersten Schicht auf die Anbindungsqualität:

Um die Annahme zu untermauern, dass eine möglichst dünne erste Schicht (Anbindungs- schicht) vorteilhaft für die Anbindungsqualität der Bauteile ist, werden unterschiedlich dicke erste Schichten aufgetragen und Prüfkörper auf die Stärke der Anbindung untersucht. Durch eine qualitative Abschätzung kann die Annahme bestätigen werden. Prüfkörper mit dickerer Anbindungsschicht lassen sich mit bloßer Hand entfernen, wohingegen Prüfkörper mit dünnerer Anbindungsschicht unter Zuhilfenahme von Werkzeug, wie einem Spachtel, von der Plattform getrennt werden müssen. Unterstützt wird dies weiterhin durch Rückstände der Plattform auf den Unterseiten der Prüfkörper, wie in Bild 5-7 zu sehen. Die Vermutung liegt hier nahe, dass bei einer dünneren Anbindungsschicht ein größerer Anteil der Laserstrahlung durch die Schicht transmittiert und den Schweißverbund mit der Bauplattform verbessert.



Bild 5-7: Rückstände an der Unterseite der Prüfkörper in Abhängigkeit der Dicke der Anbindungsschicht [Rad21]

5.3.2 Bauraumtemperatur

Als Basis für Untersuchungen zu den Belichtungsparametern wird zunächst die Bauraumtemperatur untersucht. Sie stellt den zentralen Parameter des NTLS-Prozesses dar und generiert bei PA12 einen entscheidenden Vorteil bei der thermischen Alterung des Materials und ermöglicht außerdem die Verarbeitbarkeit von HT-Materialien auf konventionellen LS-Anlagen. Josupeit zeigt anhand von künstlichen Alterungsversuchen im Ofen mit einem maschinenüblichen Restsauerstoffgehalt von 2 % unter Verwendung des MVR-Werts, dass bei einer Temperatur von 83,5 °C und Verweilzeiten bis zu 65 Stunden nahezu keine Alterung des Materials auftritt, wohingegen beim nächsten Messpunkt von 103,5 °C Alterung auch bei kurzen Verweilzeiten von wenigen Stunden zu verzeichnen ist [Jos19; JS17]. Auch in Untersuchungen von Dotchev et al. zeigt sich mittels MVR-Wert, dass Alterungerscheinungen bei 100 °C bei einer Verweildauer von wenigen Stunden auftreten [DY09]. Daraus ist zu folgern, dass die Grenztemperatur für die Alterung des PA12 im LS-Prozess zwischen den genannten Temperaturen bei einer Verweildauer von bis zu 65 Stunden liegt. Wünschenswert für den NTLS-Prozess wäre also eine prozessfähige Bauraumtemperatur von 80 bis 85 °C, um die thermische Alterung des Materials zu unterbinden und die Auffrischung des Materials mit Neupulver sowohl aus ökonomischen als auch ökologischen Gründen zu vermeiden. Aufgrund der Bauteilanbindung an die Bauplattform und eine daraus folgende vergleichsweise geringe Baujobhöhe wird eine Verweildauer von 65 Stunden nicht überschritten.

Im Folgenden wird daher die Verarbeitbarkeit bzw. Prozessierbarkeit bei verschiedenen Bauraumtemperaturen untersucht und die Bauteildichte analysiert. Dafür werden quaderförmige Dichte-Prüfkörper (20x20x10 mm³) mit einer standardmäßigen Schichtdicke von 120 µm bei Bauraumtemperaturen, die beginnend bei 110 °C mit jedem Baujob sukzessive in 5 bis 10 K Schritten bis 60 °C reduziert werden, gebaut. Zur erfolgreichen Anbindung der Prüfkörper werden, wie im vorherigen Abschnitt festgestellt, die untersten Schichten der

Prüfkörper mehrfach belichtet. Auf die hier bereits angewendete Vorgehensweise der Mehrfachbelichtung wird in Abschnitt 5.4.1 ausführlich eingegangen. Die verwendeten Belichtungsparameter mit einer Laserleistung von 50 W, einer Scangeschwindigkeit von 5000 mm/s und einem Hatchabstand von 0,14 mm mit daraus resultierender Flächenenergiedichte von 0,071 J/mm² bleiben im Rahmen dieser Untersuchungen konstant.

Die Untersuchungen zeigen, dass der Prozess bei höheren Bauraumtemperaturen ohne prozesskritisches Curling ablaufen kann. Ab einer Bauraumtemperatur von 70 °C treten vermehrt kritisches Curling mit Ablösung von der Bauplattform und daraus folgende Prozessabbrüche auf, sodass unter den gegebenen Belichtungsparametern eine prozessfähige Bauraumtemperatur von 80 °C identifiziert werden kann. Dies steht im Einklang mit der von Josupeit ermittelten Temperatur von 83,5 °C, bei der nahezu keine Alterungsvorgänge bis zu hohen Verweildauern von 65 Stunden im Material festzustellen sind [Jos19; JS17]. Grundsätzlich ist nach dieser Untersuchung nicht auszuschließen, dass tiefere Bauraumtemperaturen durch Anpassung der Belichtungsparameter stabil prozessierbar sind. Jedoch wird auf Basis dieser Untersuchung und der Erkenntnisse aus der Literatur zur temperaturabhängigen Alterung im Folgenden mit einer Bauraumtemperatur von 80 °C gearbeitet. Die Temperatur der Entnahmekammer, die bei den niedrigen Temperaturen eine eher untergeordnete Rolle spielt, wird im Rahmen der Arbeit der Bauraumtemperatur gleichgesetzt.

Zusätzlich zur Verarbeitbarkeit wird die Bauteildichte bei den betrachteten Temperaturen untersucht. Bild 5-8 stellt die Ergebnisse dar. Festzustellen ist, dass die Dichte im NTLS unabhängig von der gewählten Bauraumtemperatur geringer als die Dichte der Referenzprobe aus dem LS-Prozess ist. Weiterhin zeigt sich eine abnehmende Dichte mit abnehmender Bauraumtemperatur. Dieses Ergebnis ist aufgrund der konstanten Belichtungsparameter bei abnehmender Bauraumtemperatur, wodurch zunehmend weniger Gesamtenergie in die aufzuschmelzenden Bereiche eingebracht wird, grundsätzlich zu erwarten und stimmt mit den Ergebnissen von Hara et al. an PA12 [HIN14] und Yamauchi et al. an PA11 überein [YKN16; YNK17]. Yamauchi et al. begründen die abnehmende Dichte durch früher einsetzende Kristallisation und einhergehender kürzerer Zeit in der Schmelze [YKN16]. Die aufgetragene Pulverschicht enthält Luft zwischen den Partikeln, welche sich durch eine höhere Verweildauer in der Schmelze und damit ausgeprägterem Zusammenfließen der Schmelze zunehmend reduziert [YKI+21]. Weiterhin kann die geringere Dichte durch unzureichendes Aufschmelzen und eine verringerte Koaleszenz infolge zu geringer in das Pulverbett eingebrachter Energie erklärt werden, siehe Kapitel 2.1.4.

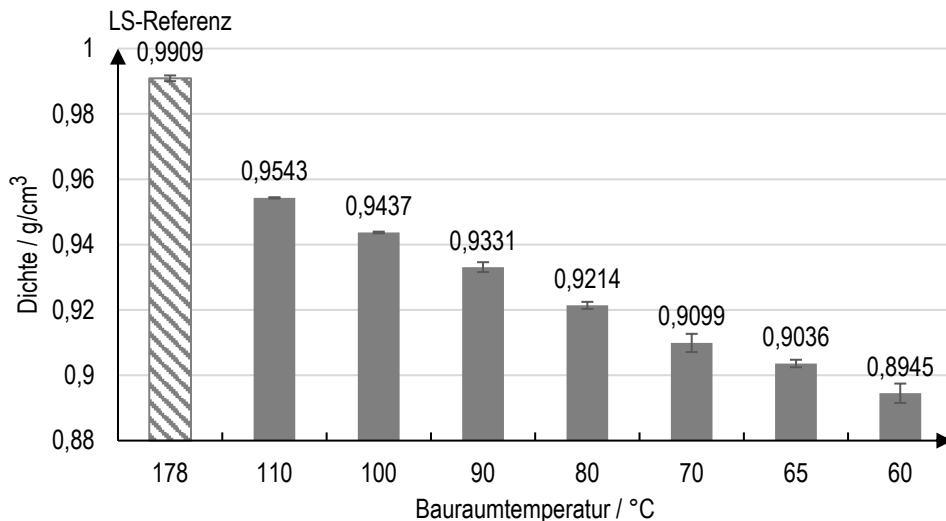


Bild 5-8: Dichte in Abhängigkeit der Bauraumtemperatur

5.3.3 Flächenenergiedichte

Beim NTLS muss der Laserenergieeintrag grundsätzlich den fehlenden Anteil der Vorheizung durch eine höhere Energiedichte als im konventionellen LS kompensieren. In den Untersuchungen zur Bauplattform und Bauraumtemperatur hat sich teilweise gezeigt, dass insbesondere während der Mehrfachbelichtung, bei der die Flächenenergiedichten bzw. der Energieeintrag der einzelnen Belichtungen akkumuliert werden, in den unteren Bauteilschichten mit Rauchentwicklung zu rechnen ist. Rauchentwicklung ist ein Anzeichen für zu hohe, eingebrachte Energiedichte ins Pulverbett und lässt auf thermische Zersetzung des Materials schließen [DWD14]. Durch die Zersetzung bildet sich Gas, welches zu sphärischen Zersetzungsgasporen im Bauteil mit negativen Folgen für die mechanischen Eigenschaften führt [DWD14; YKI+21; Weg15]. Eine stark ausgeprägte Rauchentwicklung kann außerdem zu Behinderungen im Prozess führen, da kein Rauchabzug in der Anlage vorgesehen ist und der Laserstrahl an den Partikeln im Rauch gestreut werden kann. Aus diesem Grund soll auf Basis der Rauchentwicklung eine erste obere Grenze für die Flächenenergiedichte bei Einfachbelichtung ermittelt werden. Dafür wird die Scangeschwindigkeit des in Abschnitt 5.3.2 verwendeten Parametersets schrittweise reduziert, sodass sich die in Tabelle 5-3 aufgeführten Scangeschwindigkeiten und zugehörigen Flächenenergiedichten ergeben. Auch hier werden die untersten Schichten für eine bessere Anbindung zunächst mehrfach belichtet. Auf die Untersuchung des Einflusses der Laserleistung wird an dieser Stelle verzichtet, um den Umfang der Voruntersuchungen gering zu halten. Der Einfluss der Laserleistung wird in den umfang- und detailreichen Untersuchungen in Abschnitt 5.6 betrachtet.

Tabelle 5-3: Variation der Scangeschwindigkeit und Flächenenergiedichte bei konstanter Laserleistung (50 W) und konstantem Hatchabstand (0,14 mm)

Parameterset	1	2	3	4	5
Scangeschwindigkeit	mm/s	5000	4000	3000	2000
Flächenenergiedichte	J/mm ²	0,071	0,089	0,119	0,179

Generell zeigt sich, dass bei allen Parametersets Rauchentwicklung auftritt und diese mit zunehmender Flächenenergiedichte intensiver wird. Bei Set 1 und 2 ist die Rauchentwicklung sehr gering ausgeprägt und unbedenklich. Ab Set 3, siehe Bild 5-9 (links), tritt eine verstärkte Rauchentwicklung auf, die in diesem Fall jedoch noch als unkritisch für Prozess und Material eingeschätzt wird. Ab Set 4, siehe Bild 5-9 (rechts), ist eine starke Rauchentwicklung zu verzeichnen, welche als kritisch eingestuft wird. Set 5 weist eine sehr starke, schwarze Rauchentwicklung auf. Dichter, auftretender Rauch kann im Bauraum zur Streuung der Laserstrahlung führen. Starker, dunkler Rauch ist ein Anzeichen für die Schädigung des Materials durch Zersetzung. Aufgrund dessen wird ein für die folgenden Untersuchungen vorläufiger prozessstabilier und materialunkritischer Richtwert für die Flächenenergiedichte von 0,12 J/mm² (Set 3) festgesetzt.

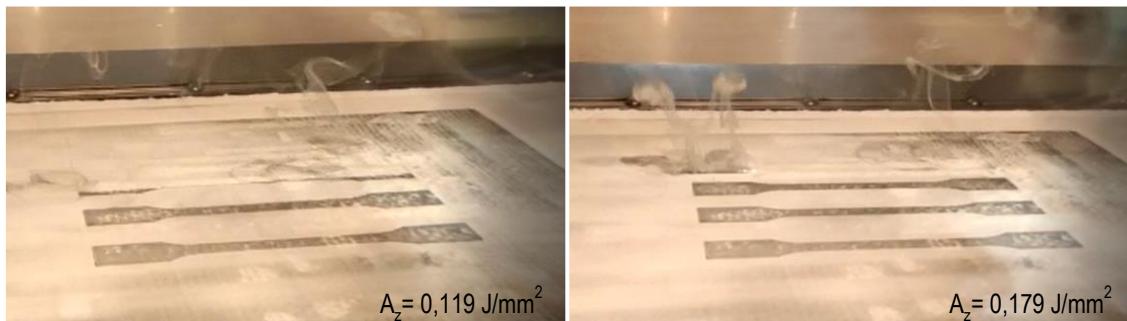


Bild 5-9: Für Prozess und Material als unkritisch (links) und kritisch (rechts) beurteilte Rauchentwicklung [MS21]

5.4 Vorstudie zur Optimierung der Belichtungsparameter mit direkter Fixierung der Prüfkörper auf der Bauplattform

Die erfolgreiche Anbindung der Bauteile an eine in die LS-Anlage integrierte Bauplattform und die Eingrenzung der Bauraumtemperatur sowie aus prozesstechnischer Sicht der Flächenenergiedichte konnten in Abschnitt 0 realisiert werden, sodass die Grundlage für weitere Untersuchungen geschaffen ist. Zur Beurteilung der Qualität des Prozesses und insbesondere der resultierenden Bauteile werden die mechanischen Eigenschaften und die Dichte der Bauteile betrachtet. Dafür wird eine umfangreiche Vorstudie in Form eines vollfaktoriellen Versuchsplans zur Optimierung der Belichtungsparameter hinsichtlich der resultierenden Dichte und der mechanischen Eigenschaften durchgeführt. Die Prüfkörper werden dabei ohne Supportstrukturen direkt auf der Plattform fixiert. Supportstrukturen werden erst im weiteren Verlauf der Arbeit entwickelt und eingeführt.

Die Untersuchungen und Daten dieses Abschnitts sind im Rahmen der studentischen Arbeit von Radke [Rad21] entstanden.

5.4.1 Vorgehensweise und Versuchsplan

Zur Optimierung der Belichtungsparameter in Bezug auf die Bauteildichte und die mechanischen Eigenschaften wird ein vollfaktorieller Versuchsplan umgesetzt. Die Rahmenbedingungen des Versuchsplans sind in Tabelle 5-4 zusammengefasst. Die Bauraumtemperatur wird auf 80 °C festgesetzt und die Konturparameter, welche im Vergleich zum Hatch eine untergeordnete Rolle im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften und die Dichte spielen, werden konstant gehalten. Die Werte sind ebenfalls in Tabelle 5-4 aufgeführt. Als Bauplattform wird das zuvor identifizierte PA6-CFK-Organoblech verwendet.

Tabelle 5-4: Rahmenbedingungen und konstante Parameter der Untersuchung

Rahmenbedingungen			
Bauraumtemperatur	°C	80	
Schichtdicke	µm	120	
Prüfkörper		Zugstab 1BA [DIN 527-2]	
Orientierung		XYZ	
Bauplattform		Organoblech (PA6, CF mit 50 Vol.-%)	
Belichtungsparameter			
Hatch	Flächenenergiedichte	J/mm ²	≤ 0,12
Kontur (Kontur- vor Hatchbelichtung)	Laserleistung Scangeschwindigkeit Beamoffset	W mm/s mm	40 4000 0,35

Gegenstand des Versuchsplans sind die Hatchparameter – Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Hatchabstand – in den in Tabelle 5-5 aufgeführten Ausprägungen, welche vollfaktoriell, also in allen Kombinationen, untersucht werden. Analog der Untersuchungen zur Rauchentwicklung (Abschnitt 5.3.3) werden die Parameterkombinationen, die zu einer Flächenenergiedichte größer als $0,12 \text{ J/mm}^2$ führen aus dem Versuchsplan eliminiert, sodass sich der Versuchsplan von 64 auf 46 Parametersets reduziert. Die minimale Flächenenergiedichte beläuft sich auf $0,05 \text{ J/mm}^2$. Der vollständige Versuchsplan inklusive der resultierenden Flächenenergiedichten ist im Anhang A1 in Tabelle A 1 hinterlegt.

Tabelle 5-5: Parameter und Ausprägungen des vollfaktoriellen Versuchsplans

Belichtungsparameter des Hatch	Ausprägungen
Laserleistung	W
Scangeschwindigkeit	mm/s
Hatchabstand	mm

Als Prüfkörper werden Zugstäbe des Typs 1BA für die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften und der Dichte verwendet. Für jedes Parameterset werden drei Zugstäbe gefertigt, sodass nach dem in Bild 5-10 dargestellten Baujoblayout mit neun Zugstäben, drei Sets je Baujob gefertigt werden. Aufgrund der notwendigen Anbindung an die Plattform werden hier ausschließlich Zugstäbe in XYZ-Orientierung untersucht.

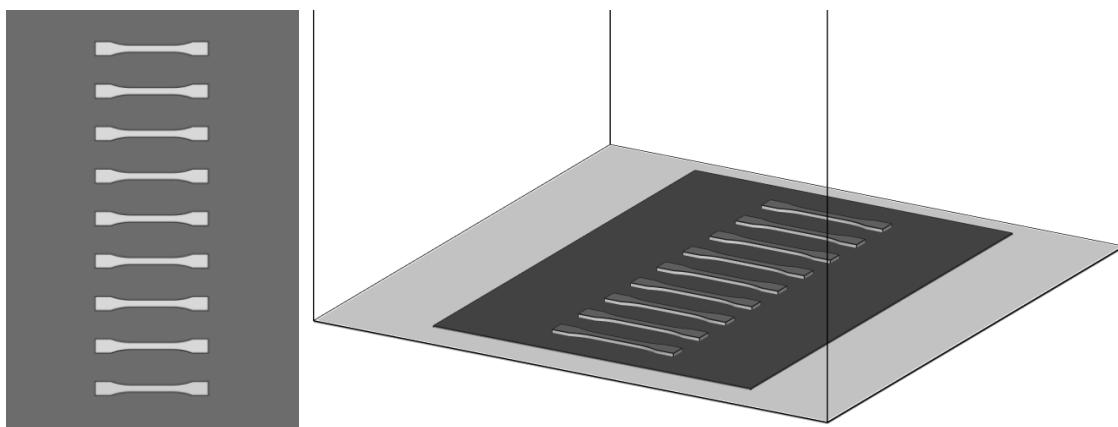


Bild 5-10: Baujoblayout für die Vorstudie (Draufsicht (links) und isometrische Ansicht (rechts))

Analog der Ergebnisse der Voruntersuchungen in Abschnitt 5.3.1 wird die direkte Anbindung der Zugstäbe durch Mehrfachbelichtung des Hatches und der Kontur der ersten Bauteilschichten realisiert. Die Belichtungsstrategie im Falle der Mehrfachbelichtung ist in Bild 5-11 dargestellt. In Aufbaurichtung werden die untersten Schichten für 0,5 mm fünffach, anschließend für 0,5 mm dreifach und der restliche Teil des Zugstabs einfach belichtet, siehe Bild 5-11 (rechts). Die Zugstäbe werden im Verbund dieses Schichtaufbaus geprüft.

Dadurch dass Mehrfachbelichtungen, insbesondere bei geringen Scangeschwindigkeiten, zu einer hohen Schichtzeit führen können, muss die Belichtungsreihenfolge innerhalb einer Schicht beachtet werden. Lange Offenzeiten von aufgeschmolzenen Bereichen bzw. Zeiten zwischen zwei Belichtungen desselben Bereichs sollten bei den niedrigen Bauraumtemperaturen vermieden werden, um die frühzeitige Rekristallisation der Schmelze zu unterbinden. Aus diesem Grund wird, wie in Bild 5-11 (links) visualisiert, ein Belichtungszyklus innerhalb einer Schicht zunächst über alle Zugstäbe durchgeführt und abgeschlossen, bevor innerhalb derselben Schicht die Zugstäbe in selbiger Reihenfolge erneut belichtet werden. Andersherum bedeutet das, dass ein Zugstab nicht direkt x -fach belichtet wird, ehe der nächste Zugstab x -fach belichtet wird, da diese Reihenfolge für die zuerst belichteten Zugstäbe eine sehr lange Offenzeit und generell sehr inhomogene Offenzeiten über alle Zugstäbe bedeuten würde.

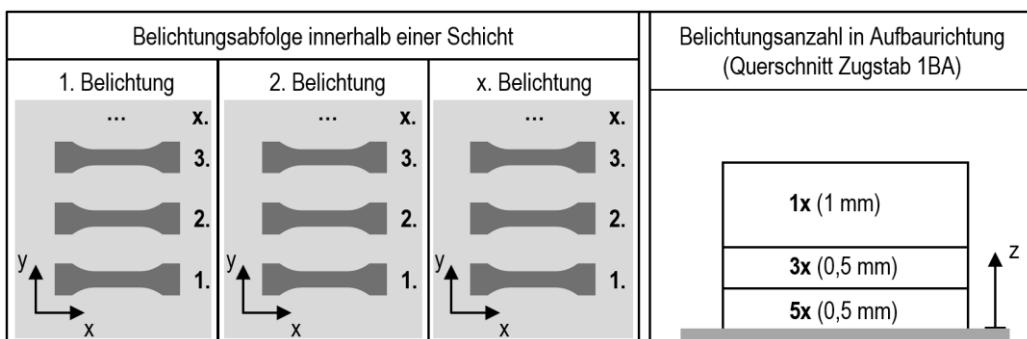


Bild 5-11: Belichtungsstrategie mit Mehrfachbelichtung der untersten Bauteilschichten

Die Mehrfachbelichtung ist in der Prozesssoftware (PSW) der EOS P396 nicht vorgesehen und wird daher durch die mehrmalige Verschachtelung des gleichen Bauteils bzw. der STL-Datei ineinander umgesetzt, sodass die Bauteilschichten mehrfach gescannt und belichtet werden. Für die zuvor beschriebene Belichtungsreihenfolge ist es notwendig, die Bauteile in die korrekte Reihenfolge in der Bauteilliste der PSW zu bringen. Die PSW arbeitet die Liste je Schicht von oben nach unten ab, sodass die korrekte Reihenfolge durch eine angepasste Beschriftung der verschachtelten Bauteile umgesetzt werden kann. Die Liste wird beim Einfügen der Bauteile in der PSW alphabetisch geordnet.

5.4.2 Ergebnisse

Alle 46 Parametersets sind ohne Prozessabbruch erfolgreich gefertigt worden. Ein exemplarischer Baujob ist in Bild 5-12 zu sehen. In der Draufsicht (Bild 5-12, links) ist zu erkennen, dass die Zugstäbe trotz der hohen Flächenenergiedichten im Vergleich zum konventionellen LS-Prozess von PA12 ($0,01\text{-}0,046 \text{ J/mm}^2$ [Loh19]) formstabil gebaut werden können. Die isometrische Ansicht (Bild 5-12, rechts) offenbart leichten Verzug und eine geringfügige Ablösung von der Bauplattform im Schulterbereich der Zugstäbe, was als unkritisch für den Prozess aufgrund der erfolgreichen Fertigung anzusehen ist. Die Ablösung ist nicht auf

Curling zurückführen, da Curling in den ersten Bauteilschichten während des Prozesses erkannt worden wäre. Daher ist davon auszugehen, dass die Ablösung durch Verzug im Laufe des Prozesses bzw. der Abkühlphase entstanden ist. Im Folgenden wird zunächst auf die Ergebnisse der Zugprüfung und der Dichtebestimmung und anschließend auf das Bruchverhalten und die Mikrostruktur eingegangen.



Bild 5-12: Auf der Bauplattform gefertigte Zugstäbe des Typs 1BA (rechts: Leichter Verzug und geringfügige Ablösung von der Bauplattform)

5.4.2.1 Mechanische Eigenschaften und Dichte

Die Ergebnisse zur Dichte und den mechanischen Zugeigenschaften in Abhängigkeit der Flächenenergiedichte sind in Bild 5-13 dargestellt. Die Dichte zeigt in Abhängigkeit der Flächenenergiedichte keinen klaren Trend, wenn auch die höchsten Werte bei hohen Flächenenergiedichten vorliegen. Die maximale Dichte von $0,968 \text{ g/cm}^3$, welche ca. 2 % unter der LS-Referenz ($0,9885 \text{ g/cm}^3$) liegt, entsteht bei der höchsten betrachteten Flächenenergiedichte von $0,119 \text{ J/mm}^2$. Aus der Materialdichte von $1,01 \text{ g/cm}^3$ ergibt sich eine maximale, relative Dichte von 95,8 % im Vergleich zur LS-Referenz mit 97,9 %, was bedeutet, dass die Porosität in diesem Fall doppelt so hoch ist wie bei der LS-Referenz. Bei mittleren Flächenenergiedichten fällt die Dichte deutlich ab. Auffallend sind die hohen Standardabweichungen im Messbereich zwischen $0,05 \text{ J/mm}^2$ und $0,083 \text{ J/mm}^2$. Zu vermerken ist hier, dass in diesem Messbereich während der Dichtebestimmung nach dem archimedischen Prinzip vermehrt Luftblasen aufsteigen, was ein Indiz dafür ist, dass die Prüfkörper sehr porös sind und das zur Messung verwendete Ethanol in den Prüfkörper eindringt und dabei Luft aus den Poren verdrängt. Aus diesem Grund werden die Messwerte direkt nach dem Eintauchen der Prüfkörper bestimmt, um den Einfluss durch das Verdrängen der Luft aus dem Inneren zu reduzieren. Die hohen Standardabweichungen sind auf diese Vorgehensweise zurückzuführen. Die Dichtewerte des genannten Messbereichs sind also mit Vorsicht zu betrachten.

Bei der Zugfestigkeit ist ein Trend zu höheren Werten mit zunehmender Flächenenergiedichte zu erkennen. Bei Flächenenergiedichten ab ca. $0,085 \text{ J/mm}^2$ wird ein Plateau von ca. $32,5 \text{ MPa}$ erreicht. Die maximale Zugfestigkeit beträgt $34,42 \text{ MPa}$ bei einer Energiedichte von $0,104 \text{ J/mm}^2$ und liegt damit ca. 25 % unter der LS-Referenz (46 MPa).

Der E-Modul steigt mit zunehmender Flächenenergiedichte und folgt einem annähernd linearen Trend. Bei einer Flächenenergiedichte von $0,111 \text{ J/mm}^2$ wird der Maximalwert von ca. 1707 MPa erreicht, welcher ca. 9 % geringer als die LS-Referenz (1883 MPa) ist.

Bei der Bruchdehnung ist kein Trend erkennbar. Zunächst ist ein Anstieg der Bruchdehnung von ca. 9 % bis zu einem Maximum von 16 % bei einer Energiedichte von $0,083 \text{ J/mm}^2$ mit steigender Energiedichte zu beobachten. Danach versprüden die Bauteile und die Bruchdehnung sinkt bei zunehmender Energiedichte auf ein Minimum von ca. 3 %. Die LS-Referenz weist eine Bruchdehnung von 20,7 % auf. Insgesamt lässt sich ein Trend zu höherer Festigkeit und Steifigkeit bei höherer Versprödung mit zunehmender Flächenenergiedichte verzeichnen.

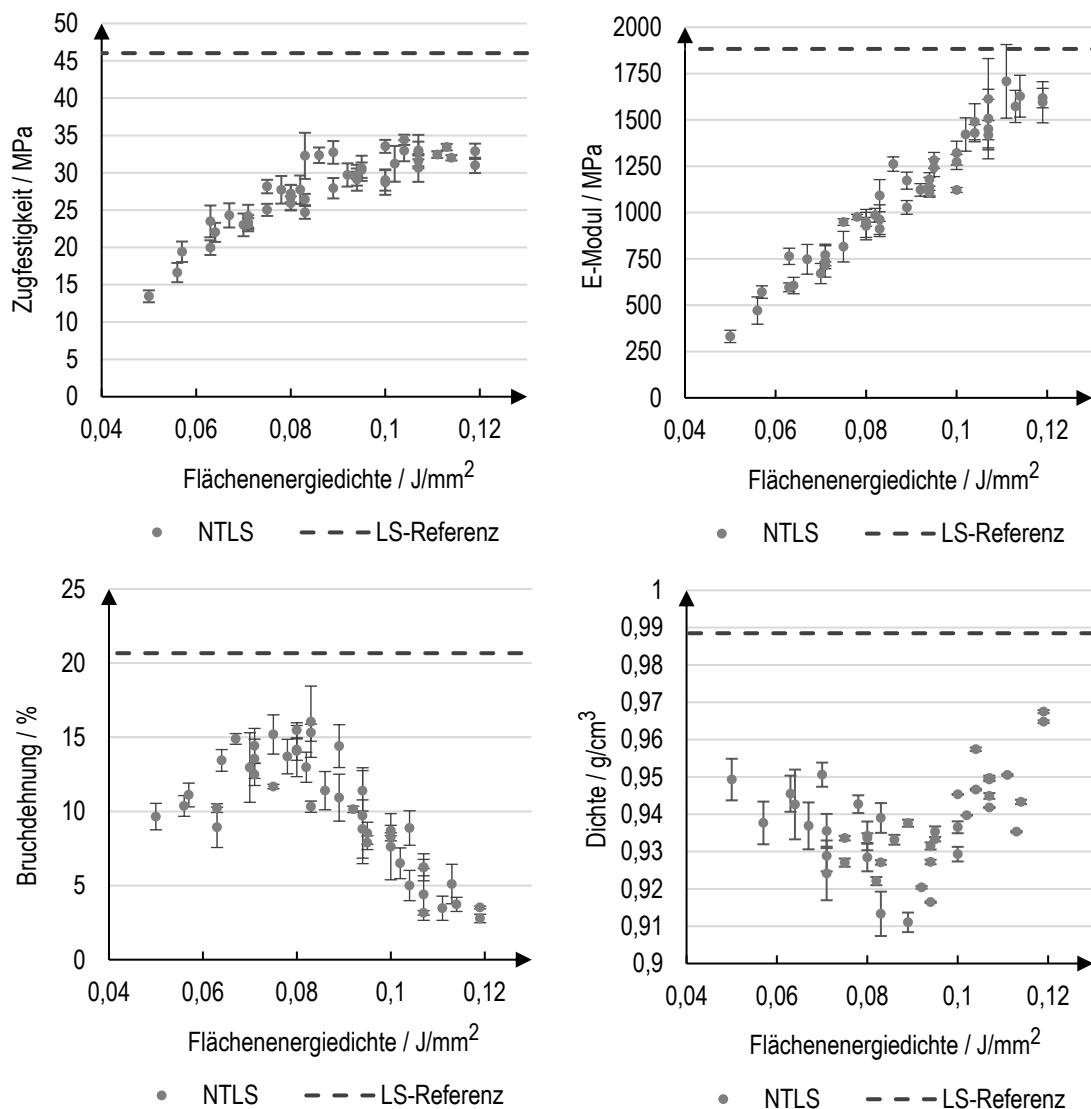


Bild 5-13: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Flächenenergiedichte

Im durchgeführten vollfaktoriellen Versuchsplan entstehen Parametersets mit gleicher Flächenenergiedichte auf Basis unterschiedlicher Parameterkombinationen, sodass der Einfluss der Belichtungsparameter bei konstanter Flächenenergiedichte auf die Dichte und die mechanischen Eigenschaften betrachtet werden kann. Diese Auswertung ist jedoch mit Vorsicht zu genießen, da die Werte, wie in Bild 5-13 dargestellt, relativ nah, teilweise innerhalb der zum Teil hohen Standardabweichung, beieinander liegen. Bei der Dichte ist z.B. bei einer leichten Differenz in der Flächenenergiedichte von 0,113 zu 0,119 J/mm² ein deutlicher Sprung von 0,935 zu 0,968 g/cm³ zu verzeichnen. Dabei steigt die Dichte mit zunehmender Schichtzeit infolge einer höheren Laserleistung (50 W zu 45 W), eines höheren Hatchabstands (0,12 mm zu 0,1 mm) und einer geringeren Scangeschwindigkeit (3500 mm/s zu 4000 mm/s) an. Diese Erkenntnis stimmt mit den Untersuchungsergebnissen von Josupeit zur Schichtzeit im konventionellen LS überein [Jos19], steht aber im Widerspruch zu den Ergebnissen von Yamauchi et al., bei denen die Dichte mit Abnahme der Schichtzeit im NTLS ansteigt. Yamauchi et al. begründen das Ergebnis damit, dass die in die aufgeschmolzenen Bereiche zugeführte Energie bei kürzeren Schichtzeiten zum Großteil in den Bereichen verbleibt und zum Aufschmelzen der folgenden Schicht und dem Schichtverbund beiträgt [YNK17; YKN16]. Bei einer Flächenenergiedichte von 0,083 J/mm² zeigt sich analog zu Yamauchi et al. eine leicht erhöhte Dichte (0,939 g/cm³ zu 0,921 g/cm³) bei kürzerer Schichtzeit, die durch eine erhöhte Scangeschwindigkeit (5000 mm/s zu 4000 mm/s) und Laserleistung (50 W zu 40 W) bei gleichem Hatchabstand zustande kommt. Eine eindeutige Aussage zur Korrelation von Dichte und Schichtzeit ist also nicht zu treffen.

Für Flächenenergiedichten von 0,08 J/mm² bis 0,083 J/mm² sind die unterschiedlichen Werte für Zugfestigkeit und Bruchdehnung in Bild 5-14 in Balkenform dargestellt. Die Zugfestigkeit schwankt zwischen 24,69 MPa und 32,27 MPa, die Bruchdehnung zwischen 10,32 % und 16,05 %. Der Datentabelle sind die von links nach rechts steigende Scangeschwindigkeit und der von links nach rechts sinkende Hatchabstand zu entnehmen. Der E-Modul unterliegt bei konstanter Flächenenergiedichte nur einer vergleichsweise geringen Schwankung und wird hier daher nicht betrachtet. Sowohl bei der Zugfestigkeit als auch der Bruchdehnung zeigt das Parameterset 6, welches über die höchste Scangeschwindigkeit (5000 mm/s) des Versuchsplans und ein hohe Laserleistung (50 W) verfügt, die höchsten Ausprägungen. Die übrigen Parametersets zeigen bei der Zugfestigkeit keine nennenswerten Differenzen. Bei der Bruchdehnung hingegen ist ein leichter Trend zu geringeren Werten bei Scangeschwindigkeiten kleiner als 4000 mm/s zu erkennen. Grundsätzlich sind also keine klaren Trends oder Einflüsse einzelner Belichtungsparameter bei konstanter Flächenenergiedichte auf Zugfestigkeit und Bruchdehnung zu verzeichnen. Lediglich die höchsten Ausprägungen bei einer hohen Laserleistung und hohen Scangeschwindigkeit in Parameterset 6 stechen heraus.

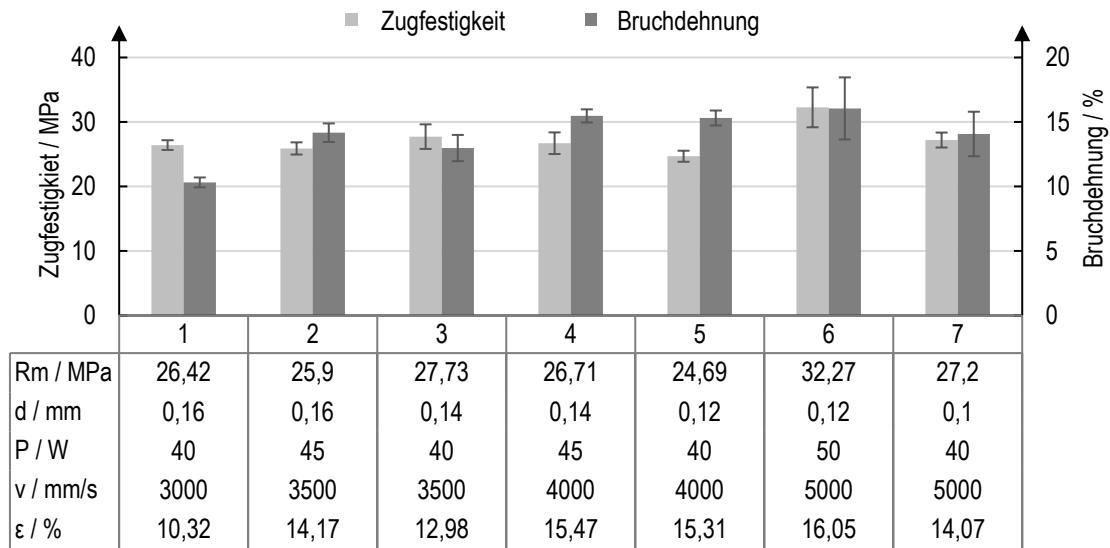


Bild 5-14: Zugfestigkeit und Bruchdehnung bei einer Flächenenergiedichte von 0,08 J/mm² bis 0,083 J/mm², sinkendem Hatchabstand, variierender Laserleistung und steigender Scangeschwindigkeit

5.4.2.2 Bruchbilder und Mikrostruktur

Neben den mechanischen Kennwerten werden zusätzlich das Bruchverhalten und die Bruchflächen betrachtet. Dafür sind in Bild 5-15 Bruchbilder für drei verschiedene Flächenenergiedichten aus den Randbereichen und der Mitte des Versuchsplans sowie das Bruchbild einer LS-Referenzprobe abgebildet. Bei niedriger (0,05 J/mm²) und mittlerer Flächenenergiedichte (0,08 J/mm²) zeigt sich ein ähnliches, tendenziell duktiles Bruchverhalten wie bei der LS-Referenzprobe. Dieses Verhalten passt zu der ermittelten Bruchdehnung mit ca. 10 % und 15 % bei den vorliegenden Proben. Bei hoher Energiedichte (0,119 J/mm²) zeigt sich ein glatter, spröder Bruch. Auch dies passt zu der gemessenen, geringen Bruchdeh-

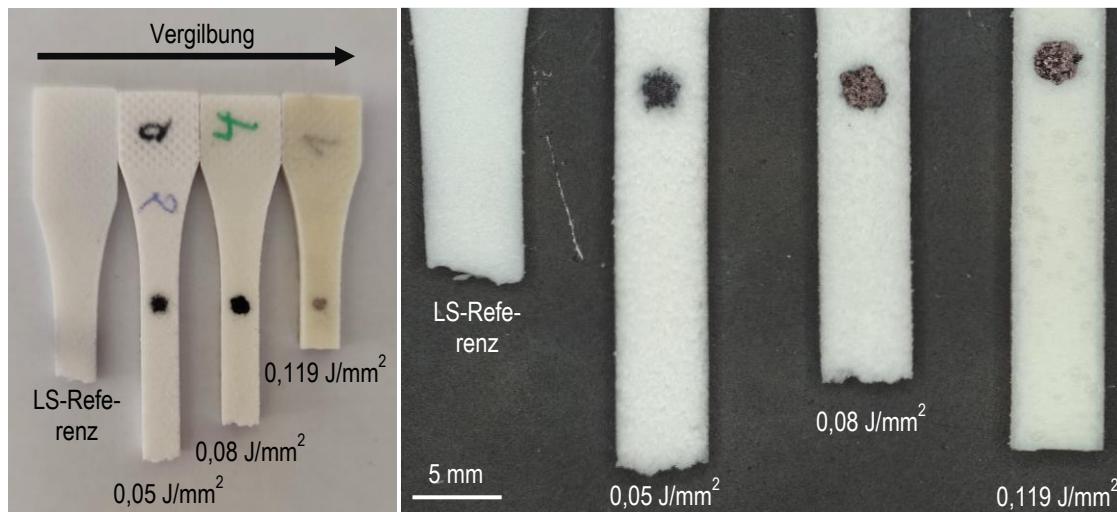


Bild 5-15: Vergilbung (links) und Bruchbilder bei verschiedenen Flächenenergiedichten

nung von ca. 3 %. Im linken Teil von Bild 5-15 ist an den Prüfkörpern zudem eine zunehmende Vergilbung bei steigender Flächenenergiedichte zu erkennen. Insbesondere bei einer Flächenenergiedichte von $0,119 \text{ J/mm}^2$ ist eine deutliche Vergilbung zu verzeichnen. Diese Vergilbung lässt sich auf Überhitzung der Schmelze, teilweise bis in den Zersetzungsbereich, aufgrund einer zu hohen Energiedichte zurückführen und lässt, wie in den Kapiteln 2.1.2 und 2.1.4 beschrieben, auf thermische bzw. thermisch-oxidative Degradationsvorgänge im Material schließen. Materialdegradation resultiert dabei in herabgesetzten mechanischen Eigenschaften, was sich hier ebenfalls in der Versprödung bzw. der geringen Bruchdehnung widerspiegelt.

Weiterhin zeigt sich wie in Bild 5-16 dargestellt, dass bei den Prüfkörpern teilweise, je nach Flächenenergiedichte, Delamination zwischen den einfach- und dreifachbelichteten Bau- teilbereichen während des Zugversuchs auftritt. Dies ist zudem gut daran zu erkennen, dass zwei Bruchflächen auf zwei unterschiedlichen Stufen auftreten. Die unterschiedlich belichteten Bereiche weisen offensichtlich unterschiedliche mechanische Eigenschaften bzw. Unterschiede in der Mikrostruktur auf. Die Einfachbelichtung scheint dabei einen nicht ausreichenden Schichtverbund zu erzeugen. Die mechanischen Eigenschaften der unterschiedlich belichteten Bereiche können nicht separat voneinander bestimmt werden, da eine Trennung der Bereiche nicht erfolgreich umsetzbar ist. Anstelle dessen kann jedoch die Dichte bei vollständigem Zugstabquerschnitt (fünffache bis einfache Belichtung) mit der Dichte eines einfachbelichteten Zugstabquerschnitts für eine Flächenenergiedichte von $0,071 \text{ g/cm}^3$ gegenübergestellt werden. Dabei zeigt sich, dass die Dichte des vollständigen Zugstabs mit $0,9214 \text{ g/cm}^3$ höher ist als die Dichte des ausschließlich einfachbelichteten Teils des Zugstabs mit $0,9076 \text{ g/cm}^3$. Daraus lässt sich schließen, dass die Mehrfachbelichtung positive Auswirkungen auf die Bauteildichte und damit auf die mechanischen Eigenschaften hat.

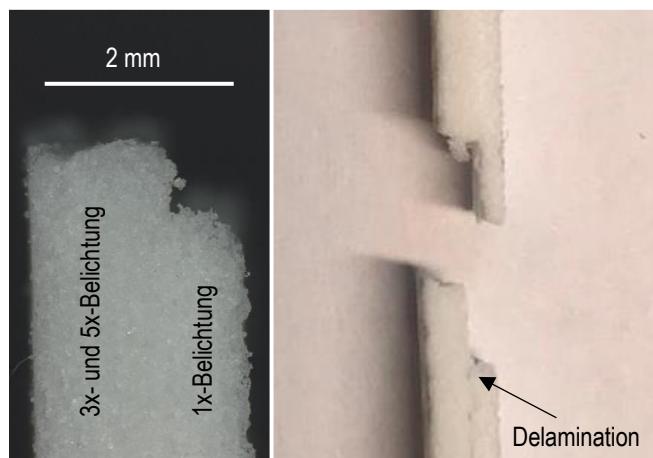


Bild 5-16: In der Bruchfläche erkennbare Delamination zwischen Einfach- und Mehrfachbelichtung

Zur weiteren Untersuchung dieser Erkenntnis werden REM-Bilder der Bruchflächen betrachtet. In Bild 5-17 sind REM-Aufnahmen von den Bruchflächen einer LS-Referenzprobe (links) und einer NTLS-Probe (rechts) mit einer Energiedichte von $0,083 \text{ J/mm}^2$ gegeben. Bei der NTLS-Probe ist, wie zuvor aufgrund der unterschiedlichen Dichten und der Delamination vermutet, zu erkennen, dass morphologische Unterschiede zwischen den einfach- (oben) und mehrfachbelichteten Bereichen (unten) vorhanden sind. Während bei der Mehrfachbelichtung eine eher zusammenhängende Struktur ähnlich zur LS-Referenz vorliegt, liegt bei der Einfachbelichtung eine eher zerklüftete Struktur vor. Die Tatsache kann durch vergrößerte Aufnahmen beider Bereiche in Bild 5-18 bestätigt werden. Die Einfachbelichtung liefert also nicht genügend Energie zum vollständigen Aufschmelzen und der Koaleszenz des Materials. Die Mehrfachbelichtung führt zur Akkumulation der Energie und ermöglicht dadurch das vollständige Aufschmelzen und eine hohe Koaleszenz. Dies trägt auch dazu bei, die Delamination zu reduzieren bzw. zu vermeiden, da, wie Yamauchi et al. im Zuge der Betrachtung kleiner Flächen mit kurzen Schichtzeiten beschreiben, die vorhandene, akkumulierte Wärme die Bildung der darauffolgenden Bauteilschicht und des Schichtverbunds unterstützen kann [YKN16].

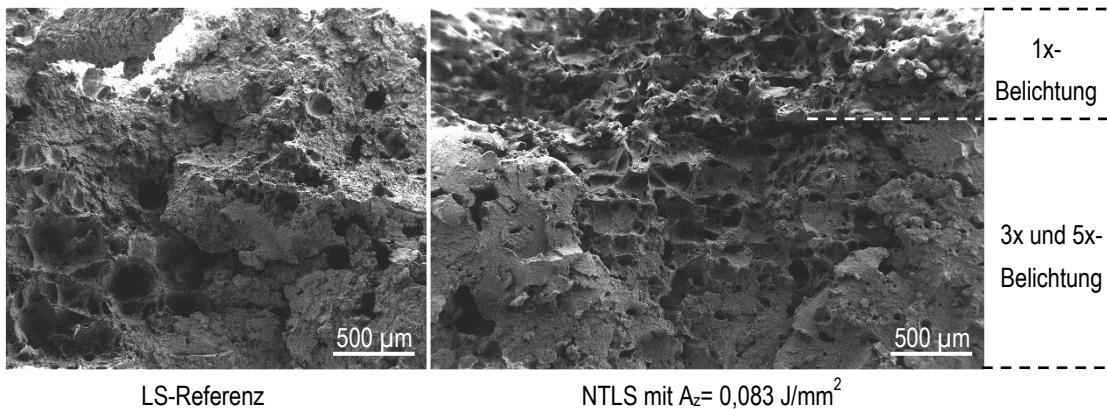


Bild 5-17: REM-Aufnahmen der Bruchflächen einer LS-Referenzprobe (links) und einer NTLS-Probe für eine Energiedichte von $0,083 \text{ J/mm}^2$ (rechts)

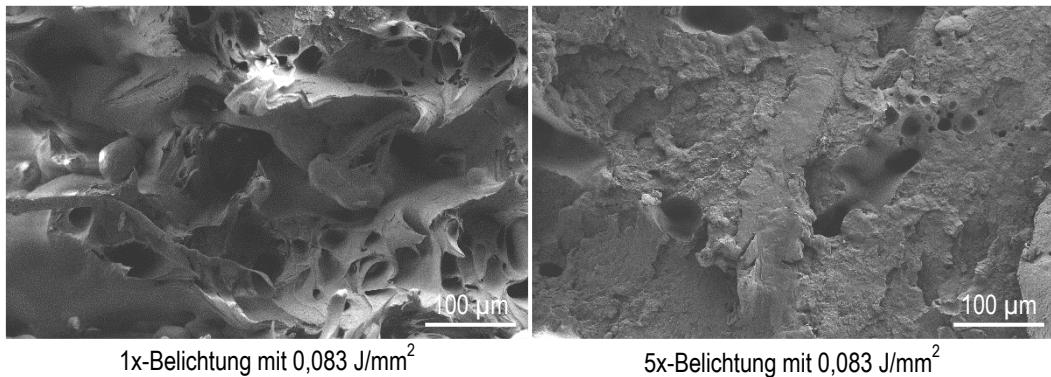


Bild 5-18: Vergrößerte REM-Aufnahmen der 1x-belichteten (links) und 5x-belichteten Bereiche (rechts) einer NTLS-Probe für eine Energiedichte von $0,083 \text{ J/mm}^2$

Bild 5-19 zeigt die REM-Aufnahme einer vergilbten Probe im Bereich der Fünffachbelichtung mit einer Energiedichte der einzelnen Belichtungsschritte von $0,119 \text{ J/mm}^2$. Deutlich zu erkennen sind sphärische Poren, die auf Gasbildung bei der Zersetzung des Materials, wie zuvor bereits vermutet, zurückzuführen sind (vgl. Bild 2-9). Die eingebrachte Energiedichte ist demnach zu hoch.

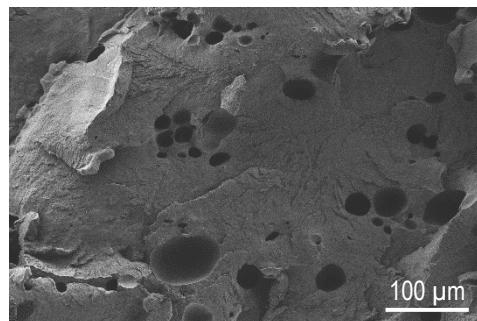


Bild 5-19: REM-Aufnahme des 5x-belichteten Bereichs einer NTLS-Probe mit erkennbaren Zersetzungsgasporen für eine Energiedichte der einzelnen Belichtungen von $0,119 \text{ J/mm}^2$

5.4.3 Zusammenfassung, Diskussion und Prozessanpassung

Zusammenfassung:

Die vorangegangenen Untersuchungen weisen die generelle Herstellbarkeit von Prüfkörpern mit direkter Anbindung an der Bauplattform innerhalb des gewählten Flächenenergiedichespektrums nach. Die Belichtungsparameter und die daraus resultierende Flächenenergiedichte werden variiert, um anhand der Dichte und der mechanischen Eigenschaften auf optimale Belichtungsparameter schließen zu können. Die Dichte und mechanischen Eigenschaften sollen optimalerweise auf einem ähnlichen Niveau wie die Werte beim konventionellen LS liegen. Die Dichte zeigt über der Energiedichte keinen klaren Trend, wenn auch tendenziell höhere Dichtewerte bei höheren Flächenenergiedichten auftreten, und unterliegt zum Teil hohen Schwankungen, vermutlich aufgrund von Messungenaugkeiten. Zugfestigkeit und E-Modul steigen mit zunehmender Flächenenergiedichte an. Die Bruchdehnung steigt zunächst mit zunehmender Flächenenergiedichte an, ehe die Prüfkörper ab einer Flächenenergiedichte von $0,08 \text{ J/mm}^2$ zunehmend versprüden. Die mechanischen Eigenschaften und die Dichte weisen im Vergleich zum konventionellen LS je nach Energiedichte zum Teil deutlich schlechtere Werte auf. Zum Teil können Werte erzielt werden, die bis auf wenige Prozent an die Werte aus dem konventionellen LS heranreichen. Eine optimale Kombination der Belichtungsparameter ist nicht zu identifizieren. Die Maximalwerte für Zugfestigkeit mit 34,4 MPa (25 % geringer als im LS) und E-Modul mit 1707 MPa (9 % geringer als im LS) ergeben sich bei einer Flächenenergiedichte von $0,104 \text{ J/mm}^2$ bzw. $0,111 \text{ J/mm}^2$. Der Maximalwert der Dichte mit $0,968 \text{ g/cm}^3$ bzw. der relativen Dichte von 95,8 % ist bei der höchsten Flächenenergiedichte des betrachteten Spektrums zu

verzeichnen. Die Bruchdehnung hingegen weist den Maximalwert von 16 % (LS-Referenz: 22 %) bei einer mittleren Flächenenergiedichte von $0,083 \text{ J/mm}^2$ auf. Eindeutige Korrelationen zwischen Dichte bzw. mechanischen Eigenschaften und einzelnen Belichtungsparametern oder der Schichtzeiten sind nicht zu registrieren. Anhand von Bruchbildern und REM-Aufnahmen der Bruchflächen kann ebenfalls die Versprödung durch thermische Degradation bei hohen Energiedichten durch Vergilbung und sphärische Poren aufgezeigt werden. Festzuhalten ist, dass mit zunehmender Flächenenergiedichte grundsätzlich ein Trend zu höherer Festigkeit und Steifigkeit bei gleichzeitiger Versprödung zu verbuchen ist.

Diskussion und Prozessanpassung:

An den Untersuchungen und Ergebnissen kritisch zu betrachten sind die geringe Anzahl der Prüfkörper (3 Stück je Parameterset) sowie die Messung der Dichte nach dem archimedischen Prinzip bei tendenziell porösen Prüfkörpern bei geringen Flächenenergiedichten. Abhilfe könnte eine Versiegelung der Prüfkörperoberfläche schaffen.

Verglichen mit dem Stand der Forschung zum NTLS von PA12 zeigen sich Unterschiede hinsichtlich der Bruchdehnung. Im Vergleich zu der hier vorliegenden Versprödung der Bau-teile liegt die Bruchdehnung bei Kigure et al. deutlich über der LS-Referenz [KYN19]. Be-gründet werden kann dies anhand des in Dünnschnitten sichtbaren erhöhten Aufschmelz-grads und erhöhter Koaleszenz des Materials im Vergleich zum LS [NHI+12]. Die Zugfestigkeit und Dichte sind im Vergleich zu Kigure et al. leicht verringert, der E-Modul leicht erhöht. [KYN19]. Die Vergleichbarkeit ist grundsätzlich als schwierig bzw. nicht möglich einzuschätzen, da Kigure et al. zum einen eine deutlich höhere Bauraumtemperatur mit 130°C genutzt und ein anderes LS-Anlagensystem verwendet haben [KYN19]. Verglichen mit den relativen Dichten in [HIN14] mit 91,7 % bei einer Bauraumtemperatur von 70°C und 93,7 % bei 100°C zeigt sich mit 95,8 % ein deutlich erhöhter Wert.

Die REM-Aufnahmen der Bruchflächen decken auf, dass im einfachbelichteten Teil der Zugstäbe keine ausreichende Koaleszenz des Materials vorliegt, woraus auf einen nicht ausreichenden Energieeintrag zu schließen ist. Eine Erhöhung der Flächenenergiedichte ist jedoch aufgrund Zersetzung des Materials, welche in Abschnitt 5.3.3 durch die starke Rauchentwicklung gezeigt werden konnte, keine Option. Im mehrfachbelichteten Teil hin-gegen zeigt sich ein ähnlicher Materialverbund wie im konventionellen LS. Die Mehrfach-belichtung akkumuliert die Energie, sodass bei gegebener Flächenenergiedichte der ein-zelnen Belichtungsschritte mehr Gesamtenergie in das Pulverbett eingebracht werden kann. Der Energieeintrag ist durch die Mehrfachbelichtung schonender für das Material und der Energieeintrag erfolgt aufgrund dessen, dass in der Regel mehrere Bauteile in einer Schicht vorliegen, zeitlich verzögert. Die Bauteile werden, wie in Bild 5-11 in Abschnitt 5.4.1 dargelegt, nacheinander belichtet ehe die erneute Belichtung erfolgt. Durch die zeitliche Verzögerung kann die Energie verteilt und zum Teil an das umliegende Pulverbett abgege-ben werden, sodass bei erneuter Belichtung eine Überhitzung der Schmelze und die

einhergehende thermische Degradation verhindert werden kann. Die Akkumulation der Energie kann qualitativ in Bild 5-20 durch die Messung der Oberflächentemperatur eines mehrfachbelichteten Bereichs durch das Punktpyrometer der verwendeten EOS P396 dargestellt werden. Aufgrund der eigentlichen Verwendung des Punktpyrometers zur Messung der Temperatur der Pulverbettoberfläche und des darauf abgestimmten Emissionsgrads sind die Absolutwerte der Peaks als ungenau anzunehmen, lassen aber eine qualitative Beurteilung zu. Zu erkennen ist, dass die Oberflächentemperatur des belichteten Bereichs ausgehend von der Bauraumtemperatur von 80 °C mit jedem zeitlich versetzten Belichtungsvorgang ansteigt. Zwischen den Belichtungsvorgängen ist die Abgabe von Wärme an die Umgebung zu verzeichnen. Weiterhin kann die Mehrfachbelichtung durch die akkumulierte Energie zu einer höheren Aufschmelztiefe bzw. Verschmelzung mit tieferliegenden Schichten und einem besseren Schichtverbund führen, wie es auch Kaddar beschreibt [Kad10]. Weiterhin ist zu vermuten, dass eine höhere Eindringtiefe der Laserstrahlung nach der ersten Belichtungssequenz der Mehrfachbelichtung durch die im Vergleich zur Pulverschüttung höhere Transmission der Schmelze auftritt [LSB+15; HLB+18]. Dadurch wird vermehrt Energie in tieferen Schichten absorbiert, woraus ein besserer Schichtverbund resultiert. Diese Erkenntnisse und Annahmen werden durch Wegner et al. unterstützt, die nachweisen, dass die Doppelbelichtung des Hatchs im konventionellen LS-Prozess durch einen besseren Schichtverbund in Aufbaurichtung mit Bruchdehnungen von bis zu 20 % zu isotroperen Bauteileigenschaften führen [WW19]. Auch Kaddar zeigt eine Verbesserung der Dichte und der mechanischen Eigenschaften durch Doppelbelichtung des Hatchs auf [Kad10]. Auf diesen ersten Erkenntnissen aufbauend wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit zur gezielten Verbesserung der Bauteileigenschaften auf die Mehrfachbelichtung im NTLS gesetzt.

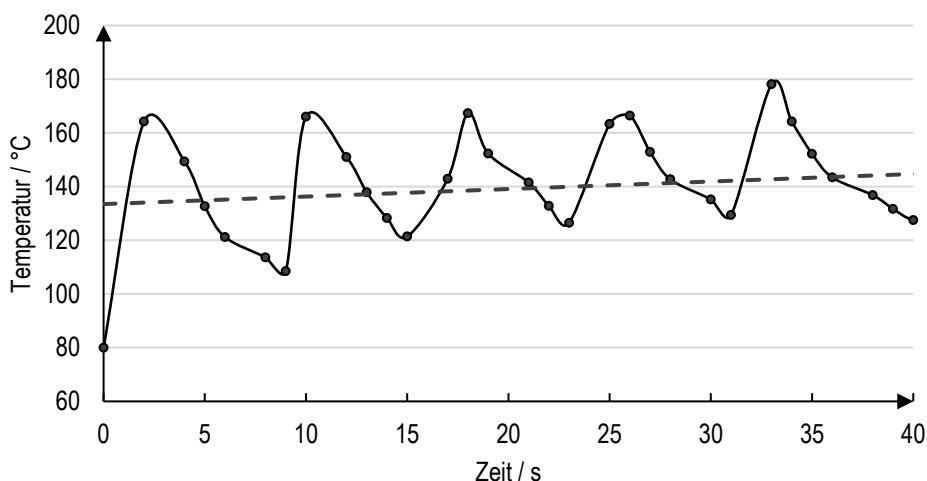


Bild 5-20: Qualitativer Temperaturverlauf einer 5x-belichteten Fläche ($v=4000 \text{ mm/s}$; $P=50 \text{ W}$; $d=0,2 \text{ mm}$) aufgezeichnet mittels Punktpyrometer der EOS P396

5.5 Supportstrukturen für das NTLS

Um auf die direkte Anbindung von Bauteilen an der Bauplattform verzichten zu können, werden im Folgenden Supportstrukturen für das NTLS experimentell entwickelt und untersucht. Eine direkte Anbindung von Bauteilen führt zu einer unterschiedlichen Belichtungsanzahl über die Bauteilhöhe (vgl. Abschnitt 5.4) und lässt ausschließlich die Fertigung von Bauteilen, deren Unterseite vollständig eben und parallel zur Bauplattform ist, zu. Bauteile und Supportstrukturen sollen sich idealerweise leicht voneinander trennen lassen und es soll möglich sein, Supportstrukturen und Bauteile durch unterschiedliche Belichtungsstrategien zu erzeugen. Dafür werden zunächst die Grundlagen zu Supportstrukturen gegeben, die Anforderungen an Supportstrukturen für den NTLS-Prozess aufgeführt und mögliche Support-Kandidaten identifiziert. Darauf aufbauend wird die Prozessfähigkeit verschiedener Strukturen zunächst bei flach orientierten Prüfkörpern (XYZ-Orientierung) experimentell untersucht und anschließend auf weitere Orientierungen übertragen.

