

**Analyse der Potenziale von Nachbehandlungsmethoden zur Reduktion prozessin-
härenter Oberflächenrauheiten von PBF-LB/P und MEX gefertigten Bauteilen so-
wie Untersuchung der Auswirkungen auf mechanische Eigenschaften**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

einer

Doktorin der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Livia Carmen Wiedau, M. Eng.

aus

Aachen

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Gerd Witt

Prof. Dr.-Ing. Frank Döpfer

Tag der mündlichen Prüfung 19.11.2024

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub

universitäts
bibliothek

Diese Dissertation wird via DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt und liegt auch als Print-Version vor.

DOI: 10.17185/duepublico/82746

URN: urn:nbn:de:hbz:465-20241219-111810-5



Dieses Werk kann unter einer Creative Commons Namensnennung - Nicht kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0 Lizenz (CC BY-NC-ND 4.0) genutzt werden.

Danksagung

Schon im Studium an der FH Aachen fand das Thema der Nachbehandlung von additiv gefertigten Bauteilen einen Platz in meinem Forschungsgeist. An der Universität Duisburg-Essen, am Lehrstuhl Fertigungstechnik konnte ich unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil Gerd Witt diese Thematik weiter erforschen. Ihm möchte ich als meinem Doktorvater für diese Möglichkeit, die Betreuung, den Austausch und sein stets offenes Ohr danken. Neben ihm gilt ein weiterer Dank meinem Zweitgutachter Prof. Dr.-Ing. Frank Döpfer.

Während meiner Arbeit standen mir stets tolle, aufgeschlossene KollegInnen zur Seite. Mit ihnen fanden Diskussionen, Ideenaustausche und Ermutigungen statt. An dieser Stelle gilt ein besonderer Dank Lars Meyer, Holger Dander und Andrea Hoppe, die nicht nur KollegInnen waren, sondern Freunde sind. Ebenso möchte ich mich bei Stefan Kleszczynski für die großartige Unterstützung als Kollege, akademischer Rat und Leiter des RTC bedanken. Wertvollen Support bot auch mein Kollege Marius Meyer; ihm sei ebenso gedankt wie Hanna Schönraht, Frauke Fleige, Manuel Sax, Jan Wegner, Sebastian Platt und Arno Elspaß.

An meine Freunde: Danke!

Sie haben mit mir gelitten während des Cyber-Angriffs, sie haben sich mit mir über jeden neuen Satz gefreut.

„Chardonnay, Chardonnay in mei'm Glas.“

(Marteria & Casper)

An meine Eltern: Danke!

Ohne sie wäre ich nicht hier.

Kurzfassung

Im Bereich der Additiven Fertigung ist ein Wachstum insbesondere beim pulverbettbasierten Schmelzen mit Polymeren (PBF-LB/P), aber auch bei der Materialextrusion festzustellen. Eine steigende Nachfrage von der Einzelteilerfertigung bis hin zur Serienproduktion kann in verschiedenen Industriebranchen verzeichnet werden. Viele dieser gefertigten Teile erfordern eine Nachbearbeitung nach ihrer Herstellung. Bei dem sogenannten Post-Processing werden je nach Verfahren z. B. Pulverreste oder etwaige Stützstrukturen entfernt. Im Nachgang können die Bauteile noch weiter nachbehandelt werden. In der Additiven Fertigung besteht so ein zunehmender Bedarf an verschiedenen Methoden zur Nachbehandlung. Vom klassischen mechanischen Gleitschleifen über das elektrochemische Galvanisieren bis hin zur chemischen bzw. physikalischen Nachbehandlung mit einer Säure oder einem Lösungsmittel (im Folgenden als Chemikalie zusammengefasst) wie beim Tauchätzen liegen hier diverse Möglichkeiten zur nachträglichen Optimierung der additiv gefertigten Bauteile vor. Mittels einer geeigneten Nachbehandlungsmethode können in Abhängigkeit von dem additiven Fertigungsverfahren, dem Material und dem Einsatz des Bauteils die optischen und funktionalen Eigenschaften verbessert oder auch geändert werden.

Aufgrund des Bedarfs und der zunehmenden Nachfrage an Bauteilen mit verbesserten topographischen Oberflächen und mechanischen Eigenschaften werden in dieser vorliegenden Arbeit additiv hergestellte Proben nachbehandelt. Für die Nachbehandlung wird das konventionelle Gleitschleifen und das auf die Additive Fertigung angepasste Tauchätzen bzw. Bedampfen mit einer Chemikalie angewendet.

Um die Potenziale der Nachbehandlungsverfahren bestimmen zu können, werden Probekörper aus Polyamid 12 und Polypropylen im PBF-LB/P-Verfahren gefertigt, nachbehandelt und anschließend die Eigenschaften wie beispielsweise die resultierenden Rauheiten, Maßhaltigkeiten, Bruchdehnungen oder maximale Zugfestigkeiten ermittelt. Zusätzlich erfolgt die Bestimmung des möglichen Einflusses der Nachbehandlung mit einer Säure auf Polyamid 12-Proben durch die Analyseverfahren der Dynamischen Differenzkalorimetrie, der Schmelze-Volumenfließrate und der Thermogravimetrie.