Die Untersuchungen und Daten dieses Abschnitts sind zum Teil im Rahmen der studentischen Arbeit von Flottmeyer [Flo22] entstanden.

5.5.1 Einführung zu Supportstrukturen

Grundlagen:

Supportstrukturen, auch Stützstrukturen, Stützen oder Support genannt, werden in verschiedenen additiven Fertigungsverfahren in unterschiedlicher Weise verwendet. Support kann in disperter Form, wie das Bauteile tragende Pulver bzw. Pulverbett beim LS, oder in solider Form, wie die generierten Strukturen beim Fused Layer Modeling (FLM), bei der Stereolithografie (SLA) oder beim Laserschmelzen (LM), vorliegen. Während solide Supportstrukturen im FLM und SLA primär eine an der Plattform fixierende und tragende Funktion, z.B. bei Überhängen, aufweisen, hat der solide Support beim LM weiterhin die Aufgabe die entstandene Wärme in die Bauplattform abzuleiten. Dadurch können Eigenspannung und Verzug reduziert und vermieden werden. Außer beim FLM, bei dem auch spezielle Supportmaterialien zum Einsatz kommen, bestehen die Supportstrukturen prozessbedingt aus demselben Material wie die Bauteile. Im Rahmen dieser Arbeit sind lediglich solide Supportstrukturen von Relevanz, sodass die Bezeichnung „solide Supportstrukturen“ mit „Supportstrukturen“ gleichgesetzt wird. Wesentliche Nachteile von Supportstrukturen sind die zum Teil aufwändige Nachbearbeitung zum Entfernen des Supports und die Aufbereitung der Bauteilloberfläche sowie der damit verbundene erhöhte Zeit- und Kostenaufwand. [Geb13; JXS18; BHS13; TMH+16]

Anforderungen an Supportstrukturen für das NTLS:

Die Hauptfunktion der Supportstrukturen im NTLS-Prozess ist die Fixierung von Bauteilen an der Bauplattform zur Vermeidung von Curling und Verzug, welche aufgrund der niedrigen Bauraumtemperaturen und die dadurch induzierte, frühzeitige Kristallisation der Schmelze entstehen. Für einen fähigen Prozess ist die Vermeidung von Curling und Verzug unabdingbar. Um die Funktion zu erfüllen, müssen die Supportstrukturen steif und fest sein und eine gute Anbindung zur Bauplattform und zu den Bauteilen aufweisen, um den auftretenden Kräften standzuhalten. Im Widerspruch dazu muss sich der Support z.B. durch fragile Teilstrukturen gut vom Bauteil entfernen lassen. Aufgrund der geringen Bauraumtemperaturen ist das umliegende Pulver nicht ausreichend verfestigt, um generierte Bauteile zu tragen, sodass der Support ebenfalls eine Stützfunktion übernimmt. Wünschenswert ist weiterhin, dass der Support durch eine gängige Baujobvorbereitungssoftware automatisch generierbar ist und die Nachbearbeitung mit geringem Aufwand zu bewerkstelligen ist. Die Supportstruktur sollte möglichst zeit- und materialeffizient sein, was bedeutet, dass die Bauzeit durch die Erzeugung der Struktur nicht drastisch erhöht wird und möglichst wenig Material, das im Nachgang entsorgt wird, zum Einsatz kommt.

Supportstrukturen im LM-Prozess:

Aufgrund der zuvor aufgestellten Anforderungen, der generellen Ähnlichkeit des NTLS-Prozesses zum LM-Prozess und der Tatsache, dass Supportstrukturen im LM-Prozess in der Verzugsvermeidung und Aufnahme von Kräften und Eigenspannungen erprobt sind, weisen Supportstrukturen aus dem LM-Prozess für die Nutzung im NTLS am meisten Potential auf. Weiterhin kann für beide Prozesse die gleiche Baujobvorbereitungssoftware genutzt werden, wodurch die Umsetzung erleichtert würde. Für den LM-Prozess gibt es eine Vielzahl von Supportstruktur-Typen in verschiedenen Vorbereitungssoftwares. Supportstrukturen können je nach Material, den Anforderungen und der zu stützenden Bauteilfläche gewählt werden. Unterschieden wird dabei zwischen dünnwandigen und massiven Strukturen [GKS19]. Die Anbindung von Support zum Bauteil und/oder der Bauplattform kann mit Zähnen als Sollbruchstellen zur besseren Entferbarkeit im Post-Processing versehen werden. Dabei können die Zähne durch verschiedene Parameter wie Höhe und Abstand angepasst werden. Der Kern des Supports kann aus verschiedensten Strukturen bestehen [GKS19]. Übliche Strukturen sind in Bild 5-21 dargestellt. In der Literatur sind auch Ansätze mit Gitterstrukturen [HHY+13] und Gyroid-Strukturen [SHE+13] zu finden. Der am meisten genutzte und gebräuchlichste Support ist dabei der Blocksupport [LLZ21; LMS+19], da dieser vielseitig und leicht zu erstellen ist und eine flächige Unterstützung der Bauteile bietet [LMS+19]. Prinzipiell setzt sich der Blocksupport aus Linien- und Kontursupports also aus dünnen Wänden, die rasterartig angeordnet sind, zusammen und lässt sich aufgrund fragiler Zähne in der Kontaktfläche zum Bauteil und der geringen Anbindungsfläche gut entfernen. Kegelsupport weist eine massive Struktur auf und wird an Stellen verwendet, an denen

mit hohen Verzugskräften zu rechnen ist, viel Wärme abgeführt wird oder Blocksupport in kritischen Bereichen verstärkt wird. Sie lassen sich trotzdem gut vom Bauteil lösen. Überhänge werden mit Gusset-Support unterbaut und abgestützt und runde Bauteilbereiche werden mit Netzesupport, der aus einer Verknüpfung von Liniensupports besteht, versehen. Der massive Volumensupport wird bei großvolumigen Bauteilen, bei denen hohe Eigenspannungen erwartet werden, verwendet [GKS19].

Typ	3D-Ansicht	Draufsicht	Typ	3D-Ansicht	Draufsicht
Block			Kegel		
Linie			Gusset		
Punkt			Volumen		
Netz			Kontur		

Bild 5-21: Supportstrukturen für den LM-Prozess aus der Software Magics (nach [LMS+19])

5.5.2 Auswahl und Voruntersuchungen

Der Fokus der Supportuntersuchung wird auf Block- und Kegelsupport gelegt, da beide Supporttypen sehr gebräuchlich und einfach zu generieren sind. Sie sind zudem für den Einsatz zur Vermeidung von Verzug und Curling durch die flächige Unterstützung beim Blocksupport und die massive Struktur beim Kegelsupport ausgelegt. Zudem lassen sie sich durch die im Rahmen dieser Arbeit genutzt Baujobvorbereitungssoftware Magics erzeugen. Der grundsätzliche Aufbau und die einzustellenden Parameter der beiden Supporttypen sind in Bild 5-22 dargestellt.

Im ersten Schritt wird die generelle Herstellbarkeit im konventionellen LS-Prozess mit EOS-Standardparametern durch einfache, mit Block- und Kegelsupport versehene Prüfkörper ($50 \times 50 \times 2 \text{ mm}^3$) mit 10 mm hohem Support in verschiedenen Ausführungen, also

unterschiedlichen Supportparametern, betrachtet. Auf Basis dessen sollen die Supportparameter für die Untersuchung im NTLS abgeschätzt bzw. eingegrenzt werden. Es werden 25 verschiedene Parametersets beim Blocksupport und 14 verschiedene Parametersets

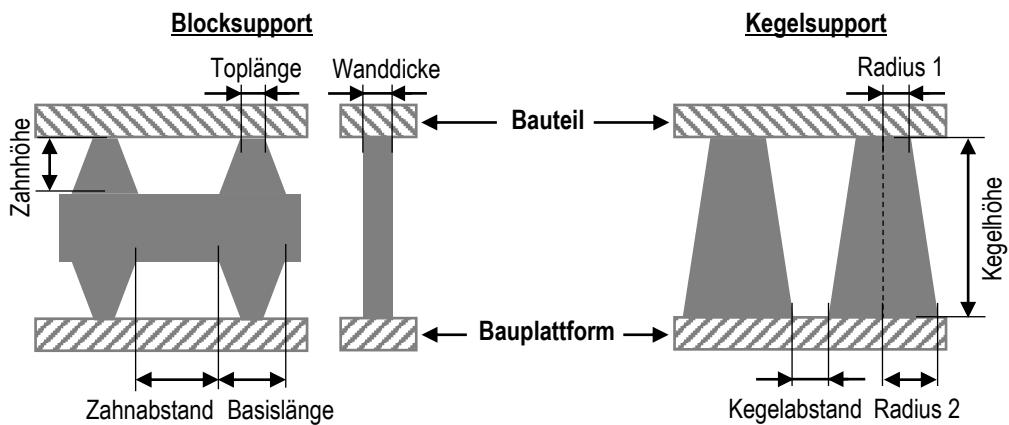


Bild 5-22: Aufbau und Parameter zu Block- und Kegelsupport

beim Kegelsupport unter Variation der in Bild 5-22 dargestellten Parameter untersucht. Die Parametersets sind in Anhang A1 in Tabelle A 2 und Tabelle A 3 aufgelistet. Es zeigt sich, dass alle Prüfkörper problemlos fertigbar sind und einen ausreichend festen Verbund zwischen Support und Prüfkörper aufweisen. Bei der Trennung von Support und Plattenprüfkörper können Unterschiede in den Verbundfestigkeiten festgestellt werden. Ein einfaches Ablösen z.B. unter Verwendung eines Spachtels, welches im NTLS gewünscht ist, ist beim Blocksupport bei einer zu hohen Wanddicke, zu großer Toplänge sowie zu geringem Zahnabstand nicht möglich. Weiterhin muss eine ausreichende Zahnhöhe zum Ansetzen des Werkzeugs zum Trennen vorhanden sein. Die vorläufigen Parameter für die Fertigung von Blocksupport sind in Tabelle 5-6 zusammengefasst.

Tabelle 5-6: Vorläufiges Parameterset für Blocksupport

Parameter	Gesamthöhe	Wanddicke	Zahnhöhe	Zahnabstand	Toplänge	Basislänge
Ausprägung / mm	10	1	4	0,2	0,6	2

Beim Kegelsupport weisen alle Parametersets eine schwächere Verbundfestigkeit und damit eine einfachere Entfernbareit der Kegel vom Prüfkörper auf, obwohl der Kegelradius im Anbindungsbereich (Radius 1) mit Ausprägungen zwischen 0,3 und 0,6 mm mindestens so groß wie die als umsetzbar identifizierte Toplänge beim Blocksupport von 0,6 mm ist. Der Unterschied ist möglicherweise auf die im Vergleich zum Blocksupport fehlende Vernetzung der Kegel untereinander zurückzuführen.

5.5.3 Experimentelle Untersuchung der Prozessfähigkeit

In den folgenden Abschnitten wird die Prozessfähigkeit von Block- und Kegelsupportstrukturen im NTLS experimentell untersucht.

5.5.3.1 Rahmenbedingungen und Vorgehensweise

Aufgrund der Erkenntnisse zu Block- und Kegelsupport im konventionellen LS wird zunächst Blocksupport im NTLS mit den im Vorfeld ermittelten und den in Tabelle 5-6 aufgeführten vorläufigen Parametern, deren Umsetzbarkeit es nun im NTLS zu bestätigen gilt, untersucht. Als zu supportierende Prüfkörper kommen zunächst die zum Curling neigenden, sog. Curlkreuze (siehe Bild 5-23), die der Hersteller EOS zur Temperatursuche im konventionellen LS verwendet, zum Einsatz. Im weiteren Verlauf werden Zugstäbe des Typs 1BA nach DIN EN ISO 527 genutzt [DIN 527-2].

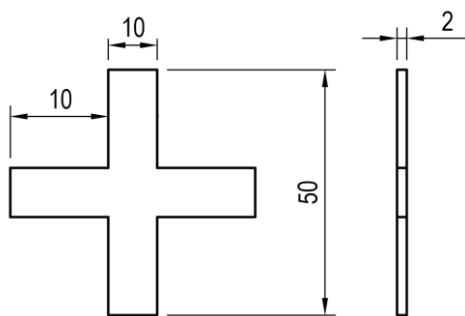


Bild 5-23: Curlkreuz

Die Belichtungsparameter werden auf Basis der Erkenntnisse der Vorstudie in Abschnitt 5.4, bei der grundsätzlich alle Parametersets bei vollflächiger Anbindung eine gute prozessfähige Anbindung zur Bauplattform zeigen, gewählt und werden in Tabelle 5-7 mit den weiteren Rahmenbedingungen zusammengefasst. Dabei werden die Scangeschwindigkeit mit 5000 mm/s und der Hatchabstand mit 0,16 mm für eine kurze Schichtzeit vergleichsweise hoch gewählt, um eine effiziente Supportfertigung zu ermöglichen. Support und Bauteil werden dabei nach den Erkenntnissen aus Abschnitt 5.4 für homogene Eigenschaften über den Querschnitt durchgehend dreifach belichtet. Lediglich die ersten Schichten des Supports werden, angelehnt an die Mehrfachbelichtung zur Anbindung der ersten Schichten in Abschnitt 5.4, manuell doppelt so oft (sechsmal) belichtet. Die Bauteileigenschaften werden an dieser Stelle nicht betrachtet, sodass Support und Bauteil mit denselben Parametern belichtet werden und die Mehrfachbelichtung nicht weiter untersucht wird. Eine Anpassung der Belichtungsparameter wird im Zuge der Supportstruktur-Untersuchung nicht angestrebt, um den Umfang an Einflussgrößen zu reduzieren, auch wenn mit einem Einfluss der Belichtungsparameter und -strategie auf die Prozessfähigkeit verschiedener Supportgeometrien zu rechnen ist. Vielmehr werden die Supportstrukturen bzw. -geometrien ausschließlich hinsichtlich der Funktionalität und Prozessfähigkeit unter Verwendung

der gegebenen Belichtungsparameter betrachtet. Dazu wird die Anbindung des Supports zur Bauplattform und zum Bauteil, die Entferbarkeit (insbesondere vom Bauteil) sowie das Curling und der Verzug der Prüfkörper untersucht. Zunächst wird der Support an flach orientierten Prüfkörpern (XYZ-Orientierung), da diese die größte anzubindende Fläche bieten und dadurch eher zu Verzug und Curling neigen, untersucht. Anschließend werden weitere Orientierungen betrachtet.

Tabelle 5-7: Rahmenbedingungen und Belichtungsparameter

Rahmenbedingungen			
Bauraumtemperatur	°C	80	
Schichtdicke	µm	120	
Bauplattform	Organoblech (PA6 / PA12, CF mit 50 Vol.-%)		
Prüfkörper	Curlkreuz, Zugstab 1BA [DIN 527-2]		
Belichtungsparameter (Support und Bauteil)			
Anzahl der Mehrfachbelichtung		3	
Hatch	Laserleistung Scangeschwindigkeit Hatchabstand	W mm/s mm	50 5000 0,16
Kontur und Edge (Kontur- vor Hatchbelichtung)	Laserleistung Scangeschwindigkeit Beamoffset	W mm/s mm	40 4000 0,35

5.5.3.2 XYZ-Orientierung

Begonnen wird mit der Untersuchung von mit Blocksupport unterbauten, flach orientierten Curlkreuzen auf dem in Abschnitt 5.3.1 identifizierten PA6-CFK-Organoblech mit den vorläufigen Blocksupport-Parametern aus Tabelle 5-6. Dabei ergeben sich die im Folgenden aufgeführten Erkenntnisse, welche teilweise in Bild 5-24 dargestellt sind. Blocksupport mit plattformseitigen Zahnstrukturen kann in den ersten Schichten nicht an der Bauplattform angebunden werden. Nach dem Prozess sind keine Zahnrückstände auf der Bauplattform zu erkennen. Blocksupport mit bauteilseitigen Zahnstrukturen ist herstellbar, neigt aber zum Verzug des Bauteil-Support-Verbunds und zur Ablösung von der Bauplattform (Bild 5-24, links oben). Um dem Verzug und der Ablösung entgegenzuwirken, wird der Support konstruktiv um das Curlkreuz herum vergrößert, um mehr Anbindungsfläche zu generieren und das Curlkreuz vor Verzug zu bewahren. Zum einen wird der Support an den Schenkeln des Curlkreuzes verlängert (Bild 5-24, links unten) und zum anderen wird ein um das Curlkreuz ringförmiger Support ergänzt (Bild 5-24, rechts oben). Weiterhin wird zur Erhöhung der Anbindungsfläche die Wandstärke des Blocksupports von 1 mm auf 1,5 mm erhöht (Bild 5-24, rechts unten). Alle drei Maßnahmen resultieren durch Sichtprüfung in geringerer Ablösung und geringerem Verzug des Bauteil-Support-Verbunds. Die tendenziell geringste Ablösung

weist der Prüfkörper mit dem zusätzlich ringförmig angelegten Support und 1 mm Wandstärke (Bild 5-24, rechts oben) auf. Die erhöhte Wandstärke mit 1,5 mm führt zu einer deutlich erschweren Ablösung des Supports von der Bauplattform im Zentrum des Prüfkörpers, zur Vergilbung durch zu hohen Energieeintrag, wie unten rechts in Bild 5-24 zu erkennen, und dazu, dass das Bauteil nicht zerstörungsfrei vom Support gelöst werden kann. Eine weitere Vergrößerung der Supportfläche durch Streben und Rippen um den Ring herum zeigt keine Verbesserung. Die vorläufigen Blocksupport-Parameter haben sich also für eine grundsätzlich prozessfähige Bauteilanbindung im NTLS bewährt, auch wenn geringe Ablösungen zu verzeichnen sind und Baujobabbrüche je nach Struktur auftreten.

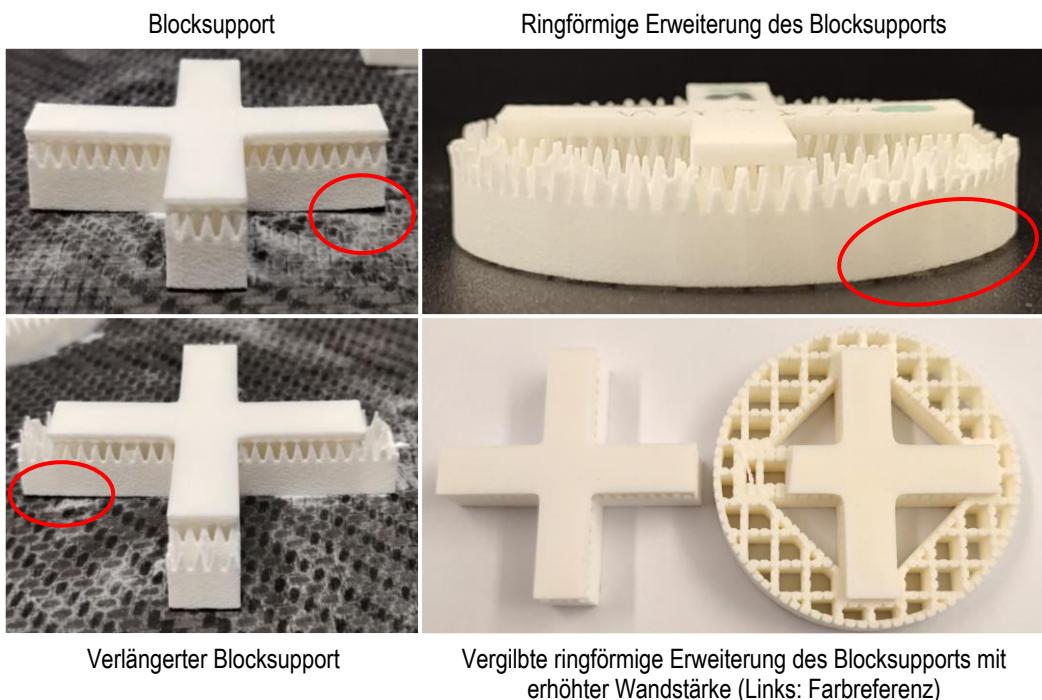


Bild 5-24: Ablösung des Supports von der Bauplattform bei unterschiedlich mit Blocksupport unterbauten Curlkreuzen (rot markiert) und Vergilbung bei Erhöhung der Blocksupport-Wandstärke (unten rechts) (nach [Flo22])

Weiterhin werden supportierte Zugstäbe des Typs 1BA untersucht, da sie Gegenstand späterer Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften ab Abschnitt 5.6 werden und daher eine prozessfähige Anbindung mit Support notwendig ist. Durch das hohe Aspektverhältnis ist der Zugstab ebenfalls sehr anfällig für Curling und Verzug. Die zuvor gewonnenen Erkenntnisse werden auf die Zugstäbe übertragen und geprüft. Dafür werden Zugstäbe mit reinem Blocksupport, mit durch zusätzlichen Liniensupport an der äußeren Kante der Zugstab-Schultern verstärktem Blocksupport und vergrößertem Blocksupport um den Zugstab herum betrachtet (Bild 5-25). Die äußeren Kanten der Zugstab-Schultern sind, wie z.B. in Bild 5-12 der Vorstudie zu erkennen, die kritischen Bereiche hinsichtlich Curling, Verzug und der Ablösung von der Bauplattform. Trotz vergrößertem Support treten

mehrmalige Prozessabbrüche auf und bei erfolgreicher Fertigung des vergrößerten Supports zeigt sich eine starke Ablösung von der Bauplattform und starker Verzug des Zugstab-Support-Verbunds (Bild 5-25, oben). Die beiden anderen Varianten sind herstellbar, weisen jedoch leichte Ablösungen von der Bauplattform im Schulterbereich auf, welche bei reinem Blocksupport ohne Verstärkung durch Liniensupport eine stärkere Ausprägung hat (Bild 5-25, Mitte und unten). Beide Varianten lassen sich gut von der Bauplattform lösen und die Bauteile lassen sich vom Support zerstörungsfrei trennen.

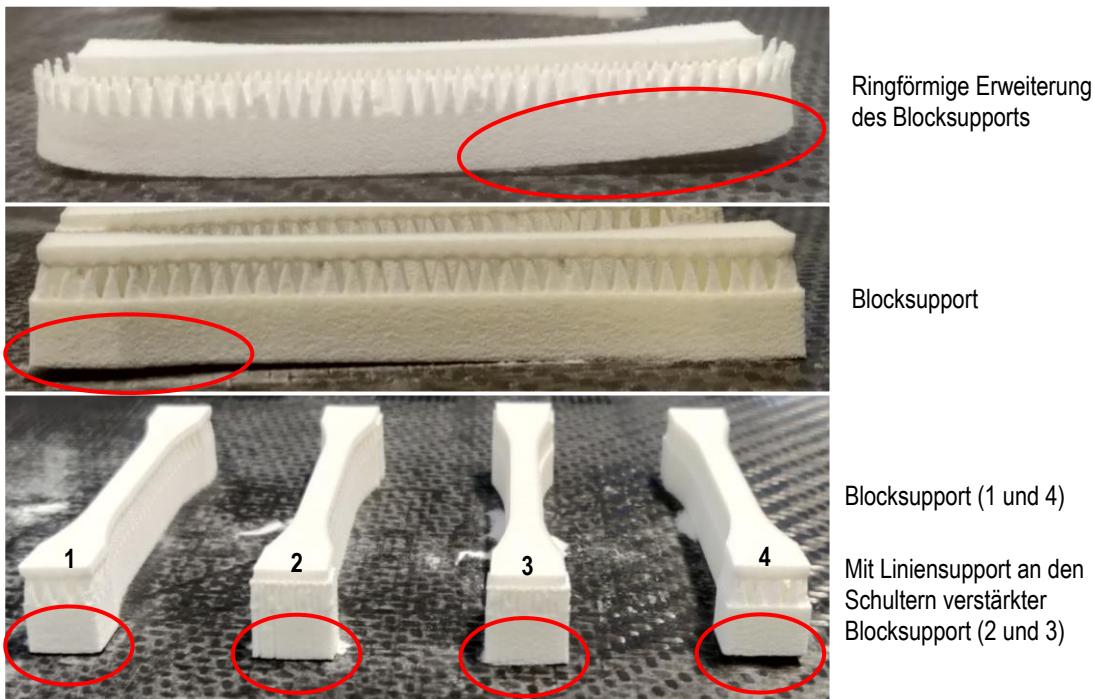


Bild 5-25: Ablösung des Supports von der Bauplattform bei unterschiedlich mit Blocksupport unterbauten Zugstäben (rot markiert) (nach [Flo22])

Auch bei supportierten Zugstäben erweisen sich die vorläufigen Blocksupport-Parameter als grundsätzlich umsetzbar. Jedoch treten bei der Vielzahl an getesteten Strukturen weiterhin Baujobabbrüche durch Ablösung der Strukturen aufgrund von Verzug unterhalb der Pulverbettoberfläche auf. Die Problematik wird daher eher in der generellen Anbindung der Strukturen an der Bauplattform als im Supportstrukturaufbau bzw. in den Supportparametern vermutet. Aus diesem Grund wird das CFK-Organoblech mit PA12-Matrix, welches in den Voruntersuchungen zur Bauplattform in Abschnitt 5.3.1 bei der flächigen Anbindung von Prüfkörpern eine zu feste, nicht zerstörungsfrei lösbare Verbindung aufweist, mit Supportstrukturen erneut betrachtet, bevor eine Anpassung der Belichtungsparameter in Betracht gezogen wird. Bei der Fertigung auf dem PA12-CFK-Organoblech kann festgestellt werden, dass die Strukturen unter Verwendung der vorläufigen Blocksupportparameter vollständig angebunden bleiben und keine Ablösung auftritt. Entgegen der Voruntersuchungen in Abschnitt 5.3.1 können die Supportstrukturen aufgrund der geringeren

Anbindungsfläche im Nachgang an den Prozess gut von der Bauplattform gelöst werden. Das PA12-CFK-Organoblech erweist sich also in Kombination mit den gewählten Blocksupportstrukturen und Supportparametern als prozessfähige und robuste Einstellung für den NTLS-Prozess. Zur Reduktion der Bauzeit kann ebenfalls gezeigt werden, dass eine Reduktion der Suporthöhe von 10 mm auf 6 mm möglich ist. Von einer weiteren Reduktion der Suporthöhe wird abgesehen, da sich eine Zahnhöhe von 4 mm bewährt hat und ein Minimum der soliden Wandhöhe des Blocksupports von 2 mm als sinnvoll erachtet wird.

Trotz der nachgewiesenen Prozessfähigkeit von Blocksupport wird Kegelsupport zu Vergleichszwecken betrachtet. Dafür werden Zugstäbe mit Kegelsupport in unterschiedlichen Ausführungen, deren Parameter in Tabelle 5-8 aufgelistet sind, jeweils zweimal gefertigt und untersucht. Es zeigt sich eine generelle Herstellbarkeit mit guter Anbindung zur Bauplattform, jedoch lösen sich in den Schulter- und Randbereichen einzelne Kegel von den Zugstäben ab, wie in den Markierungen in Bild 5-26 zu erkennen. Die Ablösung ist auf die Kräfte, die während des Schwunds des Zugstabs entstehen, zurückzuführen. Die wirkenden Kräfte sind durch zum Teil starke Deformationen der Kegel ersichtlich, insbesondere bei den Prüfkörpern 1 und 6 (Bild 5-26). Weiterhin lassen sich die Kegel mit einem plattformseitigen Radius von 1,5 mm schlecht von der Bauplattform lösen.

Tabelle 5-8: Untersuchte Kegelsupport-Parameter [Flo22]

# Prüfkörper	Kegelhöhe / mm	Radius 2 (oben) / mm	Radius 1 (unten) / mm	Kegelabstand / mm	Anzahl der Kegel
1, 6	4	0,5	1	1	60
2, 7	4	0,5	1	0,5	78
3, 8	4	0,5	1,5	0,5	46
4, 9	4	0,5	1,5	0,9	42
5, 10	4	0,5	1	1	46

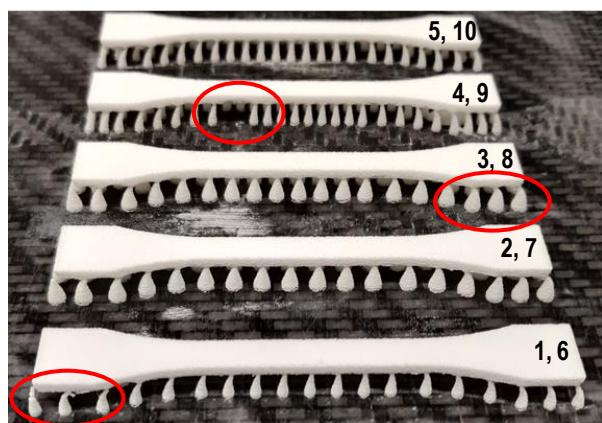


Bild 5-26: Mit unterschiedlich parametrisiertem Kegelsupport (Tabelle 5-8) unterbaute Zugstäbe

Da Kegelsupport neben Blocksupport also ebenso herstellbar und nutzbar ist, wird der Einfluss der Supportstrukturen auf die Formhaltigkeit der Zugstäbe ermittelt. Unter Verwendung eines Makroskops wird der Verzug der Zugstäbe bestimmt. Dafür werden die Zugstäbe unter zur Hilfenahme eines Probenhalters seitlich auf dem Tisch der Messeinrichtung aufgestellt (Bild 5-27). In der Makroskop-Aufnahme werden, wie in Bild 5-28 anhand eines Beispiels schematisch dargestellt, auf der Oberseite des Zugstabs zwei parallele Linien – die erste von Schulteraußenkante zu Schulteraußenkante und die zweite durch das Tal in der Zugstabmitte – gelegt und der Abstand der beiden Linien als Verzug gemessen. Es ist anzumerken, dass die Linien durch den Bediener händisch in die Aufnahme gelegt werden und die Lage der Linien daher Schwankungen unterliegt. Die Auswertung und Gegenüberstellung der Ergebnisse von Block- und Kegelsupport sind daher ausschließlich qualitativ und nicht quantitativ zu bewerten.

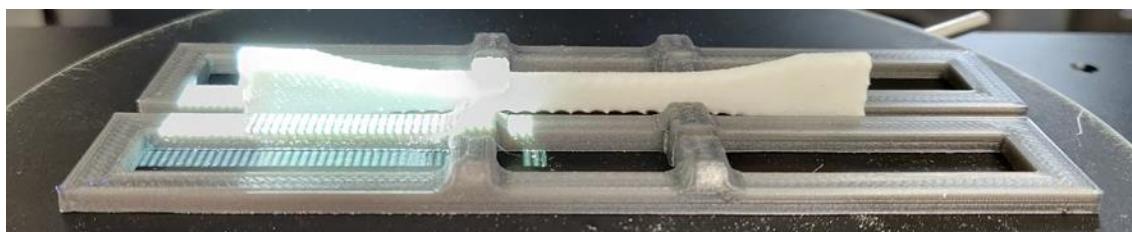


Bild 5-27: Messaufbau am Makroskop [Flo22]

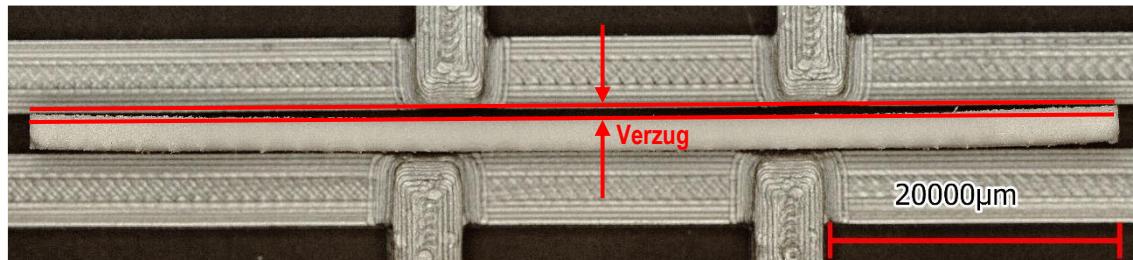


Bild 5-28: Verzugsmessung mit dem Makroskop (nach [Flo22])

Der Verzug wird für alle gefertigten Prüfkörper auf dem PA12-CFK-Organoblech mit Block- und Kegelsupport (je 7-10 Prüfkörper) bestimmt. Die Ergebnisse sind in Bild 5-29 zusammengefasst. Beim Blocksupport wird zwischen einer Suporthöhe von 10 mm und 6 mm unterschieden. Die Supportparameter bleiben hier unberücksichtigt, da zum einen nicht ausreichend Prüfkörper für eine einzelne Untersuchung vorliegen und zum anderen aufgrund des Messprinzips ohnehin Schwankungen auftreten und daher, wie zuvor bereits erwähnt, eine ausschließlich qualitative Bewertung zwischen Block- und Kegelsupport erfolgt. Zu erkennen ist, dass der Kegelsupport einen ca. viermal höheren Verzug im Vergleich zu den beiden Blocksupportvarianten, deren Verzug sich nur geringfügig voneinander unterscheidet, aufweist. Die hohen Standardabweichungen lassen sich im Wesentlichen auf das Messprinzip zurückführen. Es ist also festzuhalten, dass Blocksupport

qualitativ betrachtet in deutlich weniger Verzug der Zugstäbe resultiert und daher im weiteren Verlauf dieser Arbeit für flach orientierte Zugstäbe (XYZ-Orientierung) genutzt wird.

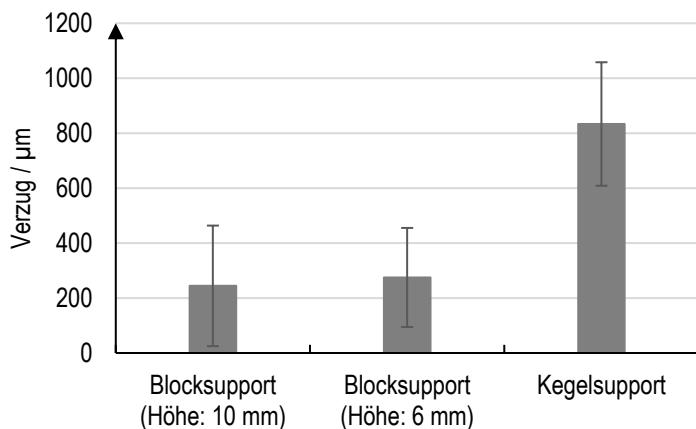


Bild 5-29: Verzug von Zugstäben nach der Fertigung mit unterschiedlichen Supportstrukturen

5.5.3.3 Weitere Orientierungen

Nach der erfolgreichen Identifizierung von Supportstrukturen für flach orientierte Curlkreuze und Zugstäbe, werden weitere Orientierungen getestet. Zunächst wird die ZXY-Orientierung also in Aufbaurichtung orientierte Zugstäbe betrachtet. Diese werden mit reinem Blocksupport, durch Linien- und Punktsupport verstärkten Blocksupport und Volumensupport, der bei dem vergleichsweisen kleinen Querschnitt weder die Fertigung signifikant verlängert noch durch die Anbringung am Schulterende Einfluss auf die Zugprüfung nimmt, gefertigt. Bei der XYZ-Orientierung hätte der Volumensupport hingegen spanend vom Zugstab abgetragen werden müssen und hätte durch eine vermeintlich andere Oberflächenstruktur im spanend bearbeiteten Bereich Einfluss auf die Zugprüfung genommen. Die in Aufbaurichtung gefertigten Zugstäbe sind in Bild 5-30 (links) abgebildet. Sämtliche Supportvarianten zeigen eine problemfreie Fertigung, sodass im weiteren Rahmen der Arbeit unverstärkter Blocksupport bei ZXY-orientierten Zugstäben verwendet wird.

Bei in XZY-Orientierung gefertigten Zugstäben (Bild 5-30, rechts) zeigt sich, dass Verzug insbesondere im Schulterbereich, wie in Bild 5-31 zu erkennen, auftritt. Block-, Linien- und Kegelsupport weisen Ablösungen der Zugstäbe vom Support oder des Supports von der Bauplattform im Schulterbereich auf. Ursächlich kann die geringe Anbindungsfläche aufgrund der Dicke des Zugstabs von 2 mm sein. Vertikale Zugstäbe (ZXY-Orientierung) weisen ebenfalls nur eine 2 mm breite Anbindungsfläche auf. Jedoch treten durch die geringe Ausdehnung in der Bauebene geringere Verzugskräfte auf. Die auf der Unterseite nach oben geneigten Ecken der XZY-orientierten Zugstäbe lassen zudem Curling in den untersten Bauteilschichten durch ungenügende Fixierung durch den Support vermuten. Erstmalig und entgegen der vorherigen Betrachtung zu Supportstrukturen weist der Support keine

konstante Höhe auf, sodass innerhalb des Supports mit ungleichmäßigm Schwund zu rechnen ist. Dieser kann ebenfalls Einfluss auf den Bauteilverzug haben. Eine Verstärkung des Supports durch Punktsupport an den Schultern oder eine konstruktive Erweiterung des Supports könnte zur Verringerung des Verzugs beitragen.

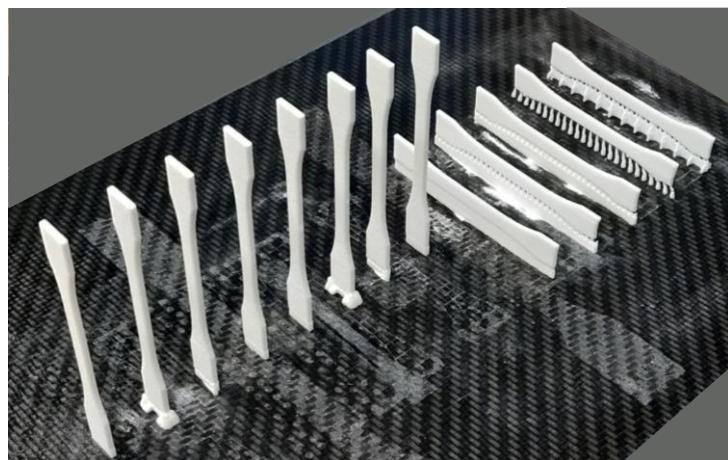


Bild 5-30: Zugstäbe in ZXY-Orientierung (links) und XZY-Orientierung (rechts) mit verschiedenen Supportstrukturen



Bild 5-31: Im Schulterbereich deformierte bzw. verzogene Zugprüfkörper in XZY-Orientierung

Weiterhin werden zur Bauebene geneigte Zugstäbe mit Winkeln von 15° , 25° , 35° und 45° betrachtet. Dafür wird lediglich die zur Bauplattform ausgerichtete Stirnseite der Zugstabschulter mit Support versehen. Aufgrund der zuvor gewählten Blocksupportparameter, insbesondere Wanddicke und Zahnabstand, kann eine flächige Supportierung wegen der zur Bauplattform geneigten Stirnfläche des Zugstabs nicht erfolgen. Aus diesem Grund wird die Stirnseite des Zugstabs konstruktiv angepasst, sodass eine zur Bauplattform parallele Fläche vorliegt. Grundsätzlich sind die unterschiedlich geneigten Zugstäbe herstellbar, wie in Bild 5-32 dargestellt. Insbesondere auf der Unterseite des um 15° zur Bauplattform geneigten Zugstabs zeigen sich deutliche Oberflächendefekte (Bild 5-32, links unten). Diese sind darauf zurückzuführen, dass die Treppenstufen des Bauteils mit zunehmend flachem Winkel größer werden. Ab einem gewissen Versatz wie hier bei 15° wahrnehmbar, ist eine Stabilisierung bzw. Fixierung der aufgeschmolzenen Stufe durch die vorherige Stufe

nicht mehr ausreichend gegeben, sodass Curling im überstehenden Bereich auftritt. Die Fläche wölbt sich dabei aus dem Pulverbett heraus und wird bei jeder Fahrt des Beschichters leicht touchiert. Eine andere mögliche Ursache kann das bei den geringeren Temperaturen im NTLS sehr lose Pulverbett (siehe Abschnitt 5.7) sein, welches die überstehenden, nicht unterbauten Bereiche nicht ausreichend trägt und diese deshalb in das Pulverbett absinken. Bei einer Neigung von 25° sind die Defekte ebenfalls vorhanden, treten aber in deutlich geringerer Form auf. Bei 35° und 45° sind keine Defekte festzustellen. Bei Neigungswinkeln unter 35° schafft eine vollständige Supportierung der Zugstabunterseite Abhilfe.

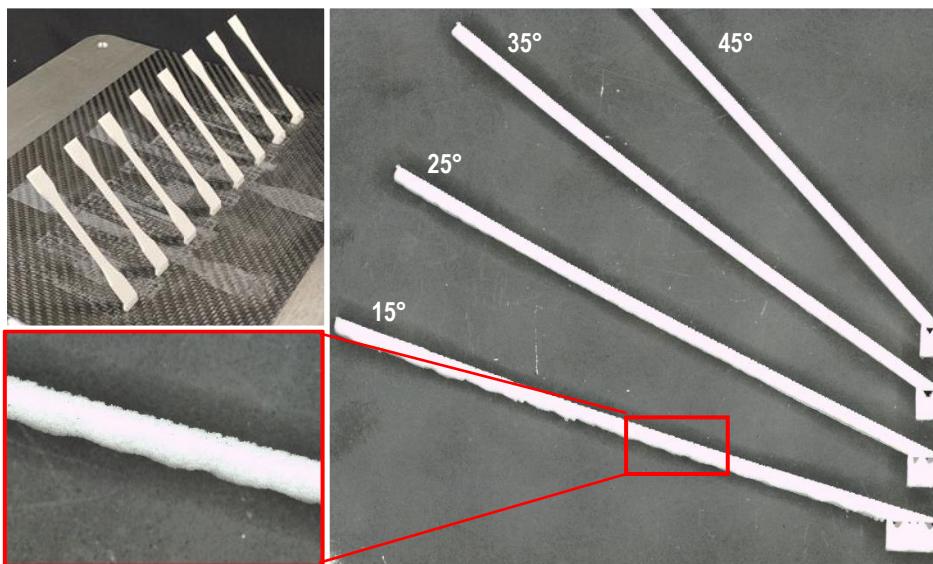


Bild 5-32: Zur Bauebene geneigte Zugstäbe (15° bis 45°)

5.5.4 Zusammenfassung und Fazit

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die durchgeföhrten Untersuchungen die Fertigung mit Supportstrukturen im NTLS nachweisen und Verzug und Curling größtenteils vermieden werden können. Im Gegensatz zur Vorstudie (Abschnitt 5.4) führt bei den in der Anbindungsfläche reduzierten Supportstrukturen ein CFK-Organoblech mit PA12-Matrix als Bauplattform zum Erfolg. Die Supportstrukturen können fest angebunden werden. Eine Ablösung während des Abkühlens tritt nicht auf. Auch die prozesssichere Verbindung zwischen Bauteil und Support kann für verschiedene Supportstrukturen aufgezeigt werden. Trotz der für den Prozess ausreichend festen Verbindungen lassen sich Support und Bauteil sowie der Support von der Bauplattform problemfrei und leicht mit z.B. einem Spachtel trennen.

Für XYZ-orientierte Prüfkörper zeigen Block- und Kegelsupport prozessfähige Ergebnisse. Kegelsupport führt jedoch zu deutlich höherem Verzug der Zugstäbe. Prüfkörper in ZXY-Orientierung lassen sich mit Blocksupport, durch Linien- und Punktsupport verstärkten

Blocksupport und reinem Volumensupport prozesssicher fertigen. Auch für die Fertigung geneigter Zugstäbe, die ausschließlich an der Stirnseite der Schulter supportiert werden, bewährt sich Blocksupport bis zu einem Neigungswinkel von 35° zur Bauplattform. Bei kleineren Neigungswinkeln empfiehlt sich eine vollflächige Supportierung der Zugstäbe, um Oberflächendefekten vorzubeugen. Bei in XZY-Orientierung gefertigten Zugstäben treten Verzug und Ablösungen im Schulterbereich sowohl zwischen Bauteil und Support als auch zwischen Support und Bauplattform auf.

Bewährte Parameter für den universell, für alle Orientierungen nutzbaren Blocksupport sind die im Rahmen der Voruntersuchungen vorläufig identifizierten Parameter, welche im Folgenden in Tabelle 5-9 erneut zusammengefasst werden. Aus Effizienzgründen wurde die Suporthöhe von 10 mm auf 6 mm reduziert. Die Belichtungsparameter für den Support verbleiben unverändert und sind in Tabelle 5-7 aufgelistet.

Tabelle 5-9: Blocksupportparameter

Parameter	Gesamthöhe	Wanddicke	Zahnhöhe	Zahnabstand	Toplänge	Basislänge
Ausprägung / mm	6	1	4	0,2	0,6	2

5.6 Experimentelle Entwicklung und Optimierung von Prozessparametern für das NTLS mit Mehrfachbelichtung

Die vorangegangenen Untersuchungen identifizieren die Mehrfachbelichtung innerhalb einer Schicht durch Akkumulation der Energie als Möglichkeit, ausreichend Energie für eine hohe Koaleszenz des Materials aufzubringen. Der Energieeintrag kann sukzessive über das Energieniveau einer zu intensiven Einfachbelichtung, bei der das Material erkennbar durch starke Rauchbildung und vergilzte Bauteile thermisch degradiert wird, gesteigert werden. Zudem sind Supportstrukturen für das NTLS entwickelt worden, sodass Bauteile und Prüfkörper verschiedener Orientierungen herstellbar sind. Der angepasste Prozessablauf ist in Bild 5-33 dargestellt.

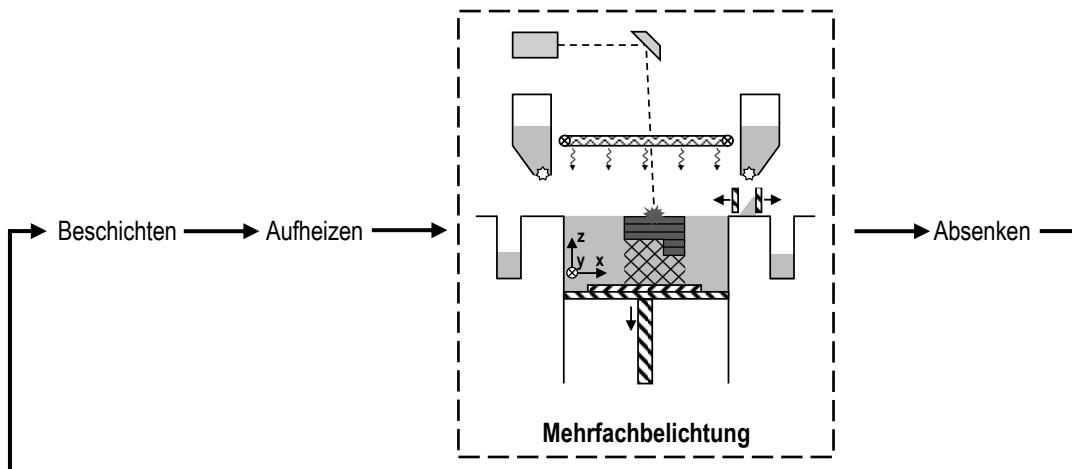


Bild 5-33: Anpassung des Prozesses durch Supportstrukturen und Mehrfachbelichtung

Zur Beschreibung der Flächenenergiedichte bei Mehrfachbelichtung wird die Formel 5-1 für die Gesamtenergiedichte ($A_{z,ges}$) eingeführt. Dabei wird die Formel 2-1 für die Flächenenergiedichte bei Einfachbelichtung (ab hier $A_{z,einfach}$) um die Belichtungsanzahl (n) ergänzt. Die Formel summiert damit die Flächenenergiedichten der einzelnen Belichtungen der Mehrfachbelichtung auf und gibt damit die mittlere Gesamtenergiedichte einer mehrfach belichteten Fläche an.

$$A_{z,ges} = n * A_{z,einfach} = \frac{n * P}{v * d} \quad (5-1)$$

Im Folgenden werden die Belichtungsparameter der Mehrfachbelichtung untersucht. Dafür werden zunächst Untersuchungen an Einschichtprüfkörpern durchgeführt, um einen Überblick über die Auswirkungen der Mehrfachbelichtung z.B. über den Materialverbund oder die Aufschmelztiefe zu erhalten. Anschließend wird der Einfluss der Gesamtenergiedichte, der zugrundeliegenden Belichtungsparameter und der Schichtzeit (t) auf die mechanischen Eigenschaften in XYZ- und ZXY-Orientierung untersucht. Der Einfluss der Bauraumtemperatur (T) und der Schichtdicke (s) sowie der Mikrostruktur und der Kristallinität wird ebenfalls

betrachtet. Ziel ist es, die Bauteileigenschaften zu maximieren bzw. den Bauteileigenschaften des konventionellen LS-Prozesses anzunähern.

Die Untersuchungen und Daten der Abschnitte 5.6.1 bis 5.6.3 sind zum Teil im Rahmen der studentischen Arbeit von Flottmeyer [Flo22] entstanden.

5.6.1 Untersuchung von Einschichtprüfköpern

Zur ersten Untersuchung der Mehrfachbelichtung werden Einschichtprüfkörper mit einer Fläche von $20 \times 20 \text{ mm}^2$ bei einer Bauraumtemperatur von 80°C und einer Schichtdicke von $120 \mu\text{m}$ ohne Anbindung an eine Bauplattform lose im Pulverbett gefertigt. Der Prozess wird nach vollendeter Belichtung dieser Schicht direkt gestoppt, sodass keine weitere Beschichtung erfolgt und die aufgrund der niedrigen Temperatur gecurlten Einschichtprüfkörper vom Beschichter nicht mitgerissen und beschädigt werden können. Der Verzicht auf die anschließende Beschichtung hat zudem den Vorteil, dass kein Pulver auf der Oberseite der Einschichtprüfkörper appliziert wird und anhaftet, welches die Untersuchung und Bewertung der Einschichtprüfkörper beeinflussen würde. Die Einschichtprüfkörper dienen der Untersuchung der Materialkoaleszenz bzw. des Materialverbunds sowie der Dichte bzw. Porosität der aufgeschmolzenen Schicht in Abhängigkeit der Energiedichte der Mehrfachbelichtung. Weiterhin kann die Aufschmelztiefe, welche sich durch die Kombination aus Eindringtiefe des Lasers und Wärmeleitung ergibt, anhand der Dicke der Einschichtprüfkörper bestimmt werden. Zu beachten ist, dass die folgenden mikroskopischen und rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen und die Messungen der Dicke im Zentrum der Prüfkörper entstehen, da die Randbereiche der Prüfkörper aufgrund der fehlenden Anbindung Curling und Schwund nach jedem Belichtungsschritt der Mehrfachbelichtung aufweisen und daher keine aussagekräftige Messung zulassen würden. Die Messung der Dicke erfolgt mit einer durch eine Ratsche kraftbegrenzten Bügelmessschraube.

Anhand von Bild 5-34, in dem mikroskopische Aufnahmen von einfach bis fünffach belichteten Schichten bei konstanten Belichtungsparametern abgebildet sind, zeigt sich, dass die Dichte der Schicht bzw. der Materialverbund mit zunehmender Belichtungsanzahl zunimmt. Dies bestätigt die in der Vorstudie in Abschnitt 5.4 anhand der REM-Aufnahmen der Bruchflächen getroffenen Schlussfolgerung. Für die in Bild 5-34 vorliegende Flächenenergiendichte von $0,04 \text{ J/mm}^2$ zeigt sich bei Einfachbelichtung kein ausreichendes Aufschmelzen und Zusammenfließen der Partikeln. Bei zwei- bis vierfacher Belichtung ist das Aufschmelzen der Partikeln mit Ausbildung einer zusammenhängenden Schicht erkennbar. Die Schichten weisen jedoch Poren auf, welche mit zunehmender Belichtungsanzahl abnehmen. Ab fünffacher Belichtung ist die Schicht nahezu vollständig geschlossen und ist von einer LS-Referenzschicht im Rahmen der verwendeten Auflösung nicht zu unterscheiden.

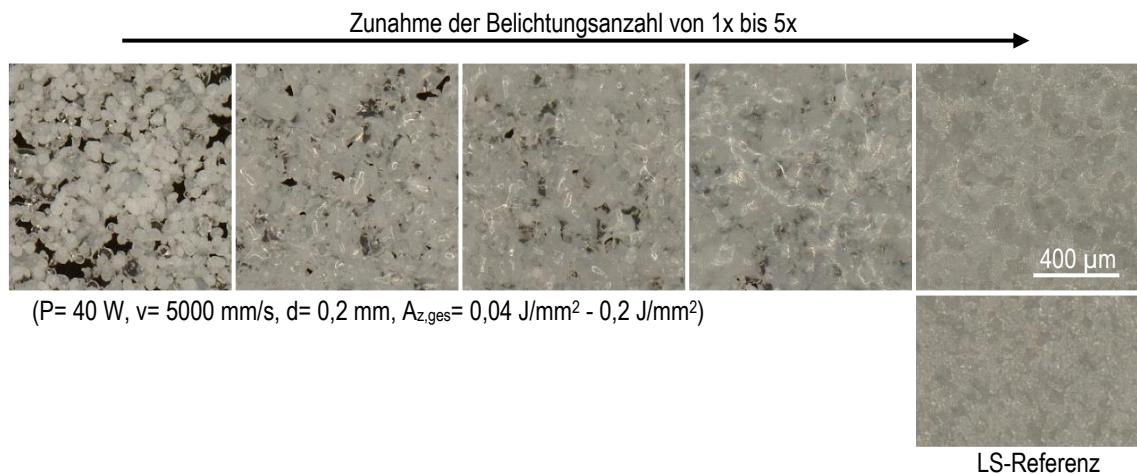


Bild 5-34: Mikroskopische Aufnahmen von Einschichtprüfkörpern bei Einfach- bis Fünffachbelichtung

Zur genaueren Betrachtung werden deshalb zusätzlich REM-Aufnahmen in Bild 5-35 betrachtet. Der Einschichtprüfkörper der Fünffachbelichtung weist eine nahezu geschlossene Fläche mit zusammengeschmolzenem Material auf. Restliche nicht vollständig aufgeschmolzene Partikeln sind an der Oberfläche zu verzeichnen. Der Einschichtprüfkörper der LS-Referenz hingegen weist eine nicht vollständige Koaleszenz mit Poren in der Struktur auf. Die Dicke der beiden Einschichtprüfkörper ist mit 0,25 mm und 0,3 mm annähernd gleich und hat damit keinen relevanten Einfluss in dieser Betrachtung. Aus dieser Untersuchung resultiert also eine minimale Gesamtenergidichte von $0,2 \text{ J/mm}^2$ bei Fünffachbelichtung, die als grober Richtwert für weitere Untersuchungen dient. Es ist jedoch zu vermerken, dass das Resultat von vielen Faktoren unter anderem der Schichtzeit bzw. der Zeit zwischen den einzelnen Belichtungen der Mehrfachbelichtung einer Fläche abhängt, was im späteren Verlauf dieser Arbeit Gegenstand detaillierter Untersuchungen wird.

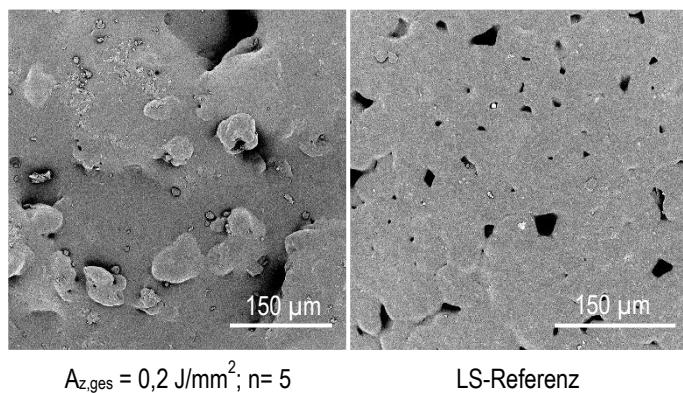


Bild 5-35: REM-Aufnahmen von Einschichtprüfkörpern für die Fünffachbelichtung im NTLS (links, Parameter siehe Bild 5-34) und LS-Referenz (rechts, EOS Standardbelichtungsparameter bei $s=120 \mu\text{m}$ und $T=176^\circ\text{C}$)

Darauf aufbauend werden Einschichtprüfkörper mit 20 verschiedenen Parametersets untersucht. Der Versuchsplan mit den zugrundeliegenden Parametern ist in Tabelle A 4 im Anhang A1 aufgeführt. Untersuchungsgegenstand ist die bei der Fertigung auftretende Rauchentwicklung und die erzielte Aufschmelztiefe in Form der Dicke der Einschichtprüfkörper. Die Ergebnisse, aufgetragen über der Flächenenergiedichte ($A_{z,einfach}$; dunkelgraue Balken) und Gesamtenergiedichte ($A_{z,ges}$; hellgraue Balken), sind in Bild 5-36 dargestellt. Zusätzlich ist über den Balken die jeweilige Belichtungsanzahl angegeben, welche je nach Parameterset zwischen zwei und sechs variiert, um eine minimale Gesamtenergiedichte von $0,2 \text{ J/mm}^2$ zu erhalten. Unabhängig der Belichtungsanzahl zeigen alle 20 Parametersets in der mikroskopischen Untersuchung ein Schicht-Erscheinungsbild analog zur Fünffachbelichtung in Bild 5-34 (rechts), weshalb auf die Visualisierung an dieser Stelle verzichtet wird.

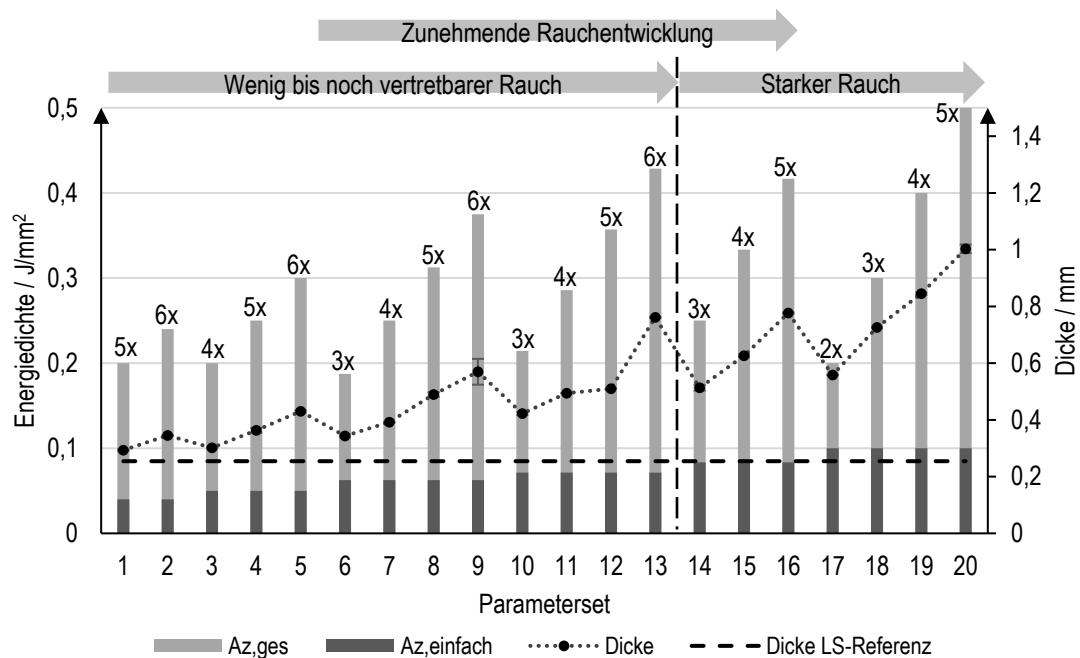


Bild 5-36: Dicke von und Rauchentwicklung bei mehrfachbelichteten Einschichtprüfkörpern unterschiedlicher Gesamtenergiedichte

Hinsichtlich der Dicke der Einschichtprüfkörper ist festzustellen, dass die Dicke mit zunehmender Flächenenergiedichte ($A_{z,einfach}$) und bei konstanter Flächenenergiedichte mit zunehmender Mehrfachbelichtung bzw. Gesamtenergiedichte ($A_{z,ges}$) ansteigt. Dies ist aufgrund der zusätzlich eingebrachten Energie und der Wärmeleitung in das darunter liegende Pulverbett nicht unerwartet. Im Vergleich zur LS-Referenz mit $0,25 \text{ mm}$ ist die Dicke aller Prüfkörper höher. Während die Dicke mit $0,3 \text{ mm}$ bei Gesamtenergiedichten von $0,2 \text{ J/mm}^2$ bei vergleichsweise geringer Flächenenergiedichte von $0,04 \text{ J/mm}^2$ (Parameterset 1) bzw. $0,05 \text{ J/mm}^2$ (Parameterset 3) nur geringfügig höher liegt, nimmt die Dicke mit zunehmender Flächen- und Gesamtenergiedichte bis auf Maximalwerte von bis zu 1 mm deutlich zu.

Ebenso ist ein Anstieg der Dicke mit zunehmender Belichtungsanzahl bei konstanter Flächenenergiedichte zu verzeichnen. Die erhöhte Dicke bzw. Aufschmelztiefe kann zu einem besseren Schichtverbund beitragen, aber auch zu Maßabweichungen auf der Bauteilunterseite führen.

Im Gegensatz zum konventionellen LS-Prozess, bei dem bei der Verarbeitung von PA12 keine Rauchentwicklung während der Belichtung zu verzeichnen ist, tritt im NTLS-Prozess durch die gesteigerten Energiedichten Rauch unterschiedlicher Intensität auf, siehe auch Abschnitt 0. Maßgeblich für die Rauchentwicklung ist die Flächenenergiedichte ($A_{z,\text{einfach}}$), da die stärkste Rauchentwicklung bei der ersten Belichtung der Mehrfachbelichtung zu verzeichnen ist. Ursächlich dafür ist die hohe Absorption der CO₂-Laserstrahlung im oberflächlichen Bereich der Pulverschicht. Dabei betragen Absorption und Transmission mehr als 75 % [Sch22]. Hauptverantwortlich für die Absorption sind die kristallinen Bereich des PA12 [Sch22]. Ab der zweiten Belichtung der Mehrfachbelichtung ist eine deutlich geringere, zum Teil nicht wahrnehmbare Rauchentwicklung festzustellen. Begründet werden kann dies durch Laumer et al. und Heinl et al., die die drastische Reduktion von Absorption und Reflexion von aufgeschmolzenem PA12 aufzeigen. Die Transmission in einer Schicht Schmelze liegt bei ca. 90 %. Die Reflexionen, die sich im nicht aufgeschmolzenen Zustand an den rauen Partikeloberflächen in der Pulverschüttung zeigen, können nicht mehr auftreten [LSB+15; HLB+18]. Die Absorption wird durch das Auflösen der kristallinen Bereiche beim Aufschmelzen reduziert [CY05; Fri07], sodass ein Großteil der Laserstrahlung in tiefere Schichten transmittiert und dort absorbiert wird. Aus Bild 5-36 ist zu entnehmen, dass die Rauchentwicklung mit zunehmender Flächenenergiedichte ansteigt. Bis zum Parameterset 13 und einer Flächenenergiedichte von 0,071 J/mm² tritt wenig bis mittelstarker Rauch auf, der als unkritisch und noch in Ordnung beurteilt wird. Ab einer Flächenenergiedichte von 0,083 J/mm² (Parameterset 14) tritt starker, zum Teil sehr dunkler Rauch auf, sodass der Bauraum bei mehreren Bauteilen nach wenigen Schichten mit Rauch gefüllt wäre und eine einwandfreie Belichtung nicht gewährleistet werden könnte. Weiterhin geht mit der Rauchbildung die thermische Zersetzung des Materials einher. Die Beurteilung des Rauchs erfolgt rein visuell über Videoaufnahmen. Es liegt keine objektive Messung zu grunde. Nichtsdestotrotz kann die Beurteilung eine Tendenz für zu hohe Flächenenergiedichten ab 0,083 J/mm² ableiten.

Die Einschätzung über die zu hohen Flächenenergiedichten mittels Rauchbetrachtung, kann durch die visuelle Betrachtung der Prüfkörper bestätigt werden. Die Prüfkörper ab Parameterset 14 sind im Zentrum vergilbt und weisen Blasen durch zu intensiven Energieeintrag auf, siehe Bild 5-37 (rechts). Zum Vergleich ist ein Prüfkörper (Parameterset 11) mit mittlerer Rauchentwicklung aufgeführt (Bild 5-37, links), der eine geschlossene Fläche ohne Blasen aufweist.

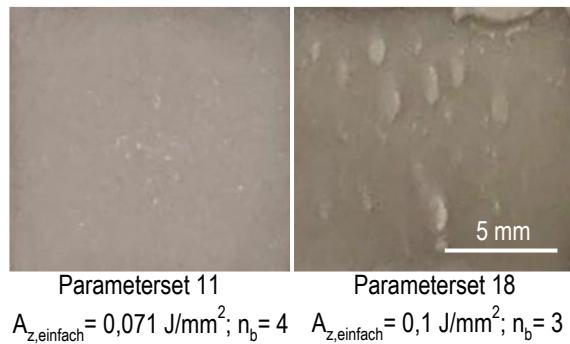


Bild 5-37: Vergilbung und Blasenbildung eines Einschichtprüförpers bei zu intensiver Mehrfachbelichtung (rechts) mit einer Flächenenergiedichte größer $0,083 \text{ J/mm}^2$ (Referenz links)

Die Unterschiede zu der in Abschnitt 5.3. hinsichtlich der Rauchentwicklung bestimmten maximalen Flächenenergiedichte von $0,119 \text{ J/mm}^2$ können zum einen aus der rein visuellen Betrachtung entstehen, zum anderen am Versuchsaufbau liegen. Die Einschichtprüföpfer werden im losen Pulverbett gefertigt, wohingegen die Betrachtung des Rauches in Abschnitt 0 bei der Belichtung der Anbindungsschicht zur Bauplattform erfolgt.

5.6.2 Versuchsaufbau und Vorgehensweise

Im Folgenden werden die mechanischen Eigenschaften und die Dichte in Abhängigkeit der Flächenenergiedichte, der Belichtungsanzahl und der daraus resultierenden Gesamtenergiedichte, aber auch in Abhängigkeit einzelner Belichtungsparameter sowie der Schichtzeit für die XYZ- und die ZXY-Orientierung untersucht. Diese beiden Orientierungen geben die Extremwerte der anisotropen Bauteileigenschaften zwischen dem Materialverbund in der Ebene und der Aufbaurichtung wieder [Sch22]. Die Rahmenbedingungen und die Belichtungsparameter des Supports, die in vorherigen Untersuchungen ermittelt wurden, sowie das Belichtungsparameterfeld zur Untersuchung der NTLS Bauteileigenschaften sind in Tabelle 5-10 festgehalten.

Um die Anzahl der Einflussgrößen gering zu halten, werden die Parameter der Kontur- und Edgebelichtung über alle Untersuchungen konstant gehalten. Untersucht wird also weiterhin nur die Belichtung des Hatchs. Auf Basis der Ergebnisse der Einschicht-Untersuchungen wird eine minimale Gesamtenergiedichte von $0,2 \text{ J/mm}^2$ als erster Richtwert angenommen. Weiterhin wird der Hatchabstand in den Abschnitten 5.6.3.1 und 5.6.3.2 zur Reduktion der Einflussgrößen zunächst auf $0,2 \text{ mm}$ festgelegt und konstant gehalten, da dieser nach der Vorgehensweise zur Parameterentwicklung von Lohn im Vergleich zu Laserleistung und Scangeschwindigkeit und hier der Belichtungsanzahl den vermeintlich geringsten Einfluss hat [Loh19]. Bei einem Laserspotdurchmesser der EOS P396 von $0,6 \text{ mm}$ [Loh19] ist bei einem Hatchabstand von $0,2 \text{ mm}$ ausreichend Überlappung der Hatchlinien und der Schmelzepools vorhanden. In Abschnitt 5.6.3.3 wird anschließend der Hatchabstand, in

Abschnitt 5.6.4 die Bauraumtemperatur und in Abschnitt 5.6.5 die Schichtdicke variiert und deren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und Dichte untersucht. Die Mikrostruktur wird in Abschnitt 5.6.6 betrachtet.

Tabelle 5-10: Rahmenbedingungen, Belichtungsparameter des Supports und Belichtungsparameterfeld zur Untersuchung des NTLS von PA12

Rahmenbedingungen				
Bauraumtemperatur	°C	80	(40 – 100 °C in Abschn. 5.6.4)	
Schichtdicke	µm	120	(100 µm in Abschn. 5.6.5)	
Prüfkörper			Zugstab 1BA [DIN 527-2]	
Orientierung			XYZ und ZXY	
Bauplattform			Organoblech (PA12, CF mit 50 Vol.-%)	
Support			Block (Parameter siehe Tabelle 5-9)	
Belichtungsparameter				
Support				
Belichtungsanzahl		3		
Hatch	Laserleistung	W	50	
	Scangeschwindigkeit	mm/s	5000	
	Hatchabstand	mm	0,16	
Kontur und Edge	Laserleistung	W	40	
(Kontur- vor Hatchbelich- tung)	Scangeschwindigkeit	mm/s	4000	
	Beamoffset (Kontur)	mm	0,35	
Belichtungsparameterfeld				
Bauteil				
Hatch	Laserleistung	W	25 – 50 6 – 50	(XYZ in Abschn. 5.6.3.1) (XYZ in Abschn. 5.6.3.2)
	Scangeschwindigkeit	mm/s	2000 – 5000 250 – 4000	(XYZ in Abschn. 5.6.3.1) (XYZ in Abschn. 5.6.3.2)
	Hatchabstand	mm	0,2	(0,15 – 0,3 in Abschn. 5.6.3.3)
	Belichtungsanzahl		3 – 5	
	Gesamtenergiedichte	J/mm ²	≥ 0,2	(Richtwert aus vorherigen Unt.)
Kontur und Edge (Kontur- vor Hatchbelich- tung)	Laserleistung	W	40	
	Scangeschwindigkeit	mm/s	4000	
	Beamoffset (Kontur)	mm	0,35	
	Belichtungsanzahl			Entspricht der Belichtungsanzahl des Hatchs

Für die Erzeugung der Zugprüfkörper werden die in Bild 5-38 dargestellten Standardbaujob-Layouts verwendet. Gefertigt werden in Layout 1 zehn Zugstäbe in XYZ-Orientierung und zehn Zugstäbe in ZXY-Orientierung mit demselben Parameterset, sodass unter Berücksichtigung von Prozessfehlern und Ausreißern in der Messung mindestens jeweils fünf verwertbare Zugstäbe je Orientierung vorhanden sind. Mit Layout 2 werden 60 Zugstäbe in

ZXY-Orientierung hergestellt. Jeweils zehn Zugstäben wird dasselbe Parameterset zugeordnet. Insbesondere bei ZXY-Zugstäben nehmen Fehlbeschichtungen aufgrund des kleinen Querschnitts einen starken Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften, sodass einige Zugstäbe nach dem Baujob als unbrauchbar deklariert werden oder in der Messung Ausreißer entstehen.

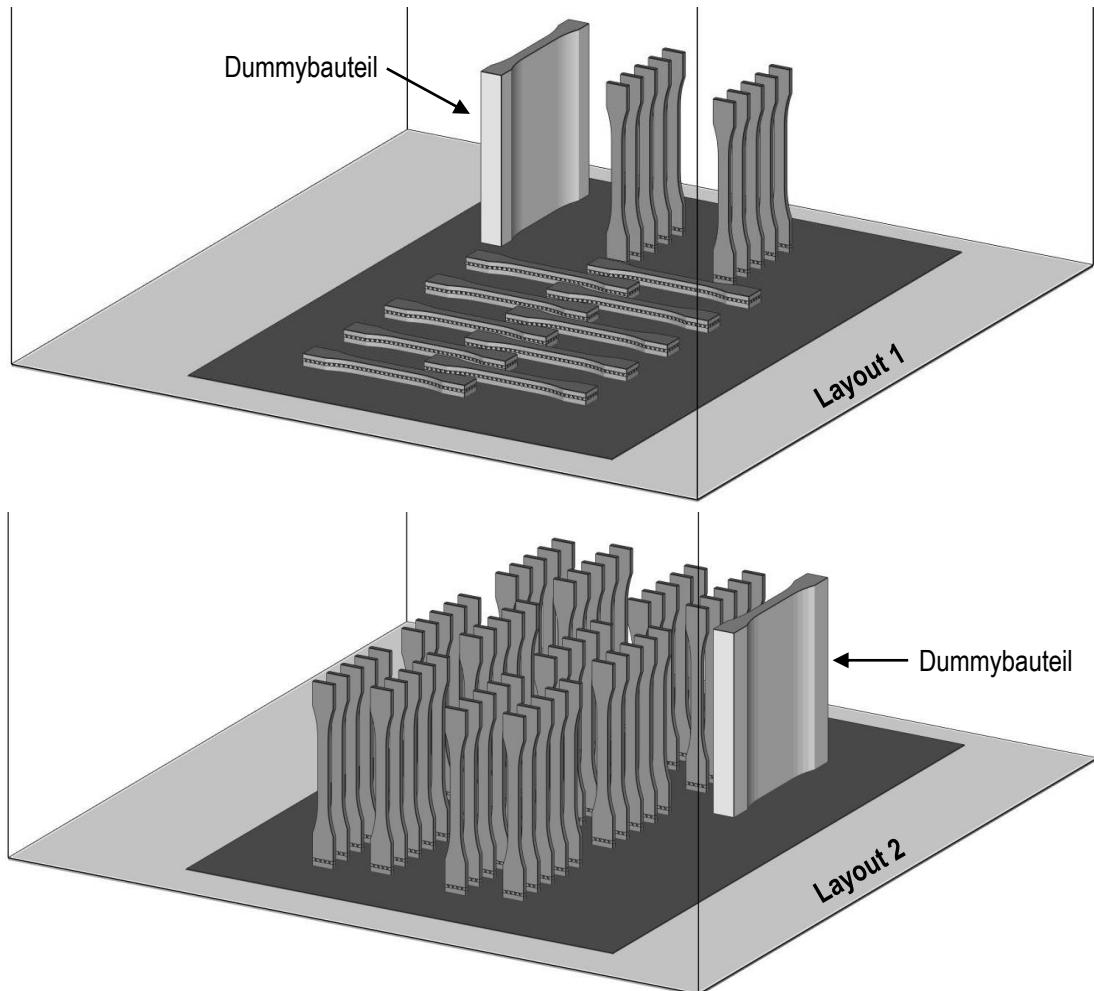


Bild 5-38: Standardbaujob-Layouts der NTLS-Untersuchungen

Als Supportstruktur wird Blocksupport mit den zuvor ermittelten und in Tabelle 5-10 aufgeführten Parametern verwendet. Weiterhin enthalten die Layouts jeweils ein Dummybauteil, welches dazu dient, die Schichtzeit verlängern zu können. Dafür werden dem Dummybau teil Belichtungsparameter zugewiesen und dabei die Laserleistung auf 0 W eingestellt, so dass die Scaneinheit zwar die Schicht des Dummys abfährt, aber diese nicht belichtet und aufschmilzt, und dadurch die Schichtzeit erhöht. Das Scannen der Dummyschicht wird in die Belichtungssequenz der Mehrfachbelichtung integriert.

Die im Vergleich zur Vorstudie in Abschnitt 5.4 angepasste Mehrfachbelichtung ist in Bild 5-39 dargestellt. Die Belichtungsabfolge innerhalb einer Schicht bleibt bestehen. In

Aufbaurichtung werden zunächst die Supportstrukturen mit Dreifachbelichtung erzeugt. Zur besseren Anbindung und Aufschmelzung der Bauplattform-Oberseite wird die erste Supportschicht sechsmal belichtet. Anschließend erfolgt die Fertigung der Zugstäbe in jeweiliger Orientierung mit Mehrfachbelichtung, deren Belichtungsanzahl Gegenstand der Untersuchung ist.

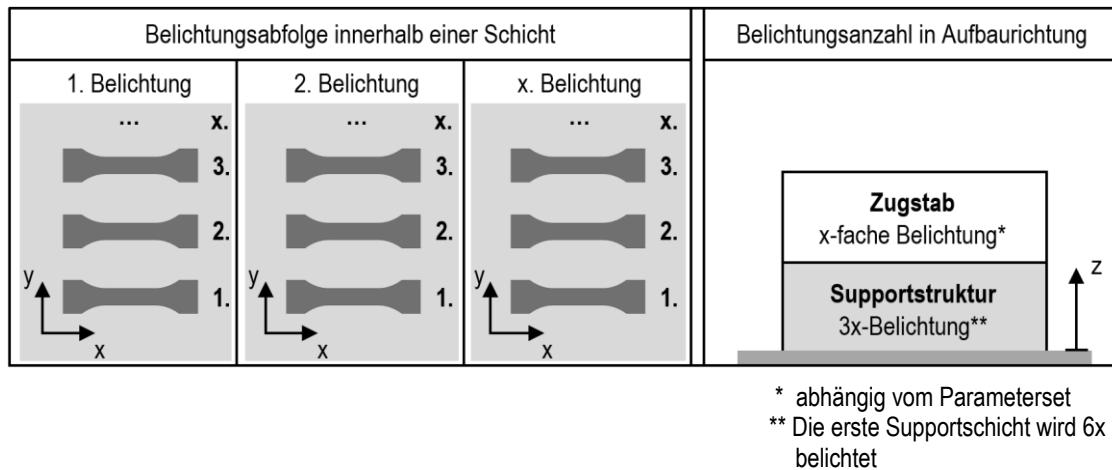


Bild 5-39: Belichtungsstrategie mit Mehrfachbelichtung am Beispiel von XYZ-orientierten Zugstäben

5.6.3 Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Belichtungsparameter

Im weiteren Verlauf werden die Ergebnisse zu den mechanischen Eigenschaften und der Dichte mit den in Tabelle 5-10 festgelegten, konstanten Parametern unter Variation der Belichtungsparameter des Hatchs betrachtet. Gegenstand der variierten Belichtungsparameter sind die Laserleistung, Scangeschwindigkeit und Belichtungszahl in den in Tabelle 5-10 aufgeführten Ausprägung sowie die daraus resultierende Flächen- und Gesamtenergiedichte. Weiterhin wird die Schichtzeit, die nach Josupeit [Jos19] und Yamauchi et al. [YNK17; YKN16] einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und Dichte hat, in die Untersuchungen aufgenommen. Der Hatchabstand bleibt zunächst unverändert. Zunächst wird auf die Ergebnisse für die XYZ-Orientierung eingegangen, ehe die Ergebnisse zur ZXY-Orientierung aufgezeigt werden. Anschließend werden die Ergebnisse interpretiert und diskutiert. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, werden die Referenzwerte für den konventionellen LS-Prozess ebenfalls an auf der EOS P396 gefertigten Zugstäben des Typs 1BA bestimmt. Die Referenzwerte sind in Tabelle 5-11 aufgeführt. Der Einfluss des Hatchabstands wird anschließend in Abschnitt 5.6.3.3 untersucht. In Abschnitt 5.6.3.4 werden Bruchbilder der geprüften Zugstäbe analysiert.

Tabelle 5-11: LS-Referenzwerte für die mechanischen Eigenschaften und Dichte von PA12 (EOS Standardbelichtungsparameter bei $s=120 \mu\text{m}$ und $T=176^\circ\text{C}$)

Orientierung	Zugfestigkeit / MPa	E-Modul / MPa	Bruchdehnung / %	Dichte / g/cm ³
XYZ	45,8	1900	23,6	0,99
ZXY	43,8	1756	9,4	0,99

5.6.3.1 XYZ-Orientierung

Bei der Untersuchung der mechanischen Eigenschaften und Dichte wird die Laserleistung zwischen 25 W und 50 W, die Scangeschwindigkeit zwischen 2000 mm/s und 5000 mm/s und die Belichtungsanzahl zwischen 3 und 5 variiert. Die untersuchten Parametersets sind im Anhang A1 in Tabelle A 5 zusammengefasst. Die Ergebnisse für Zugfestigkeit, E-Modul, Bruchdehnung und Dichte werden im Folgenden jeweils im Block in einer zusammenhängenden Abbildung dargestellt.

In Bild 5-40 sind die Ergebnisse in Abhängigkeit der Gesamtenergiedichte aufgetragen. Die gestrichelte Linie stellt den Referenzwert aus dem konventionellen LS-Prozess dar. Weiterhin sind entgegen des Richtwerts aus Tabelle 5-10 auch Gesamtenergiedichten kleiner als 0,2 J/mm² aufgetragen, um zu verdeutlichen, dass die Werte für die mechanischen Eigenschaften und Dichte, analog zu den Erkenntnissen aus der Untersuchung an Einschichtprüfkörpern, im Vergleich zu höheren Gesamtenergiedichten deutlich herabgesetzt sind. Die Schichtzeit bleibt in dieser Auswertung unberücksichtigt. Sie ist nicht konstant über alle Messwerte und liegt zwischen 21 s und 42 s. Je Gesamtenergiedichte bilden sich in dieser Auswertung aufgrund der zugrunde liegenden Belichtungsparameter und Schichtzeiten zum Teil mehrere unterschiedliche Messwerte aus. Diese Auswertung gibt zunächst einen Überblick über die Abhängigkeit von der Gesamtenergiedichte. In den darauffolgenden Abbildungen und Auswertungen wird der Fokus spezieller auf einzelne Parameter gesetzt. Grundsätzlich zeigt sich sowohl für die aufgeführten mechanischen Eigenschaften als auch die Dichte, dass die Werte mit steigender Gesamtenergiedichte zunehmen. Bei der Zugfestigkeit und dem E-Modul resultieren Gesamtenergiedichten von 0,25 J/mm² und 0,3125 J/mm² in Werten, die im Bereich der LS-Referenz liegen. Die Zugfestigkeit liegt leicht unterhalb bzw. gleichauf mit der LS-Referenz. Der E-Modul weist Werte auf, die die Werte der LS-Referenz zum Teil übersteigen. Die Bruchdehnung, bei der zum Teil hohe Standardabweichungen vorliegen, kann mit zwei Messwerten bei einer Gesamtenergiedichte von 0,3125 J/mm² mit der LS-Referenz mithalten. Die Dichte zeigt ab Gesamtenergiedichten von 0,1875 J/mm², von einem Ausreißer bei 0,2143 J/mm² abgesehen, gleiche bzw. höhere Werte als die LS-Referenz.

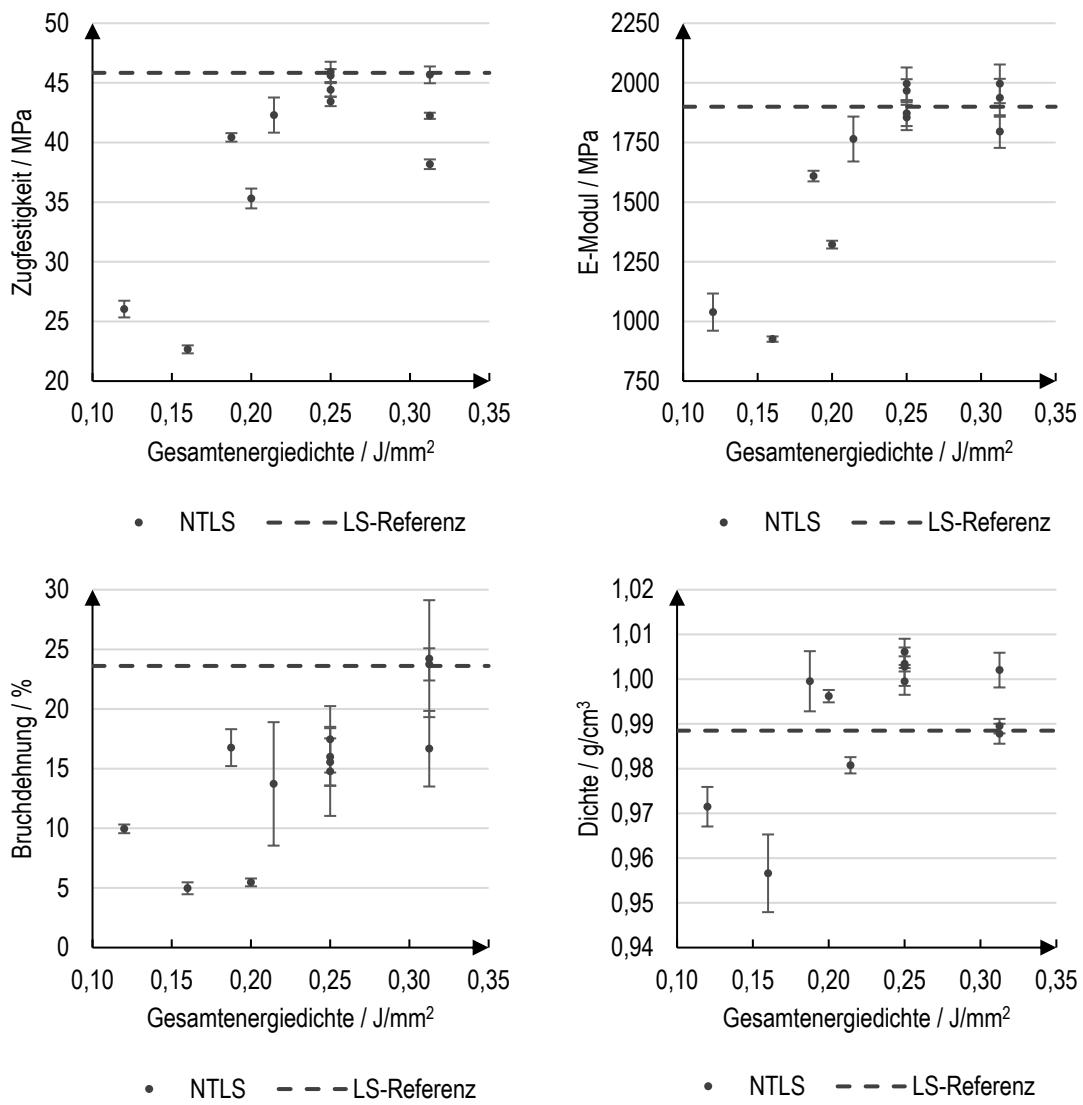


Bild 5-40: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Gesamtenergiedichte in XYZ-Orientierung bei Schichtzeiten von 21 s bis 42 s

In Bild 5-41 sind die mechanischen Eigenschaften und Dichte über der Belichtungsanzahl (dreifach bis fünffach) für ausgewählte Parametersets (Set-Nr.: 1,5,6,8-10; Tabelle A 5) mit einer Flächenenergiedichte von 0,04 J/mm² bzw. 0,0625 J/mm² aufgetragen. Die Schichtzeit nimmt mit zunehmender Belichtungsanzahl zu. Für beide Flächenenergiedichten sind dieselben klaren Trends zu verzeichnen. Für die betrachteten Parametersets steigen Zugfestigkeit, E-Modul und Dichte mit zunehmender Belichtungsanzahl an. Die Bruchdehnung sinkt. Für die Flächenenergiedichte von 0,0625 J/mm² liegen die Werte bei Vierfach- und insbesondere bei Fünffachbelichtung, ausgenommen die der Bruchdehnung, auf einem ähnlichen Niveau wie die in Tabelle 5-11 aufgeführten LS-Referenzwerte. Für die Flächenenergiedichte von 0,04 J/mm² sind die Werte der mechanischen Eigenschaften und Dichte zum Teil deutlich geringer als bei einer Flächenenergiedichte von 0,0625 J/mm². Mit einer Flächenenergiedichte von 0,0625 J/mm² und Dreifachbelichtung kann entgegen des

Richtwerte der Gesamtenergiedichte von $0,2 \text{ J/mm}^2$ aufgezeigt werden, dass auch mit einer geringeren Gesamtenergiedichte ($0,1875 \text{ J/mm}^2$) vergleichbar gute Bauteileigenschaften erzielt werden können.

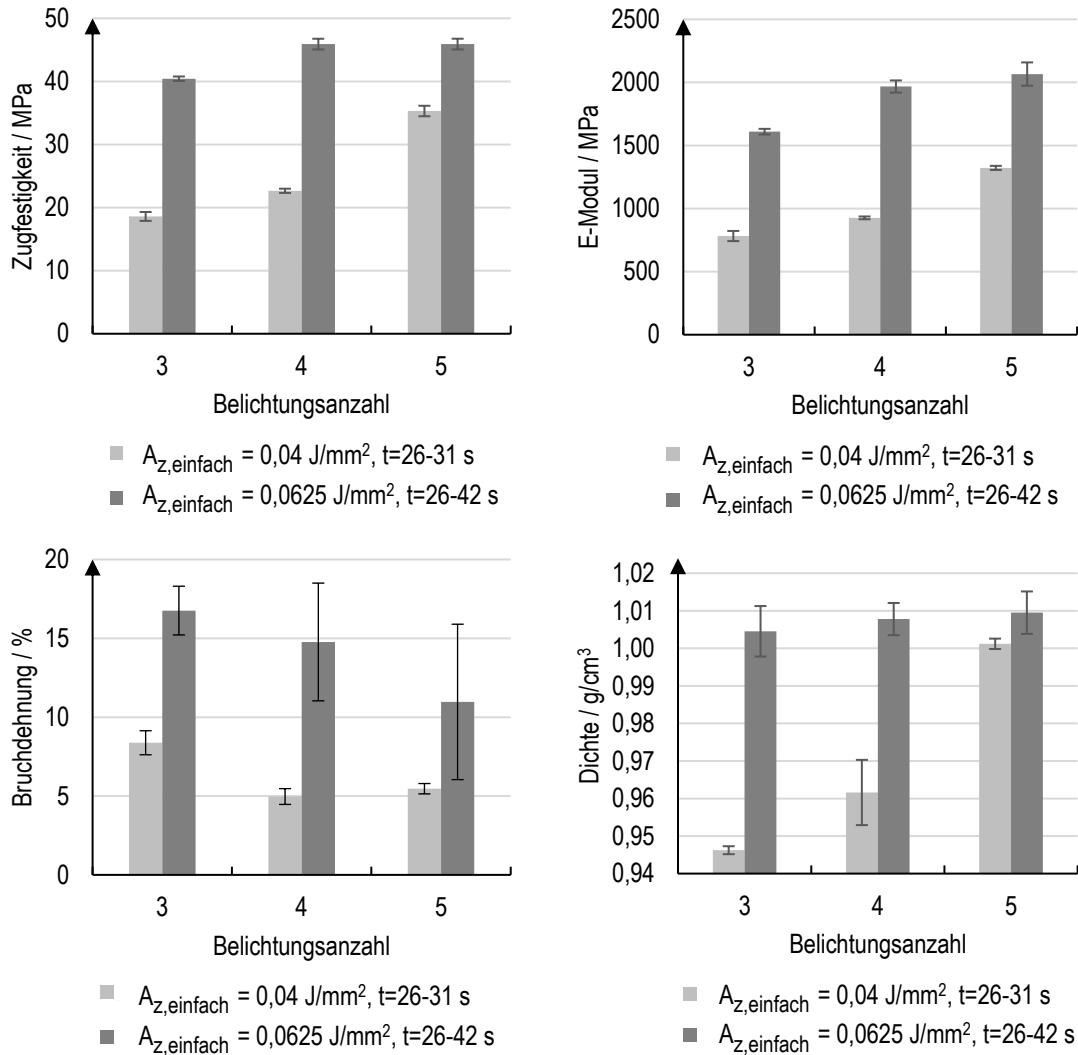


Bild 5-41: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Belichtungsanzahl bei konstanter Flächennergiedichte und konstanten Belichtungsparametern in XYZ-Orientierung

Bild 5-42 stellt die mechanischen Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Schichtzeit für eine Gesamtenergiedichte von $0,3125 \text{ J/mm}^2$ bei Fünffachbelichtung für zwei Kombinationen aus Laserleistung (25 W bzw. 50 W) und Scangeschwindigkeit (2000 mm/s bzw. 4000 mm/s) dar (Set-Nr.: 23,25,27-29; Tabelle A 5). Für die Parameterkombination mit 25 W und 2000 mm/s liegt die minimale Schichtzeit für ein ohnehin bereits reduziertes Baujoblayout 1 (vgl. Bild 5-38) von zehn auf fünf flach orientierte Zugstäbe bei 39,5 s, sodass für eine Schichtzeit von 21,5 s kein Messwert für dieses Parameterset vorliegt. Bei Zugfestigkeit, E-Modul und Dichte ist bei beiden Parameterkombinationen zu erkennen, dass die

Werte bei der Mittleren der drei Schichtzeiten (39,5 s bzw. 42,5 s) am höchsten sind. Bei geringerer Schichtzeit (21,5 s) fällt der Wert leicht ab. Bei höherer Schichtzeit (76 s bzw. 83 s) ist eine deutlich stärkere Reduktion der Werte festzustellen. Weiterhin kann bei der Zugfestigkeit und dem E-Modul registriert werden, dass die Werte für beide Parameterkombinationen nah beieinander liegen. Die Bruchdehnung zeigt mit zunehmender Schichtzeit einen rückläufigen Verlauf, der sich beim Anstieg der Schichtzeit von 39,5 s bzw. 42,5 s auf 76 s bzw. 83 s jedoch im Rahmen der hohen Standardabweichungen bewegt. Das Parameterset mit 25 W und 2000 mm/s weist tendenziell höhere Bruchdehnungen auf.

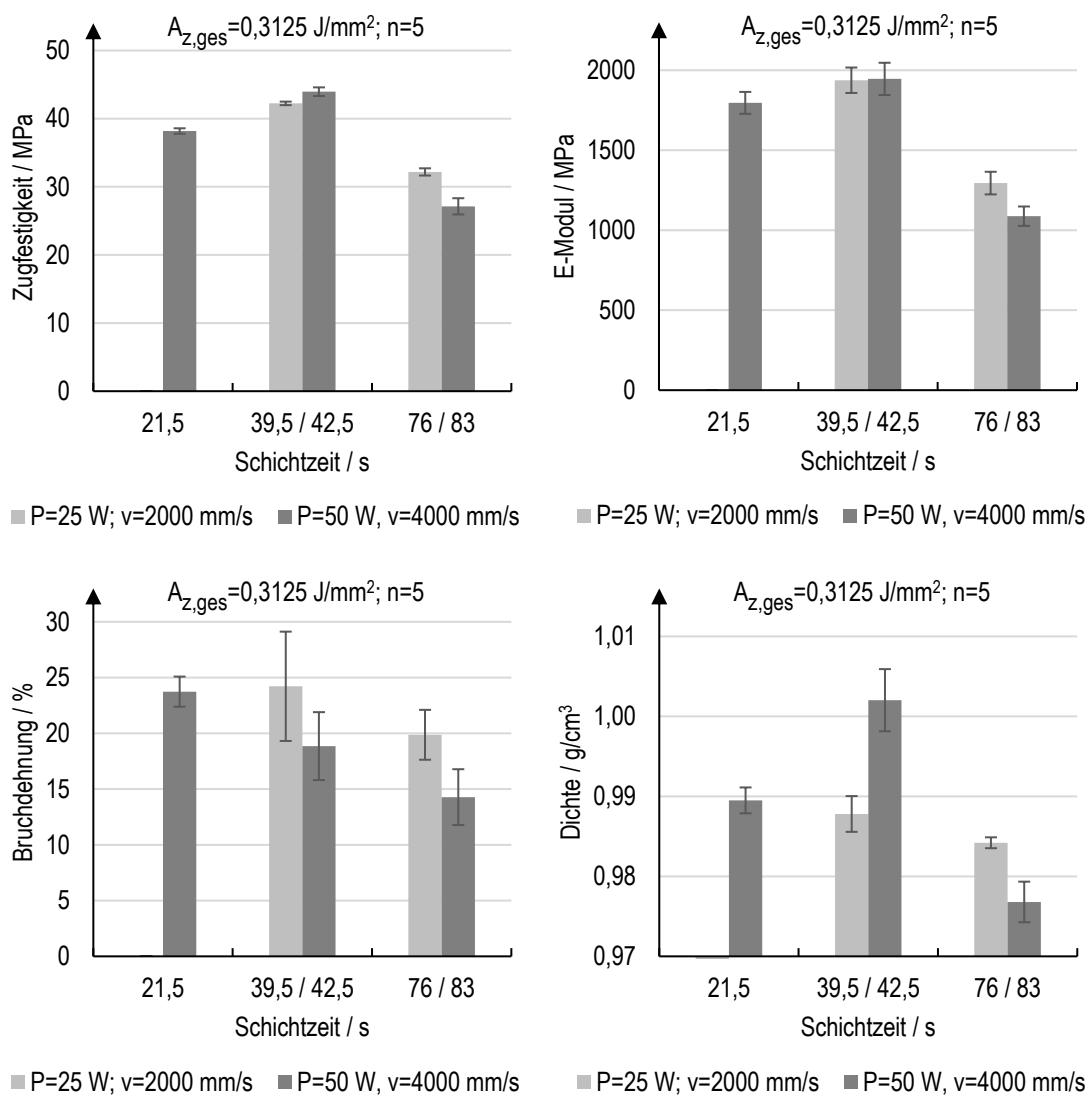


Bild 5-42: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Schichtzeit bei konstanter Gesamtenergiedichte und Belichtungsanzahl bei ausgewählten Parametersets in XYZ-Orientierung

Die mechanischen Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der zugrundeliegenden Belichtungsparameter, insbesondere der Laserleistung und der Scangeschwindigkeit, bei einer konstanten Schichtzeit von 39 ± 3 s und zwei betrachteten, konstanten Gesamtenergiedichten ($0,25 \text{ J/mm}^2$ und $0,3125 \text{ J/mm}^2$) sind in Bild 5-43 aufgeführt (Set-Nr.: 14,15,18,23,27; Tabelle A 5). Laserleistung und Scangeschwindigkeit nehmen je Gesamtenergiedichte von links nach rechts im Diagramm zu (siehe Datentabelle des jeweiligen Diagramms). Für Zugfestigkeit und E-Modul ist ein leichter Anstieg bei zunehmender Laserleistung und Scangeschwindigkeit bei beiden Gesamtenergiedichten zu verzeichnen. Alle Werte liegen auf einem hohen Niveau im Bereich der LS-Referenz. Bei der Gesamtenergiedichte von $0,25 \text{ J/mm}^2$ zeigt sich sowohl bei der Bruchdehnung als auch der Dichte, dass eine geringere Scangeschwindigkeit von 4000 mm/s im Vergleich zu 5000 mm/s bei gleicher Laserleistung von 50 W und einem Belichtungszyklus weniger (4 anstatt 5) zu

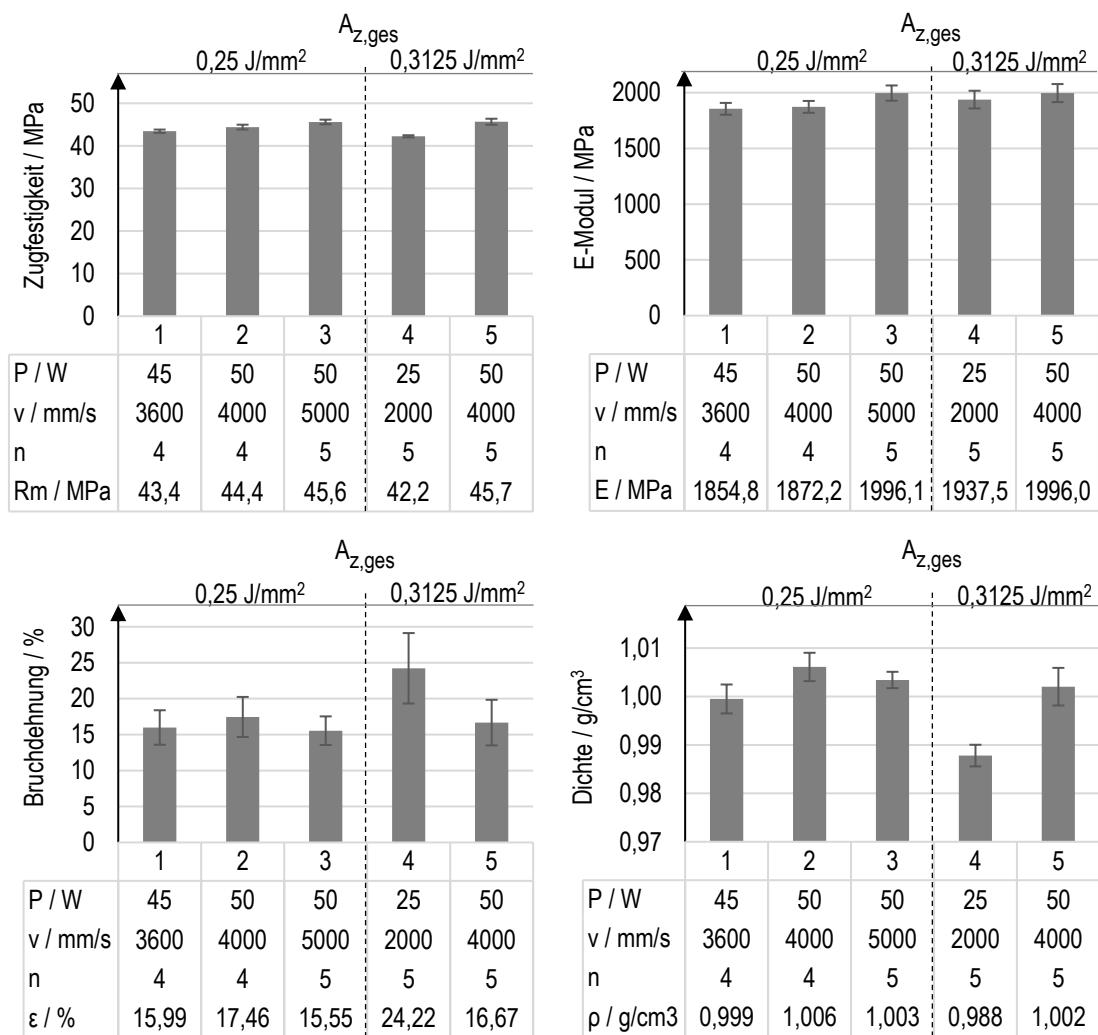


Bild 5-43: Mechanische Eigenschaften und Dichte bei konstanter Gesamtenergiedichte (je Gruppe) und Schichtzeit (39 ± 3 s) sowie steigender Laserleistung und Scangeschwindigkeit in XYZ-Orientierung

höheren Werten führt, die jedoch im Rahmen der hohen Standardabweichung liegen. Bei einer Gesamtenergiedichte von $0,3125 \text{ J/mm}^2$ zeigt sich wie auch bereits in Bild 5-42 aufgeführt, dass eine höhere Laserleistung gekoppelt mit einer höheren Scangeschwindigkeit zu geringerer Bruchdehnung und höherer Dichte führt. Bei einer Laserleistung von 25 W und Scangeschwindigkeit von 2000 mm/s fällt die Dichte im Vergleich zu den anderen Werten deutlich ab. Im Gegenzug zeigt diese Parameterkombination die höchste Bruchdehnung, die im Bereich der LS-Referenz liegt.

In Bild 5-44 wird die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse über fünf Baujobs desselben Layouts mit identischen Belichtungsparametern bei einer Gesamtenergiedichte von $0,3125 \text{ J/mm}^2$ und einer Schichtzeit von 42,5 s betrachtet (Set-Nr.: 10,19,22,24,26; Tabelle A 5). Für Zugfestigkeit und E-Modul zeigen sich relativ geringe Schwankungen über mehrere Baujobs, die insbesondere beim E-Modul im Rahmen der Standardabweichungen liegen. Bruchdehnung und Dichte unterliegen, wie aufgrund der höheren Varianz dieser Kenngrößen erwartet, starken Schwankungen. Die minimale Bruchdehnung beträgt 11 % und die maximale Bruchdehnung 25,5 %. Wie im Vorfeld beschrieben, unterliegt die Bruchdehnung, erkennbar an der hohen Standardabweichung je Baujob, ohnehin starken Schwankungen. Die Dichte schwankt zwischen $0,99 \text{ g/cm}^3$ und $1,01 \text{ g/cm}^3$ über die aufgeführten fünf Baujobs.

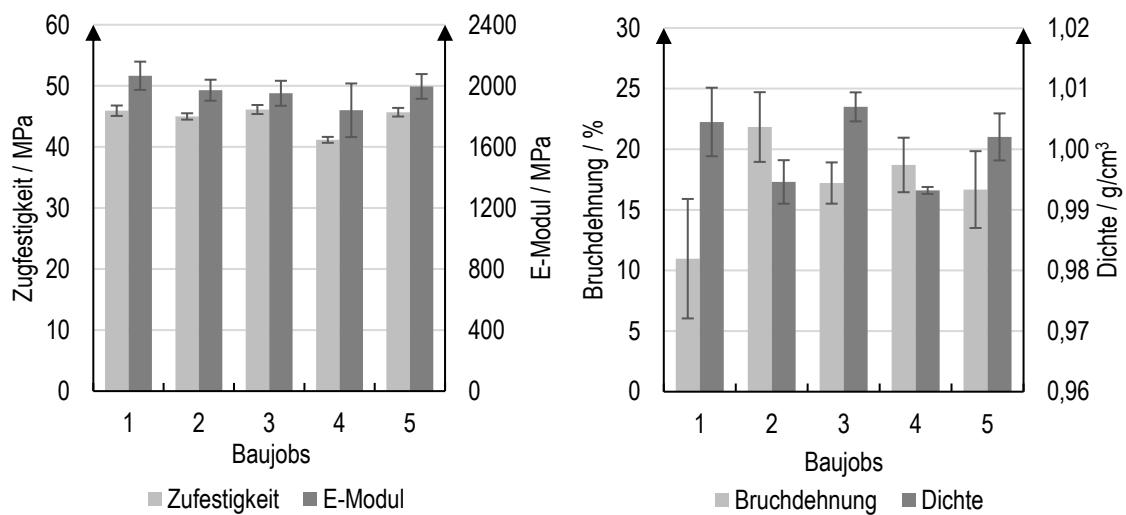


Bild 5-44: Betrachtung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu den mechanischen Eigenschaften und der Dichte über fünf Baujobs mit identischen Belichtungsparametern ($P=50 \text{ W}$; $v=4000 \text{ mm/s}$) bei einer Gesamtenergiedichte von $0,3125 \text{ J/mm}^2$ und einer Schichtzeit von 42,5 s in XYZ-Orientierung

Für die XYZ-Orientierung zeigen sich also mehrere Zusammenhänge zwischen den mechanischen Eigenschaften bzw. der Dichte und den Belichtungsparametern. Je nach Parametersatz können die mechanischen Eigenschaften und Dichte des konventionellen LS-Prozesses eingestellt bzw. im Falle der Dichte deutlich und im Falle des E-Moduls leicht

übertroffen werden. Zugfestigkeit, E-Modul, Bruchdehnung und Dichte steigen tendenziell mit der Gesamtenergiedichte. Der gleiche Zusammenhang kann für die Belichtungsanzahl mit Ausnahme der Bruchdehnung, die mit steigender Belichtungsanzahl tendenziell abfällt, nachgewiesen werden. Für Zugfestigkeit, E-Modul und Dichte führen mittlere Schichtzeiten mit ca. 40 s zu den besten Resultaten, bei der Bruchdehnung kurze (ca. 20 s) und mittlere Schichtzeiten. Zudem steigen Zugfestigkeit und E-Modul geringfügig mit der Laserleistung und Scangeschwindigkeit bei konstanter Gesamtenergiedichte an. Für die Bruchdehnung und Dichte sind keine klaren, gesamtenergiedichteübergreifenden Zusammenhänge mit der Laserleistung und Scangeschwindigkeit zu identifizieren. Weiterhin zeigt sich für Zugfestigkeit und E-Modul eine gute Reproduzierbarkeit über mehrere Baujobs. Bruchdehnung und Dichte unterliegen starken Schwankungen. Die besten Eigenschaften können generell mit Gesamtenergiedichten von $0,25 \text{ J/mm}^2$ und $0,3125 \text{ J/mm}^2$ bei einer Schichtzeit von 40 s und vier- bis fünffacher Belichtung unabhängig der zugrundeliegenden Belichtungsparameter, die insbesondere bei der Zugfestigkeit und dem E-Modul nur geringe Einflüsse zeigen, erzielt werden. Für eine hohe Bruchdehnung im Bereich der LS-Referenz sollte eine Gesamtenergiedichte von $0,3125 \text{ J/mm}^2$ mit geringer Scangeschwindigkeit von 2000 mm/s verwendet werden. Zu erwähnen ist an dieser Stelle, dass die Unterseite der Zugstäbe je nach Parameter und Probe teilweise eine schlechte Formhaltigkeit in unterschiedlicher Ausprägung aufweist, wie auch im späteren Verlauf der Arbeit in den CT-Bildern zu erkennen (siehe Abschnitt 5.6.6.2). Dies führt zu Unsicherheiten bei der Bestimmung der Querschnittsfläche im Messbereich der Zugstäbe und resultiert in Querschnittsflächen die systematisch zu groß sind (schätzungsweise bis zu 20 %). Daraus kann abgeleitet werden, dass die hier aufgeführten Werte der Zugfestigkeit und des E-Moduls teilweise größer anzunehmen sind.

5.6.3.2 ZXY-Orientierung

Bei der Untersuchung der mechanischen Eigenschaften und Dichte in ZXY-Orientierung wird die Laserleistung zwischen 6 W und 50 W, die Scangeschwindigkeit zwischen 250 mm/s und 5000 mm/s und die Belichtungsanzahl zwischen 3 und 5 deutlich umfangreicher als in XYZ-Orientierung variiert, da erste Ergebnisse deutlich schlechtere Werte für die mechanischen Eigenschaften und Dichte erwarten lassen. Im Vergleich zur XYZ-Orientierung werden höhere Gesamtenergiedichten in die Untersuchung mitaufgenommen. Der kleine Probenquerschnitt in ZXY- im Vergleich zur XYZ-Orientierung lässt zudem deutlich langsamere Scangeschwindigkeiten zu, ohne die Schichtzeiten in prozesstechnisch kritische Bereiche zu verlängern. Die untersuchten Parametersets sind im Anhang A1 in Tabelle A 6 zusammengefasst.

In Bild 5-45 werden die mechanischen Eigenschaften und Dichte über der Gesamtenergiedichte aufgetragen. Die gestrichelte Linie stellt jeweils den Referenzwert aus dem konventionellen LS-Prozess dar. Die Schichtzeit, welche über alle Parametersets zwischen 2,5 s

und 42 s liegt, bleibt an dieser Stelle unberücksichtigt. Für einige Gesamtenergiedichten sind teilweise mehrere Ausprägungen des jeweiligen Kennwerts aufgeführt, die aus unterschiedlichen, zugrundeliegenden Belichtungsparametern entstehen. Für die Zugfestigkeit und Bruchdehnung ist festzustellen, dass die Werte deutlich unterhalb des LS-Referenzwerts liegen. Die maximale Zugfestigkeit beträgt 28 MPa im Vergleich zur LS-Referenz mit 44 MPa. Tendenziell sind höhere Zugfestigkeiten bei höheren Gesamtenergiedichten zu verzeichnen. Die maximale Bruchdehnung weist im Vergleich zur LS-Referenz mit 9,5 % lediglich einen Wert von 4 % auf. Die Werte des E-Moduls weisen eine hohe Streuung auf und reichen von unter 200 MPa bis hin zu einem Maximalwert von 1570 MPa (LS-Referenz: 1750 MPa). Die Werte der Dichte weisen ebenfalls eine hohe Streuung auf, jedoch kann über die gesamte Bandbreite der betrachteten Gesamtenergiedichte vereinzelt die Dichte der LS-Referenz erreicht bzw. überstiegen werden. Die mechanischen Eigenschaften kom-

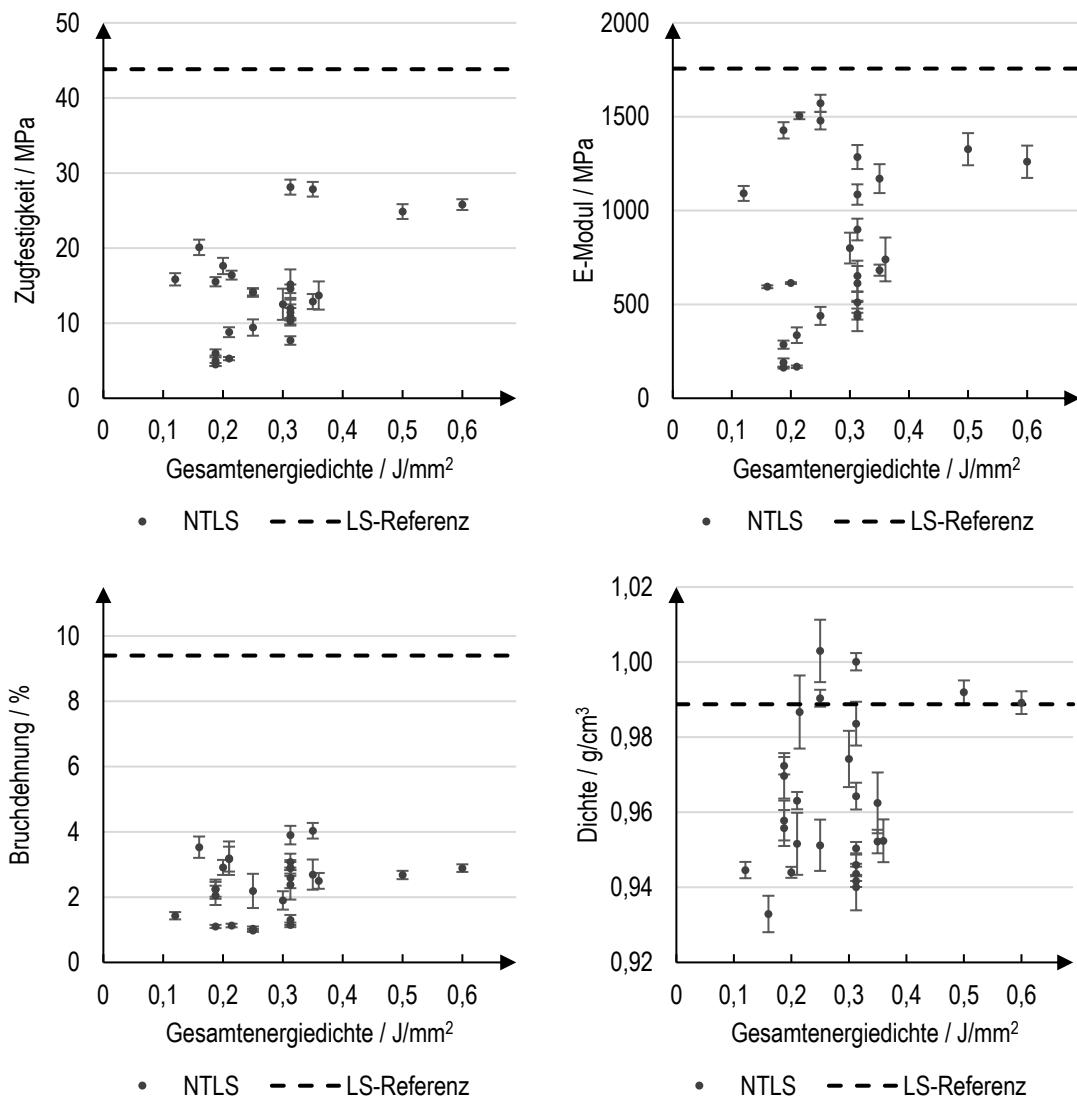


Bild 5-45: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Gesamtenergiedichte in ZXY-Orientierung bei Schichtzeiten von 21 s bis 42 s

men also nicht an die Werte aus dem konventionellen LS-Prozess heran. Im Folgenden werden dennoch die Abhängigkeiten der mechanischen Eigenschaften und der Dichte von einzelnen Belichtungsparametern und der Schichtzeit untersucht.

Die mechanischen Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Belichtungsanzahl (drei-fach und fünffach) sind in Bild 5-46 aufgeführt. Dargestellt sind die Ergebnisse für drei verschiedene Flächenenergiedichten ($0,07 \text{ J/mm}^2$, $0,1 \text{ J/mm}^2$ & $0,12 \text{ J/mm}^2$) bei einer konstanten Schichtzeit von 20 s. Für die Zugfestigkeit, den E-Modul und die Dichte zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Werte mit zunehmender Belichtungsanzahl. Bei der Bruchdehnung ist ein geringer Anstieg mit zunehmender Belichtungsanzahl zu verzeichnen. Für die betrachteten Parametersets (Set-Nr.: 48,50,52,53,56,59; Tabelle A 6) kann somit die Ten-

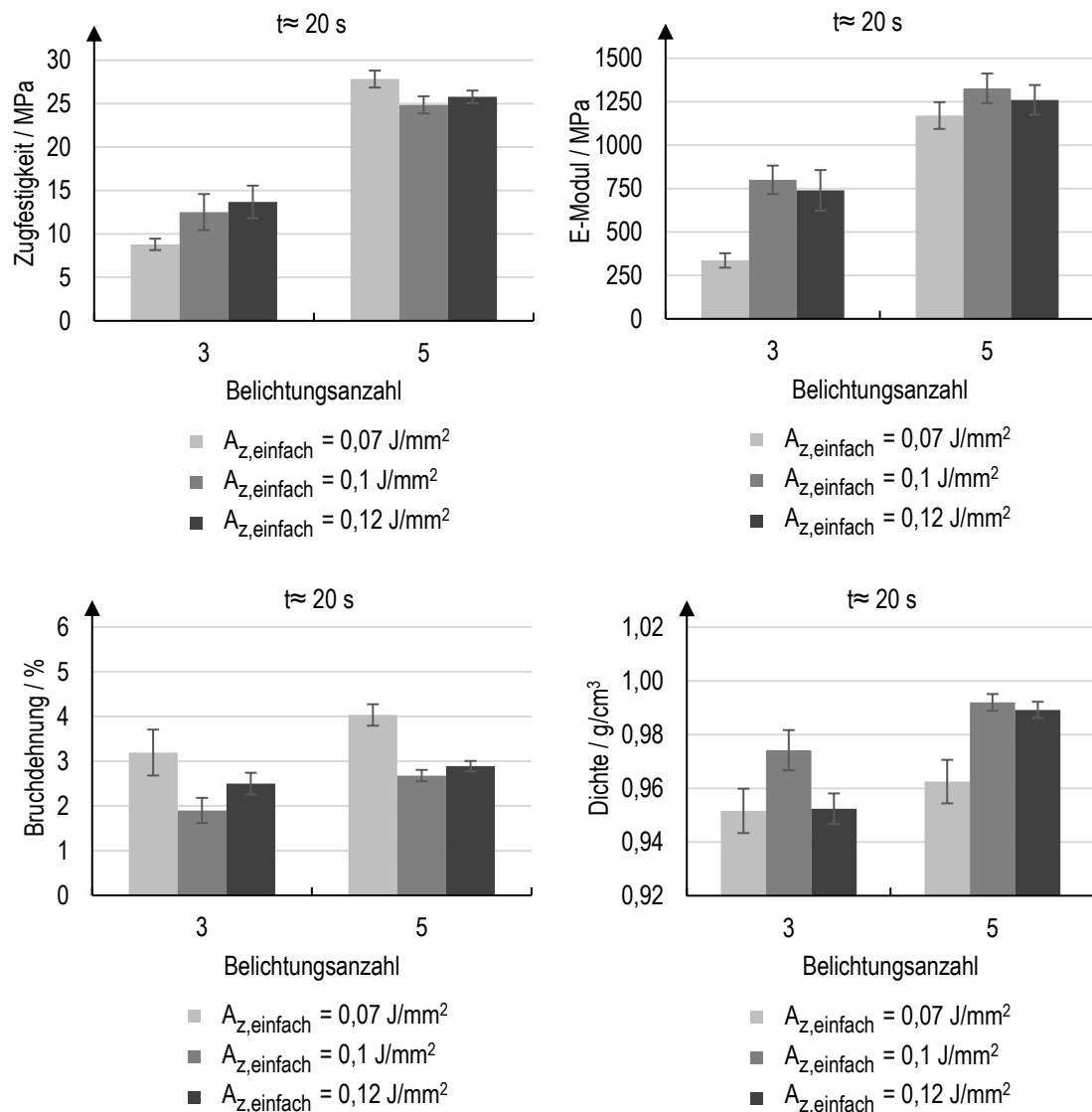


Bild 5-46: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Belichtungsanzahl bei konstanter Flächenenergiedichte, konstanten Belichtungsparametern und konstanter Schichtzeit in ZXY-Orientierung

Tendenz zu höheren Ausprägungen bei höheren Gesamtenergiedichten, die aus der höheren Belichtungsanzahl resultieren, gezeigt werden. Weiterhin ist ersichtlich, dass bei fester Belichtungsanzahl kein klarer Trend der Kennwerte in Abhängigkeit der Flächen- bzw. Gesamtenergiedichte festzustellen ist. Bei Zugfestigkeit und Bruchdehnung führt z.B. die Flächenenergiedichte von $0,07 \text{ J/mm}^2$ bei fünffacher Belichtung zu den höchsten Ausprägungen, während dies beim E-Modul und der Dichte für eine Flächenenergiedichte von $0,1 \text{ J/mm}^2$ der Fall ist.

Die Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften und Dichte von der Schichtzeit bei konstanter Gesamtenergiedichte und Belichtungsanzahl wird in Bild 5-47 anhand von zwei Parameterkombinationen (25 W & 2000 mm/s bzw. 50 W & 4000 mm/s) betrachtet (Set-Nr.:

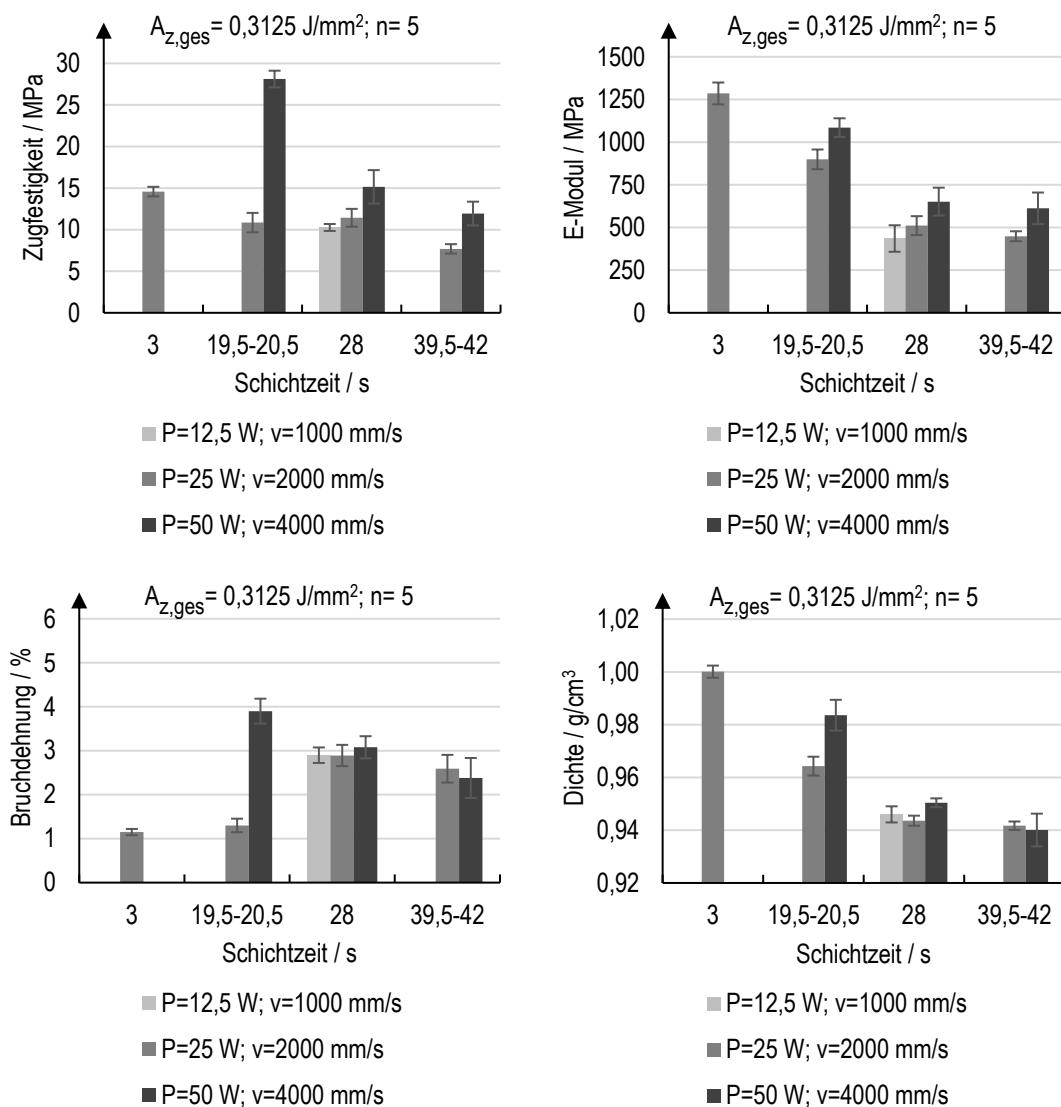


Bild 5-47: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Schichtzeit bei konstanter Gesamtenergiedichte und Belichtungsanzahl in ZXY-Orientierung

15,17-21,42-44; Tabelle A 6). Eine Schichtzeit von 3 s bei 50 W und 4000 mm/s ist hier nicht aufgeführt, da diese in starker Rauchentwicklung resultiert, welche durch zu schnelle Einbringung der Energie und dem kurzen Abstand zwischen der erneuten Belichtung der jeweiligen Fläche entsteht. Zudem ist eine starke Riefenbildung beim Pulverauftrag durch mit Schmelze verunreinigte Beschichterklingen festzustellen, infolgedessen es zum Herausreißen von Zugstäben und zu Baujobabbrüchen kommt. Der Grund für die Verunreinigung durch den Kontakt mit der Schmelze kann nur vermutet werden. Die aus der kurzen Schichtzeit resultierende hohe eingebrachte Energie und damit hohe Temperatur der Schmelze wirft Zersetzungsgasblasen an der Oberseite auf, sodass der Beschichter in Kontakt zur Schmelze hat. Bei der Parameterkombination aus 25 W und 2000 mm/s bei einer Schichtzeit von 3 s ist ebenfalls starker Rauch und Riefenbildung festzustellen, jedoch können die Prüfkörper erfolgreich gefertigt werden. Durch die halbierte Scangeschwindigkeit vergeht aufgrund der kleinen Querschnitte geringfügig mehr Zeit zwischen den Belichtungszyklen einer Fläche. Für die Parameterkombination von 50 W und 4000 mm/s zeigen sich bei allen Kennwerten höhere Ausprägungen als bei den anderen Parametersets und der Trend zu abnehmenden Werten mit zunehmender Schichtzeit. Bei der Parameterkombination von 25 W und 2000 mm/s gilt selbiges für den E-Modul und die Dichte sowie in geringer Ausprägung auch für die Zugfestigkeit. Die Bruchdehnung weist tendenziell einen Anstieg bei steigender Schichtzeit auf. Bei einer Schichtzeit von 28 s ist zur Veranschaulichung der Abhängigkeit der Kennwerte von der Laserleistung und der Scangeschwindigkeit zusätzlich die Parameterkombination mit 12,5 W und 1000 mm/s aufgeführt. Es ist ersichtlich, dass die mechanischen Eigenschaften und Dichte mit steigender Laserleistung und Scangeschwindigkeit bei konstantem Verhältnis dieser beiden Parameter leicht ansteigen.

Bild 5-48 trägt die mechanischen Eigenschaften und Dichte über der Gesamtenergiedichte und der zugrundeliegenden Scangeschwindigkeit sowie Laserleistung bei konstanter Schichtzeit und Fünffachbelichtung auf (Set-Nr.: 17,20,48,49,52,53; Tabelle A 6). Eindeutige Trends sind bei keinem der Kennwerte zu verzeichnen. Bei einer Gesamtenergiedichte von 0,3125 J/mm² zeigt sich, dass, wie bereits in Bild 5-47 zu erkennen, eine höhere Laserleistung und Scangeschwindigkeit zu höheren Werten führen. Bei einer Scangeschwindigkeit von 500 mm/s zeigen sich mit Ausnahme der Bruchdehnung höhere Werte mit steigender Laserleistung und einhergehender steigender Gesamtenergiedichte. Die höchsten Dichten und E-Module können tendenziell mit den höchsten der betrachteten Gesamtenergiedichten erreicht werden. Dass die Werte der mechanischen Eigenschaften und Dichte mit steigender Gesamtenergiedichte ansteigen, lässt sich jedoch, wie den Diagrammen zu entnehmen, nicht pauschalisieren. Die Bruchdehnung befindet sich, mit Ausnahme des Werts für 25 W und 2000 mm/s, auf einem annähernd gleichen Niveau zwischen 2,7 % und 4 %.

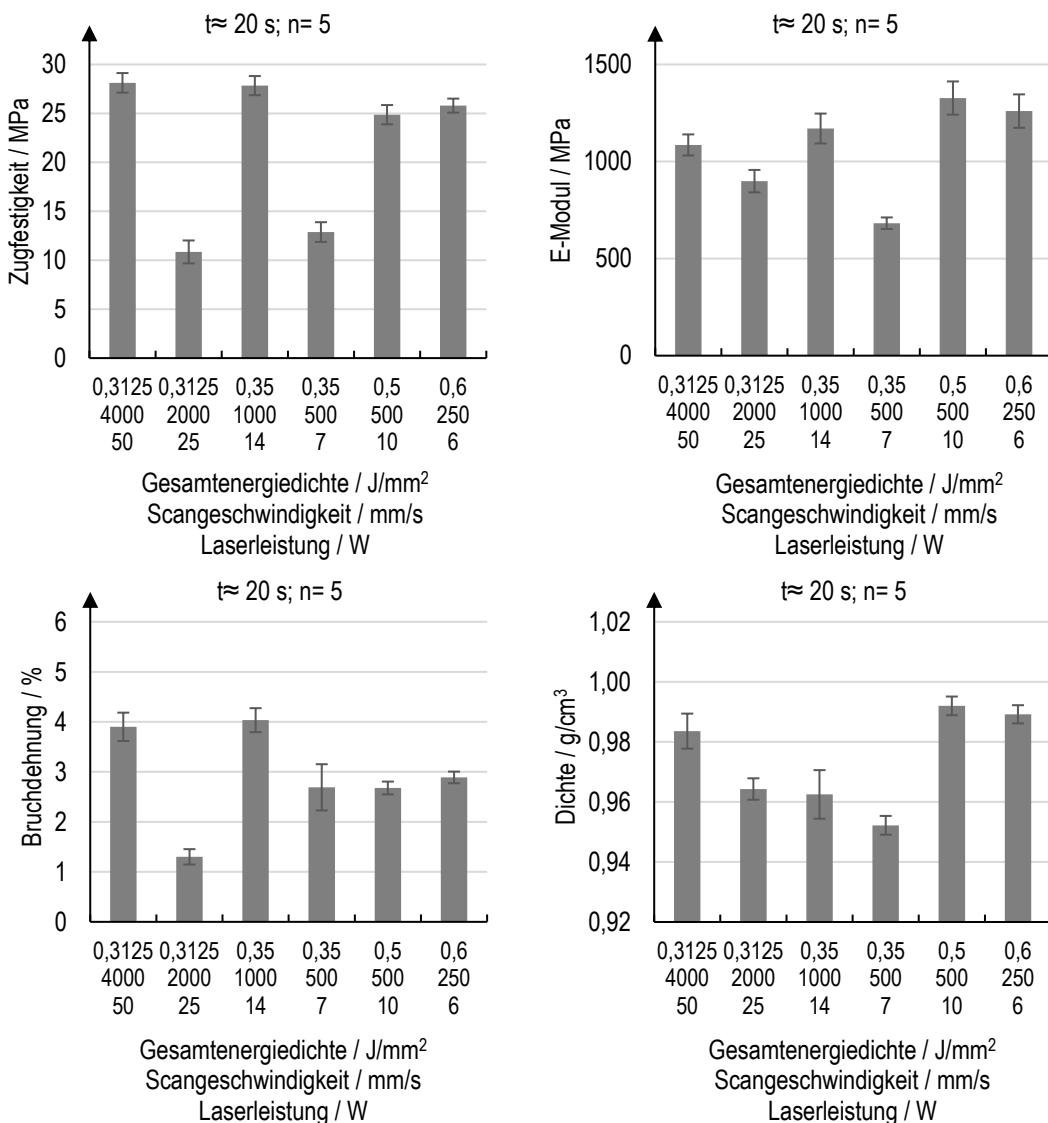


Bild 5-48: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Gesamtenergiedichte, der Scangeschwindigkeit und der Laserleistung bei konstanter Schichtzeit und Belichtungsanzahl

Bild 5-49 stellt die mechanischen Eigenschaften und Dichte über Laserleistung und Scangeschwindigkeit bei annähernd konstanter Gesamtenergiedichte ($0,33 \pm 0,03 \text{ J/mm}^2$) und Schichtzeit ($21 \pm 1,5 \text{ s}$) dar (Set-Nr.: 17,20,48,49,56,59; Tabelle A 6). Bei E-Modul und Dichte zeigt sich eine leichte Tendenz zu höheren Werten bei höherer Laserleistung und Scangeschwindigkeit. Bei Zugfestigkeit und Bruchdehnung stechen die beiden höchsten Werte, welche deutlich höher als die übrigen Werte sind, jeweils bei 14 W und 1000 mm/s sowie 50 W und 4000 mm/s hervor. Bei der Parameterkombination aus 50 W und 4000 mm/s zeigen E-Modul und Dichte ebenfalls mit die höchsten Ausprägungen. Die hohen Werte bei einer Laserleistung von 50 W und einer Scangeschwindigkeit von 4000 mm/s sind bereits aus den vorherigen Diagrammen bekannt.

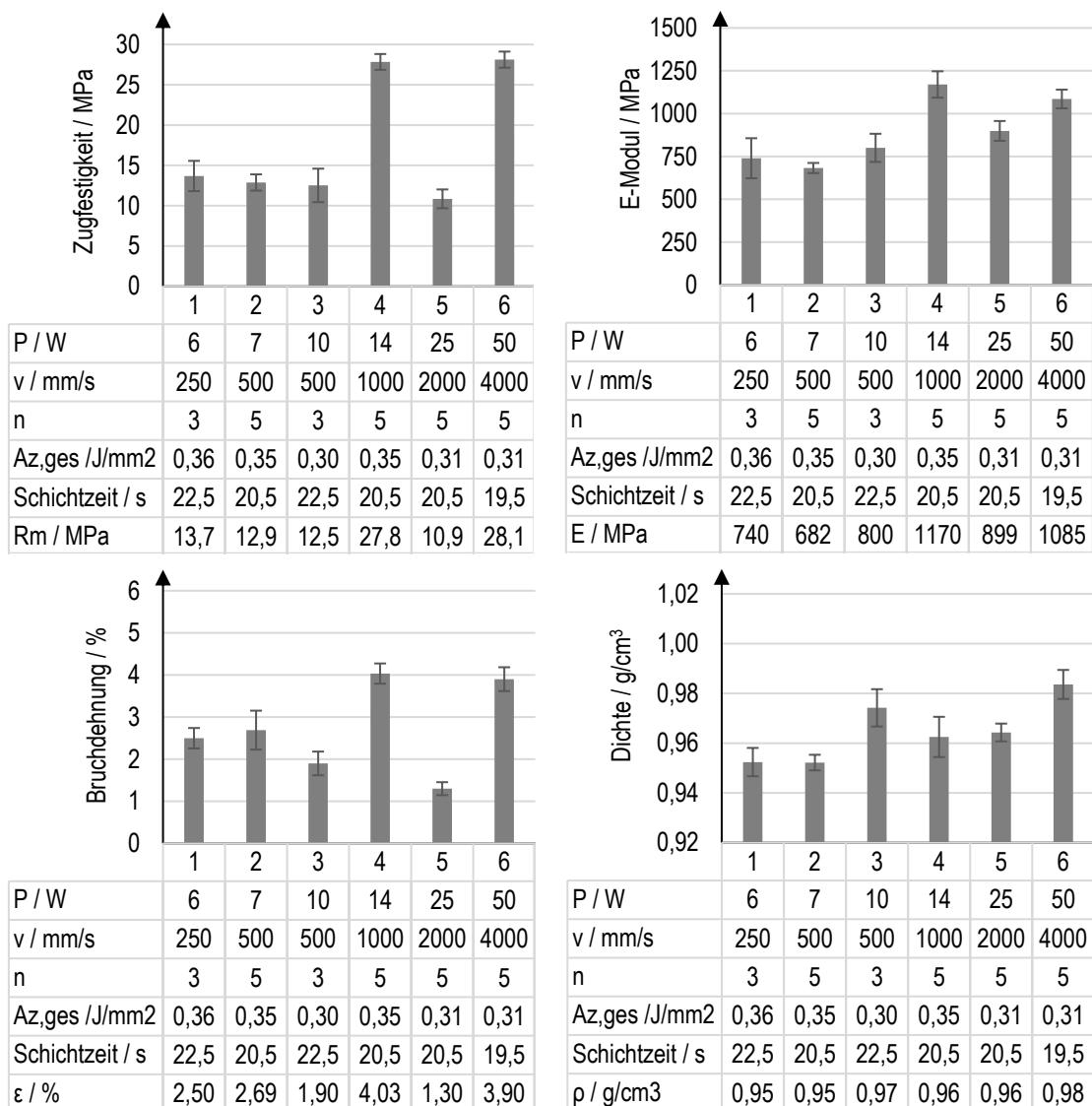


Bild 5-49: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Laserleistung und Scangeschwindigkeit bei annähernd konstanter Gesamtenergiedichte und Schichtzeit in ZXY-Orientierung

In Bild 5-50 sind die mechanischen Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Laserleistung bei konstanter Belichtungsanzahl für zwei verschiedene Scangeschwindigkeiten (500 mm/s & 1000 mm/s), die zu unterschiedlichen Gesamtenergiedichten führen, aufgeführt (Set-Nr.: 44,48,49,52; Tabelle A 6). Über alle Kennwerte, ausgenommen der Bruchdehnung bei einer Scangeschwindigkeit von 500 mm/s, zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Werte mit zunehmender Laserleistung, welche mit einer Steigerung der Gesamtenergiedichte einhergeht.

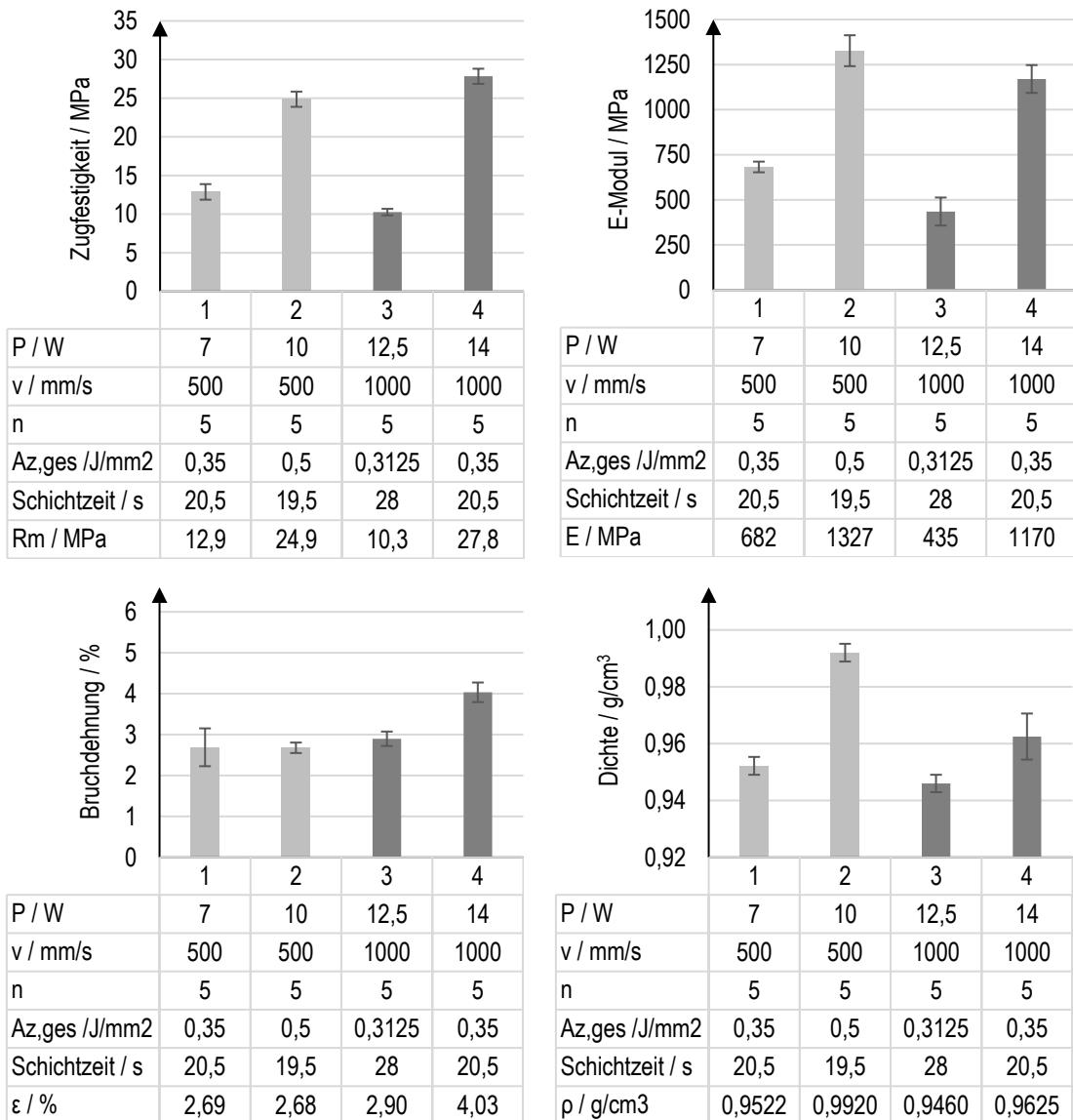


Bild 5-50: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Laserleistung bei konstanter Scangeschwindigkeit und Belichtungsanzahl in ZXY-Orientierung

Im Gegensatz zur XYZ-Orientierung gestaltet sich das Identifizieren von Zusammenhängen zwischen Belichtungsparametern und den mechanischen Eigenschaften bzw. der Dichte in ZXY-Orientierung schwieriger. Die Werte der mechanischen Eigenschaften liegen deutlich unter den Werten für den konventionellen LS-Prozess. Der E-Modul kommt vereinzelt auf 90 % an die LS-Referenz heran, weist jedoch große Schwankungen bei gleichen Gesamtenergiedichten auf. Die höchsten Werte für Zugfestigkeit bzw. Bruchdehnung liegen bei 60 % bzw. 50 % zur LS-Referenz. Die Dichte unterliegt ebenfalls großen Schwankungen, übersteigt aber zum Teil die LS-Referenz. Bei Betrachtung der Gesamtenergiedichte kann lediglich eine Tendenz zu höheren Zugfestigkeiten mit steigender Gesamtenergiedichte verzeichnet werden. Sowohl beim E-Modul als auch der Dichte zeigen sich verhältnismäßig hohe Werte über Gesamtenergiedichten von ca. 0,2 J/mm² bis 0,6 J/mm². Mit

zunehmender Belichtungsanzahl steigen die mechanischen Eigenschaften und Dichte an. Die tendenziell höchsten Werte für die mechanischen Eigenschaften ergeben sich bei mittleren Schichtzeiten von 20 s bis 28 s. Die höchsten Werte für die Dichte entstehen bei einer Schichtzeit von 20 s. Die vereinzelt betrachteten kurzen Schichtzeiten von 3 s zeigen ebenfalls verhältnismäßig hohe Werte. Bei derart kurzen Schichtzeiten treten jedoch vermehrt Prozessfehler mit Baujobabbrüchen sowie eine starke Rauchentwicklung auf. Zudem ist bei konstanter Gesamtenergiedichte und Schichtzeit ein Anstieg der mechanischen Eigenschaften und Dichte mit steigender Laserleistung und Scangeschwindigkeit, bei konstantem Verhältnis der beiden Parameter, zu dokumentieren. Die mechanischen Eigenschaften und Dichte nehmen ebenfalls mit steigender Gesamtenergiedichte durch eine steigende Laserleistung bei konstanter Scangeschwindigkeit und Schichtzeit zu. Verhältnismäßig gute Kombinationen aus den mechanischen Kennwerten, insbesondere für Zugfestigkeit und E-Modul, und der Dichte lassen sich im Rahmen der Untersuchungen mit hohen Gesamtenergiedichten von 0,5 J/mm² und 0,6 J/mm² durch geringe Scangeschwindigkeiten mit 250 mm/s bis 500 mm/s und geringer Laserleistung mit 6 W bis 10 W bei einer Schichtzeit von 20 s und Fünffachbelichtung erzielen. Eine verhältnismäßig hohe Bruchdehnung von 4 % bei verhältnismäßig guten weiteren mechanischen Eigenschaften und hoher Dichte zeigt sich bei einer Gesamtenergiedichte von 0,35 J/mm² mit einer Scangeschwindigkeit von 1000 mm/s und einer Laserleistung von 14 W bei einer Schichtzeit von 20 s und Fünffachbelichtung.

5.6.3.3 Variation der Hatchbelichtungsstrategie und des Hatchabstands

Im Folgenden wird der bislang unveränderte Hatchabstand sowie die Belichtungsstrategie des Hatches variiert und deren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und Dichte betrachtet. Aufgrund der deutlich geringeren mechanischen Eigenschaften der ZXY-Orientierung zur LS-Referenz wird exemplarisch diese Orientierung betrachtet. Die XYZ-Orientierung wird an dieser Stelle nicht untersucht, da die mechanischen Eigenschaften und Dichte in den vorigen Untersuchungen bereits Werte im Bereich der LS-Referenz aufweisen. Zunächst wird auf den Einfluss der Belichtungsstrategie bei einem Hatchabstand von weiterhin 0,2 mm analog zu den vorherigen Untersuchungen eingegangen, ehe die Ergebnisse für verschiedene Hatchabstände (siehe Tabelle 5-10) betrachtet werden.

Neben der bisher betrachteten von Schicht zu Schicht alternierenden Scanstrategie, bei der in der einen Schicht parallele Linien entlang der x-Achse der LS-Anlage und in der darauffolgenden Schicht parallele Linien entlang der y-Achse belichtet werden (alternierende Kreuzbelichtung vgl. Kapitel 2.1.3), wird die xy-Doppelbelichtung untersucht. Bei dieser Scanstrategie wird je Schicht sowohl in x- als auch in y-Richtung belichtet. Es bildet sich demnach ein Raster aus sich kreuzenden x- und y-Scanlinien je Schicht und je Belichtungsschritt aus. Dadurch handelt es sich faktisch bereits um eine Doppelbelichtung je Schicht und je Belichtungsschritt der Mehrfachbelichtung. Betrachtet wird eine

Gesamtenergiedichte von ca. 0,3 J/mm² bei einer Schichtzeit von 20 s. Für die alternierende x- und y-Belichtung werden die mechanischen Eigenschaften und Dichte für die Parameterkombinationen mit einer Laserleistung von 25 W bei einer Scangeschwindigkeit von 2000 mm/s sowie 50 W bei 4000 mm/s bei Fünffachbelichtung aus den vorherigen Untersuchungen herangezogen. Für die xy-Doppelbelichtung werden die Parameterkombinationen mit einer Laserleistung von 20 W bei einer Scangeschwindigkeit von 2000 mm/s sowie 40 W bei 4000 mm/s bei Dreifachbelichtung, die durch die sich kreuzenden Scanlinien eine Sechsfachbelichtung ist, untersucht. Zur Angleichung der Gesamtenergiedichten der Fünffach- und Sechsfachbelichtung sowie aufgrund starker Rauchentwicklung bei der xy-Doppelbelichtung werden die Laserleistungen bei der xy-Doppelbelichtungsstrategie im Vergleich zur alternierenden Kreuzbelichtung reduziert. Bild 5-51 stellt die Ergebnisse der mechanischen Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Belichtungsstrategie dar (Set-

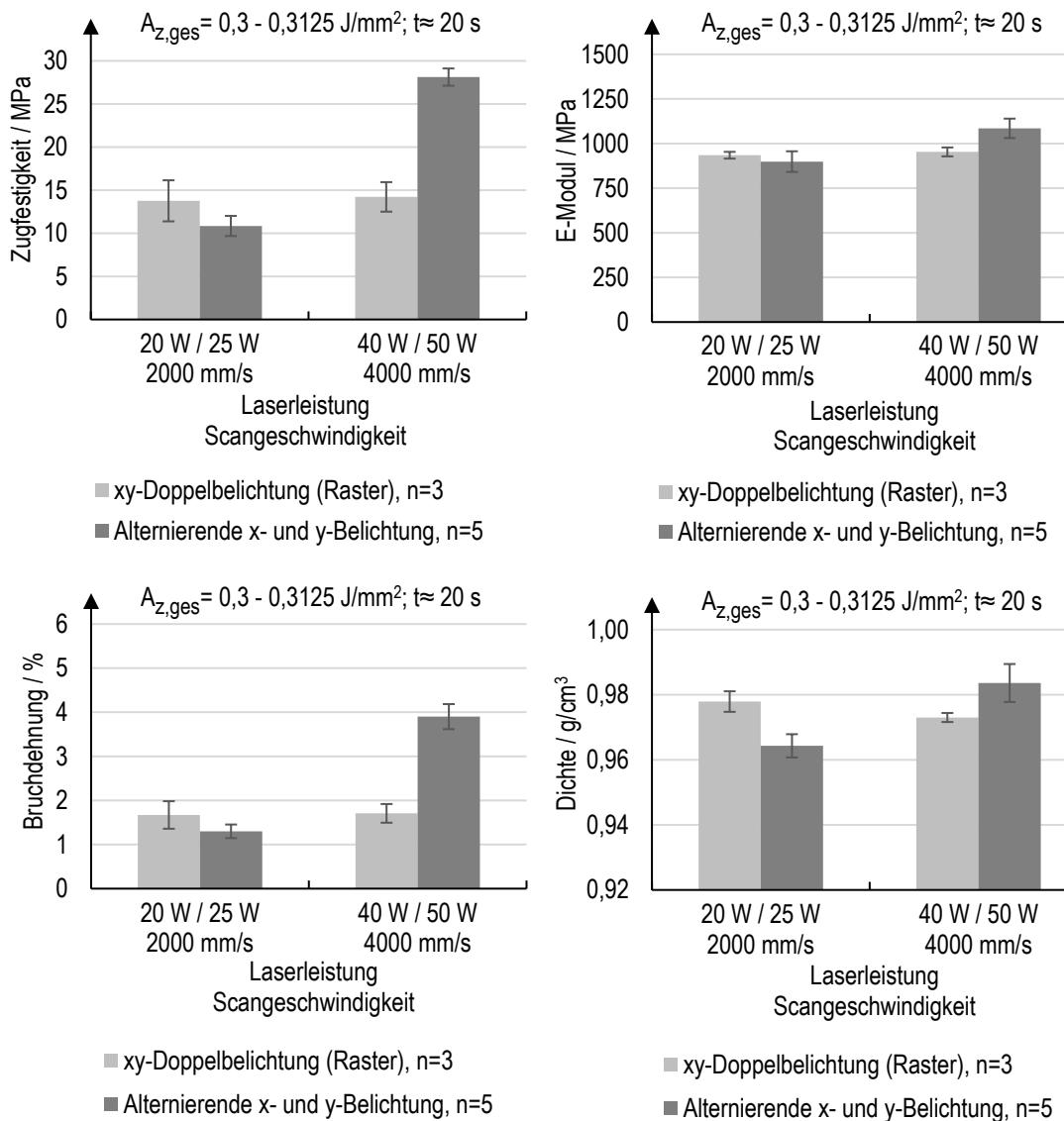


Bild 5-51: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Belichtungsstrategie bei konstanter Gesamtenergiedichte und Schichtzeit in ZXY-Orientierung

Nr.:17,20,54,55; Tabelle A 6). Zu erkennen ist, dass keine signifikanten Unterschiede in den durch die xy-Doppelbelichtung resultierenden mechanischen Eigenschaften und der Dichte im Vergleich zu den Werten der alternierenden Kreuzbelichtung auftreten. Eine Ausnahme ergibt sich für die Zugfestigkeit und Bruchdehnung beim Parameterset mit höherer Laserleistung und Scangeschwindigkeit (40 bzw. 50 W und 4000 mm/s), bei dem für die xy-Doppelbelichtung deutlich geringe Werte zu verzeichnen sind. Zu beachten ist, dass sich durch die xy-Doppelbelichtung längere Belichtungszeiten der einzelnen Zugstabflächen ergeben und daher längere Zeiten zwischen den Belichtungszyklen einer Fläche vorliegen.

Zur Untersuchung des Einflusses des Hatchabstands auf die mechanischen Eigenschaften und Dichte werden, neben dem zuvor mit 0,2 mm konstant gehaltenem Hatchabstand, Hatchabstände von 0,15 mm und 0,3 mm untersucht. Der Hatchabstand von 0,15 mm

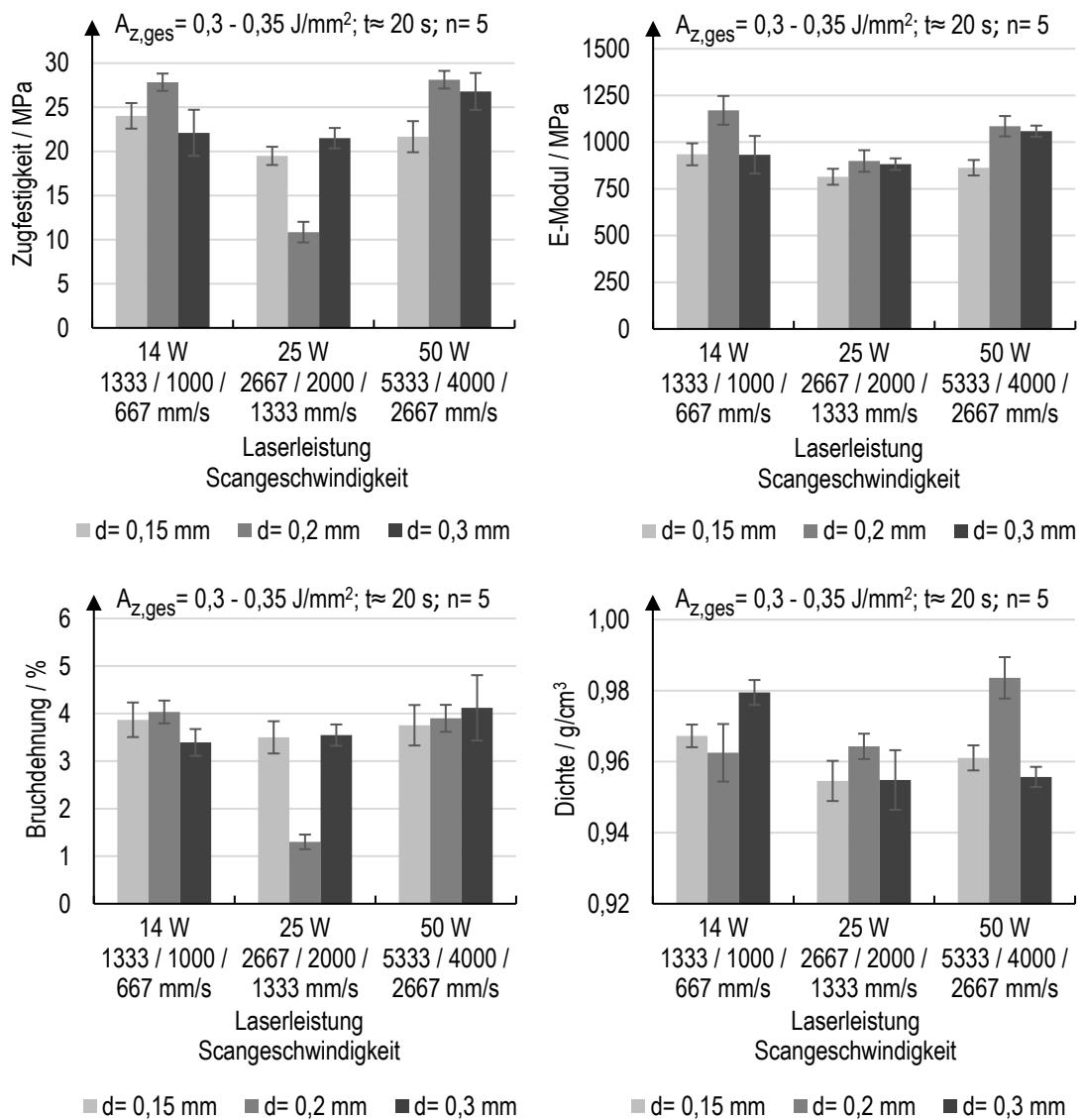


Bild 5-52: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit des Hatchabstands bei konstanter Gesamtenergiedichte und Schichtzeit in ZXY-Orientierung

erhöht die Dichte und Anzahl der Hatchlinien. Der Hatchabstand von 0,3 mm ist noch ausreichend klein, um eine Überlappung der Laserspuren und Schmelzpoole zu garantieren. Die Gesamtenergiedichte und Schichtzeit werden in den Untersuchungen konstant gehalten. Betrachtet werden drei verschiedene Laserleistungen mit 14 W, 25 W und 50 W, die je Laserleistung und Hatchabstand eine angepasste Scangeschwindigkeit zur Bewahrung der Konstanz der Gesamtenergiedichte benötigen. In Bild 5-52 sind die Ergebnisse zu den mechanischen Eigenschaften und der Dichte unter Variation des Hatchabstands dargestellt (Set-Nr.: 17,20,48,60-65; Tabelle A 6). Zu erkennen ist grundsätzlich, dass die mechanischen Eigenschaften und Dichte für die verschiedenen Hatchabstände eng beieinander liegen und sich keine signifikanten Unterschiede oder Verbesserungen einstellen. Ein Hatchabstand von 0,2 mm zeigt tendenziell, jedoch nur geringfügig, die besten Werte für die mechanischen Eigenschaften und Dichte bei allen drei Laserleistungen. Bei 25 W und einem Hatchabstand von 0,2 mm sind die Zugfestigkeit und Bruchdehnung als Ausreißer zu werten.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Belichtungsstrategie und der Hatchabstand in dem hier untersuchten Rahmen keinen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und Dichte zeigen.

5.6.3.4 Bruchbilder

Die Ergebnisse der mechanischen Eigenschaften werden im Folgenden anhand von Bruchbildern abgeglichen und analysiert. In Bild 5-53 sind Bruchbilder für die XYZ- und ZXY-Orientierung dargestellt. In der Vollaufnahme (Bild 5-53, links) wird auf die Vergilbung der Prüfkörper im NTLS-Prozess im Vergleich zur LS-Referenzprobe hingewiesen. Insbesondere der Prüfkörper in ZXY-Orientierung mit einer Schichtzeit von 3 s zeigt eine deutliche Vergilbung, die auf die zeitlich schnell aufeinanderfolgende Energieeinbringung der Mehrfachbelichtung bei der kurzen Schichtzeit zurückzuführen ist und mit der im Zuge von Bild 5-47 beschriebenen starken Rauchentwicklung korreliert. Die mechanischen Eigenschaften und Dichte weisen jedoch, mit Ausnahme der Bruchdehnung, höhere Werte im Vergleich zu höheren Schichtzeiten unter der Voraussetzung gleicher Parameter auf (vgl. Bild 5-47). Ab einer Schichtzeit von 20 s in ZXY-Orientierung ist die Vergilbung deutlich geringer ausgeprägt bzw. nahezu nicht vorhanden. In der Nahaufnahme (Bild 5-53, rechts) spiegelt sich das über die mechanischen Eigenschaften, insbesondere der Bruchdehnung, bereits in den vorangehenden Abschnitten identifizierte Verformungs- bzw. Bruchverhalten wieder. In XYZ-Orientierung zeigt sich ein duktiles Bruchverhalten mit stärkerer Einschnürung als bei der LS-Referenz. Die Bruchdehnung beider Proben ist mit ca. 24 % identisch. In ZXY-Orientierung zeigt sich für alle Schichtzeiten ein glattes, sprödes Bruchverhalten, was mit der im vorangehenden Abschnitt gemessenen, geringen Bruchdehnung von 1 % bis 4 % einhergeht. Tendenziell zeigt sich mit zunehmender Schichtzeit eine minimal rauere Bruchkante. Aufgrund des glatten Bruchs und der geringen Bruchdehnung ist, insbesondere bei

einer Schichtzeit von 3 s, anzunehmen, dass der Bruch exakt zwischen zwei Bauteilschichten auftritt und der Schicht-Schicht-Verbund nicht ausreichend ausgebildet ist. Die LS-Referenz zeigt eine vergleichsweise raue Bruchstelle über vermutlich mehrere Bauteilschichten, die zur höheren Bruchdehnung mit 9 % passt.

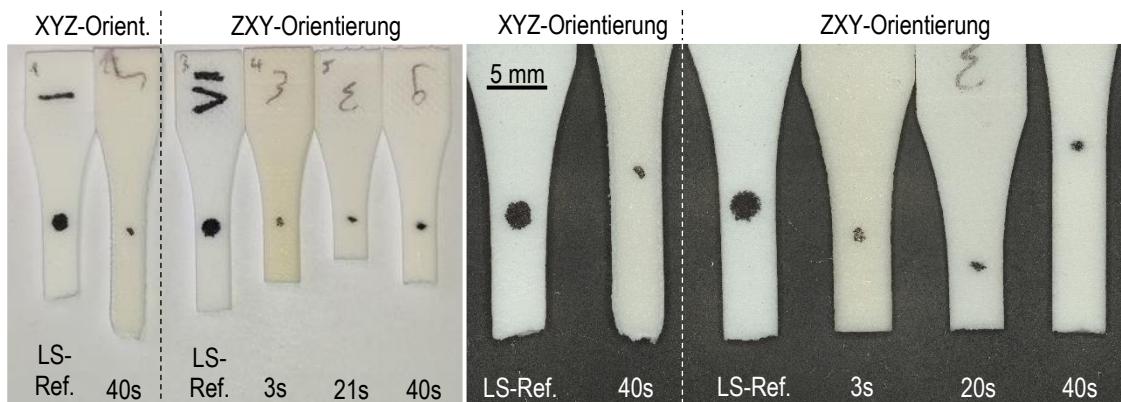


Bild 5-53: Bruchbilder mit erkennbarer Vergilbung (links) und in Nahaufnahme (rechts) für eine Gesamtenergiedichte von $0,3125 \text{ J/mm}^2$ in XYZ- und ZXY-Orientierung bei unterschiedlichen Schichtzeiten ($v=2000 \text{ mm/s}$, $P=25 \text{ W}$, $n=5$, $d=0,2 \text{ mm}$)

Zur weiteren Untersuchung der geringen Bruchdehnung und des glatten Bruchverhaltens in ZXY-Orientierung werden REM-Aufnahmen der Bruchflächen für eine LS-Referenz (links) und für den NTLS-Prozess mit einer Schichtzeit von 3 s (Mitte) bzw. 40 s (rechts) in Bild 5-54 aufgeführt. Verglichen mit der LS-Referenz zeigt sich bei einer Schichtzeit von 3 s eine deutlich glattere Bruchfläche, die die Annahme eines schlechten Schicht-Schicht-Verbunds bestätigen kann. Weiterhin sind sphärische Poren, die auf Zersetzung hindeuten und mit der Vergilbung und starken Rauchentwicklung zusammenpassen, zu erkennen. Bei einer Schichtzeit von 40 s ist eine deutlich rauere Bruchfläche im Vergleich zu einer Schichtzeit von 3 s zu verzeichnen. Im Vergleich zur LS-Referenz tritt ein ähnliches Höhenprofil

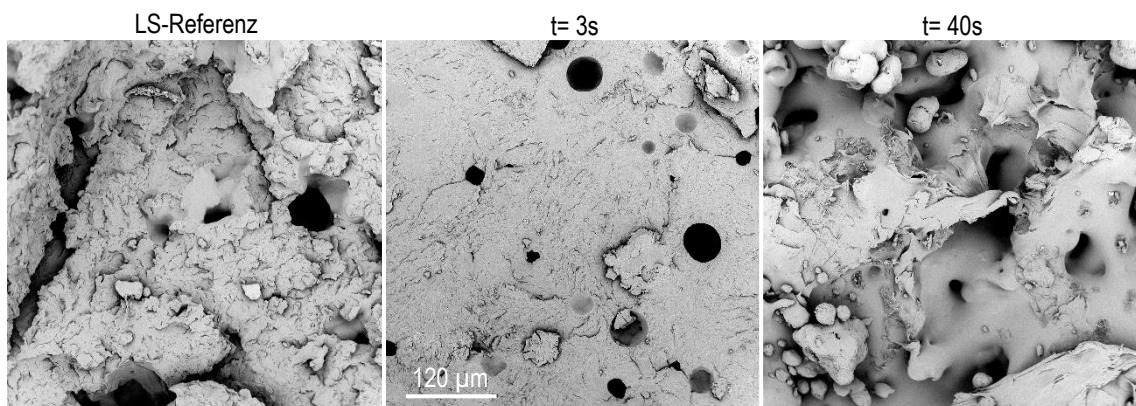


Bild 5-54: REM-Aufnahmen für eine Gesamtenergiedichte von $0,3125 \text{ J/mm}^2$ in ZXY-Orientierung bei unterschiedlichen Schichtzeiten ($v=2000 \text{ mm/s}$, $P=25 \text{ W}$, $n=5$, $d=0,2 \text{ mm}$)

auf, die Erscheinungsform ist jedoch abweichend. Die Fläche wirkt brüchiger mit mehr Poren und losen Partikeln, was ursächlich für die herabgesetzte Bruchdehnung sein kann.

5.6.3.5 Diskussion

Die vorherigen Abschnitte zeigen die mechanischen Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Belichtungsparameter und Schichtzeit für die XYZ- und ZXY-Orientierung auf. Die Anisotropie zwischen den beiden Orientierungen, welche aus dem konventionellen LS-Prozess bekannt ist (siehe Kapitel 2.1.4), ist klar zu erkennen. Die mechanischen Eigenschaften und Dichte in XYZ-Orientierung kommen an die LS-Referenzwerte heran. Im Vergleich zu den Ergebnissen von Kigure et al. zum NTLS mit PA12 bei einer Bauraumtemperatur von 130 °C liegt die maximale relative Dichte mit 99% (wahre Dichte von PA12 ca. 1,01 g/cm³, siehe Tabelle 5-2) gleichauf. Zugfestigkeit und E-Modul zeigen höhere Werte. Die Bruchdehnung ist geringer als die extrem hohe Bruchdehnung mit 34 % bei Kigure et al. [KN17; KYN19].

Die ZXY-Orientierung weist zum Teil deutlich schlechtere Werte als die LS-Referenz auf. Lediglich die Dichte zeigt ähnliche Werte wie die LS-Referenz. Die Bruchdehnung mit 2 % bis 4 % fällt im Vergleich zur LS-Referenz um mehr als 50 % ab, die Zugfestigkeit weist ein ähnliches Niveau auf. Der maximale E-Modul erreicht 90 % der Referenz. Verglichen mit einem Ringversuch des VDI zur LS-Anlagenqualifizierung liegen die für die ZXY-Orientierung im NTLS-Prozess bestimmten, maximalen Werte jedoch im Soll. Sie liegen am unteren Rand der Intervalle. Der Ringversuch zeigt für die Zugfestigkeit Werte von 25 MPa bis 50 MPa, für den E-Modul 1400 MPa bis 1900 MPa und für die Bruchdehnung 2 % bis 15 % auf [VDI 3405-1]. Im Rahmen dieser Arbeit sind jedoch die mit der EOS P396 bestimmten Referenzwerte von Relevanz, da diese die mit der Anlage realisierbaren Kennwerte widerspiegeln.

Eine mögliche Begründung für die herabgesetzten mechanischen Kennwerte in ZXY-Orientierung liefert die Kombination der von Starr et al. und Rüther et al. berichteten Erkenntnisse. Starr et al. stellen dar, dass bereits kleine Fehler im Bereich der Schicht-Schicht-Verbindung großen Einfluss, insbesondere auf die Bruchdehnung, haben [SGU11]. Rüther et al. zeigen, dass geringe Bauraumtemperaturen außerhalb des Sinterfensters zu häufigen Beschichtungsfehlern führen, die zudem hinsichtlich der Bauteileigenschaften als kritisch einzuordnen sind [RKP+23]. Vermehrte Fehlbeschichtungen können im Zuge der durchgeführten Untersuchungen ebenfalls beobachtet werden. In ZXY-Orientierung ist aufgrund des kleineren Querschnitts und der senkrecht zur Belastungsrichtung liegenden Beschichtungsfehler wie z.B. Riefen mit einem deutlich höheren Einfluss als in XYZ-Orientierung zu rechnen.

Weiterhin werden die mechanischen Eigenschaften, insbesondere die Bruchdehnung, signifikant durch Poren beeinflusst, wie in Kapitel 2.1.4 beschrieben. Aufgrund des

schichtweisen Aufbaus findet die Ausrichtung der Poren vor allem in bzw. zwischen den Schichten statt, was zu schlechten mechanischen Eigenschaften und sprödem Bruchverhalten in Aufbaurichtung führt [SFL+17]. Zudem hat die Porenanzahl einen größeren Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften als das Porenvolumen [SFL+17]. Hohe Konzentrationen mit kleinen Poren führen bei gleichem Porositätsgrad zu schlechterer Schichtverbindung als niedrige Porenkonzentrationen mit großen Poren [SMB+17]. Zur Porenausbildung und -konzentration im NTLS lässt sich durch die bisherigen Untersuchungen keine Aussage treffen, jedoch würde eine hohe Porenkonzentration im Widerspruch zur zum Teil hohen Dichte der ZXY-Prüfkörper stehen. Aus diesem Grund wird zur Detektion von Poren in Abschnitt 5.6.6 auf CT-Aufnahmen zurückgegriffen.

Möglicherweise stellen auch der umfangreich untersuchte Energieeintrag bzw. die Belichtungsparameter oder die Belichtungsstrategie weiterhin das Problem dar. Denn nachweislich hat der Energieeintrag, wie auch im Rahmen dieser Untersuchungen zu erkennen, einen starken Einfluss auf die Mikrostruktur und der damit einhergehenden mechanischen Eigenschaften (siehe Kapitel 2.1.4). Bei den kleinen Querschnittsflächen der ZXY-Prüfkörper kann die Wärme schnell in das umliegende Pulverbett abfließen und vorzeitige Kristallisation einer Bauteilschicht entstehen. Das Auskühlen und ggf. Kristallisieren der Schicht verhindert Nachkondensationsreaktionen über mehrere Schichten hinweg, die enorm zum Schichtverbund beitragen. Für die schichtübergreifende Nachkondensation ist langes Verweilen der aufgebauten Schichten in Schmelzeform notwendig [Sch22]. Nach dem Abkühlen bzw. Kristallisieren der Schicht ist die in der nächsten Schicht eingebrachte Energie trotz der durch die Einschicht-Untersuchungen nachgewiesenen hohen Eindringtiefe unter Umständen zu gering, um diese und die vorherige Schicht aufzuschmelzen. Aus diesem Grund kann keine Interdiffusion und Verschlaufung bzw. eine Durchdringung der Polymerketten schichtübergreifend stattfinden, wodurch eine geringe Schichthaftung entsteht [Sch22]. Zudem berichten Yamauchi et al. beim NTLS von PA11, dass bei kleiner Querschnittsfläche oder hohem Aspektverhältnis eine geringere Dichte durch schnellen und hohen Wärmeverlust auftritt [YNK17], wodurch ebenfalls die mechanischen Eigenschaften beeinflusst werden.

Weiterhin führt Kaddar ein mögliches Problem in der Steuerung der Energiedichte bei der Doppelbelichtung auf. Wenn die zugrundliegende Flächenenergiedichte ($A_{z,\text{einfach}}$) der beiden Belichtungen zu niedrig gewählt wird, wird bei der ersten der beiden Belichtungen lediglich die Schichtoberseite aufgeschmolzen und dadurch die Fläche sozusagen versiegelt. Die in der Pulverschüttung unter der versiegelten Schichtoberfläche befindliche Luft ist eingeschlossen und feine Poren verbleiben in der Schicht. Bei Doppelbelichtung muss laut Kaddar die erste Belichtung bereits ausreichend stark sein, um das vollständige Aufschmelzen, das Zusammensinken der Partikeln bzw. der Schmelze und das Entweichen der Luft zu bewerkstelligen [Kad10]. Im Rahmen dieser Untersuchung sind die zugrundeliegenden Flächenenergiedichten ($A_{z,\text{einfach}}$) der Mehrfachbelichtung bereits höher gewählt als die in

einer Übersicht in [WW19] dargestellten Energiedichten. Die Übersicht stellt Volumenenergiedichten verschiedener, veröffentlichter Untersuchungen für den konventionellen LS-Prozess mit Einfachbelichtung, welche hier zur Vergleichbarkeit mit standardmäßigen Schichtdicken von 100 µm bzw. 120 µm auf die Flächenenergiedichten umgerechnet werden, dar. Auch wenn die Flächenenergiedichte im Rahmen der Untersuchungen ausreichend hoch gewählt wird, könnte die beschriebene Problematik aufgrund der geringeren Bauraumtemperatur, die einen Anteil der zum Aufschmelzen benötigten Energie liefert, dennoch vorhanden sein.

Die in Abschnitt 5.6.3.4 betrachteten REM-Aufnahmen der Bruchflächen können zum Teil Aufschluss über die geringen mechanischen Eigenschaften geben. Für kurze Schichtzeiten mit hohem Energieeintrag können Zersetzungsgasporen und eine glatte Bruchfläche, die einen schwachen Schicht-Schicht-Verbund widerspiegelt, nachgewiesen werden. Die Zersetzungerscheinungen bei geringer Schichtzeit und der geringen Querschnittsfläche lassen sich durch die Erhöhung der Schmelzbadtemperatur über die Zersetzungsgrenze aufgrund der kurzen Hatchlinien [GWW+19], die innerhalb eines Belichtungszyklus schnell nacheinander belichtet werden, und die schnell aufeinanderfolgenden Belichtungszyklen begründen. Bei höheren Schichtzeiten und gleicher Energiedichte zeigt sich eine rauere Bruchfläche mit tendenziell mehr Poren und unaufgeschmolzenen Partikeln als die LS-Referenz, wobei sichtbare Poren in den deformierten Bruchbereichen nicht zwingend aussagekräftig sind. Nicht aufgeschmolzene Restpartikeln können nach Zarringhalam et al. die mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Die Partikeln weisen eine höhere Kristallinität als die umgebende Struktur auf, sodass eine Art Kompositstruktur entsteht. Dabei nehmen die interkristallinen Bereiche und die Grenzfläche zwischen den Sphärolithen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften [ZHK+06]. Starke interkristalline Strukturen können sich positiv auf die Festigkeit auswirken, aber insbesondere schwache Grenzflächen führen zu spröden Bauteileigenschaften [Lei12; ZYS+15]. Zudem ordnen sich die nicht aufgeschmolzenen Partikeln in der Schichtebene an, was zu einer schwachen Schicht-Schicht-Verbindung bei trotzdem hoher Dichte bzw. geringer Porosität führt. Aus der schwachen Schicht-Schicht-Verbindung resultiert ebenfalls sprödes Bruchverhalten [Lei12; SFL+17]. Die nicht aufgeschmolzenen Partikeln und Poren könnten also ursächlich für die herabgesetzten mechanischen Eigenschaften in ZXY-Orientierung sein.

Im Folgenden werden die Einflüsse der Belichtungsparameter und der Schichtzeit auf die mechanischen Eigenschaften und Dichte, die im Rahmen der Untersuchung der mechanischen Eigenschaften identifiziert werden und in Tabelle 5-12 zusammengefasst sind, mit der Literatur abgeglichen und diskutiert. Ein Anstieg der mechanischen Eigenschaften und Dichte mit zunehmender Energiedichte (ungeachtet der Schichtzeit), in diesem Fall der Gesamtenergiedichte der Mehrfachbelichtung, kann durch die Literatur bestätigt werden (siehe Kapitel 2.1.4). Dass dieser Zusammenhang in ZXY-Orientierung ausschließlich für die Zugfestigkeit gilt, lässt sich gegebenenfalls auf die zuvor angesprochenen

Beschichtungsfehler, unaufgeschmolzenen Partikeln oder unzureichende Verschlaufung der Polymerketten zurückführen. Bei konstanter Schichtzeit zeigt sich in ZXY-Orientierung ein steigender E-Modul und eine steigende Dichte mit zunehmender Gesamtenergiedichte. Bei der Zugfestigkeit und Bruchdehnung ist kein klarer Trend zu ermitteln. Mit steigender Belichtungsanzahl, die einen Anstieg der eingebrachten Energie zur Folge hat, kann ebenfalls ein Anstieg der mechanischen Eigenschaften und Dichte mit Ausnahme der Bruchdehnung in XYZ-Orientierung verzeichnet werden. Die Abnahme der Bruchdehnung kann gegebenenfalls auch auf Beschichtungsfehler, Poren oder unaufgeschmolzene Partikeln, die eine bruchbegünstigende Kerbwirkung hervorrufen und gleichzeitig nicht die Festigkeit und Steifigkeit in der XYZ-Orientierung (anders als in der ZXY-Orientierung) beeinflussen, zurückgeführt werden. Eine steigende Laserleistung in Kombination mit steigender Scangeschwindigkeit für eine konstante Energiedichte resultiert ebenfalls in zunehmenden mechanischen Eigenschaften und zunehmender Dichte, ausschließlich der Bruchdehnung und Dichte in der XYZ-Orientierung. Die steigenden Werte decken sich mit den in Kapitel 2.1.4 aufgeführten Erkenntnissen aus der Literatur. Ebenso zeigt sich, wie in Kapitel 2.1.4 aufgeführt, dass der Hatchabstand bei konstanter Energiedichte keinen bzw. nur einen geringen Einfluss nimmt. Die zunächst zunehmenden mechanischen Eigenschaften und zunehmende Dichte bei stagnierender Bruchdehnung bis zu einer Schichtzeit von 40 s in XYZ-Orientierung stimmt mit den Ergebnissen von Josupeit überein. Jedoch decken sich die abnehmenden Werte für Schichtzeiten größer als 40 s in XYZ- und größer als 20 s in ZXY-Orientierung nicht mit den Ergebnissen von Josupeit, bei dem die Werte zunehmend steigen [Jos19]. In ZXY-Orientierung, bei der die höchsten Werte der mechanischen Eigenschaften und Dichte für Schichtzeiten von 3 s und 20 s vorliegen, passt die Schichtzeitabhängigkeit mit den Ergebnissen von Yamauchi et al. zur Dichte im NTLS zusammen. Yamauchi et al. weisen bei konstanter Querschnittsfläche hohe Dichten bei kurzen Schichtzeiten von wenigen Sekunden und abnehmende Dichten mit steigender Schichtzeit nach. Sie begründen dies durch einen geringeren Wärmeverlust in der vorherigen Schicht bei kurzen Schichtzeiten. Die noch vorhandene Wärme unterstützt beim Aufschmelzen der neuen Schicht sowie dem Verknüpfen der Polymerketten und trägt zu einem dichten Schichtverbund bei [YKN16; YNK17].

Grundsätzlich sind die teilweise deutlich schlechteren Ergebnisse der ZXY-Orientierung kritisch zu betrachten, da sich unter anderem je nach Parameterset widersprüchliche Ergebnisse zeigen bzw. Zusammenhänge ausbilden. Die in ZXY-Orientierung auftretenden Effekte, die die schlechten mechanischen Eigenschaften und schlechte Dichte hervorrufen und zum Teil keine oder widersprüchliche Einflüsse zeigen, können nicht final identifiziert werden.

Tabelle 5-12: Zusammenfassung der tendenziellen Einflüsse der Belichtungsparameter und der Schichtzeit auf die mechanischen Eigenschaften und Dichte

	XYZ-Orientierung					ZXY- Orientierung					
	A _{z,ges} ↑	n ↑	P und v [*] ↑	t ↑ (≤40 s)	t ↑ <th>A_{z,ges} ↑</th> <th>A_{z,ges} ↑</th> <th>n ↑</th> <th>P und v[*] ↑</th> <th>d ↑</th> <th>t ↑ *** (>20 s)</th>	A _{z,ges} ↑	A _{z,ges} ↑	n ↑	P und v [*] ↑	d ↑	t ↑ *** (>20 s)
Zugfestigkeit	↑	↑	↑	↑	↓	↑	-	↑	↑	→	↓
E-Modul	↑	↑	↑	↑	↓	-	↑	↑	↑	→	↓
Bruchdehnung	↑	↓	→	→	↓	-	-	↑	↑	→	-
Dichte	↑	↑	→	↑	↓	-	↑	↑	↑	→	↓

Auswirkung: Wert steigt ↑; kein signifikanter Einfluss →; Wert sinkt ↓; kein Zusammenhang identifizierbar –

* konstantes Verhältnis von P und v

** konstante Schichtzeit

*** Eine Schichtzeit unter 20 s wird bei der ZXY-Orientierung aufgrund der starken Rauchentwicklung und der Prozessfehler nicht aufgeführt

Abhilfe für bessere mechanische Eigenschaften und eine bessere Dichte können nach Leigh die Bauraumtemperatur und die Schichtdicke leisten [Lei12]. Hara et al. verzeichnen einen Anstieg der Dichte mit zunehmender Bauraumtemperatur im NTLS mit PA12 [HIN14], was sich ebenfalls in den Voruntersuchungen zur Bauraumtemperatur in Abschnitt 5.3.2 zeigt. Daher werden in den folgenden Untersuchungen diese beiden Stellgrößen betrachtet. Zudem wird die Mikrostruktur durch CT-Aufnahmen und durch die Betrachtung der Kristallinität untersucht.

5.6.4 Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Bauraumtemperatur

In der Literatur (siehe Kapitel 2.1.4) und den Voruntersuchungen (siehe Abschnitt 5.3.2) zeigt sich, dass die Bauraumtemperatur einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und Dichte hat, sodass im Folgenden die bisher verwendete Bauraumtemperatur in Höhe von 80 °C variiert wird. Die Bauraumtemperatur wird sowohl nach unten als auch nach oben verändert. Für höhere Temperaturen sind bessere Bauteileigenschaften zu erwarten. Für geringere Temperaturen soll geprüft werden, inwieweit eine Veränderung auftritt, da gegebenenfalls der Energiebedarf gesenkt werden kann. Zunächst wird die XYZ-Orientierung und anschließend die ZXY-Orientierung betrachtet.

Bild 5-55 stellt die Ergebnisse der XYZ-Orientierung für Bauraumtemperaturen von 40 °C, 50 °C, 80 °C und 100 °C für zwei Parameterkombinationen aus Laserleistung und Scangeschwindigkeit mit ansonsten konstanten Belichtungsparametern dar (Set-Nr.: 25,27,32-37; Tabelle A 5). Zudem gelten weiterhin die Parameter aus Tabelle 5-10. Für die Zugfestigkeit und Dichte zeigt sich bis auf vereinzelte Ausreißer, die vermutlich aus Prozessschwankungen entstehen, das erwartete Verhalten, dass eine höhere

Bauraumtemperaturen zu höheren Werten führt. Beim E-Modul und der Bruchdehnung zeigt sich grundsätzlich ebenfalls ein ansteigender Verlauf mit der Bauraumtemperatur, jedoch entstehen die höchsten Werte unerklärlicherweise bei 80 °C. Eine hohe Standardabweichung ist dabei jedoch festzuhalten. Das Verhalten von mechanischen Eigenschaften und Dichte bei steigender Bauraumtemperatur zeigt sich unabhängig der verwendeten Parameterkombinationen.

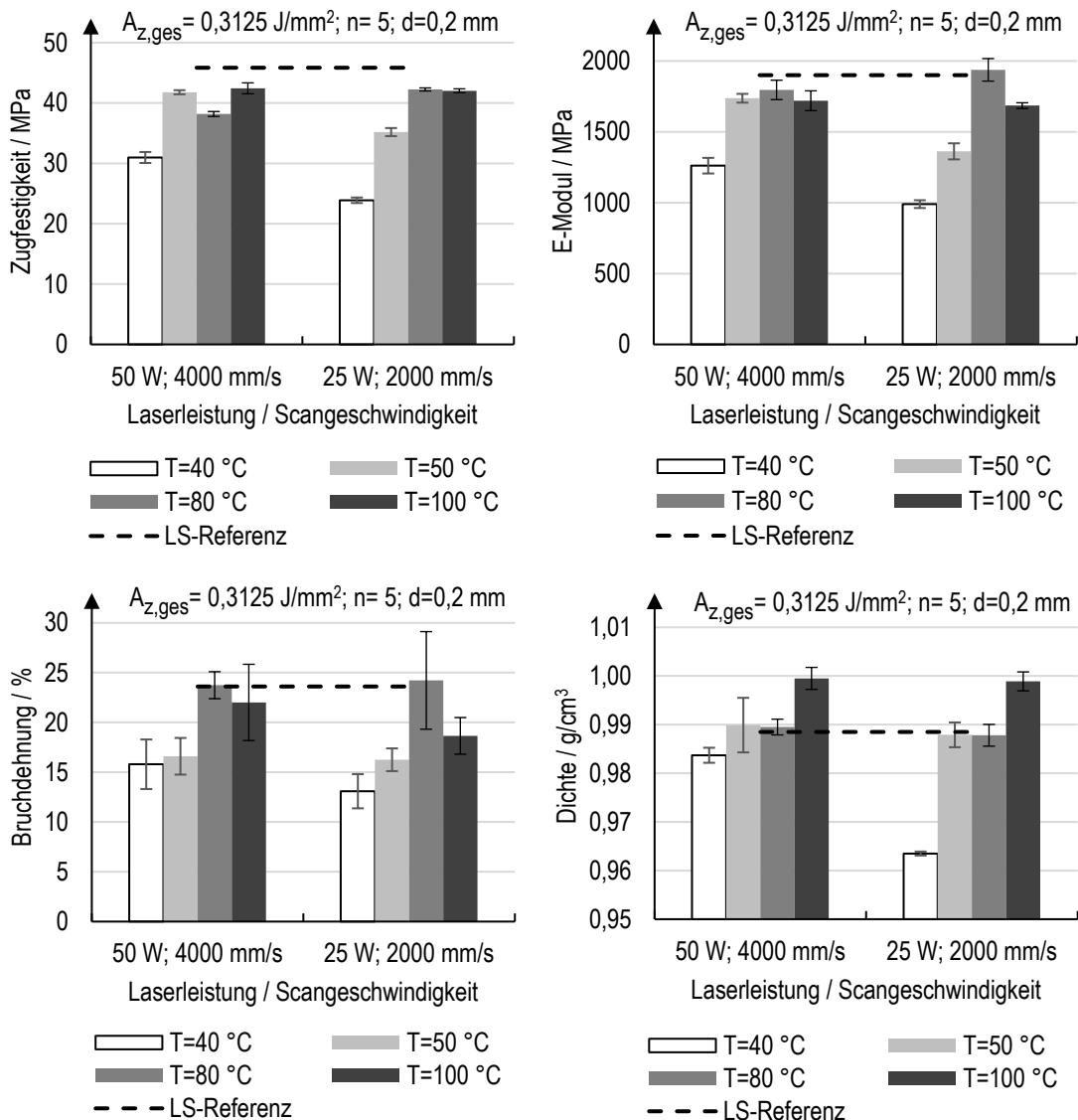


Bild 5-55: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Bauraumtemperatur bei konstanter Gesamtenergiedichte und einer Schichtdicke von 120 μm in XYZ-Orientierung

Bild 5-56 stellt die Ergebnisse der ZXY-Orientierung für Bauraumtemperaturen von 50 °C, 80 °C und 100 °C für vier Parameterkombinationen bei konstanter Schichtzeit, Belichtungsanzahl und konstantem Hatchabstand dar (Set-Nr.: 17,20,28-33,36-41,48,52,60,65; Tabelle A 6). Mit Ausnahme der Bruchdehnung zeigt sich für jede Parameterkombination eine

klare Tendenz zu steigenden Werten mit steigender Bauraumtemperatur. Die Bruchdehnung zeigt eine hohe Streuung der Werte, wobei jedoch eine Bauraumtemperatur von 50 °C die schletesten Werte bis auf einen Ausreißer aufweist. Durch den Anstieg der Werte mit zunehmender Bauraumtemperatur nähern sich die Zugfestigkeit mit einem Maximalwert von 39,1 MPa und der E-Modul mit einem Maximalwert von 1474 MPa der LS-Referenz (43,8 MPa und 1756 MPa) an. Die Dichte kann über die LS-Referenz gesteigert werden. Die maximale Bruchdehnung steigt auf 5,4 %. Die mechanischen Eigenschaften in ZXY-Orientierung kommen also auch bei einer Bauraumtemperatur von 100 °C trotz gesteigerter Werte nicht an die LS-Referenz heran.

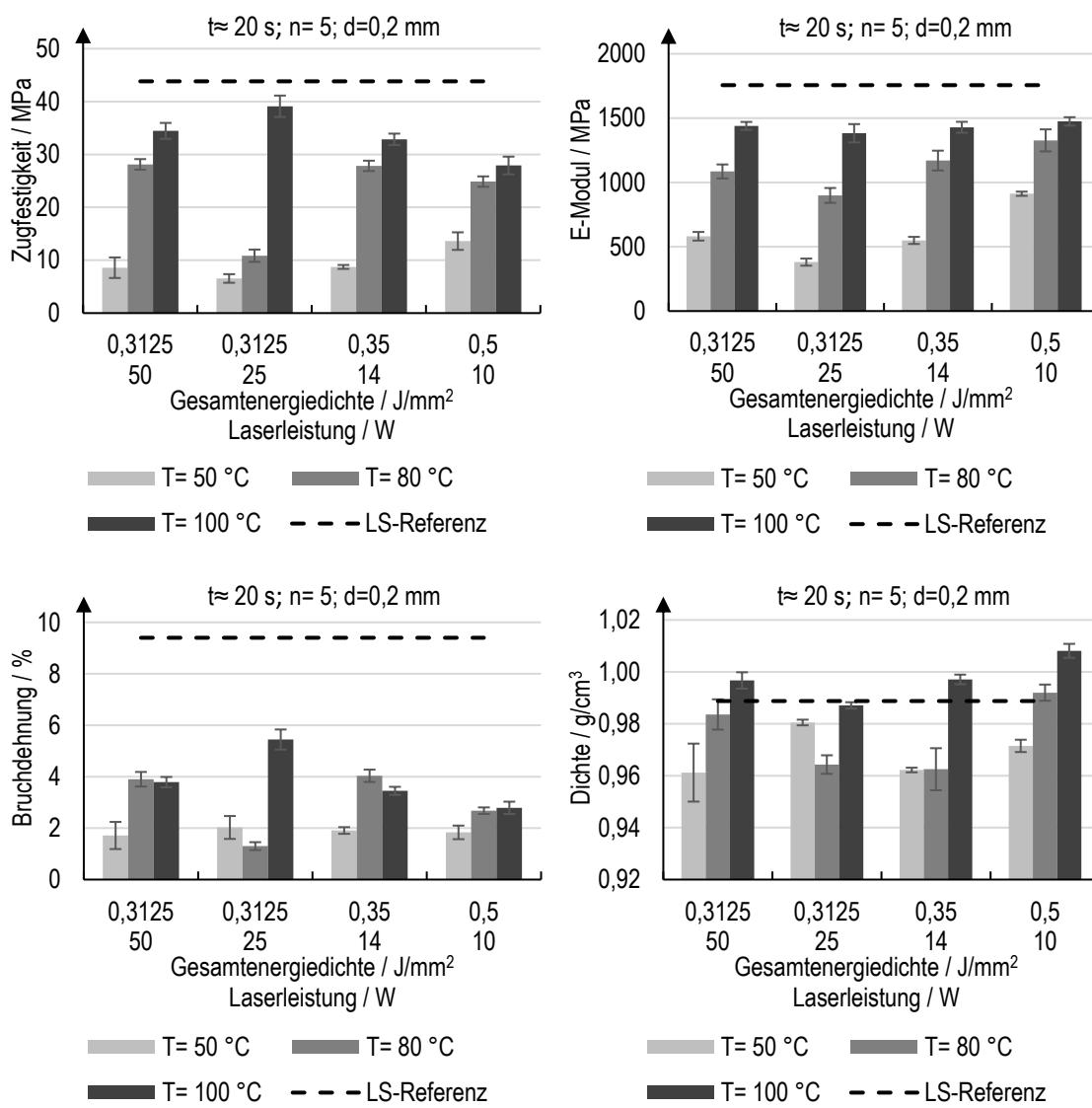


Bild 5-56: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Bauraumtemperatur bei einer Schichtdicke von 120 µm in ZXY-Orientierung

5.6.5 Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Schichtdicke

Im Folgenden wird die Schichtdicke von 120 µm auf 100 µm reduziert, was sich im konventionellen LS positiv auf die mechanischen Eigenschaften und Dichte auswirkt (siehe Kapitel 2.1.4). Für die auf der EOS P396 kleinste Schichtdicke von 60 µm ist der Parametereditor durch den Hersteller nicht freigegeben, sodass diese nicht untersucht werden kann. Die Belichtungsparameter, die Gesamtenergiedichte und die Schichtzeit werden für 100 µm und 120 µm neben den in Tabelle 5-10 aufgeführten Prozessparametern in XYZ-Orientierung konstant gehalten und zwei Parametervariationen betrachtet (Set-Nr.: 23,27,30,31; Tabelle A 5).

Bild 5-57 stellt die Ergebnisse für die XYZ-Orientierung dar. Entgegen der Erwartungen führt die Schichtdicke von 120 µm, mit Ausnahme der Dichte bei einer Laserleistung von 25 W und einer Scangeschwindigkeit von 2000 mm/s, zu zum Teil deutlich höheren mechanischen Eigenschaften und höherer Dichte. Es ist jedoch auch anzumerken, dass in den Untersuchungen zur Schichtdicke von Rüsenberg die Zugfestigkeit nur minimal ansteigt und der E-Modul sogar ebenfalls leicht rückwärtig ist [Rüs15]. Möglicherweise ist die nicht auf die Schichtdicke angepasste Energiedichte zu hoch und resultiert in thermischer Degradation. Anhand der Farbe der Prüfkörper ist dies jedoch nicht zu bestätigen. Weiterhin muss angemerkt werden, dass die Kraft bei der Zugprüfung der XYZ-orientierten Prüfkörper nicht am Schicht-Schicht-Verbund aufgebracht wird, auf den die geringere Schichtdicke bei gleicher Energiedichte tendenziell einen positiven Einfluss nehmen sollte.

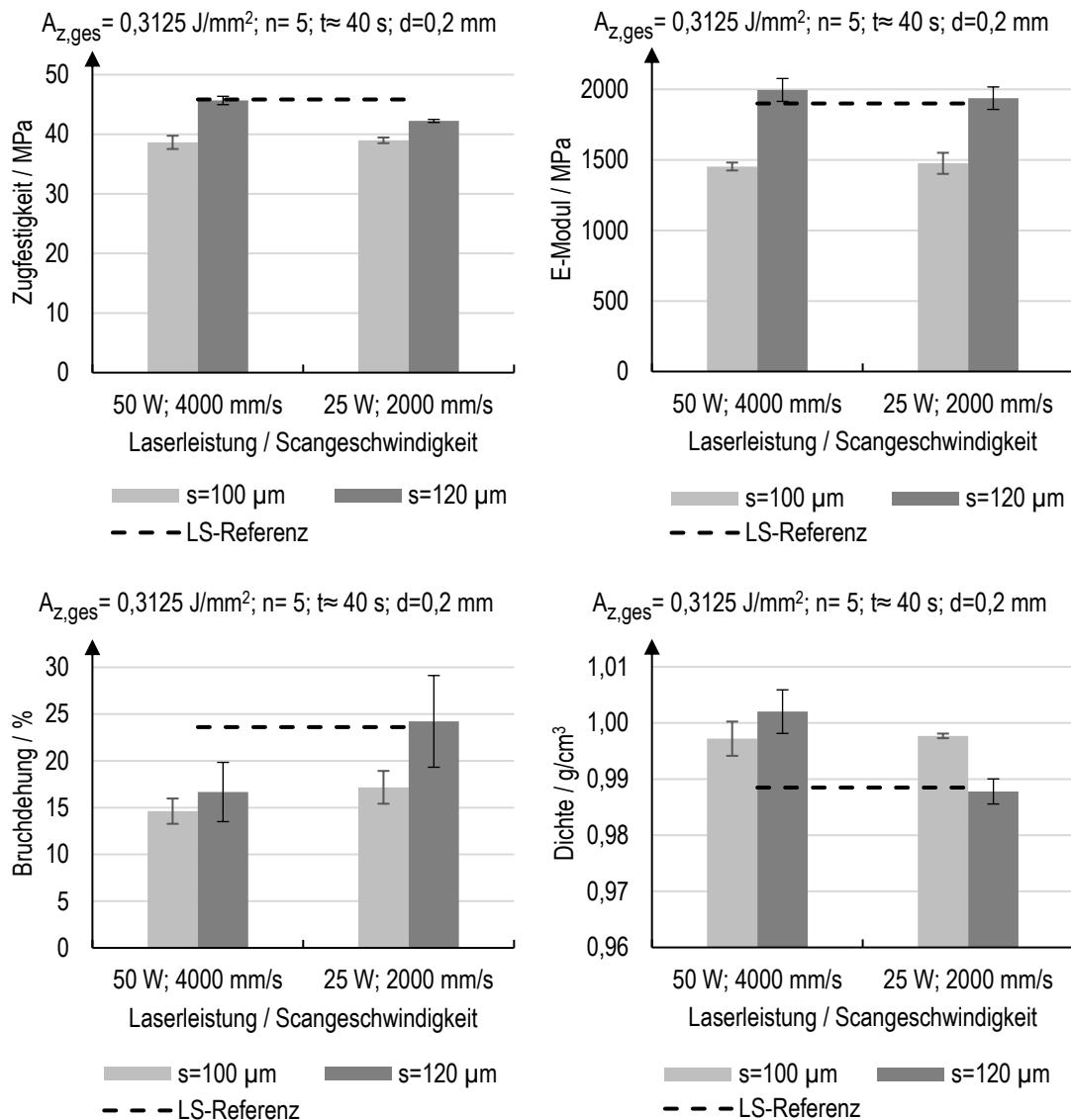


Bild 5-57: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Schichtdicke bei konstanter Gesamtenergiedichte und einer Bauraumtemperatur von 80 °C in XYZ-Orientierung

In Bild 5-58 sind die Ergebnisse zur ZXY-Orientierung aufgeführt. Betrachtet werden hier neben zwei Parameterkombinationen mit gleicher Gesamtenergiedichte, auch zwei Parameterkombinationen mit höherer Gesamtenergiedichte (Set-Nr.: 17,20,22-27,48,52,60,65; Tabelle A 6). Bis auf die Zugfestigkeit und Bruchdehnung bei einer Laserleistung von 25 W und einer Gesamtenergiedichte von 0,3125 J/mm², bei der eine Schichtdicke von 120 µm deutlich schlechtere Werte aufweist, zeigt sich ein sehr einheitliches Bild mit nah beieinander und zumeist im Rahmen der Standardabweichungen liegenden Ergebnissen für die Schichtdicken von 100 µm und 120 µm. Der angesprochene Ausreißer ist in vorherigen Auswertungen bereits in Erscheinung getreten und aufgefallen. Auch mit Zunahme der Gesamtenergiedichte ist kein Unterschied zwischen den Schichtdicken wahrzunehmen.

Eine Steigerung der mechanischen Eigenschaften und Dichte durch Reduktion der Schichtdicke ist also für beide Orientierungen nicht zu verzeichnen.

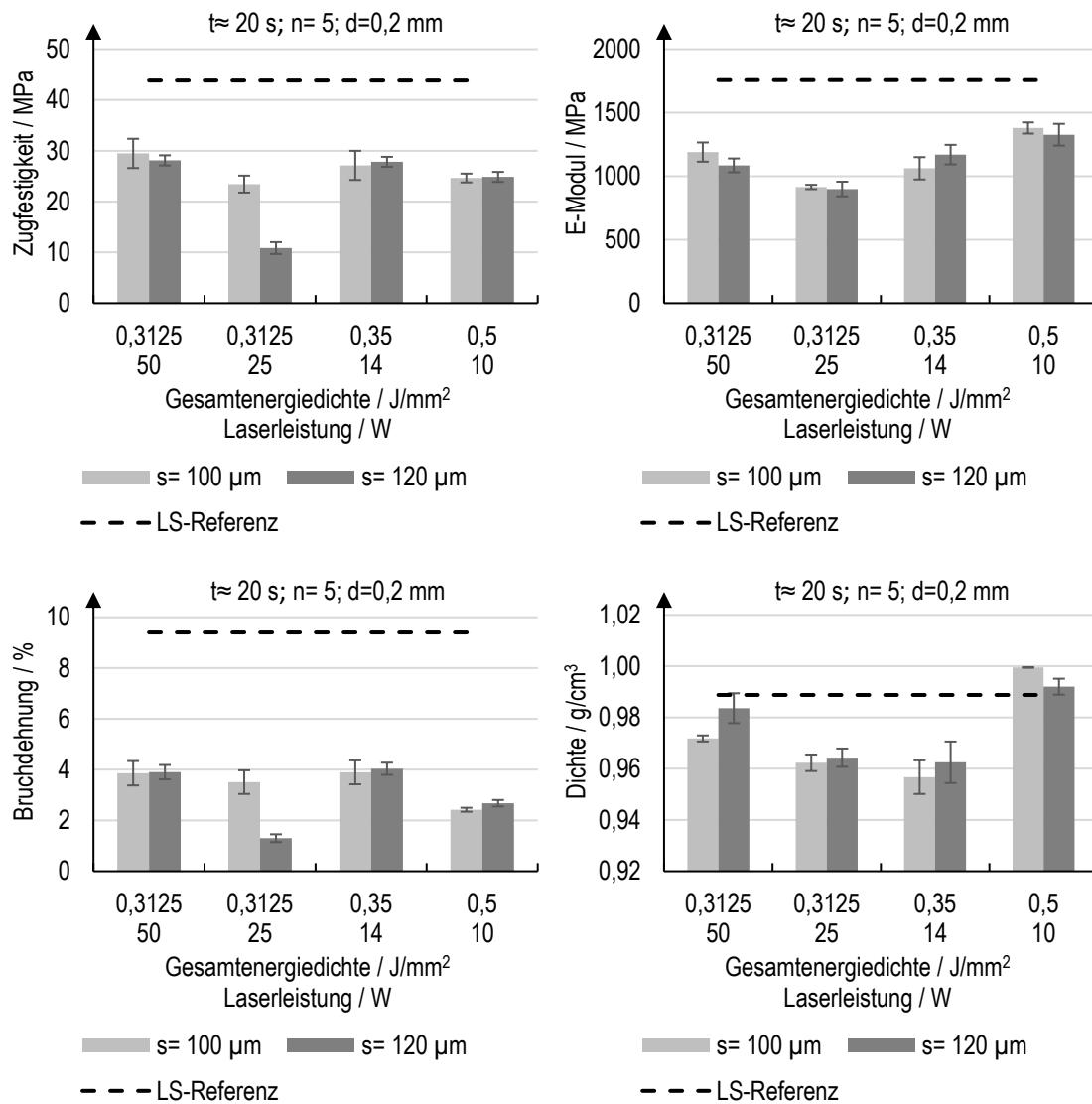


Bild 5-58: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Schichtdicke bei konstanter Gesamtenergiedichte und einer Bauraumtemperatur von 80 °C in ZXY-Orientierung

5.6.6 Mikrostruktur

Die Mikrostruktur nimmt, wie in Kapitel 2.1.4 aufgeführt, einen starken Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften lasergesinterter Bauteile, weshalb zur weiteren Beurteilung und Interpretation der Bauteileigenschaften des NTLS-Prozesses an ausgewählten Prüfkörpern die Kristallinität mittels DSC-Messung untersucht wird und CT-Aufnahmen betrachtet werden.

Die Untersuchungen und Daten zur Kristallinität sind zum Teil im Rahmen der studentischen Arbeit von Friedla [Fri22] entstanden.

5.6.6.1 Kristallinität

Wie in Kapitel 2.1.4 beschrieben steht die Kristallinität in direkter Verbindung zu Bauteileigenschaften wie den mechanischen Eigenschaften oder der Maßhaltigkeit. Mit zunehmendem Kristallinitätsgrad nehmen Festigkeit und Steifigkeit mit einhergehender Abnahme der Duktilität zu. Um den Kristallisierungsgrad zu bestimmen, wird die gemessene Schmelzenthalpie des vorliegenden Materials ins Verhältnis zum Literaturwert für ein theoretisch vollständig kristallines Material gleichen Typs gesetzt [Sch09]. Die Schmelzenthalpie ist ein Maß für die zum Aufschmelzen der kristallinen Bereiche zugeführte Energie und steht somit repräsentativ für die Kristallinität. Sie wird mittels DSC-Messung, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, durch Auswertung des Schmelzpeaks der Wärmestromkurve (Bestimmung der Fläche zwischen Wärmestromkurve und Basislinie) ermittelt. In der Literatur ist kein verlässlicher Wert für die Schmelzenthalpie eines theoretisch vollständig kristallinen PA12 zu finden. In der Datenbank der verwendeten DSC (Netzsch DSC 214) ist eine Schmelzenthalpie von 95 J/g hinterlegt. Müller et al. geben jedoch eine Schmelzenthalpie von 50 cal/g bzw. 209,2 J/g an [MP60]. Aus diesem Grund wird auf die Berechnung des Kristallinitätsgrads verzichtet und lediglich die Schmelzenthalpien verschiedener Parameterkombination im NTLS betrachtet und mit der Referenz aus dem konventionellen LS-Prozess verglichen.

In Bild 5-59 ist exemplarisch jeweils eine Wärmestromkurve für verarbeitetes PA12 im NTLS- und im konventionellen LS-Prozess aufgetragen. Ersichtlich ist, dass die Fläche des Schmelzpeaks der NTLS-Probe kleiner als die der LS-Referenzprobe ist, woraus sich eine geringere Schmelzenthalpie mit ca. 50,5 J/g zu ca. 63,5 J/g und somit eine verringerte Kristallinität ergibt. Diese Erkenntnis zeigt sich für alle untersuchten NTLS-Proben, auf welche im weiteren Verlauf noch eingegangen wird, gleichermaßen und ist zu erwarten, da die Kristallisation zeit- und temperaturabhängig ist [PZB+01; RDK+11]. Die Kristallinität nimmt mit steigender Abkühlrate ab [RDK+11]. Weiterhin ist zu erkennen, dass der Schmelzpeak und die Spitzentemperatur der Wärmestromkurve der NTLS-Probe minimal zu geringeren Temperaturen verschoben ist. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Erkenntnissen von Kigure et al. im NTLS-Prozess [KYN19] und lässt sich damit begründen, dass der

Schmelzpunkt eines teilkristallinen Kunststoffs von der Größe und Dicke der Kristalllamellen abhängig ist [SAW14; Sch22].

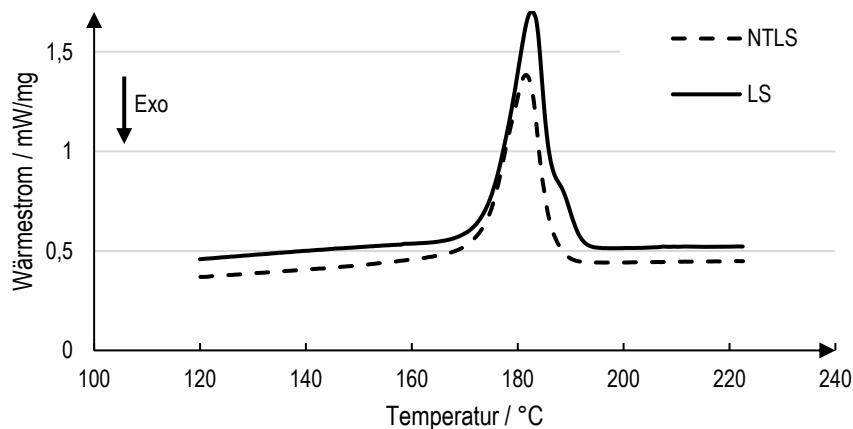


Bild 5-59: Wärmestromkurve mit Aufschmelzpeak für im NTLS- und LS-Prozess gefertigte Prüfkörper

Bild 5-60 stellt die im Rahmen der Kristallinitätsuntersuchungen aufgenommenen Maximalwerte der Schmelzenthalpie für den NTLS-Prozess der Schmelzenthalpie der LS-Referenz sowie einem Literaturwert von Kummert [Kum22] gegenüber. Dem Literaturwert liegt ebenfalls auf einer EOS P396 verarbeitetes PA2200 zugrunde. Die DSC-Proben werden aus Zugstäben der vorherigen Untersuchungen zu den mechanischen Eigenschaften und der Dichte gewonnen, sodass weiterhin zwischen der XYZ- und ZXY-Orientierung unterschieden wird. Jeder Messwert wird aus den Schmelzpeakauswertungen dreier DSC-Messungen gemittelt. Anzumerken sind hier die mit der Messmethode verbundenen signifikanten Unsicherheiten bei der Probennahme sowie der Schmelzpeakauswertung, bei der die Basislinie durch den Bediener manuell einzupflegen ist. Zu erkennen ist in Bild 5-60, wie bereits anhand von Bild 5-59 aufgezeigt und diskutiert, dass die Schmelzenthalpie für den NTLS-Prozess geringer als für den LS-Prozess ausfällt. Im Vergleich zur LS-Referenz, dessen Prüfkörper im selben Baujoblayout wie die Prüfkörper des NTLS-Prozesses mit einer Baujobhöhe von ca. 100 mm gefertigt werden, zeigen sich je nach Orientierung um ca. 12,5 % (XYZ-Orientierung) bzw. ca. 11 % (ZXY-Orientierung) geringere Werte. Im Vergleich zur Referenz aus [Kum22], die ebenfalls deutlich höher als die im Rahmen der Arbeit ermittelte LS-Referenz liegt, zeigt sich eine Reduktion um ca. 26,5 %. Der Unterschied in den Referenzwerten lässt sich auf unterschiedliche Baujobhöhen von 100 mm und 300 mm und damit einhergehende unterschiedliche Bau- sowie Abkühlzeiten und -raten im Prozess begründen, die wie zuvor beschrieben einen Einfluss auf die Kristallinität haben. Auffällig sind weiterhin die unterschiedlichen Schmelzenthalpien je Orientierung sowohl im NTLS- als auch im LS-Prozess. Da für den NTLS-Prozess die je Orientierung höchste Schmelzenthalpie aufgezeigt wird, ist an dieser Stelle zu bemerken, dass die zugrundeliegenden Belichtungsparameter nicht identisch sind. Im LS-Prozess jedoch werden

Standardparameter in beiden Orientierungen verwendet. Nach Schmid ist zu erwarten, dass die Kristallisation vornehmlich innerhalb der Bauteilschichten auftritt. Die Schichtgrenzen stellen eine Blockade für das Kristallwachstum dar, sodass die Kristallisation nicht über die Schichtgrenzen hinaus erfolgt und dadurch die geringe Bruchdehnung im Vergleich zum Spritzguss entsteht [Sch22]. Dass die unterschiedlichen Werte anhand von DSC-Messungen an Proben, die aus unterschiedlich orientierten Zugstäben entnommen werden, sichtbar werden, lässt sich vermutlich auf die Probennahme zurückführen. Bei der Probennahme werden ca. 5 mg kleine Stücke (halbkreisförmige Stücke mit einem Durchmesser von ca. 3,5 mm) aus den Zugstäben, die dabei flach auf der Arbeitsfläche liegen, gestanzt. Bei XYZ-orientierten Zugstäben erfolgt die Probennahme damit senkrecht zu den Schichten und die Probe enthält vergleichsweise nur wenige Bauteilschichten mit großer Fläche und damit einen hohen Anteil an Sphärolithen. Die Probe der ZXY-Orientierung, die parallel zu den Schichten ausgestanzt wird, enthält vergleichsweise viele Schichten mit geringer Fläche und geringerer Anzahl an Sphärolithen.

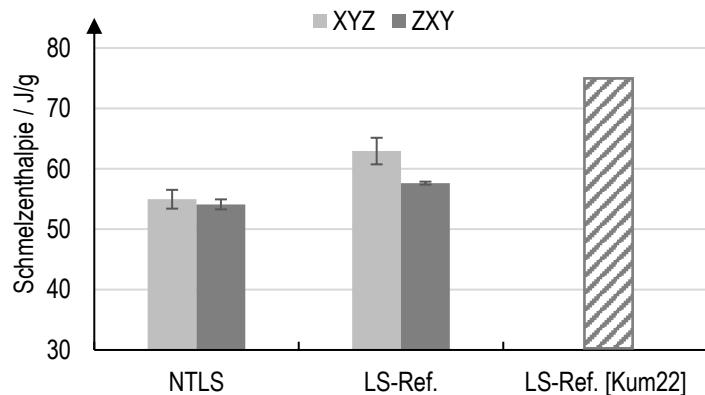


Bild 5-60: Schmelzenthalpien für in verschiedenen Bauraumorientierungen im NTLS ($T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$) und LS ($T=175\text{ }^{\circ}\text{C}$) gefertigte Prüfkörper

Im Weiteren wird der Einfluss der Belichtungsparameter und der Schichtzeit auf die Schmelzenthalpie unter Verwendung der weiteren Prozessparameter aus Tabelle 5-10 untersucht und die Korrelation der Schmelzenthalpie bzw. Kristallinität mit dem E-Modul betrachtet. In Bild 5-61 werden die Schmelzenthalpien und E-Module für die XYZ-Orientierung mit den zugrundeliegenden Belichtungsparametern in der Datentabelle dargestellt. Die Schichtzeit liegt mit 28 s bis 42,5 s relativ nah beieinander. Mit Ausnahme der Probe 4 ist ein leichter Anstieg der Schmelzenthalpie mit steigender Gesamtenergiedichte bei gleichzeitig leichtem Anstieg des E-Moduls zu verzeichnen. Gleichermaßen gilt auch für den Anstieg der Belichtungsanzahl und einhergehendem Anstieg der Gesamtenergiedichte für die Proben 3 und 5. Probe 4, welche die höchste Scangeschwindigkeit innehaltet, zeigt die höchste Schmelzenthalpie und weist mit Probe 5 zusammen den höchsten E-Modul auf. Auffällig und unerwartet ist zudem, dass die Proben 3, 4 und 5 einen höheren E-Modul als die LS-

Referenz bei gleichzeitig verringriger Schmelzenthalpie bzw. Kristallinität aufweisen, was im Widerspruch zur Literatur steht.

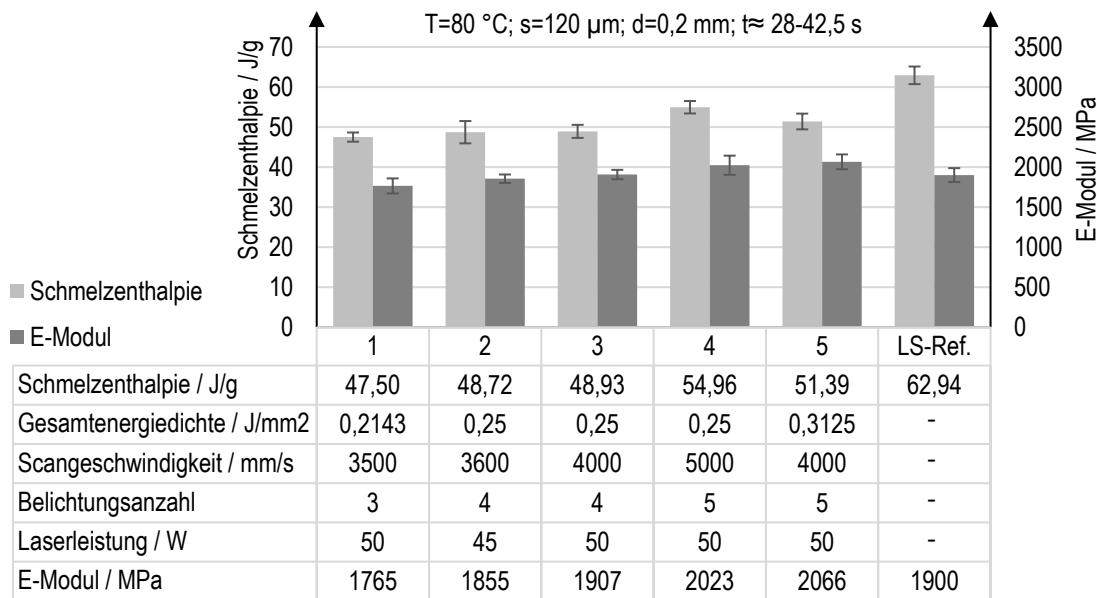


Bild 5-61: Schmelzenthalpie und E-Modul in Abhängigkeit der Belichtungsparameter in XYZ-Orientierung

Bild 5-62 führt die Schmelzenthalpie und den E-Modul unter Variation der Belichtungspараметер und der Schichtzeit für die ZXY-Orientierung auf. Auffallend sind die starken Schwankungen der Schmelzenthalpie und des E-Moduls, die zudem unterschiedlich zusammenhängen. Während bei den Proben 1 bis 3 ein Anstieg des E-Moduls mit steigender Schmelzenthalpie zu verzeichnen ist, zeigen die Proben 4 und 6 bei verhältnismäßig hoher Schmelzenthalpie jedoch einen sehr niedrigen E-Modul, der im Rahmen der Untersuchung und Auswertung nicht begründet werden kann. Im Gegensatz zur XYZ-Orientierung ist bei der ZXY-Orientierung kein Trend für eine steigende Schmelzenthalpie mit steigender Gesamtenergiedichte zu erfassen. Weiterhin sind die höchsten Schmelzenthalpien, wie bei der XYZ-Orientierung, tendenziell bei hohen Scangeschwindigkeiten auszumachen. Eine sehr geringe Scangeschwindigkeit mit gleichzeitig sehr geringer Laserleistung führt zur geringsten, aufgeführten Schmelzenthalpie. Zum Einfluss der Belichtungsanzahl z.B. bei den Proben 4 und 5 bzw. 6 ist keine Aussage zu treffen, da sich hier bei gleichen Parametern die Schichtzeit unterscheidet. Die maximale Schmelzenthalpie tritt bei einer sehr kurzen Schichtzeit von 2,5 s auf, welche jedoch prozesstechnische Probleme bereitet und zur Vergilbung der Prüfkörper führt. Eine klare Korrelation mit der Schichtzeit ist nicht zu erkennen. Die maximale Schmelzenthalpie mit 54,1 J/g liegt nur geringfügig unter der LS-Referenz mit 57,6 J/g.

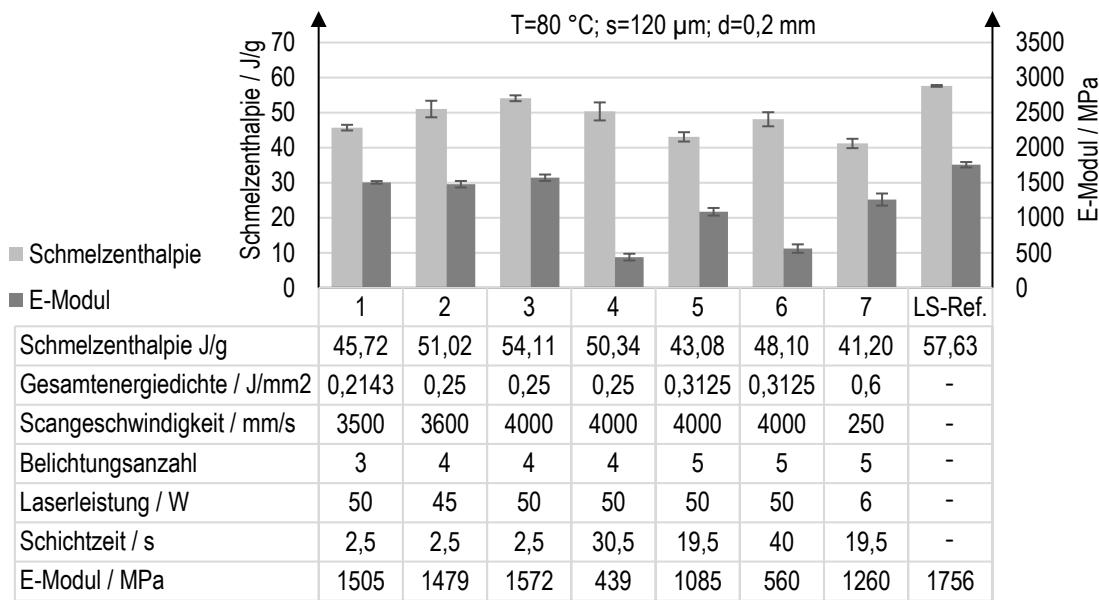


Bild 5-62: Schmelzenthalpie und E-Modul in Abhängigkeit der Belichtungsparameter und Schichtzeit in ZXY-Orientierung

Unter Verwendung der Schmelzenthalpie eines vollständig kristallinen PA12 nach Müller et al. mit 209,2 J/g [MP60], die auch Kigure et al. zur Berechnung des Kristallinitätsgrads für den NTLS-Prozess verwendet haben, lässt sich der maximale Kristallinitätsgrad in XYZ-Orientierung zu 26,3 % (LS-Referenz: 30,1 %) und in ZXY-Orientierung zu 25,9 % (LS-Referenz: 27,5 %) berechnen. Kigure et al. bestimmen einen Kristallinitätsgrad von 31 % für den NTLS-Prozess und 35 % für den LS-Prozess. Die Differenzen zwischen NTLS und LS liegen jeweils auf dem gleichen Niveau. Die Unterschiede in den Absolutwerten zu Kigure et al. lassen sich vermutlich auf die Messung bzw. das Messgerät zurückführen. Weiterhin sind die verschiedenen LS-Anlagensysteme, vor allem in Form der Temperaturlösung und den Abkühlbedingungen nicht miteinander vergleichbar.

Insgesamt ist also bei Betrachtung der Schmelzenthalpie bzw. der Kristallinität, wie anhand der Literatur erwartet, festzuhalten, dass der NTLS-Prozess eine geringere Kristallinität aufweist. Entgegen der Erwartungen zeigt sich jedoch in der XYZ-Orientierung trotz verringelter Kristallinität eine höhere Steifigkeit als im LS-Prozess.

5.6.6.2 CT-Aufnahmen

Weiterhin werden CT-Aufnahmen betrachtet, um Poren oder nicht aufgeschmolzene Partikel aufzudecken und zu visualisieren, die, wie in Kapitel 2.1.4 aufgeführt und in Abschnitt 5.6.3.5 diskutiert, die mechanischen Eigenschaften beeinflussen und daher ursächlich für die insbesondere in ZXY-Orientierung herabgesetzten mechanischen Eigenschaften sein können. Als CT-Proben werden mit einer Standardschichtdicke von 120 µm gefertigte Zugstäbe verwendet. Die im Folgenden aufgeführten Bilder werden jeweils im mittleren

Bereich aller Raumrichtungen des im CT vollständig aufgenommenen Zugstabs generiert. Anzumerken ist, dass deutliche, lokale Unterschiede je nach Lage der im CT generierten Schicht über den gesamten Zugstab zu verzeichnen sind. Die aufgeführten Bilder des jeweiligen Parametersets werden nach Sichtung aller Schichtbilder möglichst repräsentativ ausgewählt. Diese Vorgehensweise birgt jedoch Unsicherheiten, da die Porosität mit einem Einzelbild nicht zuverlässig auszuwerten ist.

Zunächst werden CT-Aufnahmen für in XYZ-Orientierung gefertigte Zugstäbe für ein Parameterset mit einer Gesamtenergiedichte von $0,3125 \text{ J/mm}^2$ ($T=80^\circ\text{C}$; $P=50 \text{ W}$; $v=4000 \text{ mm/s}$; $d=0,2 \text{ mm}$; $n=5$) mit zwei verschiedenen Schichtzeiten von 21,5 s (Probe 2) und 42,5 s (Probe 1) sowie eine LS-Referenz (Probe 3) in Bild 5-63 zeilenweise betrachtet.

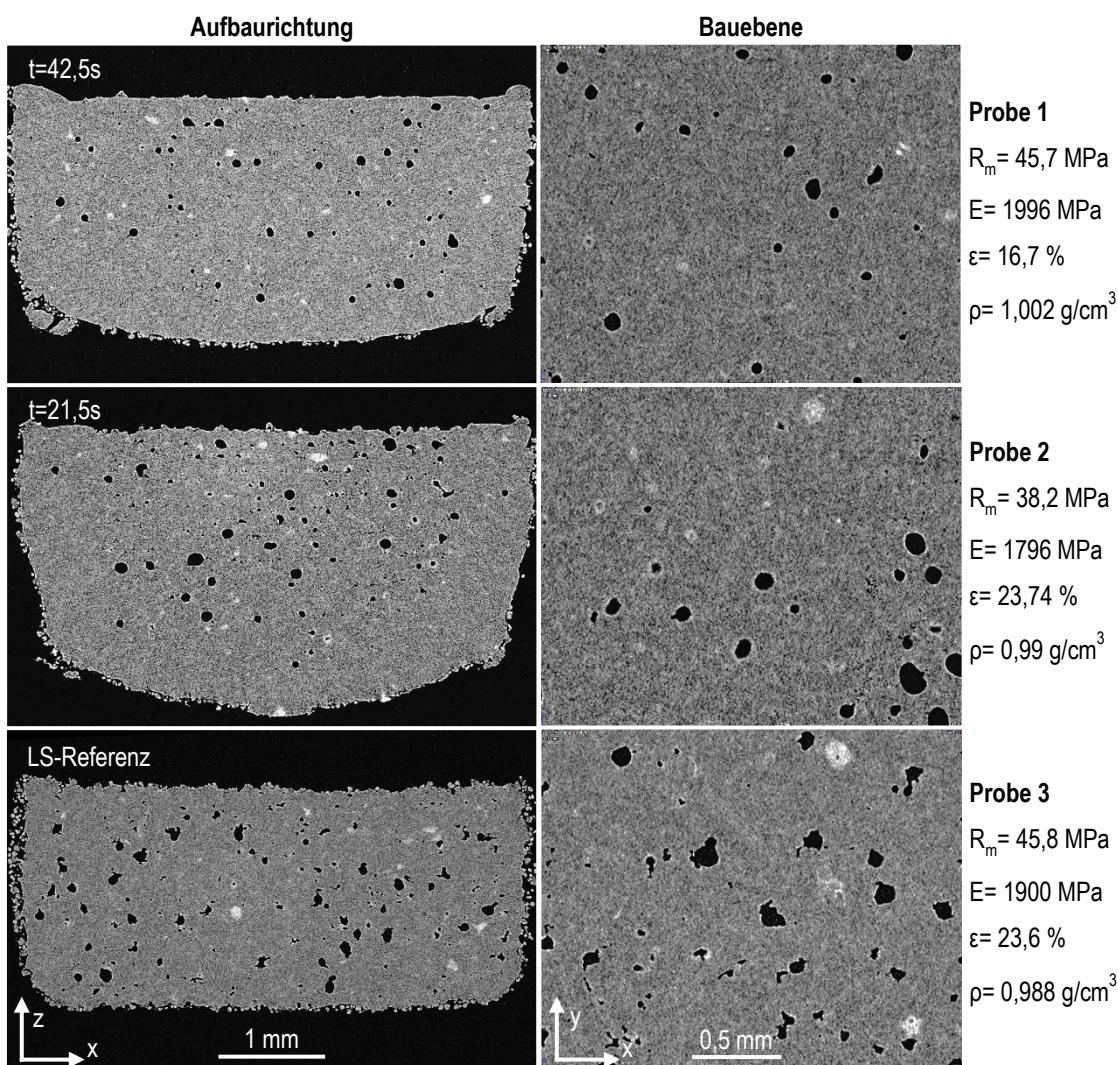


Bild 5-63: CT-Aufnahmen in Aufbaurichtung (links) und der Bauteilschicht (rechts) für verschiedene Schichtzeiten bei konstanten Belichtungsparametern ($P=50 \text{ W}$; $v=4000 \text{ mm/s}$; $d=0,2 \text{ mm}$; $n=5$; $A_{z,\text{ges}} = 0,3125 \text{ J/mm}^2$) und einer Bauraumtemperatur von 80°C in XYZ-Orientierung

Dieses Parameterset ist von Interesse, da in Abhängigkeit der Schichtzeit, wie in der rechten Spalte in Bild 5-63 aufgeführt, Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften und der Dichte entstehen. Bei geringerer Schichtzeit tritt eine geringere Festigkeit, Steifigkeit und Dichte bei höherer Bruchdehnung auf. Die linke Spalte stellt jeweils die Querschnittsfläche eines Zugstabs in Aufbaurichtung und die mittlere Spalte eine Fläche des Zugstabs in der Bauebene dar. Im Querschnitt in Aufbaurichtung sind Reste der Supportstrukturen auf der Unterseite und die Verrundung der Unterseite durch den gesteigerten Laserenergieeintrag zu erkennen. Im Vergleich der beiden NTLS-Proben lassen sich in der Porenanzahl keine nennenswerten Unterschiede ausmachen. Interessanter ist die Porenverteilung. Bei einer Schichtzeit von 42,5 s (Probe 1) sind die Poren über den Querschnitt verteilt. Bei einer Schichtzeit von 21,5 s (Probe 2) konzentrieren sich die Poren tendenziell im Zentrum. Auffällig ist zudem, dass die Poren bei Probe 2 tendenziell größer ausfallen, was durch eine hier nicht dargestellte Vermessung der Poren bestätigt werden kann. Der Unterschied in der Porengröße ist ebenfalls in der Bauebene ersichtlich. Durch die größeren Poren bei ähnlicher Anzahl ergibt sich eine tendenziell höhere Porosität, welche durch die gemessenen Dichtewerte bestätigt werden kann. Dass die Bruchdehnung mit zunehmender Porosität abnimmt, wie Dupin et al. beschreiben [DLB+12], kann in diesem Fall nicht bestätigt werden. Im Vergleich der NTLS- mit den LS-Proben zeigen sich im NTLS deutlich rundere, teils sphärische Poren. Sphärische Poren bilden sich durch bei Zersetzungsvorgängen entstehendes Gas (siehe Kapitel 2.1.4), sodass hier von einem grenzwertig hohen Energieeintrag auszugehen ist, der jedoch nahezu keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften, verglichen mit der LS-Referenz, nimmt. Weiterhin sind helle Punkte in allen drei Proben zu erkennen, die aufgrund der Größe und der höheren Dichte auf unaufgeschmolzene Partikeln zurückzuführen sind. Das Ausgangsmaterial weist eine hohe Kristallinität und damit hohe Dichte aufgrund der sehr langsamen Abkühlung bei der Herstellung durch Fällung auf [Sch22].

Bild 5-64 stellt die CT-Aufnahmen der in ZXY-Orientierung gefertigten Zugstäbe für das gleiche Parameterset wie in XYZ-Orientierung sowie eine LS-Referenz zeilenweise dar. Entgegen Bild 5-63 ist die Bauebene aufgrund der Orientierung in der linken und die Aufbaurichtung in der mittleren Spalte dargestellt. Die aufgeführten NTLS-Proben unterscheiden sich von Probe 1 zu 2 in der Schichtzeit mit 38 s zu 19,5 s. Probe 3 liegt eine höhere Bauraumtemperatur mit 100 °C bei einer mit 20,5 s vergleichbaren Schichtzeit zu Probe 2 zugrunde. Auffallend ist die deutlich erhöhte Porosität bei Probe 1 und 2. In Aufbaurichtung ist zu erkennen, dass sich längliche Poren zwischen den Bauteilschichten ausbilden. Auch die Kontur, zu sehen in der linken Spalte, ist deutlich offenporiger. Die kürzere Schichtzeit bei Probe 2 resultiert dabei in geringerer Porosität, die durch die höhere gemessene Dichte und die höheren mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu Probe 1 bestätigt werden kann. Die gemessene Dichte von Probe 2 ist nur leicht geringer als die Dichte der LS-Referenz. Im Vergleich der in den CT-Bildern ersichtlichen Porosität ist jedoch ein

deutlicher Unterschied zu verzeichnen, was auf die Aussagekraft der CT-Bilder sowie die Messunsicherheit der Dichtemessung zurückgeführt werden kann. Die Dichtedifferenz müsste zudem aufgrund der nachgewiesenen geringeren Kristallinität im NTLS, welche in

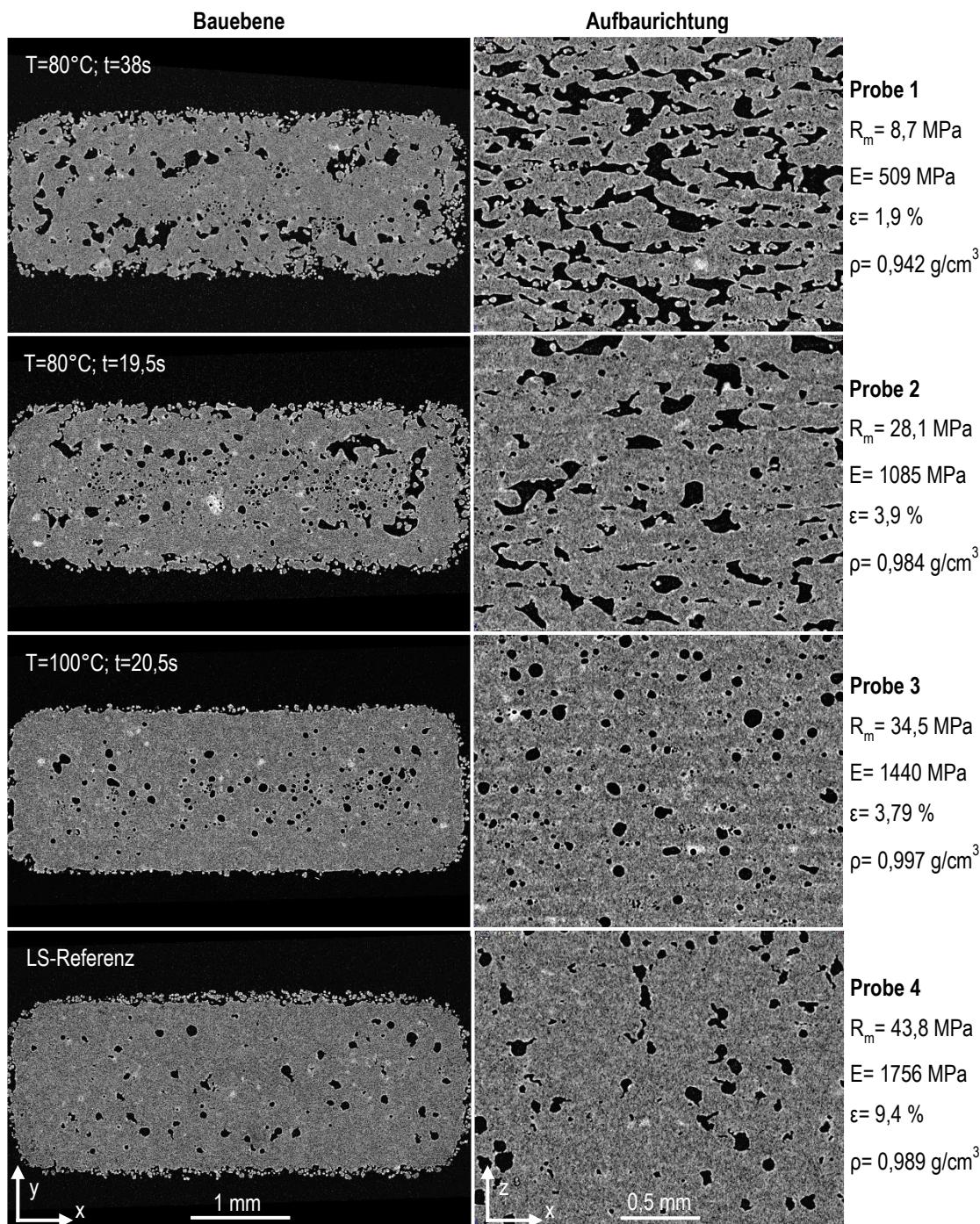


Bild 5-64: CT-Aufnahmen in der Bauteilschicht (links) und Aufbaurichtung (rechts) für verschiedene Schichtzeiten und Bauraumtemperaturen bei konstanten Belichtungsparametern ($P=50 \text{ W}$; $v= 4000 \text{ mm/s}$; $d=0,2 \text{ mm}$; $n=5$; $A_{z,\text{ges}}=0,3125 \text{ J/mm}^2$) in ZXY-Orientierung

geringerer Dichte resultiert, stärker ausgeprägt sein. Durch die visuell nachgewiesene erhöhte Porosität können dennoch die deutlich geringeren mechanischen Eigenschaften der NTLS-Proben, die bei einer Bauraumtemperatur von 80 °C in ZXY-Orientierung gefertigt werden, im Vergleich zur LS-Referenz begründet werden. Das Material bzw. die Schmelze fließt mit dem vorhandenen Energieeintrag nicht ausreichend zusammen, was durch nicht vollständige Aufschmelzung oder zu schnelle Erstarrung zu erklären ist. Der Energieeintrag als Kombination aus Laserbelichtung und Bauraumtemperatur ist demnach als zu gering einzuschätzen. Dass eine erhöhte Porosität zu geringeren mechanischen Eigenschaften in ZXY-Orientierung, insbesondere einer geringeren Bruchdehnung, führt, ist, wie in Kapitel 2.1.4 beschrieben, bekannt. Bei einer Bauraumtemperatur von 100 °C zeigt sich bei gleicher Schichtzeit eine verringerte Porosität. Die Porengröße nimmt ab und weist in etwa die Porengröße der LS-Referenz bei im Vergleich leicht erhöhter Porenanzahl auf. Die Porenform ändert sich von den bei 80 °C länglichen Poren zu sphärischen Poren. Die Poren der LS-Referenz sind kartoffelförmig. Wie zuvor beschrieben, sind sphärische Poren auf Zersetzungsvorgänge zurückzuführen. Die geringere Porosität bei 100 °C führt zu höheren mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu 80 °C, liegt jedoch trotzdem deutlich unter den mechanischen Eigenschaften der LS-Referenz. Die gemessene Dichte bei 100 °C ist geringfügig höher als die der LS-Referenz. Weiterhin ist bei Probe 3 der Schichtaufbau deutlich durch helle Streifen, die eine höhere Dichte aufweisen, in Aufbaurichtung zu erkennen. Diese Streifen weisen eine Dicke von 30 µm bis 50 µm auf. Mögliche Ursache können sich ausbildende kristalline Bereiche sein. Eine weitere Ursache könnte die Zersetzung der Oberseite der aufgetragenen 120 µm dicken Schicht sein. Die nach dem Verdampfen der flüchtigen Anteile und dem (teilweisen) Abbau des Polymers verbleibenden Materialanteile wie das Titandioxid, welches dem PA2200 zur Aufhellung und besseren Strahlungsabsorption beigemischt wird [Sch22], führen zu einer höheren Dichte des verbleibenden Materials. Weiterhin ist bei Probe 2 und 3, in Teilen auch bei Probe 1, festzustellen, dass die Poren primär im Zentrum des Zugstabquerschnitts (Bauebene) auftreten. Der Randbereich weist deutlich weniger Poren auf. Vor allem bei Probe 3, bei der auf Zersetzung zurücksließende sphärische Poren im Zentrum vorhanden sind, liegt die Vermutung nahe, dass das Zentrum des Querschnitts durch einen Energiestau überhitzt ist, während die Randbereiche genügend Wärme an das umliegende Pulverbett abgeben können, um nicht von Zersetzung betroffen zu sein.

Die deutlich geringeren mechanischen Eigenschaften der NTLS-Proben in ZXY-Orientierung können also in Teilen mit der erhöhten Porosität, welche eine Abhängigkeit von der Schichtzeit und der Baumraumtemperatur zeigt, und dem daraus reduzierten Schichtverbund begründet werden. Jedoch sollten für mehr Aussagekraft weitere Proben untersucht und eine softwaregesteuerte Auswertung der CT-Bilder wie z.B. zum Porositätsgrad im Volumen durchgeführt werden. Auch die starken lokalen Unterschiede, teilweise von CT-Schicht zu CT-Schicht, in der Porenanzahl und -verteilung würden dadurch berücksichtigt.

5.7 Post-Processing im NTLS-Prozess

Die Nachbearbeitung des Baujobs bzw. der Bauteile im NTLS-Prozess unterscheidet sich von dem des konventionellen LS-Prozesses, weshalb im Folgenden kurz darauf eingegangen wird. Der wesentliche Unterschied besteht in der Entfernung der Supportstrukturen, aber auch der Schritt der Entpulverung bzw. des Auspackens weist Unterschiede auf.

5.7.1 Entpulverung und Auspacken

Im Zuge der Entpulverung und des Auspackens, welche in Bild 5-65 zu sehen sind, fällt auf, dass das um die Bauteile umliegende, nicht aufgeschmolzene Pulver nach dem NTLS-Prozess deutlich fließfähiger als nach dem konventionellen LS-Prozess ist. Durch bloßes Hochfahren der Plattform rieselt das Pulver seitlich herunter und auch zwischen den ZXY-Zugstäben fließt das Pulver deutlich sichtbar in Bild 5-65 (rechts) heraus. Im konventionellen LS-Prozess ist das umliegende Pulver deutlich verfestigt, woraus sich auch die bauteilstützende Funktion ergibt. Die Verfestigung des Pulvers entsteht aufgrund der hohen Bauraumtemperatur nahe des Schmelzpunkts und der Verdichtung durch den Beschichter. Das verfestigte Pulver haftet zudem stark an den Bauteilen. Am Bauteil anhaftendes Pulver ist nach dem NTLS-Prozess nicht zu verzeichnen, sodass im Nachgang auf das im Post-Processing des konventionellen LS-Prozesses verwendete Glaskugelstrahlen verzichtet werden kann und Druckluft zur Entfernung der restlichen Partikeln ausreichend ist. Folglich ist der Entpulverungsvorgang nach dem NTLS-Prozess mit geringerem Aufwand verbunden.

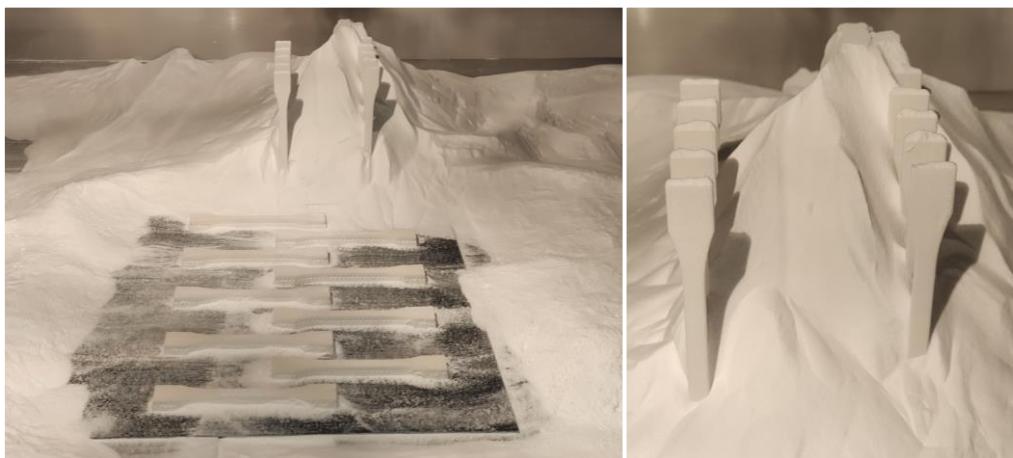


Bild 5-65: Entpulverung eines NTLS-Baujobs

5.7.2 Entfernung von Supportstrukturen

Nach der Entpulverung des Baujobs erfolgt die Entfernung der Bauteile und Supportstrukturen von der Bauplattform unter Verwendung eines handelsüblichen Spachtels, wie in Bild 5-66 dargestellt. Zunächst wird der Zugstab von der Supportstruktur getrennt, ehe die Supportstruktur von der Plattform entfernt wird. Die Trennbarkeit zwischen Bauteil und

Support ist durch die Zahnstrukturen einfach und mit wenig Aufwand umzusetzen. Anschließend können die restlichen Zahnstrukturen am Bauteil bzw. Zugstab mit feinem Schleifpapier entfernt werden. Zur Aufbereitung wird die Bauplattform ebenfalls mit Schleifpapier bearbeitet, um Rückstände der Supportstrukturen zu entfernen, sodass die Ebenheit der Plattform für einen folgenden Baujob wiederhergestellt ist.

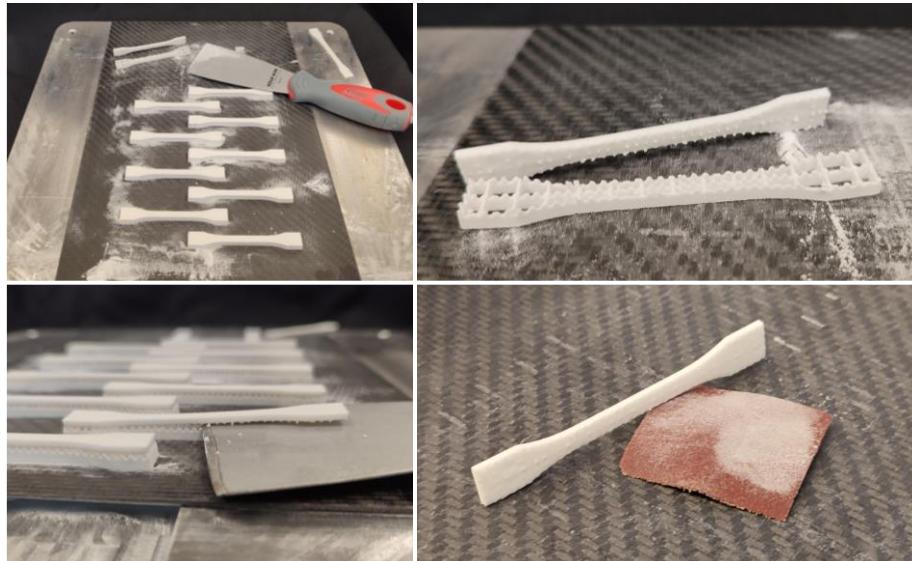


Bild 5-66: Ablösung von der Bauplattform und Entfernung der Supportstrukturen im NTLS

5.8 Überprüfung der Materialalterung

Das im Rahmen der Untersuchungen verwendete PA12-Pulver, welches nach dem Sieben ohne Auffrischung mit Neupulver wiederverwendet wird, wird mittels MVR-Messung nach 2, 8 und 16 Baujobs auf Alterung untersucht. Im Ausgangszustand weist das Material einen MVR-Wert von $37,4 \text{ cm}^3/10\text{min}$ auf. Die drei Messpunkte zeigen Werte zwischen $36 \text{ cm}^3/10\text{min}$ und $38 \text{ cm}^3/10\text{min}$ (Bild 5-67), was im Rahmen der Messunsicherheit der MVR-Messung liegt. Demnach kann die Aussage von Josupeit, nach der bei $83,5^\circ\text{C}$ keine relevante thermische Alterung auftritt (Abschnitt 5.3.2), bestätigt werden [Jos19; JS17].

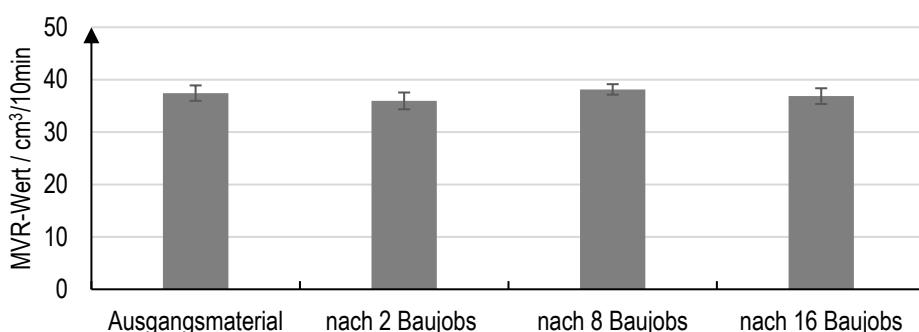


Bild 5-67: Überprüfung der Materialalterung von PA12 nach vollständiger Wiederverwendung des Materials ohne Auffrischung mit Neupulver

5.9 Zusammenfassung zum NTLS von PA12

Die Untersuchungsergebnisse zum NTLS-Prozess mit PA12 (PA2200) unter Verwendung einer unmodifizierten EOS P396, einem konventionellen LS-Anlagensystem, werden im Folgenden zusammengetragen. Zur Verarbeitung von PA12 bei niedriger Bauraumtemperatur außerhalb des LS-typischen Prozessfensters zwischen Schmelze- und Kristallisationspeak wird die in der Literatur beschriebene Methodik verwendet, bei der Bauteile zur Vermeidung von Verzug und Curling infolge der geringen Temperaturen mittels soliden Supportstrukturen an eine Bauplattform angebunden werden.

Voruntersuchungen weisen die Eignung von CFK- und GFK-Organoblechen mit PA6- oder PA12-Matrixmaterial als Bauplattform zur Anbindung der Bauteile im Prozess nach. Damit eine notwendigerweise homogene, möglichst dünne und ebene erste Pulverschicht auf der Bauplattform appliziert werden kann, wird zudem eine Justierplattform, auf die das Organoblech geklebt wird, verwendet. Bei der Untersuchung der Bauraumtemperatur zeigt sich erwartungsgemäß eine Verringerung der gemessenen Dichte mit abnehmender Temperatur bei ansonsten konstanten Prozessparametern. Aufgrund der in den Voruntersuchungen nachgewiesenen Prozessfähigkeit und aufgrund der nach Josupeit ab dieser Temperatur nicht mehr vorhandenen Alterung, wird für die weiteren Untersuchungen zunächst eine Bauraumtemperatur von 80 °C verwendet.

In einer ersten Parameterstudie werden die mechanischen Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Belichtungsparameter anhand von XYZ-orientierten Zugprüfkörpern, die direkt auf der Bauplattform fixiert werden, untersucht. Die Anbindung der Bauteile erfolgt über mehrfache Belichtung der untersten Schichten. Die weiteren Bauteilschichten werden wie üblich einmal belichtet. In den Untersuchungen kann eine obere Grenze der Flächenenergiedichte von 0,119 J/mm² anhand der Rauchentwicklung, die zum einen ein Indikator für thermische Schädigung des Materials ist und zum anderen den Belichtungsprozess entscheidend stören kann, ausgemacht werden. Die Studie zeigt, dass die Zugfestigkeit und der E-Modul mit zunehmender Flächenenergiedichte steigen und die Bruchdehnung ab einem Peak bei 0,08 J/mm² mit zunehmender Flächenenergiedichte sinkt. Die Versprödung mit zunehmender Flächenenergiedichte ist durch REM-Aufnahmen, die in der Bruchfläche auf Zersetzung hindeutende sphärische Poren erfassen, zu bestätigen und zu begründen. Die Dichte zeigt keinen eindeutigen Trend. Im Vergleich zum konventionellen LS-Prozess weisen die mechanischen Eigenschaften und die Dichte zum Teil deutlich geringere Werte auf. Lediglich der E-Modul nähert sich den Werten der LS-Referenz an. Die REM-Bilder der Bruchflächen decken weiterhin auf, dass die ursprüngliche zur besseren Anbindung an die Bauplattform verwendete Mehrfachbelichtung ein homogeneres und zusammenhängendes Gefüge bzw. einen höheren Koaleszenzgrad aufweist. Die Einfachbelichtung erzeugt hingegen keine ausreichende Koaleszenz. Eine Erhöhung der Flächenenergiedichte bei Einzelbelichtung ist wegen der thermischen Zersetzung, die anhand der sphärischen Poren in

den REM-Bildern aufgedeckt wird, keine Option, sodass der Belichtungsprozess im NTLS hin zu einer Mehrfachbelichtung der Bauteilschichten angepasst wird.

Zur Anbindung der Bauteile an der Bauplattform sowie zur Fertigung verschiedener Orientierungen werden Supportstrukturen im NTLS benötigt. Im Zuge der Untersuchungen der Supportstrukturen können prozessfähige Supportstrukturen, die ursprünglich im Laserschmelzen von Metallen Verwendung finden, identifiziert und die Vermeidung bzw. Minimierung von Verzug und Curling nachgewiesen werden. Während bei vollflächiger Anbindung der Prüfkörper in den Voruntersuchungen ein PA6-Organoblech verwendet wird, wird bei den deutlich kleineren und filigraneren Anbindungsflächen der Supportstrukturen ein PA12-Organoblech, welches bei vollflächiger Anbindung einen zu starken Verbund aufweisen würde, verwendet. Die Ablösung der Supportstrukturen von der Bauplattform und den Prüfkörpern ist mit einfachen Hilfsmitteln wie einem handelsüblichen Spachtel einfach und unkompliziert umzusetzen. Die Supportierung verschiedener Orientierungen kann an Zugstäben nachgewiesen werden. Geneigte Zugstäbe sollten unterhalb eines Grenzneigungswinkels von 35° zur Bauplattform vollflächig supportiert werden. Die untersuchten Block- und Kegelsupportstrukturen sind im NTLS prozesssicher herstellbar. Blocksupport führt im Vergleich zu Kegelsupport zu weniger Verzug, weshalb der NTLS-Prozess mit Blocksupport angewendet wird. Die ersten Schichten der Supportstrukturen (bis zu vier) werden für eine prozesssichere Anbindung an die Bauplattform sechsfach belichtet. Die restlichen Schichten werden für einen ausreichenden Verbund, der den Prozesskräften standhält, dreifach belichtet.

Für eine anschließende, umfangreiche Untersuchung und Optimierung der Prozess- bzw. Belichtungsparameter unter Verwendung der Mehrfachbelichtung hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften und Dichte für verschiedene Orientierungen wird die Gesamtenergiedichte, welche sich aus dem Produkt aus Flächenenergiedichte und Belichtungsanzahl ergibt, eingeführt. Zunächst kann die Untersuchung von Einschichtprüfköpern dichtere Bauteilschichten mit höherer Belichtungsanzahl der Mehrfachbelichtung nachweisen. Ab einer Gesamtenergiedichte von $0,2 \text{ J/mm}^2$ zeigen alle Einschichtprüfköper in der mikroskopischen Untersuchung ein zusammenhängendes, verschmolzenes Gefüge. Der erste Belichtungszyklus der Mehrfachbelichtung ist maßgeblich für die Rauchentwicklung, weshalb die zugrundeliegende Flächenenergiedichte entsprechend nicht zu hoch zu wählen ist ($< 0,083 \text{ J/mm}^2$). Die Unterschiede in der maximalen Flächenenergiedichte im Vergleich zur Voruntersuchung ($< 0,119 \text{ J/mm}^2$) entstehen vermutlich dadurch, dass die Einschichtprüfköper hier direkt ins lose Pulverbett mit anschließender Beendigung des Prozesses im Gegensatz zur Fertigung auf einer Bauplattform erzeugt werden. Die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften und Dichte deckt eine im Vergleich zum konventionellen LS-Prozess stärker ausgeprägte Anisotropie zwischen der XYZ- und der ZXY-Orientierung auf. Je nach Parameterset liegen die mechanischen Eigenschaften und Dichte der XYZ-Orientierung im Bereich der Referenzwerte des konventionellen LS-Prozesses. Es zeigt sich ein

duktiles Bruchverhalten mit leichter Einschnürung im Bruchbereich. Die ZXY-Orientierung weist hingegen deutlich schlechtere Werte als die LS-Referenz auf und fällt insbesondere bei der Bruchdehnung stark ab. Das spröde Bruchverhalten ist auch bei Betrachtung der Bruchbilder und Bruchflächen ersichtlich und kann durch eine erhöhte Porosität, erkennbar in CT-Aufnahmen, begründet werden. Weiterhin können Zersetzungerscheinungen in Form von sphärischen Poren in Teilen der untersuchten Proben bei erhöhtem Energieeintrag durch die CT-Aufnahmen nachgewiesen werden.

Aus den Untersuchungsergebnissen können verschiedene Einflüsse der Belichtungs- und Prozessparameter auf die mechanischen Eigenschaften und Dichte ermittelt werden. Die mechanischen Eigenschaften und Dichte weisen in XYZ-Orientierung eine positive Korrelation mit der Gesamtenergiedichte und Belichtungsanzahl auf (Bruchdehnung mit der Belichtungsanzahl ausgeschlossen). In ZXY-Orientierung zeigt sich mit steigender Gesamtenergiedichte lediglich eine steigende Zugfestigkeit sowie mit zunehmender Belichtungsanzahl ein Anstieg der mechanischen Eigenschaften und Dichte. Ausschließlich der Bruchdehnung und Dichte in XYZ-Orientierung zeigt sich für die mechanischen Eigenschaften und Dichte in beiden Orientierungen bei konstanter Gesamtenergiedichte eine positive Korrelation mit steigender Laserleistung bei gleichzeitiger Erhöhung der Scangeschwindigkeit (P/v -Verhältnis konstant). Weiterhin ist eine Abhängigkeit von der Schichtzeit auszumachen. In XYZ-Orientierung lässt sich im Rahmen der betrachteten Schichtzeiten ein Peak der mechanischen Eigenschaften und Dichte bei einer Schichtzeit von 40 s ermitteln. In ZXY-Orientierung sind hohe Werte für Schichtzeiten bis 20 s und eine Reduktion der Werte mit höheren Schichtzeiten zu identifizieren. In beiden Orientierungen lässt sich dies durch die in CT-Bildern aufgezeigten Poren begründen. Maßgeblich für die Schichtzeit ist unter anderem die Querschnittsfläche, weshalb ein Einfluss der Querschnittsfläche nahe liegt. Die Untersuchung des Hatchabstands, exemplarisch für die ZXY-Orientierung ermittelt, zeigt keinen nennenswerten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und Dichte. Ein Anstieg der Bauraumtemperatur bewirkt in beiden Orientierungen eine Zunahme der mechanischen Eigenschaften und Dichte, unerklärlicherweise mit Ausnahme des Anstiegs von 80 °C auf 100 °C in XYZ-Orientierung beim E-Modul und der Bruchdehnung. Durch die Erhöhung der Bauraumtemperatur auf 100°C nähern sich die mechanischen Eigenschaften der ZXY-Orientierung der LS-Referenz an. Zugfestigkeit und E-Modul liegen bei ca. 84 % bis 90 % und die Bruchdehnung bei 57 % der LS-Referenz. Die Dichte übersteigt in beiden Orientierungen die Werte der LS-Referenz. Eine Steigerung der mechanischen Eigenschaften und Dichte durch Reduktion der Schichtdicke ist für beide Orientierungen nicht zu identifizieren. Eine abschließende Empfehlung für gute Prozessparameter ist schwer zu fällen. Tendenziell sollte eine Standardschichtdicke von 120 µm und eine Bauraumtemperatur von 100 °C wegen der besseren Eigenschaften in Aufbaurichtung gewählt werden, sofern die thermische Alterung des Materials bei weiterhin gegebener Recyclingfähigkeit vernachlässigbar ist. Weiterhin sollten mittlere Schichtzeiten von 20 s bis 40 s sowie eine tendenziell

hohe Laserleistung, hohe Scangeschwindigkeit und eine hohe Gesamtenergiedichte angestrebt werden. Sinnvoll sind zudem neben bauteilabhängigen Prozessparametern auch baujob- bzw. querschnittsflächenabhängige Prozessparameter. Entgegen des LS-Prozesses, bei dem in der Regel einheitliche Prozessparameter verwendet werden, sollten beim NTLS-Prozess spezifische Prozessparameter zum Einsatz kommen.

Die Untersuchung der Schmelzenthalpie bzw. der Kristallinität weist, wie durch die Literatur erwartet, nach, dass im NTLS-Prozess gefertigte Bauteile über eine geringere Kristallinität als im LS gefertigte Bauteile verfügen. Entgegen der Erwartungen zeigt sich in XYZ-Orientierung jedoch trotz verringelter Kristallinität eine höhere Steifigkeit als im LS-Prozess. Zudem ist in XYZ-Orientierung erwartungsgemäß eine positive Korrelation von Schmelzenthalpie und E-Modul auszumachen. In ZXY-Orientierung ist aufgrund der hohen Porosität und dem fehlenden Schichtverbund keine Korrelation festzustellen.

Durch die Veränderung des LS-Prozesses hin zu geringerer Bauraumtemperatur und durch die Anbindung an eine Bauplattform ändert sich zudem das Post-Processing. Das umliegende, nicht aufgeschmolzene Pulver ist im NTLS deutlich weniger verfestigt und weist eine hohe Fließfähigkeit auf, sodass das Auspacken und die Entpulverung tendenziell einfacher als im konventionellen LS-Prozess durchzuführen ist. Die Fixierung auf der Bauplattform bedingt, wie aus dem Laserschmelzprozess bekannt, die anschließende Ablösung der Bauteile und Supportstrukturen von der Bauplattform sowie das Trennen des Supports vom Bauteil. Aufgrund der filigranen Zahnstrukturen des Blocksupports ist eine Entfernung und Ablösung mit geringem Aufwand möglich.

Weiterhin kann anhand von MVR-Messungen bestätigt werden, dass über eine Vielzahl von Baujobs mit einer Bauraumtemperatur von 80 °C keine Materialalterung bzw. -schädigung auftritt. Das Pulver muss nach dem Prozess und dem Auspacken lediglich zur Entfernung von möglichen Fremdteilen gesiebt werden und kann dem Prozess anschließend wieder zugeführt werden. Thermische Agglomerate, die beim konventionellen LS durch die Siebung entfernt werden, sind nach dem NTLS-Prozess nicht vorhanden, was ebenfalls die nicht vorhandene thermische Schädigung des Materials aufzeigt.

Verglichen mit der Literatur zum NTLS von PA12 in Kapitel 3.2.1 kann die Verarbeitung auf einer konventionellen, weitverbreiteten LS-Anlage nachgewiesen werden. Die Alterung und damit die nicht vollständige Recyclingfähigkeit des umliegenden Materials wird bei einer prozessfähigen Bauraumtemperatur von 80 °C vollends vermieden. Eine Bauteildichte von 99 % kann in XYZ-Orientierung bei im Vergleich zur Literatur deutlich geringerer Bauraumtemperatur (80 °C zu 130 °C) realisiert werden [KN17]. In XYZ-Orientierung kann dieselbe Zugfestigkeit (45 MPa) wie bei der LS-Referenz und dem NTLS-Literaturwert (bei T=130 °C) erreicht werden. Der maximale E-Modul übertrifft mit 2000 MPa die LS-Referenz leicht und den NTLS-Literaturwert (1500 MPa) deutlich. Die maximale Bruchdehnung liegt mit 24 % im Rahmen der LS-Referenz und ist kleiner als der NTLS-Literaturwert mit 34 %

[KYN19]. Die Kristallinität bzw. Schmelzenthalpie im NTLS zeigt die gleiche Differenz zur LS-Referenz wie in die in der Literatur aufgeführte Differenz [KYN19]. Zur Einordnung der Ergebnisse der ZXY-Orientierung stehen keine Ergebnisse in der Literatur bereit.

6 NTLS von Polyamid 6 – Machbarkeit und erste Ergebnisse

Aufbauend auf den Ergebnissen und Erkenntnissen zum NTLS von PA12 wird im Weiteren die Verarbeitung von PA6 im NTLS-Prozess betrachtet. Grundsätzlich verfügt PA6 im Vergleich zu PA12 über eine höhere Festigkeit und Steifigkeit und weist weiterhin eine gute Temperaturbeständigkeit und eine hohe Kriech- und Ermüdungsbeständigkeit auf, sodass es unter anderem in der Automobilbranche Anwendung findet [CWZ+18; BHM19; Sch22]. Die größte Herausforderung für die Verarbeitung in konventionellen LS stellt die hohe Schmelztemperatur von 220 °C und die damit verbundene Bauraumtemperatur dar, aufgrund dessen das Material auf den meisten konventionellen LS-Anlagen (nicht HT-Anlagen), wie der EOS P396, nicht verarbeitbar ist [SMB+17; TZ20]. Aus den genannten Gründen ist daher die Verarbeitung von PA6 im NTLS-Prozess auf einer EOS P396 von Interesse und die Umsetzung anzustreben.

Zunächst wird das hier verwendete PA6 auf einer durch die Firma AMCM für Hochtemperatur-Materialien modifizierten EOS P395 im konventionellen LS-Prozess untersucht (im Folgenden: AMCM P395 HT). Im Zuge der Untersuchung werden Prozessparameter sowie mechanische Eigenschaften und Dichte bestimmt, um Anhaltspunkte zum Start der NTLS-Untersuchungen zu erhalten und zum anderen um verlässliche und aussagekräftige Referenzwerte zu bestimmen. Darauf aufbauend wird der NTLS-Prozess von PA6 zur Vergleichbarkeit auf derselben Anlage und anschließend auf der EOS P396 untersucht und die mechanischen Eigenschaften sowie Dichte ermittelt. Weiterhin wird die Materialalterung untersucht.

Die Untersuchungen und Daten dieses Kapitels sind zum Teil im Rahmen der studentischen Arbeit von Neitzel [Nei22] entstanden.

6.1 Rahmenbedingungen

Zur Untersuchung des NTLS-Prozesses und der Vorabqualifizierung der Materials PA6 im konventionellen LS-Prozess wird zunächst eine durch die Firma AMCM für Hochtemperatur-Materialien angepasste EOS P395 verwendet. Die relevanten Merkmale der AMCM P395 HT sind zusammen mit den Eigenschaften der EOS P396, die neben der AMCM P395 HT für den NTLS-Prozess von PA6 zum Einsatz kommt, in Tabelle 6-1 aufgeführt. Die wesentlichen Modifikationen bestehen darin, dass die AMCM P395 HT eine Bauraumtemperatur von bis zu 300 °C zulässt. Für eine homogene Temperaturlösung und die Tatsache, dass die Anlage für kleinste Mengen an zu erforschendem Pulver ausgelegt ist, verfügt die Anlage über einen deutlich kleineren Bauraum von 100 x 100 x 90 mm³. Zudem ist die Anlage durch den Tausch von Klingen- zu Rollenbeschichter auch für schlecht fließfähige Pulver, wie gemahlene Pulver, ausgelegt. Die AMCM P395 HT lässt ebenso wie die EOS P396 eine freie Parametrierung der Belichtungsparameter zu. Der Laserspot weist bei beiden Anlagen denselben Durchmesser auf.

Tabelle 6-1: Relevante technische Daten einer EOS P396 und der AMCM P395 HT

		EOS P396 [EOS22a]	AMCM P395 HT
Bauvolumen	mm ³	340 x 340 x 600	100 x 100 x 90
Lasertyp und -leistung	W	CO ₂ , 70	CO ₂ , 50
Max. Bauraumtemperatur	°C	200	300
Mögliche Schichtdicken	µm	60, 100, 120, 150, 180	60, 100, 120, 150, 180
Max. Scangeschwindigkeit	mm/s	6000	6000
Temperaturmessung auf dem Pulverbett		Punktpyrometer	Wärmebildkamera
Beschichtersystem		Doppelklingenbeschichter	Rollenbeschichter

Untersuchungsgegenstand ist das unverstärkte, naturfarbene Ultrasint PA6 der BASF 3D Printing Solutions GmbH, dessen im Rahmen der Arbeit relevanten technischen Eigenschaften geltend für Neupulver in Tabelle 6-2 aufgelistet sind. Neben den aus dem Datenblatt entnommenen mechanischen Eigenschaften, der lasergesinterten Dichte sowie der Schmelz- und Rekristallisationstemperatur sind die im Zuge dieser Arbeit mittels DSC-Messung bestimmten und für den Prozess notwendigen Onset-Temperaturen des Schmelze- und Kristallisationspeaks angegeben. Das theoretische Prozessfenster des PA6 für den konventionellen LS-Prozess liegt demnach zwischen 174 °C und 207 °C. Die Bauraumtemperatur liegt in der Regel im oberen Bereich des Prozessfensters. Die lasergesinterte Dichte weist aufgrund der für die Verarbeitung zugefügten notwendigen Füllstoffe im Vergleich zur Dichte von reinem PA6 gleiche bzw. leicht erhöhte Werte auf. Der Hersteller gibt die mechanischen Eigenschaften des PA6 sowohl für den trockenen als auch den konditionierten Zustand an, da PA6 stark hygrokopisch ist und sich die Werte in Abhängigkeit der Feuchtigkeit deutlich unterscheiden. Im konditionierten Zustand ist das Material bei verringrigerter Steifigkeit und Festigkeit deutlich duktiler. In der Regel sollten Bauteile aus PA6 in der Anwendung konditioniert eingesetzt werden, um ein sehr sprödes Materialverhalten zu verhindern [Sch22]. Obwohl das PA6 ein gemahlenes Pulver ist, zeigt es in den folgenden Untersuchungen sowohl mit dem Rollenbeschichter auf der AMCM P395 HT als auch mit dem Doppelklingenbeschichter der EOS P396 ein solides Auftragsverhalten.

Da das Material im konventionellen LS-Prozess aufgrund der notwendigen Bauraumtemperatur um 200 °C nicht auf EOS P3 Anlagen verarbeitbar ist, sind seitens des Materialherstellers für diese Anlagentypen keine Prozessparameterempfehlungen vorhanden. Der Materialhersteller gibt jedoch die in Tabelle 6-3 aufgeführten Prozessparameter zur Verarbeitung des PA6 auf LS-Anlagen der Firma Farsoon an. Für die folgenden Untersuchungen relevant sind die angegebene Bauraumtemperatur von ca. 200 °C, die über eine Temperatursuche zu validieren ist, und die Flächenenergiedichte von 0,02 J/mm², die einen ersten Anhaltspunkt für die zu entwickelnden Belichtungsparameter darstellt. Das Material lässt zudem eine Auffrischung mit 40 % Neupulver zu. Im Rahmen der Untersuchungen wird jedoch aufgrund der Vergleichbarkeit zum Datenblatt ausschließlich Neupulver verwendet.

Tabelle 6-2: Eigenschaften des Materials Ultrasint PA6

Mechanische Eigenschaften	Konditionierung	Orientierung	Wert	Norm	Quelle
Zugfestigkeit*	MPa	Trocken**	XYZ ZXY	66 56	ISO 527-2 [BAS21b]
		Konditioniert***	XYZ ZXY	47 38	
E-Modul*	MPa	Trocken**	XYZ ZXY	3700 3800	
		Konditioniert***	XYZ ZXY	1700 1850	
Bruchdehnung*	%	Trocken**	XYZ ZXY	2 1,6	ISO 527-2 [BAS21b]
		Konditioniert***	XYZ ZXY	16 4,4	
Thermische Eigenschaften					
Schmelztemperatur	°C		220		[BAS21b]
Kristallisationstemperatur	°C		172		
Schmelzpeak	°C		~ 221,5		DSC-Mes- sungen im Rahmen dieser Ar- beit
Beginn der Schmelze (T _{s, onset})	°C		~ 207		
Kristallisationspeak	°C		~ 167		
Beginn der Kristallisation (T _{k, onset})	°C		~ 174		
Ende der Kristallisation	°C		~ 158		
Weitere Eigenschaften					
Dichte (lasergesintert)*	g/cm ³		1,15	DIN EN ISO 1183-1	[BAS21b]
Wahre Dichte PA6	g/cm ³		1,12 - 1,15		[BBO+13; BHM19]

* Neupulver; Schichtdicke: k.A.; ** Trocken: 80 °C / Vakuum für 14 Tage; Wassergehalt: ~0,04 %

*** Konditioniert: 70 °C / 62% r.F. für 14 Tage; Wassergehalt: ~2,5 %

Tabelle 6-3: Vom Materialhersteller empfohlene Prozessparameter zur Verarbeitung von Ultrasint PA6 auf LS-Anlagen der Firma Farsoon [BAS21a]

Anlagentypen	25xP und 40xP (HT und ST Modelle)
Bauraumtemperatur	~ 200
Entnahmekammer	~ 185
Flächenenergiedichte	0,02
Auffrischungsverhältnis (FP / RP)	40 / 60
Restsauerstoffgehalt	< 0,2

6.2 Verarbeitung von PA6 im konventionellen LS-Prozess auf einer experimentellen Hochtemperatur-Anlage

Zunächst wird die Verarbeitung des Ultrasint PA6 im konventionellen LS-Prozess auf der AMCM P395 HT betrachtet. Dieses Vorgehen dient dazu, die generelle Verarbeitbarkeit auf dieser Anlage nachzuweisen, Prozessparameter zu identifizieren und Referenzwerte zu den mechanischen Eigenschaften und der Dichte für auf dieser Anlage im konventionellen LS verarbeitetes PA6 zu erhalten. Die identifizierten Prozessparameter dienen anschließend, analog zur Vorgehensweise bei PA12, als Ausgangspunkt für die Untersuchung des NTLS von PA6.

Durch eine sog. Temperatursuche, bei der die Non-Curl-Temperatur durch zum Curling neigende Curlkreuze (Bild 5-23) ermittelt wird, kann mit der Belichtung von EOS Standardparametern für PA2200 ein Non-Curl-Temperaturbereich von 199 °C bis 206 °C ausgemacht werden. Auch die mechanischen Eigenschaften von für jede Temperatur mitgebauten Zugstäben zeigt ein konstantes Niveau für diesen Temperaturbereich. Im weiteren Verlauf wird eine Bauraumtemperatur von 202 °C verwendet, um ausreichend Abstand zu den Temperaturgrenzen einzuhalten, um Curling und vollständiges Aufschmelzen des Pulverbetts zu vermeiden, denn die AMCM P395 HT weist häufige Schwankungen in der Temperaturregelung auf. Die grundlegenden Parameter und Rahmenbedingungen für die folgenden Untersuchungen sind in Tabelle 6-4 aufgelistet. Die Untersuchung der Verarbeitung bzw. die Identifikation von Belichtungsparametern orientiert sich dabei an der für Farsoon-Anlagen vom Materialhersteller empfohlenen Flächenenergiedichte von 0,02 J/mm².

Tabelle 6-4: Rahmenbedingungen und konstante Belichtungsparameter zur Untersuchung von PA6 im konventionellen LS

Rahmenbedingungen			
Bauraumtemperatur	°C	202	
Entnahmekammer	°C	185	
Schichtdicke	µm	120	
Prüfkörper		Zugstab 1BA [DIN 527-2]	
Orientierung		XYZ und ZXY	
Pulverzustand		Neupulver	
Belichtungsparameter			
Hatch	Flächenenergiedichte	J/mm ²	~ 0,02 [BAS21b]
Kontur (Kontur- vor Hatchbelichtung)	Laserleistung Scangeschwindigkeit Beamoffset	W mm/s mm	30 3000 0,3

Zunächst wird in XYZ-Orientierung die Flächenenergiedichte um die empfohlene Flächenenergiedichte von 0,02 J/mm² herum variiert. Der Hatchabstand wird mit 0,3 mm ebenso

wie die Konturbelichtung (siehe Tabelle 6-4) konstant gehalten. Die Laserleistung weist Werte von 25 W, 32,5 W und 40 W auf. Die Scangeschwindigkeit beträgt zwischen 3000 mm/s und 6000 mm/s. Die resultierenden Flächenenergiedichten liegen zwischen 13,89 J/mm² und 36,11 J/mm². Die Parameterkombinationen sind im Anhang A2 in Tabelle A 7 aufgeführt. Je Parameterset werden fünf Zugstäbe gefertigt und anschließend im Normklima für mindestens 88 Stunden, wie in Kapitel 2.2 beschrieben, schnellkonditioniert. Die Ergebnisse zu den mechanischen Eigenschaften und der Dichte sind in Bild 6-1 über der Flächenenergiedichte zusammen mit den Werten aus dem Datenblatt für den trockenen und konditionierten Zustand aufgetragen.

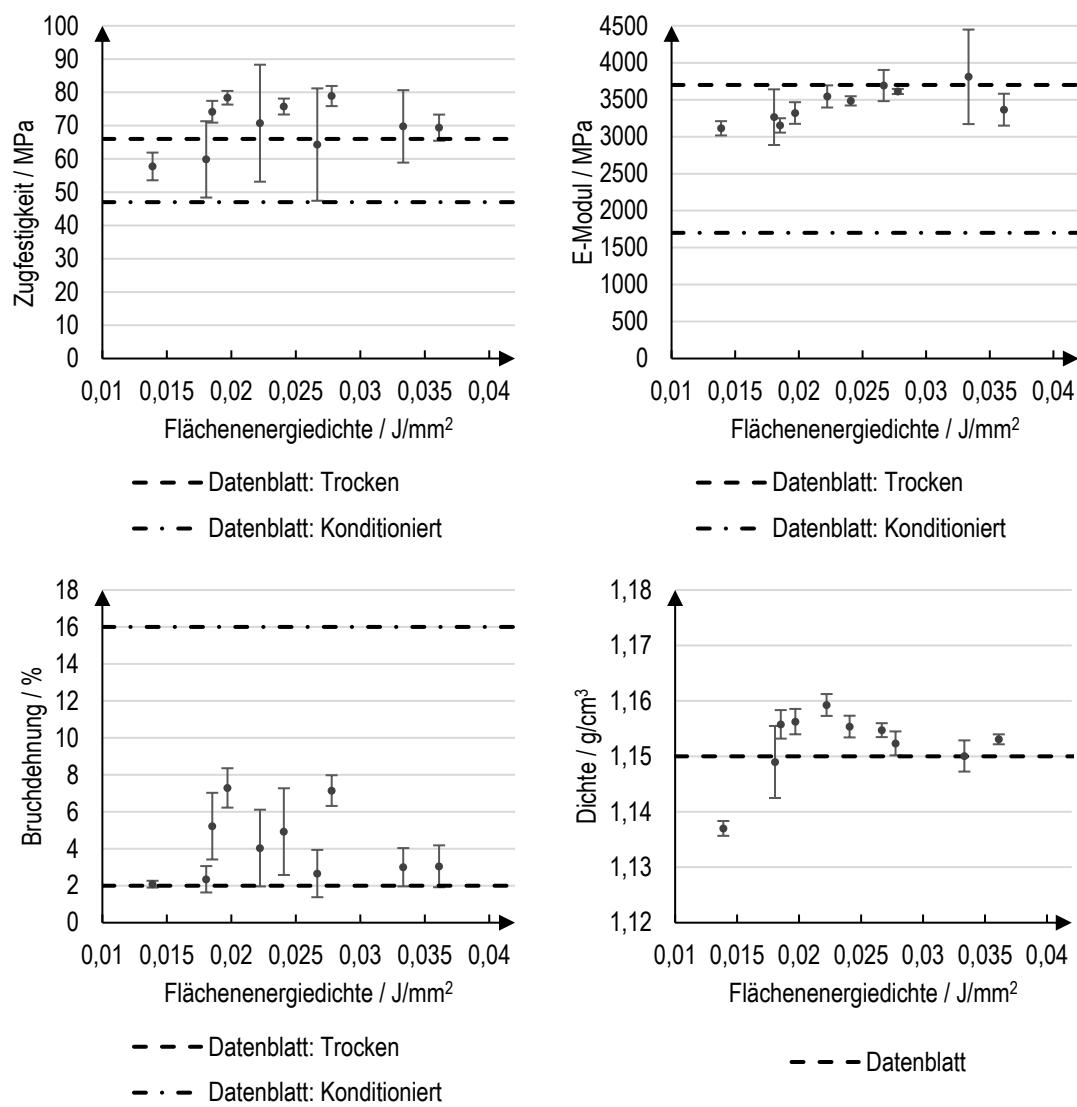


Bild 6-1: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Flächenenergiedichte für konventionelles LS mit PA6 in XYZ-Orientierung

Auffallend aber auch naheliegend ist, dass die gemessenen Werte im Bereich des trockenen Zustands aus dem Materialdatenblatt liegen. Dem technischen Informationsblatt zur

Konditionierung von PA6 ist zu entnehmen, dass nach 88 Stunden unter Normalklima eine Wasseraufnahme von lediglich 0,5 % stattfindet. Der Gleichgewichtsfeuchtigkeitsgehalt stellt sich bei PA6 bei einer Wandstärke der Zugstäbe von 2 mm unter Normalklima jedoch erst nach ca. 200 Tagen ein [BAS16]. Die hier einheitlich zur Vergleichbarkeit verwendete Schnellkonditionierung ist also mit dem trockenen Zustand aus dem Datenblatt vergleichbar. Dass die Werte, bis auf die des E-Moduls, geringfügig höher liegen, kann auf die geringe aber vorhandene Wasseraufnahme in den 88 Stunden unter Normklima, auf die Prozessparameter oder die Zugprüfung bzw. Zugprüfmaschine zurückgeführt werden. Die höchsten Werte für die mechanischen Eigenschaften und Dichte sind bei Flächenenergiedichten von 0,02 J/mm² und 0,028 J/mm² zu verzeichnen, sodass die durch den Materialhersteller empfohlene Flächenenergiedichte von 0,02 J/mm² auf der AMCM P395 HT bestätigt werden kann.

Die anschließende Variation des Hatchabstands zwischen 0,2 mm und 0,45 mm bei konstanter Flächenenergiedichte zeigt keinen nennenswerten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und Dichte, sodass auf die Darstellung der Ergebnisse in Bild A 1 im Anhang A2 verwiesen wird.

Im Folgenden werden die mechanischen Eigenschaften und Dichte sowohl in XYZ- als auch ZXY-Orientierung für zwei Parametersets mit der optimalen Flächenenergiedichte von 0,02 J/mm² betrachtet. Die Laserleistung beträgt 32,5 W. Der Hatchabstand und die Scan-Geschwindigkeit betragen 0,3 mm bzw. 0,35 mm und 5500 mm/s bzw. 4643 mm/s. Für die XYZ-Orientierung werden die Prüfkörper neben der bewährten Schnellkonditionierung von 88 Stunden im Normklima ebenfalls für 14 Tage bei 70 °C und 62 % r.F. [DIN 1110] im Klimaschrank, analog der Methode für Kennwerte des konditionierten Materialzustands im Datenblatt des Ultrasint PA6, konditioniert, damit auch für den konditionierten Zustand ein Vergleich zum Datenblatt vorliegt. In diesem Zustand, in dem laut Datenblatt ein Wassergehalt von ca. 2,5 % vorliegt [BAS21b], zeigen sich geringere Festigkeiten und Steifigkeiten bei erhöhter Duktilität im Vergleich zum sprödharten Verhalten im trockenen Zustand. Da diese Vorgehensweise zeit- und ressourcenintensiv ist, wird sie exemplarisch an den in XYZ-Orientierung gefertigten Prüfkörpern angewendet. Die Werte der schnellkonditionierten Prüfkörper sind, wie zuvor beschrieben, wegen der langsamen Wasseraufnahme des PA6 mit den Werten des trockenen Materialzustands des Datenblatts vergleichbar.

Bild 6-2 führt die mechanischen Eigenschaften und Dichte für die genannten Parameter und Konditionierungszustände in XYZ-Orientierung auf. Die Variation des Hatchabstands und der zugehörigen Scan-Geschwindigkeit bei konstanter Laserleistung zeigt für beide Konditionierungszustände für die mechanischen Eigenschaften und Dichte ausschließlich geringe Unterschiede, die im Rahmen der Standardabweichung liegen. Die Zugfestigkeit zeigt für beide Konditionierungszustände eine sehr gute Übereinstimmung mit den Werten aus dem Datenblatt. Gleichermaßen gilt für den E-Modul im konditionierten Zustand. Der E-Modul des

trockenen Zustands zeigt leicht niedrigere Werte, die sich vermutlich auf die geringfügige Wasseraufnahme durch die Lagerung im Normklima für mindestens 88 Stunden zurückführen lassen, während die Werte im Datenblatt für eine 14-tägige Lagerung bei 80 °C im Vakuum gelten. Dieselbe Begründung lässt sich für die Bruchdehnung nach Lagerung im Normklima anbringen, welche mit 5 % bei relativ hoher Standardabweichung in etwa doppelt so hoch ist wie die Bruchdehnung im Datenblatt. Im konditionierten Zustand liegen für die Bruchdehnung leicht geringere Werte als im Datenblatt vor. Die Dichte zeigt im konditionierten Zustand durch das aufgenommene Wasser leicht höhere Werte als im trockenen Zustand, die sich jedoch im Rahmen der Standardabweichung bewegen. Die Dichten

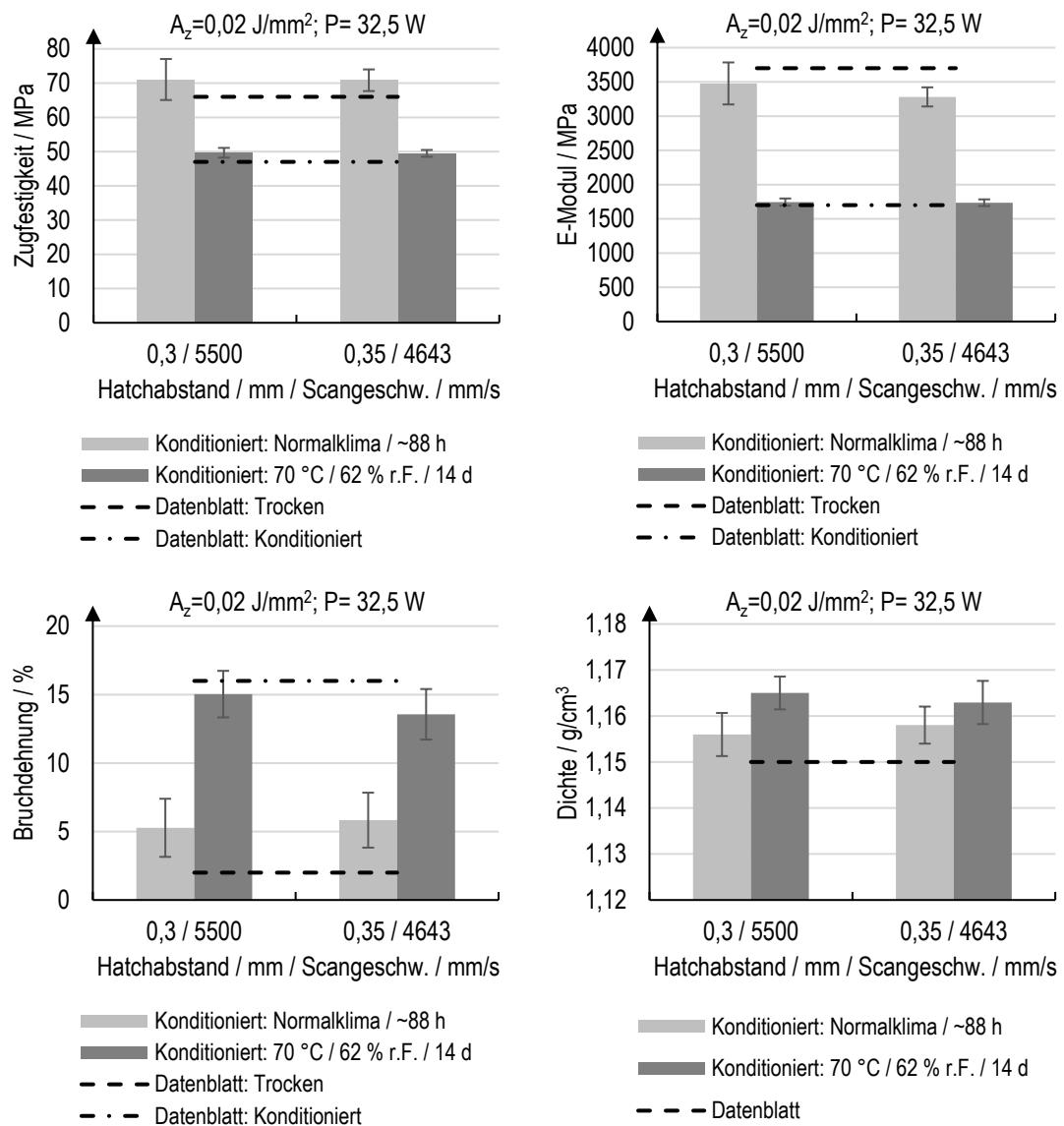


Bild 6-2: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit des Hatchabstands bzw. der Scangeschwindigkeit und des Konditionierungszustands in XYZ-Orientierung für konventionelles LS mit PA6

beider Zustände sind höher als die Dichte im Datenblatt, in dem auf eine Unterscheidung nach dem Konditionierungszustand verzichtet wird.

Bild 6-3 stellt die Ergebnisse zu den mechanischen Eigenschaften und der Dichte der ZXY-Orientierung für dieselben Kombinationen aus Hatchabstand und Scangeschwindigkeit bei konstanter Laserleistung wie bei der XYZ-Orientierung (Bild 6-2) dar. Auch in ZXY-Orientierung sind keine bzw. ausschließlich geringere Unterschiede im Rahmen der Standardabweichung bei den mechanischen Eigenschaften und der Dichte in Abhängigkeit des Hatchabstands und der zugehörigen Scangeschwindigkeit zu identifizieren. Die Zugfestigkeit zeigt um ca. 10 MPa geringere Werte als das Datenblatt, jedoch liegt der Wert des Datenblatts im Konfidenz- bzw. Vertrauensintervall bei zweiseitiger Fragestellung und einem Konfidenzniveau von 95 %. Aus der Probenzahl von 6 (linker Balken in Bild 6-3) bzw. 5 (rechter Balken in Bild 6-3), die in Freiheitsgraden von 5 bzw. 4 resultieren, berechnen sich die Vertrauensintervalle zu 40 bis 56 MPa bzw. 28 bis 62 MPa. Der E-Modul liegt ca.

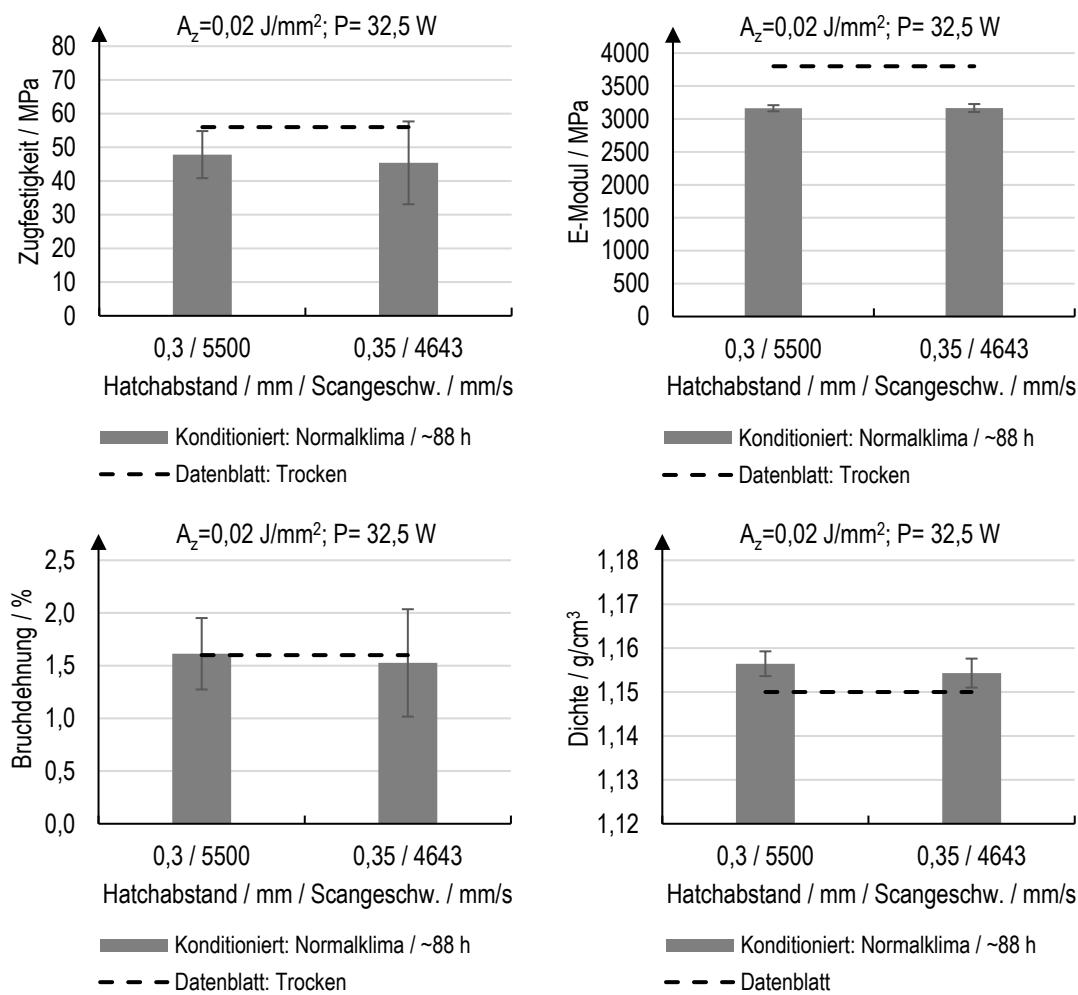


Bild 6-3: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit des Hatchabstands bzw. der Scangeschwindigkeit in ZXY-Orientierung für konventionelles LS mit PA6

17 % tiefer als der Wert des Datenblatts und die Bruchdehnung stimmt im Mittel bei gleichzeitig großer Standardabweichung mit dem Datenblatt überein. Die Dichte ist wie in XYZ-Orientierung leicht höher als die Dichte laut Datenblatt. Bei dem E-Modul und der Bruchdehnung ist zu erwähnen, dass das Videoextensometer der verwendeten Prüfanlage ausgesetzt hat und die Werte im Nachgang über den Traversenweg der Prüfanlage berechnet worden sind. Die Evaluierung der Berechnung über den Traversenweg anhand mehrerer beliebiger Messungen, bei denen das Videoextensometer ordnungsgemäß funktioniert hat, weist einen Fehler bzw. eine Abweichung der berechneten Werte von 10 % bis 15 % nach unten nach. Aufgrund dessen ist anzunehmen, dass der E-Modul in ZXY-Orientierung näher am Wert des Datenblatts liegen müsste bzw. mit diesem annähernd übereinstimmt. Die Bruchdehnung läge unter Berücksichtigung des Fehlers leicht über dem Datenblattwert.

Im Vergleich zur XYZ-Orientierung (Bild 6-2) weist die ZXY-Orientierung (Bild 6-3) geringere mechanische Kennwerte auf. Im Vergleich zu den mechanischen Kennwerten aus dem Datenblatt in Tabelle 6-2 zeigt sich dabei eine höhere Anisotropie zwischen den beiden Orientierungen. Die Dichte ist erwartungsgemäß nahezu identisch für beide Orientierungen. Tabelle 6-5 fasst in Gegenüberstellung zum Datenblatt die Werte für die mechanischen Eigenschaften und Dichte beider Orientierungen für das tendenziell minimal bessere Parametersatz, das bei einer Laserleistung von 32,5 W einen Hatchabstand von 0,3 mm und eine Scangeschwindigkeit von 5500 mm/s für die Energiedichte von 0,02 J/mm² nutzt, zusammen. Auf eine weitere Optimierung der Parameter wird an dieser Stelle verzichtet, da diese ausschließlich die Basis für die Untersuchung der Machbarkeit des NTLS-Prozesses von PA6 bildet.

Tabelle 6-5: Mechanische Eigenschaften und Dichte von PA6 im schnellkonditionierten bzw. trockenen Zustand für die XYZ- und ZXY-Orientierung in Gegenüberstellung zum Datenblatt

		Untersuchungen auf AMCM P395 HT		Datenblatt [BAS21b]	
Kennwert	Einheit	XYZ	ZXY	XYZ	ZXY
Zugfestigkeit	MPa	71	48	66	56
E-Modul	MPa	3477	3162*	3700	3800
Bruchdehnung	%	5,3	1,6*	2	1,6
Dichte	g/cm ³	1,156	1,156		1,15

* Berechnung über Traversenweg aufgrund des Aussetzens des Videoextensometers (Werte ca. 10-15 % zu gering)

6.3 NTLS von PA6 auf einer experimentellen und konventionellen LS-Anlage

Auf Basis der vorangehenden Untersuchungen zur Verarbeitung von PA6 auf einer experimentellen Hochtemperatur-Anlage, der AMCM P395 HT, wird die Machbarkeit der Verarbeitung von PA6 mit dem NTLS-Prozess zunächst auf derselben Anlage und anschließend auf einem konventionellen LS-System, der EOS P396, untersucht. Dabei wird auf die Erkenntnisse aus Kapitel 5 zum NTLS von PA12 zurückgegriffen und dieselbe Methodik verwendet. Im Zuge der Untersuchungen werden die mechanischen Eigenschaften und Dichte für die XYZ- und ZXY-Orientierung ermittelt und mit den Werten des LS-Prozesses aus dem vorangehenden Abschnitt verglichen.

6.3.1 Vorgehensweise und Rahmenbedingungen

Zur Verarbeitung von PA6 im NTLS wird, wie in Kapitel 5 für PA12 erarbeitet, auf eine Bauplattform zur Fixierung der Prüfkörper zur Vermeidung von Verzug und Curling zurückgegriffen. Für eine ausreichend starke Verbindung wird ein PA6-CFK-Organoblech mit einem Faservolumenanteil von 50 % verwendet. Bild 6-4 stellt exemplarisch die PA6-Bauplattform inklusive der Justierplattform für die AMCM P395 HT sowie die erste Schicht (Bild 6-4, links) abgelegt durch den Rollenbeschichter der AMCM P395 HT dar. Das Baujoblayout für die NTLS-Untersuchungen von PA6 auf der AMCM P395 HT ist im rechten Teil von Bild 6-4 zu sehen. Dabei werden bis zu fünf Zugstäbe in XYZ-Orientierung auf der Bauplattform gefertigt. Die im Rahmen der Arbeit verwendeten Zugstäbe des Typs 1BA, welche eine Länge von 75 mm aufweisen, können in ZXY-Orientierung auf der AMCM P395 HT aufgrund der geringen Bauraumhöhe von 90 mm und der in die Anlage integrierten Bauplattform nicht gefertigt werden. Die für die EOS P396 verwendete Bauplattform ist aus Kapitel 0 bekannt und als Baujoblayout kommt das aus den Untersuchungen zu PA12 verwendete Layout 1 aus Bild 5-38 zum Einsatz, welches sowohl Zugstäbe in XYZ- als ZXY-Orientierung beinhaltet.

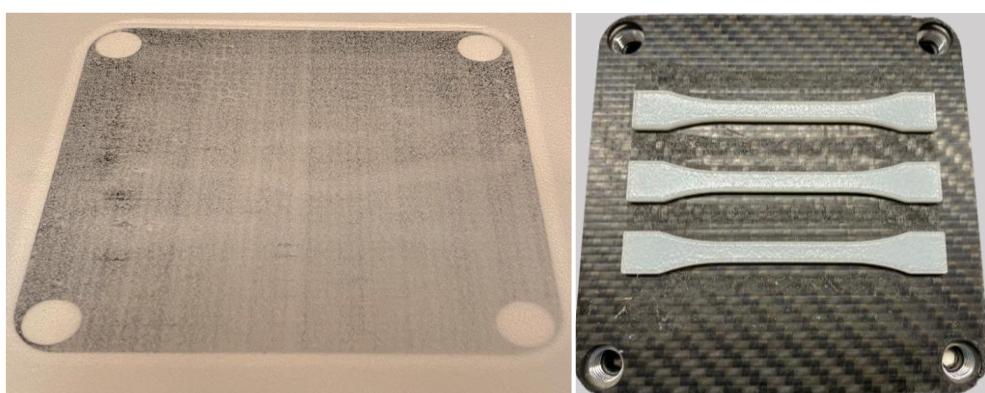


Bild 6-4: In die AMCM P395 HT integrierte Bauplattform mit erster Pulverschicht (links) und in XYZ-Orientierung gefertigten Zugstäben (rechts) [Nei22]

Weiterhin wird die in Kapitel 5 erarbeitete Methode der Mehrfachbelichtung, dargestellt in Bild 5-33 und Bild 5-39, für die NTLS-Untersuchungen an PA6 angewendet. Zudem werden die in Tabelle 6-6 aufgeführten Rahmenbedingungen sowie die Belichtungsparameter für die Supportstrukturen und die Kontur- bzw. Edgebelichtung verwendet, die aus den NTLS-Untersuchungen an PA12 übernommen und erfolgreich getestet werden konnten. Die Belichtungsparameter des Hatchs sind Gegenstand der Untersuchung. Die Fünffachbelichtung, die beim NTLS von PA12 bessere Ergebnisse im Vergleich zu geringerer Belichtungsanzahl zeigt, wird dabei herangezogen. Zu vermerken ist jedoch, dass auch gute Ergebnisse mit geringerer Belichtungsanzahl nicht ausgeschlossen werden können. Als Basis der Untersuchungen dienen die in Abschnitt 6.2 für den LS-Prozess von PA6 ermittelten Hatchparameter mit einer Laserleistung von 32,5 W, einem Hatchabstand von 0,3 mm und einer Scangeschwindigkeit von 5500 mm/s, die in einer Flächenenergiedichte von 0,02 J/mm² resultieren. Aufgrund der Fünffachbelichtung ergibt sich demnach eine Gesamtenergiedichte von 0,1 J/mm² für dieses Parameterset. Die Bauraumtemperatur wird mit

Tabelle 6-6: Rahmenbedingungen und Belichtungsparameter zur Untersuchung des NTLS von PA6

Rahmenbedingungen			
Bauraumtemperatur	°C	150	
Schichtdicke	µm	120	
Prüfkörper		Zugstab 1BA [DIN 527-2]	
Orientierung		XYZ und ZXY	
Pulverzustand		Neupulver	
Bauplattform		Organoblech (PA6, CF mit 50 Vol.-%)	
Support		Block (Parameter s. Tabelle 5-9)	
Belichtungsparameter Bauteil			
Belichtungsanzahl		5	
Hatch	Flächenenergiedichte Gesamtenergiedichte	J/mm ² J/mm ²	≥ 0,02 ≥ 0,1
Kontur und Edge (Kontur- vor Hatchbelichtung)	Laserleistung Scangeschwindigkeit Beamoffset (Kontur)	W mm/s mm	30 3000 0,3
Belichtungsparameter Support			
Belichtungsanzahl		3	
Hatch	Laserleistung Scangeschwindigkeit Hatchabstand	W mm/s mm	50 5000 0,16
Kontur und Edge (Kontur- vor Hatchbelichtung)	Laserleistung Scangeschwindigkeit Beamoffset (Kontur)	W mm/s mm	40 4000 0,35

150 °C leicht unterhalb des Rekristallisationsbereichs festgelegt, um deutlich in den Temperaturbereich konventioneller LS-Anlagen zu gelangen und deutlich unterhalb des Sinterfensters zu liegen. Dadurch kann gegebenenfalls auch die Materialalterung hervorgerufen durch Nachkondensation und thermisch-oxidative Vorgänge reduziert werden. Für die Untersuchung der Verarbeitbarkeit ohne Berücksichtigung der Materialalterung wäre die maximale Bauraumtemperatur der EOS P396 von 200 °C, die nur geringfügig unterhalb der zuvor ermittelten LS-Bauraumtemperatur von 202 °C liegt, grundsätzlich ausreichend.

6.3.2 Ergebnisse zur Verarbeitbarkeit, den mechanischen Eigenschaften und der Dichte

Mit den gewählten Parametern zeigt sich eine erste erfolgreiche Verarbeitung im NTLS-Prozess auf der AMCM P395 HT, wie bereits zuvor in Bild 6-4 (rechts) aufgezeigt, sodass im Folgenden im geringen Umfang weitere Hatchparameter betrachtet werden und die Untersuchung der Verarbeitung auf der EOS P396 erfolgt. Wie bereits aus Abschnitt 6.2 bekannt weist das PA6 im trockenen Zustand nach dem Bauprozess ein sprödes Materialverhalten auf. Aus diesem Grund ist bei der Ablösung von der Bauplattform bzw. von den Supportstrukturen darauf zu achten, möglichst keine Biegebeanspruchung aufzubringen, um Beschädigungen und Brüche der Zugstäbe zu vermeiden.

Die finalen Ergebnisse zu den mechanischen Eigenschaften und der Dichte des schnellkonditionierten, also nahezu trockenen Zustands werden im Folgenden mit den zugehörigen Parametersets zunächst für die XYZ-Orientierung in Bild 6-5 zusammengefasst und erläutert. Die ersten beiden Parametersets werden auf der AMCM P395 HT und die vier weiteren Parametersets auf der EOS P396 untersucht. Das Ausgangsparameterset auf Basis der Hatchbelichtungsparameter aus dem LS-Prozess (Nr.1 in Bild 6-5) weist im Vergleich zu der auf der AMCM P395 HT bestimmten LS-Referenz und zum Datenblatt mit 33 MPa eine um etwa 50 % verringerte Zugfestigkeit, einen mit 880 MPa zu 3500 MPa unzureichenden E-Modul sowie eine deutlich verringerte Dichte mit 1,10 g/cm³ zu 1,15 g/cm³ auf. Die Bruchdehnung liegt mit 13 % deutlich über der Referenz und dem Datenblatt. Zu erwähnen ist, dass die Konditionierungsdauer im Normklima aufgrund von Reparaturmaßnahmen der Prüfanlage in etwa doppelt so lang beträgt. Jedoch sollte dies, aufgrund der Tatsache, dass PA6 ca. 200 Tage benötigt um den Gleichgewichtsfeuchtigkeitsgehalt im Normklima zu erreichen [BAS16], zu vernachlässigen sein. Eine Begründung insbesondere für die hohe Bruchdehnung, die möglicherweise mit dem geringen E-Modul zusammenspielt, ist an dieser Stelle nicht auszumachen. Die geringe Festigkeit und insbesondere die herabgesetzte Dichte lassen jedoch auf eine nicht vollständige Aufschmelzung und Koaleszenz des Materials schließen. Aus diesem Grund wird die Gesamtenergiedichte in Parameterset 2 auf 0,15 J/mm² durch Erhöhung der Laserleistung auf 40 W und Verringerung der Scangeschwindigkeit auf 4450 mm/s bei gleichbleibendem Hatchabstand erhöht. Daraus resultiert eine Zugfestigkeit von 64 MPa und eine Bruchdehnung von 5 %, die

im Bereich der Referenz und des Datenblattwerts liegen. Der E-Modul und die Dichte können im Vergleich zur Gesamtenergiedichte von $0,1 \text{ J/mm}^2$ des ersten Parametersets deutlich auf 2275 MPa bzw. $1,13 \text{ g/cm}^3$ gesteigert werden. Insbesondere der E-Modul fällt jedoch weiterhin zur Referenz und zum Datenblatt ab. Die Verarbeitbarkeit von PA6 im NTLS auf einer experimentellen LS-Anlage, der AMCM P395 HT, kann also nachgewiesen und

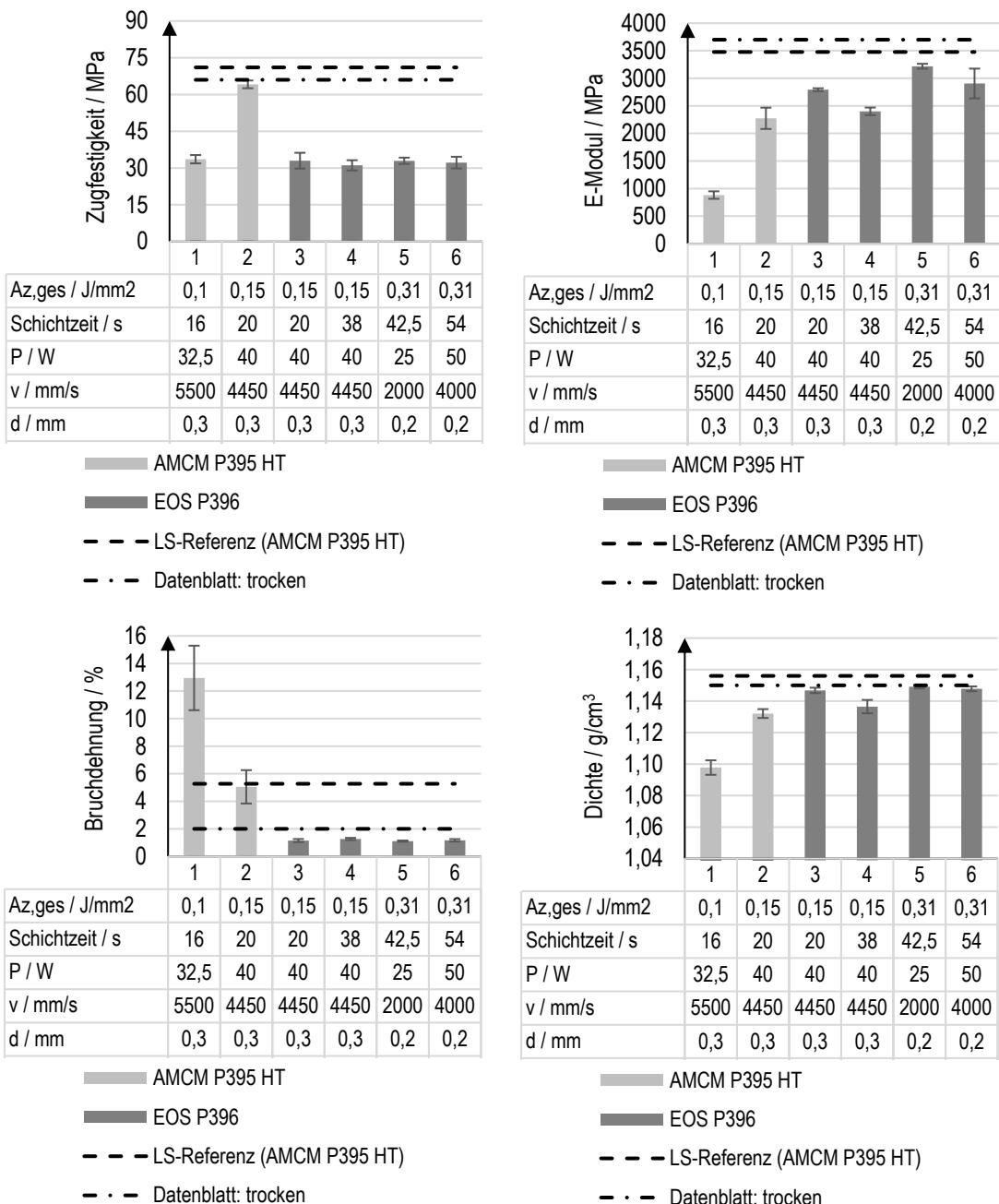


Bild 6-5: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Belichtungsparameter für die XYZ-Orientierung unter Verwendung der AMCM P395 HT und der EOS P396 für das NTLS mit PA6

mit Parameterset 2 (Bild 6-5) eine Zugfestigkeit und Bruchdehnung im Rahmen der Referenzwerte und des Datenblattwerts realisiert werden.

Im Folgenden werden diese Erkenntnisse auf die Verarbeitung von PA6 auf der konventionellen EOS P396 LS-Anlage übertragen und die mechanischen Eigenschaften und Dichte zu vier Parametersets (Nr.3-6 in Bild 6-5) untersucht. Die erfolgreiche Verarbeitbarkeit zeigt sich für jedes der vier Parametersets. Exemplarisch ist ein gefertigter Baujob in Bild 6-6 aufgezeigt. Parameterset 3 entspricht dem Parameterset 2 der AMCM P395 HT, um einen Vergleich zwischen den beiden Anlagen ziehen zu können. Dabei zeigt sich auf der EOS P396 eine im Vergleich geringere Zugfestigkeit von 33 MPa, ein höherer E-Modul mit 2795 MPa, eine geringere Bruchdehnung von 1,2 % sowie eine höhere Dichte mit 1,15 g/cm². Insbesondere die Dichte liegt im Bereich der Referenz und des Datenblatts. Beim E-Modul und der Bruchdehnung ist zu vermerken, dass das Videoextensometer defekt war und die Werte über den Traversenweg der Prüfanlage berechnet worden sind. Wie in Abschnitt 6.2 bei derselben Problematik beschrieben, ist anzunehmen, dass die Werte also bis zu 15 % zu gering sind, sodass diese real näher an der Referenz und dem Datenblatt liegen. Selbiges Problem mit dem Videoextensometer ist bei der Prüfung von Parameterset 4 zu berücksichtigen, welches dieselben Parameter wie Parameterset 3 bei doppelter Schichtzeit verwendet. Die erhöhte Schichtzeit zeigt keinen Einfluss auf die Zugfestigkeit und Bruchdehnung. Der E-Modul und die Dichte weisen leicht geringere Werte auf. Mit Parameterset 5 und 6 wird mit 0,31 J/mm² eine doppelt so hohe Gesamtenergiedichte untersucht, die zum einen durch Reduktion des Hatchabstands auf 0,2 mm und zum anderen durch die Kombination aus Laserleistung und Scangeschwindigkeit umgesetzt wird. Dabei wird auf eine langsame Energieeinbringung mit 2000 mm/s bei 25 W und auf eine schnelle Energieeinbringung mit 4000 mm/s bei 50 W gesetzt. Bis auf den E-Modul liegen die Werte für beide Geschwindigkeiten gleich auf und auf einem Niveau mit Parameterset 3. Der E-Modul weist höhere Werte auf, wobei bei einer Scangeschwindigkeit von 2000 mm/s der insge-

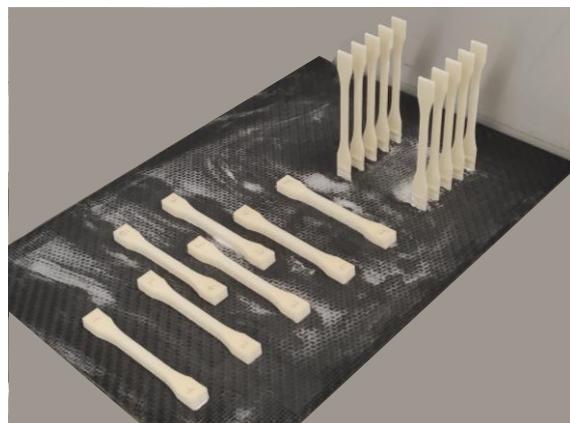


Bild 6-6: NTLS-Baujob von PA6 auf der EOS P396 mit einer Bauraumtemperatur von 150 °C

samt höchste E-Modul mit 3220 MPa, ungeachtet der Abweichungen bei Parameterset 3 und 4, zu verzeichnen ist. Die Verarbeitbarkeit von PA6 im NTLS auf einer konventionellen LS-Anlage, der EOS P396, kann also aufgezeigt werden. Bis auf die Zugfestigkeit liegen die Werte für E-Modul, Bruchdehnung und Dichte nur geringfügig unter der LS-Referenz und den Werten im Datenblatt.

Mit der EOS P396 werden weiterhin die mechanischen Eigenschaften und Dichte in ZXY-Orientierung untersucht. Dabei werden zwei Parametersets mit geringer Scangeschwindigkeit von 700 mm/s bzw. 1000 mm/s und geringer Laserleistung von 10 W bzw. 14 W mit einem Hatchabstand von 0,2 mm bei einer Schichtzeit von 22 s betrachtet, sodass Gesamtenergiedichten von ca. 0,35 J/mm² vorliegen. Geringe Scangeschwindigkeiten und eine Schichtzeit von ca. 20 s zeigen bei der Untersuchung der ZXY-Orientierung von PA12 in Kapitel 5.6.3.2 gute Ergebnisse. Aus fertigungstechnischer Sicht ist zu beachten, dass ein Dummy zur Erhöhung der Schichtzeit, wie bei den Untersuchungen zu PA12 erarbeitet, verwendet wird, damit die aufeinanderfolgenden Belichtungen nicht zu schnell hintereinander erfolgen. Die Ergebnisse zu den mechanischen Eigenschaften und der Dichte sind in Bild 6-7 aufgeführt. Zunächst ist zu erkennen, dass zwischen den beiden Parametersets ausschließlich minimale Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften und der Dichte auszumachen sind. Die Zugfestigkeit liegt mit 30 MPa deutlich unterhalb der Referenz (48 MPa) und dem Datenblatt (56 MPa). Die Bruchdehnung fällt mit 1,1 % ebenfalls geringer als der Referenzwert und der Wert des Datenblatts (beide 1,6 %) aus. Der E-Modul liegt mit 3000 MPa auf einem Niveau mit der Referenz und etwas tiefer als der Wert aus dem Datenblatt mit 3800 MPa. Die Dichte beträgt 1,15 g/cm³ und stimmt mit dem Referenzwert und dem Datenblatt überein. Auf der EOS P396 lassen sich folglich auch Zugprüfkörper in ZXY-Orientierung, was mit einer größeren Baujobhöhe einhergeht, fertigen und E-Module und Dichten wie im konventionellen LS realisieren.

Im Vergleich der XYZ- und ZXY-Orientierung sind, wie erwartet, anistrope mechanische Eigenschaften festzustellen. Zugfestigkeit, E-Modul und Bruchdehnung, bestimmt für die EOS P396, zeigen in ZXY-Orientierung um ca. 10 % bis 15 % geringere Werte als die XYZ-Orientierung. Die Dichte zeigt keine Abhängigkeit von der Orientierung. Ein Vergleich der Werte der AMCM P395 HT in XYZ-Orientierung zur ZXY-Orientierung der EOS P396 wird aufgrund der bereits in XYZ-Orientierung ausgemachten deutlichen Unterschiede nicht gezogen. Zu bedenken ist, dass keine Optimierung der Prozessparameter erfolgt ist, sodass höhere mechanische Eigenschaften möglich sind.

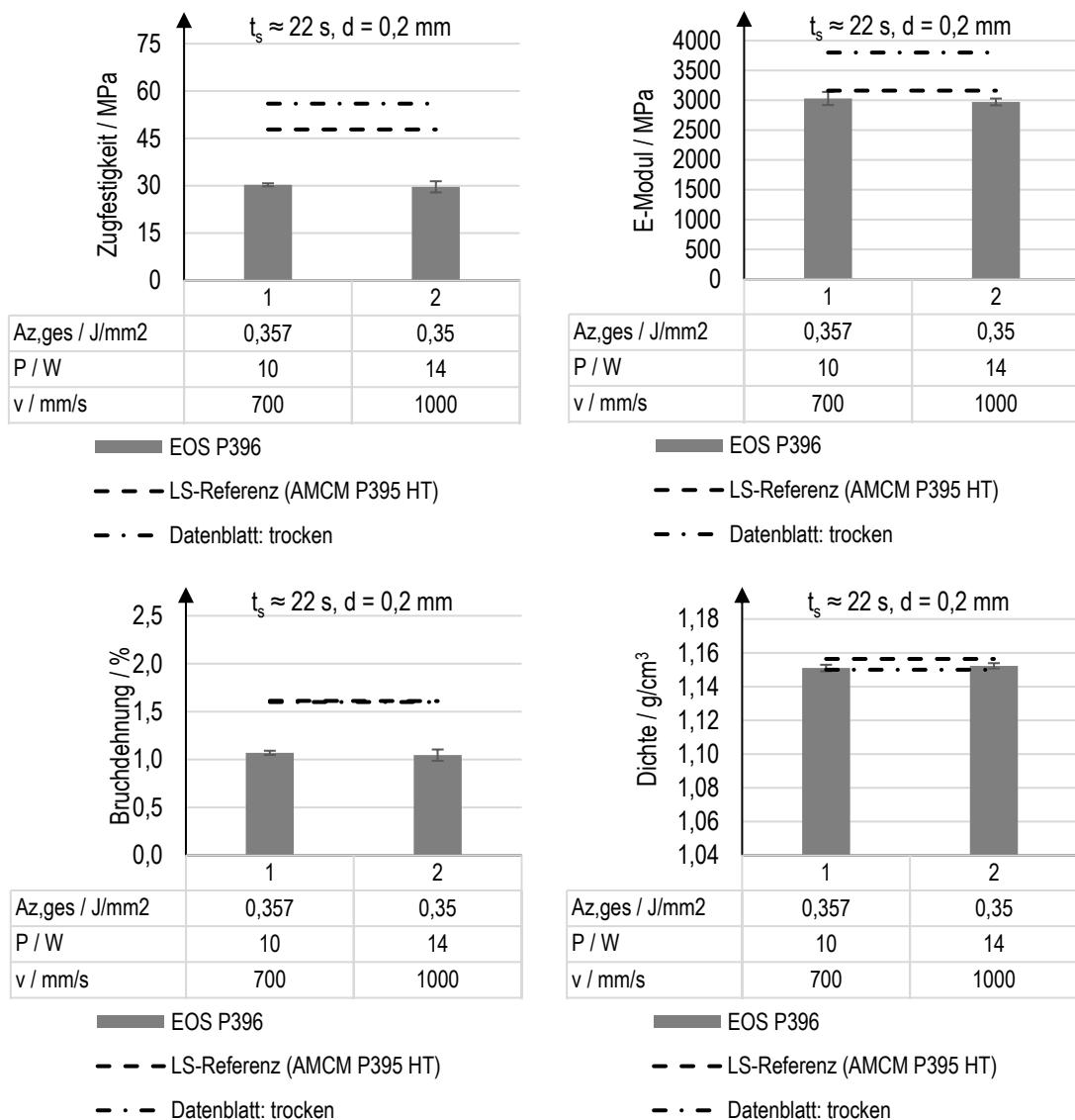


Bild 6-7: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit der Belichtungsparameter für die ZXY-Orientierung unter Verwendung der EOS P396 für das NTLS mit PA6

6.4 Materialalterung

Neben dem Hauptziel der Verarbeitung von PA6 im NTLS auf einer konventionellen LS-Anlage kann die geringere Bauraumtemperatur weiterhin zu einer geringeren thermischen Belastung und damit einhergehenden geringeren Alterung des Materials führen. Im Folgenden wird der Einfluss der Temperatur auf den MVR-Wert des Materials, der einen Rückschluss auf die Alterung des Materials zulässt, unter Versuchsbedingungen in einem mit Stickstoff gespülten Vakuumofen und unter Prozessbedingungen in der LS-Anlage bei verschiedenen Restsauerstoffgehalten und Verweilzeiten in Bild 6-8 betrachtet. Ausgangspunkt für die Untersuchungen ist Neupulver, dessen MVR-Wert von 41 cm³/10min durch

die gestrichelte Linie abgebildet ist. Die durchgezogene Linie stellt die Alterung des Materials im Ofen bei verschiedenen Temperaturen mit minimalem Restsauerstoffgehalt für eine Dauer von 24 Stunden dar. Ausgehend von einer Ofentemperatur von 80 °C, bei der nahezu keine Veränderung des MVR-Werts zum Neupulver und demnach keine Alterung des Materials zu verzeichnen ist, zeigt sich mit zunehmender Temperatur zunächst bis zum Messpunkt bei 140 °C eine leichte Verringerung des MVR-Werts auf 34 cm³/10min. Zwischen 140 °C und 175 °C tritt ein starker Rückgang des MVR-Werts bis auf ca. 14 cm³/10min auf, welcher sich bei 200 °C weiter geringfügig auf 12 cm³/10min reduziert. Die Maximaltemperatur der Messreihe beträgt aufgrund der Maximaltemperatur des verwendeten Vakuumofens 200 °C. Die Verringerung des MVR-Werts durch die Versuche im Ofen bei minimalem Restsauerstoff ist auf Nachkondensation zurückzuführen.

Die weiteren in Bild 6-8 vorhandenen Messpunkte gehören zu im Bauprozess bzw. unter Prozessbedingungen gealtertem Material. Bei der im konventionellen LS-Prozess auf der AMCM P395 HT in Abschnitt 6.2 verwendeten Bauraumtemperatur von 202 °C mit einem Restsauerstoffgehalt von ca. 2 % werden drei MVR-Werte aufgeführt, die sich in den Verweilzeiten bzw. Baujobdauern und der Entnahmestelle des Pulvers im Bauraum unterscheiden. Die MVR-Werte für Verweilzeiten bzw. Baujobdauern von ca. 8 Stunden, gezogen aus dem vermischten Restpulver eines Baujobs, sowie von ca. 22 Stunden, gewonnen von der Unterseite des Baujobs, also dem Baujobboden, unterscheiden sich mit Werten von 35 cm³/10min bzw. 33 cm³/10min nur geringfügig. Im Vergleich zur Ofenalterung mit einem MVR-Wert von 12 cm³/10min bei 200 °C sind die Werte deutlich höher. Zu begründen ist dies zum einen durch die geringere Verweilzeit bzw. Baujobdauer von 8 Stunden, die durch die Vermischung des Restpulvers im Mittel geringer ist, und zum anderen durch die Lage der Probengewinnung, da die Randbereiche des Pulverkuchens im und nach dem Bauprozess bei einer hier verwendeten Entnahmekammertemperatur von 185 °C schneller abkühlen und sich dadurch die Verweilzeit bei hoher Temperatur reduziert. Die Positionsabhängigkeit der Materialalterung durch unterschiedliche Temperaturbelastung im Bauraum kann am Beispiel von PA12 durch Josupeit belegt werden [Jos19]. Bei einer Verweilzeit von 22 Stunden bei 200 °C und der Probengewinnung aus dem Zentrum des Baujobs zeigt sich mit ca. 134 cm³/10min ein deutlich erhöhter MVR-Wert, der auf thermisch-oxidativen Abbau des Materials mit deutlicher Schädigung bzw. Spaltung der Polymerketten zurückzuführen ist. Die Wärme kann aus dem Zentrum nur langsam abgeleitet werden, sodass eine hohe Verweilzeit bei hoher Temperatur und unter Sauerstoffeinfluss (ca. 2 %) auch nach dem Bauprozess über die 22 Stunden hinaus zu erwarten ist. Der deutliche Unterschied zum MVR-Wert (ca. 12 cm³/10min) des Ofenversuchs bei 200 °C und einer Verweilzeit von 24

Stunden ist damit auf den Restsauerstoffgehalt in der LS-Anlage zurückführbar. Ohne Sauerstoff kann kein thermisch-oxidativer Abbau stattfinden, sodass im Ofenversuch ausschließlich der gegenläufige Effekt der Nachkondensation auftritt. Bestätigt werden kann die Relevanz der Probenentnahmestelle durch die Verfärbung bzw. Vergilbung des Pulvermaterials in Bild 6-9. Während das Pulver in den Randbereichen weißlich bis leicht vergilbt in Erscheinung tritt, ist im Baujobzentrum stark vergilbtes Material vorzufinden, wie in Bild 6-9 (links) zu erkennen. Dabei zeigt sich also eine Abhängigkeit der Vergilbung von der Verweilzeit und Temperatur, die durch Untersuchungen von Kummert an den Materialien TPE und PA613 bestätigt werden kann [Kum22], sodass eine Korrelation zwischen thermischer Belastung bzw. Materialalterung und Vergilbung anzunehmen ist.

Bei dem im NTLS-Prozess auf der EOS P396 mit einer Bauraumtemperatur von 150 °C verwendeten Material ergibt sich bei einer Baujobdauer von 7,5 Stunden ein MVR-Wert von ca. 36 cm³/10min, der leicht oberhalb der Kurve der Ofenalterung und in demselben Bereich wie die beiden MVR-Werte aus der Prozessalterung (35 cm³/10min, 8 h, Bauraummischung und 33 cm³/10min, 22 h, Baujobboden) liegt. Die Probe wird dem vermischten Restpulver des NTLS-Baujobs entnommen. Eine Vergilbung des umliegenden Pulvers ist hierbei nicht festzustellen, wie in Bild 6-9 (rechts) beim Auspackvorgang der Zugstäbe zu sehen. Hinsichtlich der Materialalterung zeigt sich der NTLS-Prozess unter den betrachteten Bedingungen von 7,5 bzw. 8 Stunden also als gleichwertig und nicht vorteilhaft, jedoch kann die für Bauteile unerwünschte Vergilbung reduziert werden. Die drei Werte aus

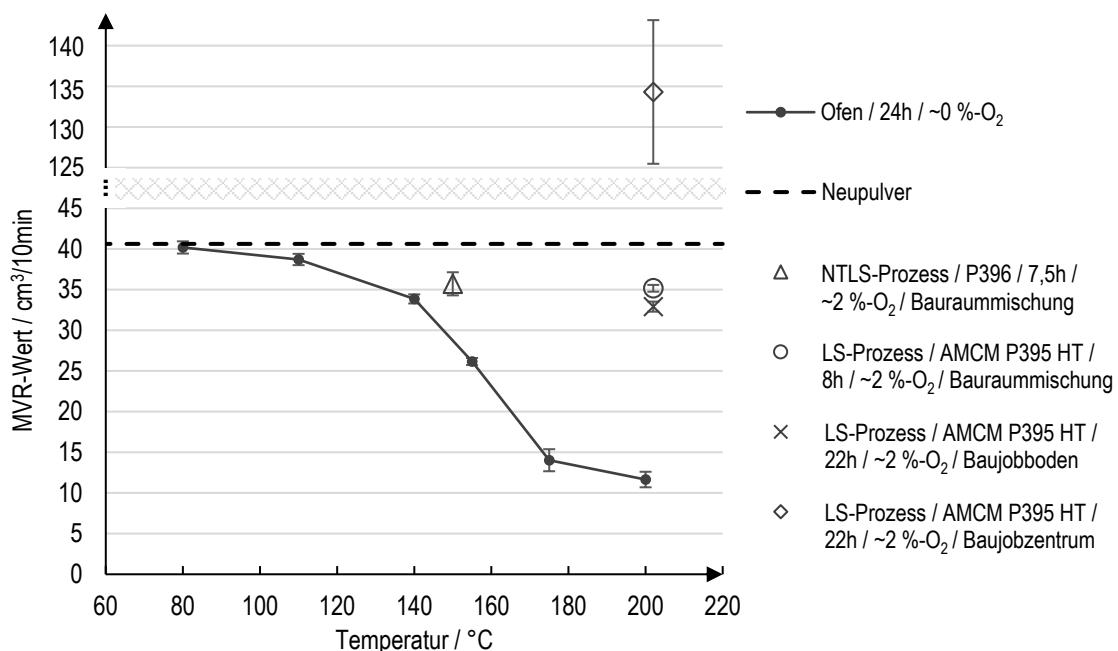


Bild 6-8: Untersuchung der Materialalterung im Ofen (~0 % Restsauerstoff) sowie im LS- bzw. NTLS-Prozess (~2 % Restsauerstoff) für verschiedene Temperaturen und Verweilzeiten

prozessgealtertem Material (LS und NTLS) liegen zudem nur 10 % bis 17 % unterhalb des MVR-Werts von Neupulver, sodass unter den vorliegenden Bedingungen eine hohe Recyclingfähigkeit zu erwarten ist. Für eine geringere Alterung, also höhere oder hundertprozentige Recyclingfähigkeit, müsste, wie bei der Ofenalterung zu sehen, die Temperatur im NTLS-Prozess weiter gesenkt werden.



Bild 6-9: Prozessalterung in der AMCM P395 HT bei 202°C im LS (links) und in der EOS P396 bei 150 °C im NTLS (rechts) bei einer Baujobdauer von 8 bzw. 7,5 Stunden

Bei der Beurteilung der MVR-Werte der Prozessalterung ist zu bedenken, dass der Bauraum der AMCM P395 HT, wie in Tabelle 6-1 aufgeführt, im Vergleich zu herkömmlichen Anlagen deutlich kleiner ist. Der zugrundeliegende NTLS-Baujob auf der EOS P396 weist ebenfalls eine vergleichsweise geringe Bauhöhe von 93 mm auf. Bei hohen Baujobs in größeren Bauräumen, wie z.B. dem der EOS P396, ist mit längeren Verweilzeiten im Zentrum des Pulverkuchens und damit mit geringeren MVR-Werten bzw. erhöhter Alterung zu rechnen. Bei den vorliegenden Werten muss bedacht werden, dass die Ergebnisse zwischen Ofen- und Prozessalterung nur bedingt vergleichbar sind, da die Verweilzeiten bei hohen Temperaturen im Prozess über die reine Baujobdauer hinaus gehen und nicht genau abschätzbar sind und zudem unter anderem deutlich kürzere Prozesszeiten mit 7,5 bzw. 8 Stunden im Vergleich zum Ofen mit 24 Stunden betrachtet werden. Weiterhin unterscheidet sich der Restsauerstoffgehalt in den durchgeföhrten Untersuchungen. Grundsätzlich ließe sich aber die Materialalterung im LS-Prozess mit dem von Josupeit entwickelten Modell zur Vorhersage der Materialalterung von PA12 im LS-Prozess unter Verwendung von MVR-Werten, die in Ofenversuchen mit prozesstypischem Restsauerstoffgehalt erzeugt werden, vorhersagen [Jos19].

Einen weiteren Einfluss identifiziert Josupeit in Form des Restsauerstoffs in der LS-Anlage bei Untersuchungen zu PA12. In dessen Untersuchungen führt ein Restsauerstoffgehalt von 2 % zu geringfügig höheren MVR-Werten als ein Restsauerstoffgehalt von ca. 0 %, da der Nachkondensation durch thermisch-oxidative Degradation entgegengewirkt wird.

Besonders bemerkbar macht sich dieser Effekt bei PA12 bei einem Sauerstoffgehalt von ca. 21 % (Umgebungsluft), bei dem deutlich höhere MVR-Werte vorliegen [Jos19]. Auch beim PA6 zeigt sich zwischen der Ofenalterung mit minimalem Restsauerstoffgehalt und der Prozesssalterung mit ca. 2 % Restsauerstoffgehalt bei 200 °C bzw. 202 °C bei annähernd vergleichbarer Verweilzeit (24 zu 22 Stunden) ein deutlich höherer MVR-Wert bei einem Restsauerstoffgehalt von 2 %.

Die Vergilbung des Materials in Abhängigkeit der Lage im Bauraum, hervorgerufen durch thermisch-oxidative Vorgänge, kann ebenfalls an gefertigten Zugstäben aufgezeigt werden (Bild 6-10). Die auf der AMCM P395 HT im LS bei 202 °C gefertigten Zugstäbe, welche unten und mittig im Bauraum platziert sind, zeigen aufgrund der längeren Verweilzeit im Baujob eine stärkere Vergilbung als im oberen Teil des Baujobs platzierte Zugstäbe. Im NTLS zeigt sich durch die geringere Bauraumtemperatur von 150 °C eine deutlich geringere Vergilbung. Der auf der EOS P396 gefertigte Prüfkörper (Bild 6-10, 1.v.r) weist aufgrund der größeren Baujobhöhe bedingt durch die zusätzliche Fertigung von ZXY-orientierten Prüfkörpern und der damit verbundenen höheren Verweilzeit eine leicht stärkere Vergilbung als der auf der AMCM P395 HT im NTLS gefertigte Prüfkörper (Bild 6-10, 2.v.r.) auf. Da der Hersteller zur Verarbeitung des PA6 einen Restsauerstoffgehalt von kleiner als 0,2 % empfiehlt [BAS21a] und aus der Literatur bekannt ist, dass Restsauerstoff im Prozess zu Verfärbungen führen kann [EP07], ist mit einer Reduzierung der durch thermisch-oxidative Vorgänge induzierten, in der Anwendung unerwünschten Vergilbung durch Senkung des in den Anlangen vorliegenden Restsauerstoffgehalts von ca. 2 % zu rechnen. Diese Erwartung zeigt und bestätigt sich durch die Ofenversuche mit minimalem Restsauerstoffgehalt, bei denen sich auch bei 200 °C nur eine sehr geringe Vergilbung des Pulvers einstellt, und durch Untersuchungen von Kummert an PA613, insbesondere bei hohen Verweilzeiten von 24 Stunden [Kum22]. Die Vergilbung ist also sowohl von der Temperatur als auch vom Restsauerstoffgehalt abhängig. Ein Einfluss des höheren Restsauerstoffgehalts auf die mechanischen Eigenschaften ist nicht auszumachen, da die für den LS-Prozess auf

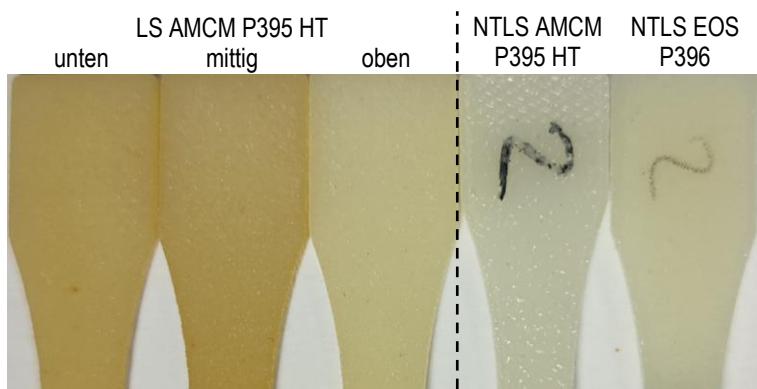


Bild 6-10: Vergilbung nach Position im Baujob im LS-Prozess ($T=202\text{ }^{\circ}\text{C}$, links) und im NTLS-Prozess ($T=150\text{ }^{\circ}\text{C}$, rechts)

der AMCM P395 HT ermittelten mechanischen Eigenschaften im Bereich der Werte des Datenblatts liegen. Festzuhalten ist also, dass der NTLS-Prozess aufgrund der geringeren thermischen Belastung bei gleichem Restsauerstoffgehalt der Vergilbung der Bauteile entgegenwirken kann.

6.5 Zusammenfassung und Diskussion zum NTLS von PA6

Im Rahmen der vorangehenden Untersuchungen kann das primäre Ziel der generellen Verarbeitbarkeit von PA6 im NTLS sowohl auf einer experimentellen LS-Anlage, die im Vorfeld zur Erzeugung von LS-Referenzwerten dient, als auch auf einer konventionellen LS-Anlage bei einer Bauraumtemperatur von 150 °C nachgewiesen werden. Die gewählte Temperatur liegt deutlich unterhalb des Sinterfensters am unteren Ende des Kristallisationsbereichs des PA6 und deutlich im Verarbeitungsbereich der EOS P396.

Für die AMCM P395 HT kann in XYZ-Orientierung im schnellkonditionierten und daher mit dem trockenen Zustand vergleichbaren Wert des Datenblatts bei einer Gesamtenergiedichte von 0,15 J/mm² eine Zugfestigkeit im Bereich der zuvor ermittelten Referenzwerte und der Datenblattwerte bei verringriger Dichte und verringertem E-Modul aufgezeigt werden. Die Bruchdehnung liegt im Bereich des im Vergleich zum Datenblatt erhöhten Referenzwerts. Auf der EOS P396 führt dasselbe Parameterset zu geringerer Zugfestigkeit und Bruchdehnung bei höherem E-Modul und höherer Dichte. Letztere liegt mit 1,15 g/cm³ im Bereich der Referenz und des Datenblatts. Durch Steigerung der Gesamtenergiedichte auf 0,31 J/mm² kann auf der EOS P396 der E-Modul mit 3320 MPa auf leicht unterhalb der Referenz und des Datenblatts bei gleichbleibender Zugfestigkeit von 33 MPa, Bruchdehnung von 1,2 % und Dichte von 1,15 g/cm³ gesteigert werden. Die zum Teil hohen Unterschiede zwischen den Werten gefertigt mit demselben Parameterset auf der AMCM P395 HT und der EOS P396 sind in der auftretenden Ausprägung nicht zu erklären. Möglicherweise zeigt sich hier ein Einfluss aufgrund der unterschiedlichen Abkühl- und Erstarrungsbedingungen durch das unterschiedliche Baujob-Layout und der damit verbundenen Baujobhöhe und -dauer oder aufgrund der Größenunterschiede der Bauräume.

In ZXY-Orientierung, die ausschließlich auf der EOS P396 untersucht wird, lassen sich mit einer Gesamtenergiedichte von 0,35 J/mm² ein mit der Referenz nahezu identischer E-Modul von 3000 MPa, der jedoch niedriger als der Wert des Datenblatts ausfällt, und eine Dichte von 1,15 g/cm³ analog des Referenz- und Datenblattwerts realisieren. Die Zugfestigkeit und Bruchdehnung liegen mit 30 MPa und 1,1 % teilweise deutlich unter dem Wert der Referenz und des Datenblatts. Weiterhin ist eine Anisotropie der mechanischen Eigenschaften von 10 % bis 15 % ist zwischen den beiden Orientierungen auf der EOS P396 auszumachen. Die Dichte zeigt keine Richtungsabhängigkeit.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen also, dass mit dem NTLS von PA6 teilweise die Referenzwerte und Werte des Datenblatts eingestellt werden können, jedoch insbesondere

bei der Zugfestigkeit deutlich darunter liegen. Der Grund für die Unterschiede ist rein auf Basis der durchgeführten Zugprüfungen und Dichtemessungen nicht auszumachen. Zersetzungsvorgänge im Material durch die hohe Energieeinbringung in Form der Mehrfachbelichtung oder nicht vollständig aufgeschmolzene Partikeln durch ein zu geringes Energieniveau sind denkbar. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die Parameter nur im geringen Umfang auf Basis der LS-Voruntersuchungen auf der AMCM P395 HT und der Erkenntnisse aus den Untersuchungen an PA12 variiert werden. Eine umfangreichere Parameterstudie könnte zur Verbesserung der mechanischen Kennwerte beitragen. Insbesondere die Erhöhung der Raumtemperatur in Richtung der Grenzen der EOS P396 lässt eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften erwarten. Eine Erhöhung der Raumtemperatur würde jedoch die Vergilbung der Bauteile begünstigen.

Im Vergleich zur Alterung des Materials im Ofen mit minimalem Restsauerstoff kann im Prozess bei ca. 2 % Restsauerstoff und annähernd gleicher Verweilzeit eine geringere Alterung durch höhere MVR-Werte identifiziert werden. Jedoch zeigt sich kein nennenswerter Unterschied zwischen der Raumtemperatur von 202 °C im LS und der Raumtemperatur von 150 °C im NTLS bei vergleichbarer Verweilzeit von 7,5 bzw. 8 Stunden. Im Kern eines Baujobs mit einer Dauer von 22 Stunden zeigt sich ein vollständiger Abbau der Polymerketten in Form eines extrem hohen MVR-Werts. Auf Basis der Ofenversuche ist anzunehmen, dass dem vollständigen Kettenabbau im Kern eines Baujobs mit hoher Dauer durch eine geringere Raumtemperatur entgegenzuwirken ist.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Erweiterung der Anwendungsbereiche des Polymer-Lasersinterns (LS) wird im Rahmen dieser Arbeit ein abgewandelter LS-Prozess das sog. Niedertemperatur-Lasersintern (NTLS) für eine konventionelle, nicht modifizierte LS-Anlage, der EOS P396, entwickelt. Die entwickelte Methode, die bei deutlich geringerer Bauraumtemperatur außerhalb des für ein LS-Material typischen und notwendigen Prozessfensters arbeitet, kann die Materialvielfalt für konventionelle, weit am Markt verbreitete LS-Anlagen erweitern sowie die Recyclingfähigkeit des Materials erhöhen. Aufgrund des hohen Schmelzpunkts sind Hochleistungskunststoffe standardmäßig auf einer EOS P396, deren maximale Bauraumtemperatur 200 °C beträgt, nicht verarbeitbar. Das NTLS kann durch drastische Reduktion der Bauraumtemperatur und Anpassung des Laserenergieeintrags in Form der Belichtungsparameter und -strategie die Verarbeitung von Hochleistungskunststoffen auf konventionellen LS-Anlagen, wie der EOS P396, ermöglichen. Weiterhin kann die reduzierte Bauraumtemperatur in verringrigerter Alterung des im Prozess verarbeiteten Materials und daher in erhöhter Recyclingfähigkeit, die im Sinne der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit von hoher Relevanz ist, resultieren.

Im Kern der Arbeit wird der NTLS-Prozess zur Verarbeitung von PA12 entwickelt und die Methodik anschließend auf die Verarbeitung von PA6, welches standardmäßig nicht auf der EOS P396 verarbeitbar ist, angewendet. Zur Vermeidung von durch die geringe Bauraumtemperatur induziertem Curling und Verzug werden die Bauteile an eine Bauplattform angebunden.

Im Zuge der Entwicklung der NTLS-Methode mit PA12 zeigen Voruntersuchungen die Prozessfähigkeit von CFK- und GFK-Organoblechen (Kohlenstofffaser- und glasfaserverstärkter Kunststoff) mit PA6- und PA12-Matrix als Bauplattform auf. Auf Basis von Untersuchungen zur Bauraumtemperatur und Angaben aus der Literatur zur temperaturabhängigen Alterung wird eine prozessfähige Bauraumtemperatur von 80 °C ermittelt und in den folgenden Untersuchungen als Richtwert verwendet. Eine erste umfangreiche Versuchsreihe zu Belichtungsparametern an direkt und flächig auf der Bauplattform fixierten und in XYZ-Orientierung ausgerichteten Prüfkörpern zeigt den Einfluss der Parameter auf die mechanischen Eigenschaften und Dichte der Prüfkörper auf. Zur prozessfähigen Anbindung werden die Prüfkörper in den ersten Schichten mehrfach belichtet. Die restlichen Schichten des Zugstabs werden standardmäßig einmal belichtet. Die im Vergleich zum LS gesteigerte Laserenergiedichte resultiert ab einer Grenzenergiedichte von 0,12 J/mm² in zu starker Rauchentwicklung infolge von Zersetzungsvorgängen. Mit steigender Flächenenergiedichte steigen Zugfestigkeit und E-Modul an. Selbiges zeigt sich für die Bruchdehnung ab einer Flächenenergiedichte von 0,08 J/mm². Die Maximalwerte liegen zum Teil deutlich unterhalb der Referenzwerte aus dem LS-Prozess. REM-Aufnahmen der Bruchflächen identifizieren im einfachbelichteten Teil des Zugstabquerschnitts eine unzureichende

Koaleszenz des Materials mit erhöhter Porosität als Ursache für die reduzierten mechanischen Eigenschaften. Im mehrfachbelichteten Teil des Querschnitts ist eine deutlich ausgeprägtere Koaleszenz und ein homogeneres Gefüge vorzufinden. Folglich wird im NTLS auf die Mehrfachbelichtung der Hatchlinien gesetzt.

Zur Fixierung der Bauteile an der Bauplattform und der Fertigung verschieden orientierter Prüfkörper oder Bauteile, die eine flächige Anbindung an der Bauplattform nicht zulassen, werden Supportstrukturen für das NTLS entwickelt. Die Untersuchungen weisen die zuverlässige Anbindung der Bauteile in verschiedenen Orientierungen durch die aus dem Laserschmelz-Prozess von Metallen bekannten Block- und Kegelsupportstrukturen mit bauteilseitigen, filigranen Strukturen nach. Blocksupport resultiert dabei in weniger Bauteilverzug, sodass dieser in anschließenden NTLS-Untersuchungen zum Einsatz kommt. Zur erfolgreichen Anbindung des Supports an der Bauplattform werden die ersten Schichten zunächst sechsmal belichtet, ehe die restlichen Schichten mit Dreifachbelichtung erzeugt werden. Ein einfaches Ablösen der Supportstrukturen vom Bauteil und der Bauplattform im Anschluss an den Prozess kann nachgewiesen werden. Zudem zeigt sich im Post-Processing, dass das Pulverbett im Vergleich zum LS deutlich weniger verfestigt ist und das umliegende Pulver daher eine hohe Fließfähigkeit aufweist.

Für die Mehrfachbelichtungsstrategie im NTLS wird die Gesamtenergiedichte als Parameter für den Laserenergieeintrag eingeführt. Diese ergibt sich aus dem Produkt von Flächenenergiedichte und Belichtungsanzahl. Einschichtprüfkörper können dichtere Bauteilschichten mit zunehmender Belichtungsanzahl nachweisen. Vollständige Koaleszenz des Materials zeigt sich ab einer Gesamtenergiedichte von $0,2 \text{ J/mm}^2$. Aufgrund der Rauchentwicklung, die primär im ersten Belichtungszyklus der Mehrfachbelichtung entsteht, wird empfohlen, eine Energiedichte der einzelnen Belichtungsschritte von $0,08 \text{ J/mm}^2$ nicht zu überschreiten. Aufgrund der Rauchentwicklung lässt sich zudem auf Zersetzung schließen, die sich in der Mikrostruktur des Bauteils in kugelförmigen Poren äußert. Die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften und Dichte der XYZ- und ZXY-Orientierung unter Verwendung der Mehrfachbelichtung mit drei bis fünf Belichtungszyklen und unter Variation der weiteren Belichtungsparameter zeigt anisotrope Bauteileigenschaften auf. Die Maximalwerte der mechanischen Eigenschaften und Dichte in XYZ-Orientierung liegen im Bereich der LS-Referenzwerte. Die Werte der ZXY-Orientierung, insbesondere die Bruchdehnung, fallen zur LS-Referenz deutlich ab. Das spröde Bruchverhalten kann durch REM-Aufnahmen von Bruchflächen und CT-Aufnahmen auf eine erhöhte Porosität durch unvollständige Koaleszenz und durch Zersetzung entstehende Poren zurückgeführt werden, die beide in nicht ausreichendem Schichtverbund resultieren. Die umfangreiche Variation der Prozessparameter deckt zudem verschiedene Korrelationen zwischen den Prozessparametern und den mechanischen Eigenschaften bzw. der Dichte in beiden Orientierungen auf. Dabei zeigt sich insbesondere ein positiver Einfluss der Gesamtenergiedichte sowie der Belichtungsanzahl, die ebenfalls zu einer höheren Gesamtenergiedichte führt, auf die

mechanischen Eigenschaften und Dichte. Ausgeschlossen von dieser Korrelation sind die mechanischen Eigenschaften in ZXY-Orientierung bis auf die Zugfestigkeit. Mit steigender Laserleistung und Scangeschwindigkeit bei konstantem Verhältnis der beiden Werte und damit zugleich konstanter Energiedichte nehmen die mechanischen Eigenschaften und Dichte, ausschließlich der Bruchdehnung und Dichte in XYZ-Orientierung, zu. Auch die Schichtzeit zeigt einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und Dichte. In XYZ-Orientierung führen mittlere Schichtzeiten von 40 s und in ZXY-Orientierung Schichtzeiten bis 20 s zu den besten Werten. Der Hatchabstand und die Schichtdicke zeigen keinen nennenswerten Einfluss auf die Bauteileigenschaften. Eine zunehmende Bauraumtemperatur resultiert in höheren mechanischen Eigenschaften und höherer Dichte und nähert die mechanischen Eigenschaften in ZXY-Orientierung der LS-Referenz an. Weiterhin ist durch Bestimmung der Schmelzenthalpie eine verringerte Kristallinität bei im NTLS-Prozess gefertigten Bauteilen festzustellen. Durch Untersuchungen der Schmelze-Volumenfließrate (engl.: MVR) des im Rahmen der Untersuchungen über einige Baujobs verwendeten und nicht aufgefrischten Materials kann nachgewiesen werden, dass bei einer Bauraumtemperatur von 80 °C keine Alterung zu verzeichnen ist.

Unter Verwendung der Methode der Mehrfachbelichtung kann die generelle Verarbeitbarkeit von PA6 im NTLS auf einer experimentellen LS-Anlage und der konventionellen EOS P396 LS-Anlage bei einer Bauraumtemperatur von 150 °C aufgezeigt werden. Die auf der experimentellen LS-Anlage ausschließlich in XYZ-Orientierung erzeugten Prüfkörper weisen im trockenen Zustand eine Zugfestigkeit im Bereich des Datenblatt- und Referenzwerts sowie einen verringerten E-Modul und eine verringerte Dichte auf. Die Bruchdehnung übersteigt den Wert des Datenblatts und der LS-Referenz. Auf der EOS P396 in XYZ-Orientierung erzeugte Prüfkörper zeigen eine verringerte Zugfestigkeit und Bruchdehnung im Vergleich zu den auf der experimentellen Anlage erzeugten Prüfkörpern und einen erhöhten E-Modul, der im Bereich der LS-Referenz liegt. Die Dichte weist die Werte des Datenblatts und der LS-Referenz auf. In ZXY-Orientierung ist ein mit der LS-Referenz nahezu identischer E-Modul sowie eine mit der LS-Referenz und dem Datenblatt übereinstimmende Dichte zu verzeichnen. Zugfestigkeit und Bruchdehnung zeigen deutlich geringere Werte als das Datenblatt und die LS-Referenz. Eine Verbesserung der Eigenschaften sollte durch Optimierung der Prozessparameter, wie beim NTLS von PA12 gezeigt, realisierbar sein. Eine nennenswerte Reduktion der Alterung von PA6 durch die geringe Bauraumtemperatur kann nicht nachgewiesen werden.

Im Zuge der durchgeföhrten Untersuchungen können neben der Erweiterung der Materialvielfalt und Vermeidung von Alterung beim PA12 weitere Vorteile des NTLS-Prozesses identifiziert werden. Im NTLS werden kürzere Aufheiz- und Abkühlzeiten benötigt, die sich positiv auf die Prozesskette und die Wirtschaftlichkeit auswirken. Weiterhin kann die nach dem Prozess vorliegende hohe Rieselfähigkeit des umliegenden Pulvermaterials zu einer besseren Pulverentfernung aus komplexen Strukturen und damit zu Vorteilen in der

Konstruktion von Bauteilen führen. Identifizierte Nachteile bestehen in dem zusätzlichen Arbeitsschritt der Supportentfernung, in der Anbindung der Bauteile an eine Bauplattform, die die Verschachtelung von Bauteilen und eine hohe Auslastung des Bauraums unterbindet, sowie in langen Schichtzeiten, die zu längeren und unwirtschaftlicheren Baujobdauern führen.

An diese Arbeit anschließend bzw. auf den Ergebnissen aufbauend können beim NTLS von PA12 weitere Untersuchungen zu den Belichtungsparametern bzw. der Belichtungsstrategie insbesondere zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften in Aufbaurichtung durchgeführt werden. Fokus kann dabei auf die Konturbelichtung, die im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konstant gehalten wird, aber nach Kummert, Lohn und Kaddar einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften nimmt, gelegt werden [Kad10; KS18; Loh19]. Insbesondere bei kleinen Bauteilquerschnitten, wie bei in Aufbaurichtung orientierten Zugstäben, ist aufgrund des hohen Anteils der Konturlinien an der Gesamtbelichtungsfläche ein Einfluss zu erwarten. Weiterhin kann die Strategie der Mehrfachbelichtung in Form von variierenden Energiedichten je Belichtungszyklus betrachtet werden. Aufgrund der primär im ersten Belichtungszyklus entstehenden starken Rauchentwicklung könnte die erste Belichtung mit geringerer Energiedichte und die folgenden Belichtungen mit höherer Energiedichte ablaufen, sodass die Belichtungsanzahl bei gegebener Gesamtenergiedichte reduziert werden könnte. Gegebenenfalls könnte auf diese Weise auch eine höhere Gesamtenergiedichte ins Material eingebracht werden, ohne Zersetzungerscheinungen hervorzurufen. Auch baujob-, bauteil- und querschnittsflächenabhängige Belichtungsparameter können anschließend an diese Arbeit untersucht werden. Desweitern kann eine umfangreiche Untersuchung der Mikrostruktur hinsichtlich des Porositätsgrads oder der Porenverteilung im Volumen sowie der Kristallinität erfolgen, welche im Rahmen der Arbeit nur in kleinem Umfang erfolgt ist. Beim NTLS von PA6 könnte im nächsten Schritt eine Optimierung der Belichtungsparameter erfolgen.

Weiterhin ist die generelle Verarbeitbarkeit von komplexen Bauteilen mit sich über der Bauhöhe verändernden Querschnittsflächen, die Einfluss auf die jeweilige Schichtzeit, die akkumulierte Energie sowie damit einhergehend auf die Bauteileigenschaften nehmen, zu untersuchen. Zudem kann der NTLS-Prozess hinsichtlich der Form- und Maßhaltigkeit untersucht und Schwund- bzw. Skalierungsfaktoren ermittelt werden. Auch die Entwicklung von NTLS spezifischen Konstruktionsregeln kann angeschlossen werden, da die Anbindung an die Bauplattform Restriktionen in der Konstruktion hervorruft. Ggf. entstehen jedoch auch Vorteile in der Konstruktion durch das deutlich weniger verfestigte Pulverbett, woraus die Pulverentfernbareit aus komplexen Strukturen oder Hohlräumen, wie langen und dünnen Kanälen, realisiert werden kann.

Auf Basis dieser Arbeit ist außerdem die Verarbeitbarkeit von Hochleistungskunststoffen, die bisher im LS ausschließlich auf speziellen Hochtemperatur-Anlagen zu verarbeiten sind,

auf der EOS P396 im NTLS zu untersuchen. Insbesondere PEEK und PPS, die als LS-Material verfügbar sind, wären aufgrund ihrer Eigenschaften und Anwendungspotenziale für die Untersuchungen von Interesse.

8 Literaturverzeichnis

- [Abt16] ABTS, G.: Kunststoff-Wissen für Einsteiger. Hanser, München, 3., aktualisierte und erweiterte Auflage, 2016
- [AMP23] AMPOWER GmbH & Co. KG: AMPower Report, 2023
- [Ass22] ASSOCIATES, W.: Wohlers report 2022 - 3D printing and additive manufacturing global state of the industry. Wohlers Associates, Fort Collins (Colo.), 2022
- [BAS16] BASF: Konditionieren von Fertigteilen aus Ultramid - Technische Information, 2016
- [BAS21a] BASF 3D Printing Solutions GmbH: Processing Guideline - For Farsoon (25xP and 40xP), 2021
- [BAS21b] BASF 3D Printing Solutions GmbH: Technisches Datenblatt Ultrasint PA6, 2021
- [BBO+13] BAUR, E.; BRINKMANN, S.; OSSWALD, T.; RUDOLPH, N.; SCHMACHTERNBERG, E.: Saechting Kunststoff Taschenbuch. Hanser Verlag; Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 31., 2013
- [BBW+13] BREUNINGER, J.; BECKER, R.; WOLF, A.; ROMMEL, S.; VERL, A.: Generative Fertigung mit Kunststoffen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013
- [BEG15] BERRETTA, S.; EVANS, K. E.; GHITA, O.: Processability of PEEK, a new polymer for High Temperature Laser Sintering (HT-LS). European Polymer Journal, Vol. 68, 2015, p. 243–266
- [BEG16] BERRETTA, S.; EVANS, K. E.; GHITA, O. R.: Predicting processing parameters in high temperature laser sintering (HT-LS) from powder properties. Materials & Design, Vol. 105, 2016, p. 301–314
- [BGE11] BEARD, M. A.; GHITA, O. R.; EVANS, K. E.: Monitoring the effects of selective laser sintering (SLS) build parameters on polyamide using near infrared spectroscopy. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 121, Iss. 6, 2011, p. 3153–3158
- [BHK+17] BAHADOR, A.; HAMZAH, E.; KONDOH, K.; ABUBAKAR, T.; YUSOF, F.; SAUD, S. N.; IBRAHIM, M. K.; EZAZI, M. A.: Defocusing Effects of Laser Beam on the Weldability of Powder Metallurgy Ti-Based Shape Memory Alloys. Procedia Engineering, Vol. 184, 2017, p. 205–213
- [BHM19] BAUR, E.; HARSCH, G.; MONEKE, M.: Werkstoff-Führer Kunststoffe - Eigenschaften - Prüfungen - Kennwerte. Hanser, München, 11., aktualisierte Auflage, 2019
- [BHS13] BERGER, U.; HARTMANN, A.; SCHMID, D.: Additive Fertigungsverfahren - Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. Europa Lehrmittel, Haan-Gruiten, 1. Aufl., 2013
- [BWL+14] BOURELL, D. L.; WATT, T. J.; LEIGH, D. K.; FULCHER, B.: Performance limitations in polymer laser sintering, 2014
- [CAB+11] COOKE, W.; ANNE TOMLINSON, R.; BURGUETE, R.; JOHNS, D.; VANARD, G.: Anisotropy, homogeneity and ageing in an SLS polymer. Rapid Prototyping Journal, Vol. 17, Iss. 4, 2011, p. 269–279
- [CGH+01] CHOREN, J.; GERVASI, V.; HERMAN, T.; KAMARA, S.; MITCHELL, J.: SLS Powder Life Study. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2001

- [CLW19a] CHATHAM, C. A.; LONG, T. E.; WILLIAMS, C. B.: A review of the process physics and material screening methods for polymer powder bed fusion additive manufacturing. *Progress in Polymer Science*, Vol. 93, 2019, p. 68–95
- [CLW19b] CHATHAM, C. A.; LONG, T. E.; WILLIAMS, C. B.: Powder bed fusion of poly(phenylene sulfide) at bed temperatures significantly below melting. *Additive Manufacturing*, Vol. 28, 2019, p. 506–516
- [CML07] CAULFIELD, B.; McHUGH, P. E.; LOHFELD, S.: Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, Iss. 1-3, 2007, p. 477–488
- [CWZ+18] CHEN, P.; WU, H.; ZHU, W.; YANG, L.; LI, Z.; YAN, C.; WEN, S.; SHI, Y.: Investigation into the processability, recyclability and crystalline structure of selective laser sintered Polyamide 6 in comparison with Polyamide 12. *Polymer Testing*, Vol. 69, 2018, p. 366–374
- [CY05] CUI, X.; YAN, D.: Preparation, characterization and crystalline transitions of odd–even polyamides 11,12 and 11,10. *European Polymer Journal*, Vol. 41, Iss. 4, 2005, p. 863–870
- [DDW14a] DRUMMER, D.; DREXLER, M.; WUDY, K.: Impact of Heating Rate During Exposure of Laser Molten Parts on the Processing Window of PA12 Powder. *Physics Procedia*, Vol. 56, 2014, p. 184–192
- [DDW14b] DRUMMER, D.; DREXLER, M.; WUDY, K.: Resulting Melt-Pool-Shape During Selective Beam Melting of Thermoplastics as Function of Energy Input Parameters. In: *Proceedings of the Fraunhofer Direct Digital Manufacturing Conference*, Berlin, 2014
- [Del20] DELFS, P.: Dreidimensionale Oberflächenanalyse und Topografie-Simulation additiv hergestellter Laser-Sinter Bauteile. Dissertation, Universität Paderborn, Paderborn, 2020
- [DIN 291] DIN EN ISO 291: Kunststoffe - Normalklima für Konditionierung und Prüfung, 2008
- [DIN 527-2] DIN EN ISO 527-2: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen, 2012
- [DIN 1133-1] DIN EN ISO 1133-1: Kunststoffe - Bestimmung der Schmelze-Massefließrate (MFR) und der Schmelze-Volumenfließrate (MVR) von Thermoplasten. Teil 1: Allgemeines Prüfverfahren, 2012
- [DIN 50035] DIN EN 50035: Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien - Polymere Werkstoffe, 2012
- [DIN 35230] DIN 35230: Kunststoffe - Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen - Angaben zu Schweißverfahren, 2016
- [DIN 52921] DIN EN ISO 52921: Normbegrifflichkeiten für die Additive Fertigung - Koordinatensysteme und Prüfmethodologien, 2017
- [DIN 11357-3] DIN EN ISO 11357-3: Kunststoffe - Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC). Teil 3: Bestimmung der Schmelz- und Kristallisationstemperatur und der Schmelz- und Kristallisationsenthalpie, 2018
- [DIN 527-1] DIN EN ISO 527-1: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze, 2019

- [DIN 1183-1] DIN EN ISO 1183-1: Kunststoffe - Verfahren zur Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen. Teil 1: Eintauchverfahren, Verfahren mit Flüssigkeitspyknometer und Titrationsverfahren, 2019
- [DIN 1110] DIN EN ISO 1110: Kunststoffe - Polyamide - Beschleunigte Konditionierung von Probekörpern, 2019
- [DIN 8580] DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung, 2022
- [DHM22] DAHLMANN, R.; HABERSTROH, E.; MENGES, G.: Menges Werkstoffkunde Kunststoffe. Hanser, München, 7., vollständig neu bearbeitete Auflage, 2022
- [DIN 52900] DIN EN ISO/ ASTM 52900: Additive Fertigung – Grundlagen – Terminologie, 2022
- [DLB+12] DUPIN, S.; LAME, O.; BARRÈS, C.; CHARMEAU, J.-Y.: Microstructural origin of physical and mechanical properties of polyamide 12 processed by laser sintering. European Polymer Journal, Vol. 48, Iss. 9, 2012, p. 1611–1621
- [DLD15] DREXLER, M.; LEXOW, M.; DRUMMER, D.: Selective Laser Melting of Polymer Powder – Part Mechanics as Function of Exposure Speed. Physics Procedia, Vol. 78, 2015, p. 328–336
- [DPC+16] DEWULF, W.; PAVAN, M.; CRAEGHS, T.; KRUTH, J.-P.: Using X-ray computed tomography to improve the porosity level of polyamide-12 laser sintered parts. CIRP Annals, Vol. 65, Iss. 1, 2016, p. 205–208
- [DWD14] DRUMMER, D.; WUDY, K.; DREXLER, M.: Influence of Energy Input on Degradation Behavior of Plastic Components Manufactured by Selective Laser Melting. Physics Procedia, Vol. 56, 2014, p. 176–183
- [DY09] DOTCHEV, K.; YUSOFF, W.: Recycling of polyamide 12 based powders in the laser sintering process. Rapid Prototyping Journal, Vol. 15, Iss. 3, 2009, p. 192–203
- [Ehr04] EHRENSTEIN, G. W.: Thermal Analysis of Plastics: Theory and Practice, 2004
- [Ehr07] EHRENSTEIN, G. W.: Mit Kunststoffen konstruieren. Hanser, München, 3., Aufl., 2007
- [Ehr11] EHRENSTEIN, G. W.: Polymer-Werkstoffe - Struktur - Eigenschaften - Anwendung. Hanser, München, 3. Aufl., 2011
- [EOS15] EOS GmbH: Parameterblatt - Maschinen-, Software- und Materialparameter, 2015
- [EOS22a] EOS GmbH: Produktdatenblatt EOS P396, 2022
- [EOS22b] EOS GmbH: Produktdatenblatt PA2200 - Balance 1.0, 2022
- [EP07] EHRENSTEIN, G. W.; PONGRATZ, S.: Beständigkeit von Kunststoffen. Hanser, München, 2007
- [Evo22] Evonik Industries: Datenblatt VESTAKEEP 2000FP, 2022
- [Far23] Farsoon Technologies: Produktdatenblatt 252P Series, 2023
- [Flo11] FLOCK, D.: Wärmeleitungsfügen hybrider Kunststoff-Metall-Verbindungen. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen, RWTH Aachen, Aachen, 2011

- [Fri07] FRICK, T.: Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen. Dissertation, Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, 2007
- [FST14] FAHRENWALDT, H. J.; SCHULER, V.; TWRDEK, J.: Praxiswissen Schweißtechnik. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014
- [GDS+02] GORNET, T. J.; DAVIS, K. R.; STARR, T. L.; MULLOY, K. M.: Characterization of Selective Laser Sintering™ Materials to Determine Process Stability. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2002
- [Geb13] GEBHARDT, A.: Generative Fertigungsverfahren - Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion. Hanser, München, 4., neu bearb. und erw. Aufl., 2013
- [Geb16] GEBHARDT, A.: Additive Fertigungsverfahren. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, 2016
- [GKS19] GEBHARDT, A.; KESSLER, J.; SCHWARZ, A.: Produktgestaltung für die additive Fertigung. Hanser, München, 2019
- [GLG10] GRIESSBACH, S.; LACH, R.; GRELLMANN, W.: Structure–property correlations of laser sintered nylon 12 for dynamic dye testing of plastic parts. *Polymer Testing*, Vol. 29, Iss. 8, 2010, p. 1026–1030
- [Gro09] GROßMANN, J.: Einfluß von Plasmabehandlungen auf die Haftfestigkeit vakuumtechnisch hergestellter Polymer-Metall-Verbunde. Dissertation, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen-Nürnberg, 2009
- [GRS+20] GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B.; KHORASANI, M.: Additive Manufacturing Technologies. SPRINGER NATURE, [S.I.], 2020
- [GS97] GIBSON, I.; SHI, D.: Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. Vol. 3, No. 4, 1997, p. 129–136
- [GSD21] GREINER, S.; SCHLICHT, S.; DRUMMER, D.: Temperaturfeldhomogenisierung durch fraktale Belichtungsstrategien im Lasersintern von Kunststoffen. In: Kynast, M.; Eichmann, M.; Witt, G. (Ed.): *Rapid.Tech 3D digital – Understanding, Seeing, Experiencing - Proceedings of the 17th Rapid.Tech 3D Conference Erfurt, Germany*, Hanser, München, 2021
- [GTH12] GOODRIDGE, R. D.; TUCK, C. J.; HAGUE, R.: Laser sintering of polyamides and other polymers. *Progress in Materials Science*, Vol. 57, Iss. 2, 2012, p. 229–267
- [GWW+19] GREINER, S.; WUDY, K.; WÖRZ, A.; DRUMMER, D.: Thermographic investigation of laser-induced temperature fields in selective laser beam melting of polymers. *Optics & Laser Technology*, Vol. 109, 2019, p. 569–576
- [HBW17] HOFLAND, E. C.; BARAN, I.; WISMEIJER, D. A.: Correlation of Process Parameters with Mechanical Properties of Laser Sintered PA12 Parts. *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2017, 2017, p. 1–11
- [HDK18] HOSKINS, T. J.; DEARN, K. D.; KUKUREKA, S. N.: Mechanical performance of PEEK produced by additive manufacturing. *Polymer Testing*, Vol. 70, 2018, p. 511–519

- [HHY+13] HUSSEIN, A.; HAO, L.; YAN, C.; EVERSON, R.; YOUNG, P.: Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, Iss. 7, 2013, p. 1019–1026
- [HIN14] HARA, K.; ITAGAKI, Y.; NIINO, T.: Evaluation of selective laser sintering preheated under the recrystallization temperature. In: The Japan Society for Precision Engineering (Ed.): *Proceedings of the JSPE Spring Conference*, 2014
- [HLB+18] HEINL, M.; LAUMER, T.; BAYER, F.; HAUSOTTE, T.: Temperature-dependent optical material properties of polymer powders regarding in-situ measurement techniques in additive manufacturing. *Polymer Testing*, Vol. 71, 2018, p. 378–383
- [HOZ+22] HUMMEL, S.; OBERMEIER, K.; ZIER, K.; KROMMES, S.; SCHEMME, M.; KARLINGER, P.: Analysis of Mechanical Properties Related to Fiber Length of Closed-Loop-Recycled Offcuts of a Thermoplastic Fiber Composites (Organo Sheets). *Materials* (Basel, Switzerland), Vol. 15, Iss. 11, 2022
- [IN16] ITO, F.; NIINO, T.: Implementation of tophat profile laser into low temperature process of Poly Phenylene Sulfide. In: *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, 2016
- [JBA+12] JHABVALA, J.; BOILLAT, E.; ANDRÉ, C.; GLARDON, R.: An innovative method to build support structures with a pulsed laser in the selective laser melting process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 59, Iss. 1-4, 2012, p. 137–142
- [JLH+15] JOSUPEIT, S.; LOHN, J.; HERMANN, E.; GESSLER, M.; TENBRINK, S.; SCHMID, H.-J.: Material Properties of Laser Sintered Polyamide 12 as Function of Build Cycles using Low Refresh Rates. In: *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, 2015
- [Jos19] JOSUPEIT, S.: On the Influence of Thermal Histories within Part Cakes on the Polymer Laser Sintering Process. Dissertation, Universität Paderborn, Paderborn, 2019
- [JPR08] JAIN, P. K.; PANDEY, P. M.; RAO, P.: Experimental investigations for improving part strength in selective laser sintering. *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 3, Iss. 3, 2008, p. 177–188
- [JS17] JOSUPEIT, S.; SCHMID, H.-J.: Experimental analysis and modeling of local ageing effects during laser sintering of polyamide 12 in regard to individual thermal histories. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 134, Iss. 42, 2017, p. 45435
- [JXS18] JIANG, J.; XU, X.; STRINGER, J.: Support Structures for Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Vol. 2, Iss. 4, 2018, p. 64
- [Kad10] KADDAR, W.: Die generative Fertigung mittels Laser-Sintern: Scanstrategien, Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf die mechanischen und optischen Eigenschaften beim LS von Thermoplasten und deren Nachbearbeitungsmöglichkeiten. Dissertation, Fakultät für ingenieurwissenschaften, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, 2010
- [Käf19] KÄFER, S.: Pressemitteilung: 3D-Kunststoffdruck - Maschinen-Serie für das Lasersintern, 2019
- [Kai21] KAISER, W.: *Kunststoffchemie für Ingenieure - Von der Synthese bis zur Anwendung*. Hanser, München, 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, 2021

- [Kei06] KEIM, W.: Kunststoffe - Synthese, Herstellungsverfahren, Apparaturen. Wiley-VCH, Weinheim, 1. Aufl., 2006
- [KH03] KONG, Y.; HAY, J. N.: The enthalpy of fusion and degree of crystallinity of polymers as measured by DSC. European Polymer Journal, Vol. 39, Iss. 8, 2003, p. 1721–1727
- [Kle11] KLEIN, R.: Laser Welding of Plastics. Wiley, Weinheim, 2011
- [KLK+07] KRUTH, J.-P.; LEVY, G.; KLOCKE, F.; CHILDS, T.: Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. CIRP Annals, Vol. 56, Iss. 2, 2007, p. 730–759
- [KLS+08] KRUTH, J.-P.; LEVY, G. N.; SCHINDEL, R.; CRAEGHS, T.; YASA, E.: Consolidation of polymer powders by selective laser sintering. Materials Science, Vol. 2008, 2008
- [KMV+08] KRUTH, J.-P.; MERCELIS, P.; VAERENBERGH, J. VAN; CRAEGHS, T.: Feedback control of Selective Laser Melting. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Taylor & Francis, London, 2008
- [KN17] KIGURE, T.; NIINO, T.: Improvement of recycle rate in laser sintering by low temperature process. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2017
- [KS18] KUMMERT, C.; SCHMID, H.-J.: The influence of contour scanning parameters and strategy on selective laser sintering PA613 build part properties. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2018
- [Kum22] KUMMERT, C.: Über die thermischen und thermisch-oxidativen Einflüsse auf Lasersinter-Werkstoffe. Shaker, Vol. 26, Düren, 1. Auflage, 2022
- [KYN19] KIGURE, T.; YAMAUCHI, Y.; NIINO, T.: Relationship between powder bed temperature and microstructure of laser sintered PA12 parts. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2019
- [KYN21] KIGURE, T.; YAMAUCHI, Y.; NIINO, T.: Investigation into laser sintering of PEEK using commercially available low powder bed temperature machine. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2021
- [KYN22] KIGURE, T.; YAMAUCHI, Y.; NIINO, T.: Investigation into Effect of Beam Defocusing in Low Temperature Laser Sintering of PEEK. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2022
- [LDD17] LEXOW, M. M.; DREXLER, M.; DRUMMER, D.: Fundamental investigation of part properties at accelerated beam speeds in the selective laser sintering process. Rapid Prototyping Journal, Vol. 23, Iss. 6, 2017, p. 1099–1106
- [Leh16] Lehmann & Voss & Co.: Pressemitteilung: Additive Manufacturing - Kooperation zur Entwicklung eines neuen 3D-Druck-Verfahrens ThermoMELT, Hamburg, 2016
- [Lei12] LEIGH, D. K.: A comparison of polyamide 11 mechanical properties between laser sintering and traditional molding. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2012

- [LFL+22] LIU, B.; FANG, G.; LEI, L.; Liu, W.: Experimental and numerical exploration of defocusing in Laser Powder Bed Fusion (LPBF) as an effective processing parameter. *Optics & Laser Technology*, Vol. 149, 2022, p. 107846
- [LLZ21] LAMMERS, S.; LIENEKE, T.; ZIMMER, D.: Development of a Method to Derive Design Guidelines for Production-suitable Support Structures in Metal Laser Powder Bed Fusion. In: *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, 2021
- [LMS+19] LEARY, M.; MACONACHIE, T.; SARKER, A.; FARUQUE, O.; BRANDT, M.: Mechanical and thermal characterisation of AlSi10Mg SLM block support structures. *Materials & Design*, Vol. 183, 2019, p. 108138
- [Loh19] LOHN, J.: Zum Laserstrahlschmelzen neuer Kunststoffmaterialien - Anlagen- und Methodenentwicklung mit besonderer Berücksichtigung des Energieeintrags. Dissertation, Universität Paderborn, Paderborn, 2019
- [LS17] LOHN, J.; SCHMID, H.-J.: Aufbau einer Lasersinter-Versuchsanlage und Verarbeitung neuer Materialien am Beispiel von Polyamid 6 und Polyamid 613. In: Kynast, M.; Eichmann, M.; Witt, G. (Ed.): *Rapid.Tech – International trade show & conference for additive manufacturing - Proceedings of the 14th Rapid.Tech Conference Erfurt, Germany*, Hanser, München, 2017
- [LSA+15] LAUMER, T.; STICHEL, T.; AMEND, P.; SCHMIDT, M.: Simultaneous laser beam melting of multimaterial polymer parts. *Journal of Laser Applications*, Vol. 27, Iss. S2, 2015, p. S29204
- [LSB+15] LAUMER, T.; STICHEL, T.; BOCK, T.; AMEND, P.; SCHMIDT, M.: Characterization of temperature-dependent optical material properties of polymer powders. In: *Proceedings of PPS-30: The 30th International Conference of the Polymer Processing Society – Conference Papers*, 2014, Cleveland, Ohio, USA, AIP Publishing LLC, 2015
- [LSN+16] LAUMER, T.; STICHEL, T.; NAGULIN, K.; SCHMIDT, M.: Optical analysis of polymer powder materials for Selective Laser Sintering. *Polymer Testing*, Vol. 56, 2016, p. 207–213
- [LWD+14] LAUMER, T.; WUDY, K.; DREXLER, M.; AMEND, P.; ROTH, S.; DRUMMER, D.; SCHMIDT, M.: Fundamental investigation of laser beam melting of polymers for additive manufacture. *Journal of Laser Applications*, Vol. 26, Iss. 4, 2014, p. 42003
- [LWL99] LEVCHIK, S. V.; WEIL, E. D.; LEWIN, M.: Thermal decomposition of aliphatic nylons. *Polymer International*, Vol. 48, Iss. 7, 1999, p. 532–557
- [LWW+19] LING, Z.; WU, J.; WANG, X.; LI, X.; ZHENG, J.: Experimental study on the variance of mechanical properties of polyamide 6 during multi-layer sintering process in selective laser sintering. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 101, Iss. 5-8, 2019, p. 1227–1234
- [MH11] MAJEWSKI, C.; HOPKINSON, N.: Effect of section thickness and build orientation on tensile properties and material characteristics of laser sintered nylon-12 parts. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 17, Iss. 3, 2011, p. 176–180
- [Mon22] MONEKE, M.: *Kunststoffwerkstoffe - Fachbuch für Lehre und Praxis*. Hanser, Carl, München, 1. Auflage, 2022
- [MP60] MÜLLER, A.; PFLÜGER, R.: *Kunststoffe*, 1960

- [MS21] MENGE, D.; SCHMID, H.-J.: Low Temperature Laser Sintering on a Standard System: First Attempts and Results with PA12. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2021
- [MZH08] MAJEWSKI, C.; ZARRINGHALAM, H.; HOPKINSON, N.: Effect of the degree of particle melt on mechanical properties in selective laser-sintered Nylon-12 parts. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 222, Iss. 9, 2008, p. 1055–1064
- [Nel93] NELSON, J. C.: Selective laser sintering: A definition of the process and an empirical sintering model. Dissertation, University of Texas, Austin, TX, 1993
- [NHI+11] NIINO, T.; HARAGUCHI, H.; ITAGAKI, Y.; IGUCHI, S.; HAGIWARA, M.: Feasibility study on plastic laser sintering without powder bed preheating. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2011
- [NHI+12] NIINO, T.; HARAGUCHI, H.; ITAGAKI, Y.; HARA, K.; MORITA, S.: Microstructural Observation and Mechanical Property Evaluation of Plastic Parts Obtained by Preheat Free Laser Sintering. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2012
- [NU15] NIINO, T.; UEHARA, T.: Low temperature selective laser melting of high temperature plastic powder. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2015
- [OFA+16] OKUNKOVA, A.; FEDOROV, V.; ANDREY GUSAROV, S.; VOLOSOVA, M.; PERETYAGIN, P.; ZHIRNOV, I.; PODRABINNIK, P.: Study Of Laser Beam Modulation Influence On Structure Of Materials Produced By Additive Manufacturing. Advanced Materials Letters, Vol. 7, Iss. 2, 2016, p. 111–115
- [Pot04] POTENTE, H.: Fügen von Kunststoffen - Grundlagen, Verfahren, Anwendung ; mit 31 Tabellen. Hanser, München, Wien, 2004
- [PVB+10] PILIPOVIC, A.; VALENTAN, B.; BRAJLIH, T.; HARAMINA, T.; BALIC, J.; KODVANJ, J.; SERCER, M.; DRSTVENSEK, I.: Influence of laser sintering parameters on mechanical properties of polymer products. In: DAAM International (Ed.): Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium, Wien, Österreich, 2010
- [PZB+01] PLUMMER, C. J. G.; ZANETTO, J.-E.; BOURBAN, P.-E.; MÅNSON, J.-A. E.: The crystallization kinetics of polyamide-12. Colloid & Polymer Science, Vol. 279, Iss. 4, 2001, p. 312–322
- [RDK+11] RIETZEL, D.; DREXLER, M.; KÜHNLEIN, F.; DRUMMER, D.: Influence of temperature fields on the processing of polymer powders by means of laser and mask sintering technology. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2011
- [RH14] ROUHOLAMIN, D.; HOPKINSON, N.: An investigation on the suitability of micro-computed tomography as a non-destructive technique to assess the morphology of laser sintered nylon 12 parts. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 228, Iss. 12, 2014, p. 1529–1542
- [RKD09] RIETZEL, D.; KÜHNLEIN, F.; DRUMMER, D.: Selektives Lasersintern von teilkristallinen Thermoplasten. RTeJournal - Fachforum für Rapid Technologie, 2009

- [RKP+23] RÜTHER, M.; KLIPPSTEIN, S. H.; PONUSAMY, S.; RÜTHER, T.; SCHMID, H.-J.: Flowability of polymer powders at elevated temperatures for additive manufacturing. *Powder Technology*, 2023, p. 118460
- [RSH+12] RÜSENBERG, S.; SCHMIDT, L.; HOSSE, H.; SCHMID, H.: Porosity as a key to increase material properties of laser sintered parts. In: Bártoł, P.; Lemos, A. de; Tojeira, A.; Pereira, A.; Mateus, A.; Mendes, A.; dos Santos, C.; Freitas, D.; Bártoł, H.; Almeida, H.; dos Reis, I.; Dias, J.; Domingos, M.; Alves, N.; Pereira, R.; Patrício, T.; Ferreira, T. (Ed.): *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping*, CRC Press, 2012
- [Rüs15] RÜSENBERG, S.: Prozessqualifizierung zur verlässlichen Herstellung von Produkten im Polymer Lasersinterverfahren. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Paderborn, 2015
- [SAW14] SCHMID, M.; AMADO, A.; WEGENER, K.: Materials perspective of polymers for additive manufacturing with selective laser sintering. *Journal of Material Research*, Iss. Vol. 29, No. 17, 2014, p. 1824–1832
- [Sch09] SCHICK, C.: Differential scanning calorimetry (DSC) of semicrystalline polymers. *Analytical and bioanalytical chemistry*, Vol. 395, Iss. 6, 2009, p. 1589–1611
- [Sch22] SCHMID, M.: *Lasersintern (LS) mit Kunststoffen - Technologie, Prozesse und Werkstoffe*. Hanser, Carl, München, 2. Auflage, 2022
- [SFL+17] STICHEL, T.; FRICK, T.; LAUMER, T.; TENNER, F.; HAUSOTTE, T.; MERKLEIN, M.; SCHMIDT, M.: A Round Robin study for Selective Laser Sintering of polyamide 12: Microstructural origin of the mechanical properties. *Optics & Laser Technology*, Vol. 89, 2017, p. 31–40
- [SGD22] SCHLICHT, S.; GREINER, S.; DRUMMER, D.: Low Temperature Powder Bed Fusion of Polymers by Means of Fractal Quasi-Simultaneous Exposure Strategies. *Polymers*, Vol. 14, Iss. 7, 2022
- [SGU11] STARR, T. L.; GORNET, T.; USHER, J. S.: The effect of process conditions on mechanical properties of laser-sintered nylon. *Rapid Prototyping Journal*, Iss. 17, 2011, p. 418–423
- [SHE+13] STRANO, G.; HAO, L.; EVERSON, R. M.; EVANS, K. E.: A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, Iss. 9-12, 2013, p. 1247–1254
- [SLS+04] SHI, Y.; LI, Z.; SUN, H.; HUANG, S.; ZENG, F.: Effect of the properties of the polymer materials on the quality of selective laser sintering parts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, Vol. 218, Iss. 3, 2004, p. 247–252
- [Sma19] SmarTech Analysis: 2020 Additive Manufacturing Market Outlook and Summary of Opportunities, 2019
- [SMB+17] SCHMIDT, M.; MERKLEIN, M.; BOURELL, D.; DIMITROV, D.; HAUSOTTE, T.; WEGENER, K.; OVERMEYER, L.; VOLLERTSEN, F.; LEVY, G. N.: Laser based additive manufacturing in industry and academia. *CIRP Annals*, Vol. 66, Iss. 2, 2017, p. 561–583

- [SSS12] SINGH, S.; SHARMA, V. S.; SACHDEVA, A.: Optimization and Analysis of Shrinkage in Selective Laser Sintered Polyamide Parts. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 27, Iss. 6, 2012, p. 707–714
- [Str21] STRAETEN, K. VAN DER: *Laserbasiertes Fügen von Kunststoff-Metall-Hybridverbindungen mittels selbstorganisierter Mikrostrukturen*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2021
- [TC01] TONTOWI, A. E.; CHILDS, T.: Density prediction of crystalline polymer sintered parts at various powder bed temperatures. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 7, Iss. 3, 2001, p. 180–184
- [TKM+00] TOLOCHKO, N. K.; KHLOPKOV, Y. V.; MOZZHAROV, S. E.; IGNATIEV, M. B.; LAOUI, T.; TITOV, V. I.: Absorptance of powder materials suitable for laser sintering. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 6, Iss. 3, 2000, p. 155–161
- [TMH+16] TÖPPEL, T.; MÜLLER, B.; HOEREN, K.; WITT, G.: Residual stresses and distortion during additive fabrication by means of laser beam melting. *Schweißen und Schneiden*, Vol. 2016, 2016, p. 176–186
- [TZZ20] TAN, L. J.; ZHU, W.; ZHOU, K.: Recent Progress on Polymer Materials for Additive Manufacturing. *Advanced Functional Materials*, Iss. 30, 2020
- [VDv+16] VERBELEN, L.; DADBAKHSH, S.; VAN DEN EYNDE, M.; KRUTH, J.-P.; GODERIS, B.; VAN PUYVELDE, P.: Characterization of polyamide powders for determination of laser sintering processability. *European Polymer Journal*, Vol. 75, 2016, p. 163–174
- [VDI 3405] VDI 3405: Additive Fertigungsverfahren - Grundlagen, Verfahren, Verfahrensbeschreibungen, 2014
- [VDI 3405-1.1] VDI 3405: Additive Fertigungsverfahren - Blatt 1.1: Laser Sintern von Kunststoffbauteilen: Materialqualifizierung, 2018
- [VDI 3405-1] VDI 3405: Additive Fertigungsverfahren - Blatt 1: Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen - Güteüberwachung, 2019
- [VHH13] VASQUEZ, M.; HAWORTH, B.; HOPKINSON, N.: Methods for quantifying the stable sintering region in laser sintered polyamide-12. *Polymer Engineering & Science*, Vol. 53, Iss. 6, 2013, p. 1230–1240
- [VKK+19] VOCK, S.; KLÖDEN, B.; KIRCHNER, A.; WEißGÄRBER, T.; KIEBACK, B.: Powders for powder bed fusion: a review. *Progress in Additive Manufacturing*, Vol. 4, Iss. 4, 2019, p. 383–397
- [VMH+14] VASQUEZ, G. M.; MAJEWSKI, C. E.; HAWORTH, B.; HOPKINSON, N.: A targeted material selection process for polymers in laser sintering. *Additive Manufacturing*, Vol. 1-4, 2014, p. 127–138
- [VSM17] VOYIADJIS, G. Z.; SAMADI-DOKKI, A.; MALEKMOTIEI, L.: Nanoindentation of high performance semi-crystalline polymers: A case study on PEEK. *Polymer Testing*, Vol. 61, 2017, p. 57–64
- [WCD+18] WOHLERS, T.; CAMPBELL, I.; DIEGEL, O.; KOWEN, J.: Wohlers report 2018 - 3D printing and additive manufacturing state of the industry : annual worldwide progress report. Wohlers Associates, Fort Collins (Colo.), 2018

- [WD16] WUDY, K.; DRUMMER, D.: Aging Behavior of Polyamide 12: Interrelation Between Bulk Characteristics and Part Properties. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2016
- [WDK+14] WUDY, K.; DRUMMER, D.; KÜHNLEIN, F.; DREXLER, M.: Influence of degradation behavior of polyamide 12 powders in laser sintering process on produced parts. In: Proceedings of PPS-29: The 29th International Conference of the Polymer Processing Society - Conference Papers, 2013, Nuremberg, Germany, 2014
- [WDL+18] WUDY, K.; DREXLER, M.; LANZL, L.; DRUMMER, D.: Analysis of time dependent thermal properties for high rates in selective laser sintering. *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 24, Iss. 5, 2018, p. 894–900
- [Weg15] WEGNER, A.: Theorie über die Fortführung von Aufschmelzvorgängen als Grundvoraussetzung für eine robuste Prozessführung beim Laser-Sintern von Thermoplasten. Dissertation, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, 2015
- [WW12] WEGNER, A.; WITT, G.: Betrachtung zur Pulvernutzungsdauer beim Laser- Sintern und Einfluss der Prozessführung auf die Entstehung von Ausschussbauteilen. *RTeJournal - Fachforum für Rapid Technologie*, Iss. 9, 2012
- [WW13] WEGNER, A.; WITT, G.: Ursachen für eine mangelnde Reproduzierbarkeit beim Laser Sintern von Kunststoffbauteilen. *RTeJournal - Fachforum für Rapid Technologie*, Iss. 1, 2013
- [WW15] WEGNER, A.; WITT, G.: Understanding the decisive thermal processes in laser sintering of polyamide 12. In: Proceedings of PPS-30: The 30th International Conference of the Polymer Processing Society – Conference Papers, 2014, Cleveland, Ohio, USA, 2015
- [WW19] WEGNER, A.; WITT, G.: Adjustment of isotropic part properties in laser sintering based on adapted double laser exposure strategies. *Optics & Laser Technology*, Vol. 109, 2019, p. 381–388
- [YKI+21] YAMAUCHI, Y.; KIGURE, T.; ISODA, K.; NIINO, T.: Powder bed penetration depth control in laser sintering and effect on depth of fusion. *Additive Manufacturing*, Vol. 46, 2021, p. 102219
- [YKN16] YAMAUCHI, Y.; KIGURE, T.; NIINO, T.: Low temperature laser sintering of PA powder using fiber laser. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2016
- [YNK17] YAMAUCHI, Y.; NIINO, T.; KIGURE, T.: Influence of process time and geometry on part quality of low temperature laser sintering. In: Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, TX, 2017
- [Zar07] ZARRINGHALAM, H.: Investigation into Crystallinity and Degree of Particle Melt in Selective Laser Sintering. Dissertation, Loughborough University, Loughborough, 2007
- [ZHK+06] ZARRINGHALAM, H.; HOPKINSON, N.; KAMPERMAN, N. F.; VLIEGER, J. J. DE: Effects of processing on microstructure and properties of SLS Nylon 12. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 435-436, 2006, p. 172–180
- [ZWD18] ZHAO, M.; WUDY, K.; DRUMMER, D.: Crystallization Kinetics of Polyamide 12 during Selective Laser Sintering. *Polymers*, Vol. 10, Iss. 2, 2018

- [ZYS+15] ZHU, W.; YAN, C.; SHI, Y.; WEN, S.; LIU, J.; SHI, Y.: Investigation into mechanical and microstructural properties of polypropylene manufactured by selective laser sintering in comparison with injection molding counterparts. *Materials & Design*, Vol. 82, 2015, p. 37–45

Studentische Arbeiten

Die nachstehend aufgeführten studentischen Arbeiten wurden im Kontext der vorliegenden Dissertation am Lehrstuhl für Partikelverfahrenstechnik der Universität Paderborn angefertigt. Die Definition der Zielsetzung, die Bearbeitung sowie die Auswertung, Interpretation und Visualisierung von Ergebnissen erfolgten unter wissenschaftlicher Anleitung des Betreuers Dennis Menge. Die erzielten Ergebnisse sind zum Teil in die Dissertation eingeflossen.

- [Erl19] ERLEMEIER, T.; MENGE, D. (Betreuer): Voruntersuchungen zum Niedrigtemperatur-Lasersintern auf einer EOS-Anlage, Unveröffentlichte Projektarbeit, Universität Paderborn, Paderborn, 2019
- [Rad21] RADKE, H.; MENGE, D. (Betreuer): Entwicklung von Prozessparametern für das Niedrigtemperatur-Lasersintern am Beispiel von Polyamid 12, Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Universität Paderborn, Paderborn, 2021
- [Nei21] NEITZEL, F.; MENGE, D. (Betreuer): Materialqualifizierung von Polyamid 6 auf einer experimentellen Lasersinter-Anlage, Unveröffentlichte Masterarbeit, Universität Paderborn, Paderborn, 2021
- [Flo22] FLOTTMEYER, J.; MENGE, D. (Betreuer): Entwicklung von Stützstrukturen und Belichtungsstrategien für das Niedrigtemperatur-Lasersintern von PA 12, Unveröffentlichte Masterarbeit, Universität Paderborn, Paderborn, 2022
- [Fri22] FRIEDLA, C.; MENGE, D. (Betreuer): Untersuchungen der Kristallinität von PA12 und PA6 im Niedrigtemperatur-Lasersintern, Unveröffentlichte Projektarbeit, Universität Paderborn, Paderborn, 2022

Erklärung zur Zitation von Inhalten aus studentischen Arbeiten

In Ergänzung zu meinem Antrag auf Zulassung zur Promotion in der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn erkläre ich gemäß §11 der Promotionsordnung und unter Beachtung der Regelung zur Zitation studentischer Arbeiten:

Die von mir vorgelegte Dissertation habe ich selbstständig verfasst, und ich habe keine anderen als die dort angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Es sind Inhalte studentischen Ursprungs (studentische Arbeiten) in dieser Dissertation enthalten.

Ich habe die verwendeten Arbeiten entsprechend der Regelung „Zitation aus studentischen Arbeiten in Dissertationen“ zitiert.

Paderborn, 23.01.2024

9 Anhang

A1 Anhang Kapitel 5

Tabelle A 1: Vollfaktorieller Versuchsplan der Vorstudie zu Belichtungsparametern für PA12 (Kapitel 5.4)

Nr.	Laserleistung / W	Scangeschwindigkeit / mm/s	Hatchabstand / mm	Flächenenergiedichte / J/mm ²
1	60	5000	0,16	0,0750
2	60	5000	0,14	0,0857
3	60	5000	0,12	0,1000
4	60	5000	0,1	0,1200
5	60	4000	0,16	0,0938
6	60	4000	0,14	0,1071
7	60	4000	0,12	0,1250
8	60	4000	0,1	0,1500
9	60	3500	0,16	0,1071
10	60	3500	0,14	0,1224
11	60	3500	0,12	0,1429
12	60	3500	0,1	0,1714
13	60	3000	0,16	0,1250
14	60	3000	0,14	0,1429
15	60	3000	0,12	0,1667
16	60	3000	0,1	0,2000
17	50	5000	0,16	0,0625
18	50	5000	0,14	0,0714
19	50	5000	0,12	0,0833
20	50	5000	0,1	0,1000
21	50	4000	0,16	0,0781
22	50	4000	0,14	0,0893
23	50	4000	0,12	0,1042
24	50	4000	0,1	0,1250
25	50	3500	0,16	0,0893
26	50	3500	0,14	0,1020
27	50	3500	0,12	0,1190
28	50	3500	0,1	0,1429
29	50	3000	0,16	0,1042
30	50	3000	0,14	0,1190
31	50	3000	0,12	0,1389
32	50	3000	0,1	0,1667

33	45	5000	0,16	0,0563
34	45	5000	0,14	0,0643
35	45	5000	0,12	0,0750
36	45	5000	0,1	0,0900
37	45	4000	0,16	0,0703
38	45	4000	0,14	0,0804
39	45	4000	0,12	0,0938
40	45	4000	0,1	0,1125
41	45	3500	0,16	0,0804
42	45	3500	0,14	0,0918
43	45	3500	0,12	0,1071
44	45	3500	0,1	0,1286
45	45	3000	0,16	0,0938
46	45	3000	0,14	0,1071
47	45	3000	0,12	0,1250
48	45	3000	0,1	0,1500
49	40	5000	0,16	0,0500
50	40	5000	0,14	0,0571
51	40	5000	0,12	0,0667
52	40	5000	0,1	0,0800
53	40	4000	0,16	0,0625
54	40	4000	0,14	0,0714
55	40	4000	0,12	0,0833
56	40	4000	0,1	0,1000
57	40	3500	0,16	0,0714
58	40	3500	0,14	0,0816
59	40	3500	0,12	0,0952
60	40	3500	0,1	0,1143
61	40	3000	0,16	0,0833
62	40	3000	0,14	0,0952
63	40	3000	0,12	0,1111
64	40	3000	0,1	0,1333

* graue hinterlegte Parameterkombinationen des Versuchsplans weisen eine Flächenenergiedichte größer als 0,119 J/mm² auf und werden daher nicht untersucht

Tabelle A 2: Untersuchte Parameter-Kombinationen für Blocksupport (Kapitel 5.5.2)

Nr.	Wanddicke / mm	Eindringtiefe / mm	Zahnhöhe / mm	Basislänge / mm	Toplänge / mm	Zahnabstand / mm
0	0,6	0	2	2	0,6	0,2
1	0,5	0	2	2	0,6	0,2
2	1	0	2	2	0,6	0,2
3	1,5	0	2	2	0,6	0,2
4	2	0	2	2	0,6	0,2
5	1	0,25	2	2	0,6	0,2
6	1	0,5	2	2	0,6	0,2
7	1	0,75	2	2	0,6	0,2
8	1	0	1	2	0,6	0,2
9	1	0	1,5	2	0,6	0,2
10	1	0	2	2	0,6	0,2
11	1	0	3	2	0,6	0,2
12	1	0	4	2	0,6	0,2
13	1	0	2	1	0,6	0,2
14	1	0	2	1,5	0,6	0,2
15	1	0	2	3	0,6	0,2
16	1	0	2	2	1	0,2
17	1	0	2	2	1,5	0,2
18	1	0	2	4	0,6	0,2
19	1	0	2	4	1	0,2
20	1	0	2	6	0,6	0,2
21	1	0	2	6	1	0,2
22	1	0	2	6	1,5	0,2
23	1	0	2	2	0,6	0,6
24	1	0	2	2	0,6	1
25	1	0	2	2	0,6	1,5

Tabelle A 3: Untersuchte Parameter-Kombinationen für Kegelsupport (Kapitel 5.5.2)

Nr.	Radius 1 (Bauteil) / mm	Radius 2 (Plattform) / mm	Kegelabstand / mm	Kegelhöhe / mm	Eindringtiefe / mm
1	0,3	0,5	2	2	0
2	0,3	0,75	2	2	0
3	0,5	1	2	2	0
4	0,6	1,5	2	2	0
5	0,5	1	1,5	2	0
6	0,5	1	3	2	0
7	0,5	1	1	2	0
8	0,5	1	2	1,5	0
9	0,5	1	2	2,5	0
10	0,5	1	2	3	0
11	0,5	1	2	4	0
12	0,5	1	2	2	0,25
13	0,5	1	2	2	0,5
14	0,5	1	2	2	0,75

Tabelle A 4: Versuchsplan zu Einschichtprüfkörpern von PA12 (Kapitel 5.6.1)

Parameterset	Belichtungsanzahl	Laserleistung / W	Scangeschwindigkeit / mm/s	Energiedichte / J/mm ²	Einfach	Gesamt
1	5	40	5000	0,04	0,2	
2	6	40	5000	0,04	0,24	
3	4	50	5000	0,05	0,2	
4	5	50	5000	0,05	0,25	
5	6	50	5000	0,05	0,3	
6	3	50	4000	0,0625	0,1875	
7	4	50	4000	0,0625	0,25	
8	5	50	4000	0,0625	0,3125	
9	6	50	4000	0,0625	0,375	
10	3	50	3500	0,0714	0,2143	
11	4	50	3500	0,0714	0,2857	
12	5	50	3500	0,0714	0,3571	
13	6	50	3500	0,0714	0,4286	
14	3	50	3000	0,0833	0,25	
15	4	50	3000	0,0833	0,3333	
16	5	50	3000	0,0833	0,4167	
17	2	50	2500	0,1	0,2	
18	3	50	2500	0,1	0,3	
19	4	50	2500	0,1	0,4	
20	5	50	2500	0,1	0,5	

* Hatchabstand konstant mit 0,2 mm

Tabelle A 5: Untersuchte Parametersets zu PA12 in XYZ-Orientierung (Kap. 5.6.3.1, 5.6.4, 5.6.5)

Parameter-set Nr.	Schicht-dicke / μm	Bauraum-tempera-tur / °C	Laserleis-tung / W	Scange-schwin-gigkeit / mm/s	Belich-tungsan-zahl	Flächen-energie-dichte / J/mm ²	Gesamt-energie-dichte / J/mm ²	Schicht-zeit / s
1	120	80	40	5000	3	0,04	0,12	26
5	120	80	40	5000	4	0,04	0,16	31
6	120	80	40	5000	5	0,04	0,2	31
7	120	80	50	3500	3	0,0714	0,2143	28
8	120	80	50	4000	3	0,0625	0,1875	25,5
9	120	80	50	4000	4	0,0625	0,25	34
10	120	80	50	4000	5	0,0625	0,3125	42,5
12	120	80	50	5000	5	0,05	0,25	35,5
13	120	80	50	5000	5	0,05	0,25	42,5
14 (MW aus 12,13)	120	80	50	5000	5	0,05	0,25	39
15	120	80	45	3600	4	0,0625	0,25	37
16	120	80	50	4000	4	0,0625	0,25	34
17	120	80	50	4000	4	0,0625	0,25	34
18 (MW aus 9,16,17)	120	80	50	4000	4	0,0625	0,25	34
19	120	80	50	4000	5	0,0625	0,3125	42,5
22	120	80	50	4000	5	0,0625	0,3125	42,5
23 (MW aus 10,19,22)	120	80	50	4000	5	0,0625	0,3125	42,5
24	120	80	50	4000	5	0,0625	0,3125	42
25	120	80	50	4000	5	0,0625	0,3125	21,5
26	120	80	50	4000	5	0,0625	0,3125	42
27	120	80	25	2000	5	0,0625	0,3125	39,5
28	120	80	25	2000	5	0,0625	0,3125	76
29	120	80	50	4000	5	0,0625	0,3125	83
30	100	80	50	4000	5	0,0625	0,3125	40
31	100	80	25	2000	5	0,0625	0,3125	40
32	120	40	50	4000	5	0,0625	0,3125	22
33	120	40	25	2000	5	0,0625	0,3125	39
34	120	50	50	4000	5	0,0625	0,3125	22,5
35	120	50	25	2000	5	0,0625	0,3125	39
36	120	100	50	4000	5	0,0625	0,3125	59
37	120	100	25	2000	5	0,0625	0,3125	59

* Hatchabstand konstant mit 0,2 mm

Tabelle A 6: Untersuchte Parametersets zu PA12 in ZXY-Orientierung (Kap.5.6.3.2, 5.6.4, 5.6.5)

Parame- meter- set Nr.	Schicht- dicke / µm	Bau- raum- tempera- tur / °C	Hatchabstand / mm	Laser- leis- tung / W	Scange- schwin- digkeit / mm/s	Belich- tungs- anzahl	Flächen- energie- dichte / J/mm²	Gesamt- energie- dichte / J/mm²	Schicht- zeit / s
1	120	80	0,2	40	5000	3	0,04	0,12	2,5
1a	120	80	0,2	40	5000	4	0,04	0,16	2,5
1b	120	80	0,2	40	5000	5	0,04	0,2	2,5
2	120	80	0,2	40	5000	3	0,04	0,12	2,5
3	120	80	0,2	50	3500	3	0,071	0,2143	2,5
4	120	80	0,2	50	4000	3	0,0625	0,1875	2,5
5	120	80	0,2	50	4000	4	0,0625	0,25	2,5
6	120	80	0,2	50	4000	5	0,0625	0,3125	2,5
7	120	80	0,2	50	5000	5	0,05	0,25	2,5
8	120	80	0,2	50	5000	5	0,05	0,25	2,5
9	120	80	0,2	50	5000	5	0,05	0,25	2,5
10	120	80	0,2	45	3600	4	0,0625	0,25	2,5
11	120	80	0,2	50	4000	4	0,0625	0,25	34
12	120	80	0,2	50	4000	4	0,0625	0,25	30,5
13	120	80	0,2	50	4000	5	0,0625	0,3125	42
15	120	80	0,2	50	4000	5	0,0625	0,3125	42
16	120	80	0,2	50	4000	5	0,0625	0,3125	38
17	120	80	0,2	50	4000	5	0,0625	0,3125	19,5
18	120	80	0,2	50	4000	5	0,0625	0,3125	3
19	120	80	0,2	25	2000	5	0,0625	0,3125	3
20	120	80	0,2	25	2000	5	0,0625	0,3125	20,5
21	120	80	0,2	25	2000	5	0,0625	0,3125	39,5
22	100	80	0,2	14	1000	5	0,07	0,35	20
23	100	80	0,2	10	500	5	0,1	0,5	20
24	100	80	0,2	50	4000	5	0,0625	0,3125	20
25	100	80	0,3	50	2666,67	5	0,0625	0,3125	20
26	100	80	0,15	14	1333,33	5	0,07	0,35	20
27	100	80	0,2	25	2000	5	0,0625	0,3125	20
28	120	50	0,2	50	3600	5	0,0694	0,3472	20,5
29	120	50	0,2	25	1800	5	0,0694	0,3472	20,5
30	120	50	0,2	14	900	5	0,0778	0,3889	20,5
31	120	50	0,2	10	500	5	0,1	0,5	20,5
32	120	50	0,3	50	2666,67	5	0,0625	0,3125	20,5
33	120	50	0,15	14	1333,33	5	0,07	0,35	20,5
34	120	100	0,2	50	4000	5	0,0625	0,3125	20

35	120	100	0,2	25	2000	5	0,0625	0,3125	20
36	120	100	0,2	50	4000	5	0,0625	0,3125	20,5
37	120	100	0,2	25	2000	5	0,0625	0,3125	20,5
38	120	100	0,2	14	1000	5	0,07	0,35	20,5
39	120	100	0,2	10	500	5	0,1	0,5	20,5
40	120	100	0,3	50	2666,67	5	0,0625	0,3125	20,5
41	120	100	0,15	14	1333,33	5	0,07	0,35	20,5
42	120	80	0,2	50	4000	5	0,0625	0,3125	28
43	120	80	0,2	25	2000	5	0,0625	0,3125	28
44	120	80	0,2	12,5	1000	5	0,0625	0,3125	28
45	120	80	0,2	50	4000	3	0,0625	0,1875	28
46	120	80	0,2	25	2000	3	0,0625	0,1875	28
47	120	80	0,2	12,5	1000	3	0,0625	0,1875	28
48	120	80	0,2	14	1000	5	0,07	0,35	20,5
49	120	80	0,2	7	500	5	0,07	0,35	20,5
50	120	80	0,2	14	1000	3	0,07	0,21	20,5
51	120	80	0,2	7	500	3	0,07	0,21	20,5
52	120	80	0,2	10	500	5	0,1	0,5	19,5
53	120	80	0,2	6	250	5	0,12	0,6	19,5
54	120	80	0,2 (xy-Doppel)	40	4000	3	0,05	0,15	22,5
55	120	80	0,2 (xy-Doppel)	20	2000	3	0,02	0,06	22,5
56	120	80	0,2	10	500	3	0,1	0,3	22,5
57	120	80	0,2 (xy-Doppel)	40	4000	2	0,05	0,1	22,5
58	120	80	0,2 (xy-Doppel)	20	2000	2	0,05	0,1	22,5
59	120	80	0,2	6	250	3	0,12	0,36	22,5
60	120	80	0,3	50	2666,67	5	0,0625	0,3125	22
61	120	80	0,3	25	1333,33	5	0,0625	0,3125	22
62	120	80	0,3	14	666,67	5	0,07	0,35	22
63	120	80	0,15	50	5333,33	5	0,0625	0,3125	22
64	120	80	0,15	25	2666,67	5	0,0625	0,3125	22
65	120	80	0,15	14	1333,33	5	0,07	0,35	22

* xy-Doppel: Belichtung im Raster in x- und y-Richtung je Schicht (Doppelbelichtung)

A2 Anhang Kapitel 6

Tabelle A 7: Untersuchte Parametersets zu PA6 in XYZ-Orientierung (Kap. 6.2, Bild 6-1)

Parameterset	Laserleistung / W	Scangeschwindigkeit / mm/s	Hatchabstand / mm	Flächenenergiedichte / J/mm ²
1	25	6000	0,3	13,89
2	25	4500	0,3	18,52
3	25	3000	0,3	27,78
4	32,5	6000	0,3	18,06
5	32,5	5500	0,3	19,7
6	32,5	4500	0,3	24,07
7	32,5	3000	0,3	36,11
8	40	6000	0,3	22,22
9	40	5000	0,3	26,67
10	40	4000	0,3	33,33

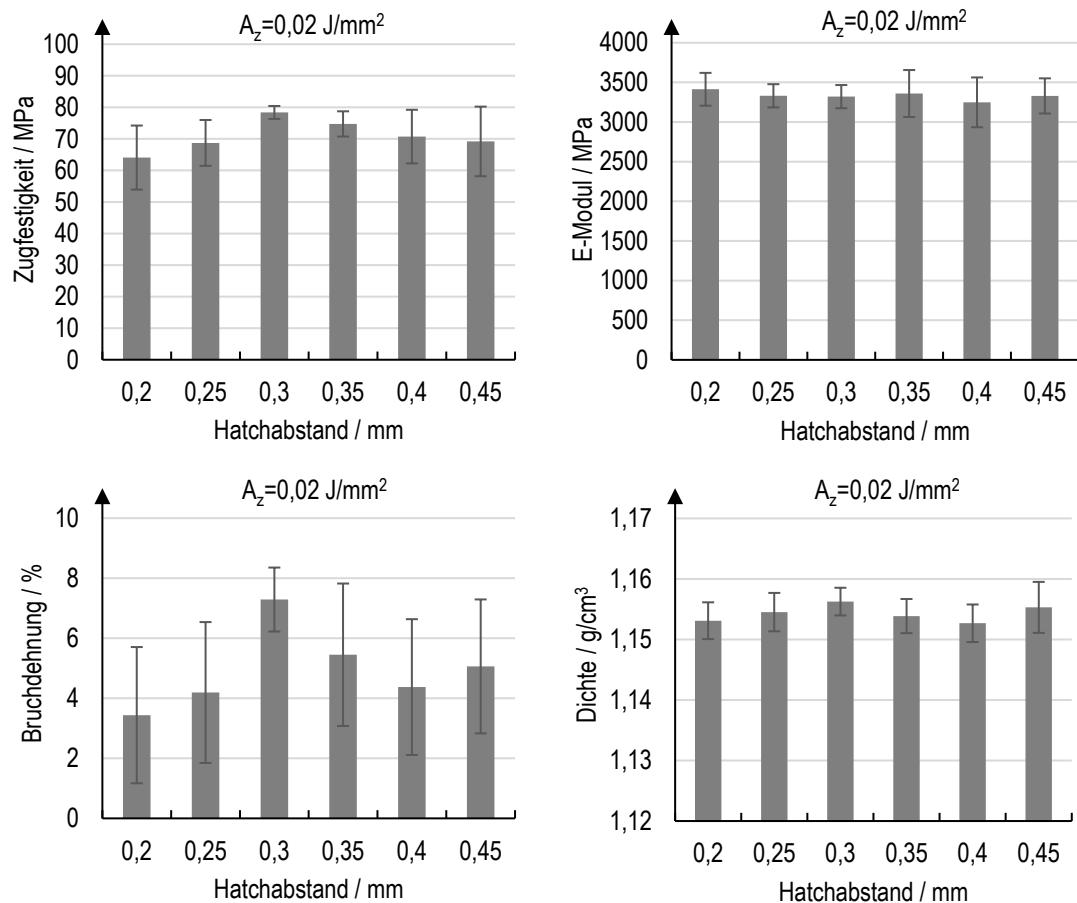


Bild A 1: Mechanische Eigenschaften und Dichte in Abhängigkeit des Hatchabstands bei konstanter Flächenenergiedichte für konventionelles LS mit PA6 in XYZ-Orientierung (Kapitel 6.2)