Außerdem werden Proben aus der Materialextrusion aus Polyamid 12 gefertigt und auf gleiche Weise wie die Proben aus dem pulverbettbasierten Schmelzen nachbehandelt und auf ihre Oberflächenrauheits- und mechanischen Kennwerte untersucht.

Ergebnisse zeigen, dass eine signifikante Reduzierung der Oberflächenrauheit durch eine Nachbehandlung mit einer Chemikalie möglich ist, wodurch sich ein Anstieg der Bruchdehnung aufgrund der Reduzierung der Kerbwirkung ergibt.

Abstract

In the field of additive manufacturing, growth is particularly evident in powder bed fusion with polymers (PBF-LB/P), but also in material extrusion and other processes. There is an increasing demand for single part production through to series production in various industrial sectors. Many of these manufactured parts require post-processing after they have been produced. During post-processing, powder residues or any support structures are removed, for example, depending on the process. The components can then be further post-processed. There is an increasing demand in additive manufacturing for various post-processing methods. From classic mechanical vibratory grinding and electro-chemical electroplating to chemical or physical post-treatment with a chemical, such as dip etching, there are various options for the subsequent optimization of additively manufactured components. Depending on the additive manufacturing process, material and use of the component, the optical and functional properties can be enhanced or altered through appropriate post-treatment methods.

Due to the need and increasing demand for components with improved topographical surfaces and mechanical properties, additively manufactured samples are post-processed in this thesis. Conventional vibratory grinding and dip coating or vapor deposition with a chemical, adapted to additive manufacturing, are used for post-processing.

In order to determine the potential of the post-treatment processes, test specimens made of polyamide 12 and polypropylene are produced using the PBF-LB/P process, post-treatment is carried out and the properties such as the resulting roughness, dimensional accuracy, elongation at break or maximum tensile strength are then determined. In addition, the possible influence of post-treatment with an acid on polyamide 12 samples is determined using the analysis methods of differential scanning calorimetry, melt volume flow rate and thermogravimetry.

Furthermore, samples from the material extrusion of polyamide 12 are manufactured and post-treated in the same way as the samples from the powder bed fusion and examined for their surface roughness and mechanical characteristics.

Measurements show that a significant reduction in surface roughness is possible by post-treatment with a chemical, which results in an increase in elongation at break due to the reduction in the notch effect.

Formel- und Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
3D	dreidimensional
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
AF	Additive Fertigung
ASTM	American Society for Testing and Materials
BJT	Freistrah-Bindemittelauftrag
DIN	Deutsches Institut für Normung
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie / Differential Scanning Calorimetry
E-Modul	Elastizitätsmodul
EN	Europäische Norm
FDM	Fused Deposition Modeling
FLM	Fused Layer Modeling
GK	Glaskugeln
ISO	Internationale Organisation für Normung / International Organisation for Standardization
LS	Laser-Sintern
MEX	Materialextrusion
MJT	Freistrah-Materialauftrag
MVR	Schmelze-Volumenfließrate / Melt Volume Rate
PA6	Polyamid 6
PA11	Polyamid 11
PA12	Polyamid 12
PBF-LB/P oder -M	Pulverbettbasiertes Schmelzen – Laserstrahl/Kunststoff/Metall powder bed fusion – laser beam/polymer/metal
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimide
PLA	Polylactide
PP	Polypropylen

REM	Rasterelektronenmikroskop(ie)
RT	Raumtemperatur
SD	Standardabweichung
SG	Spritzguss
SHL	Schichtlaminierung
SL	Stereolithographie
TFA	Trifluoressigsäure
T _G	Glasübergangstemperatur
TG(A)	Thermogravimetrie(analyse)
unbeh.	unbehandelt
VFS	VaporFuse Surfacing
VPP	badbasierte Photopolymerisation / vat photopolymerization

Formel- und Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
δ_h	Pa ^{1/2}	Wasserstoffbrückenbindung
δ_{SP}	Pa ^{1/2}	Hanse'sche Löslichkeitsparameter
δ_d	Pa ^{1/2}	Dispersionskraft
δ_p	Pa ^{1/2}	Dipolkraft
ε	%	Bruchdehnung
σ	N/mm ²	Spannung
<i>Eff.</i>	variabel	Effekt
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
M _L	%	Massenabnahme
m _f	kg	Masse vor dem Aufheizen
m _s	kg	Masse bei Endtemperatur
MVR-Wert	cm ³ /10 min	Schmelze-Volumenfließrate
n _r	–	Versuchsaufwand
R _a	µm	Mittenrauwert
R _a	Pa ^{1/2}	Radius des Lösungsmittels
RED	–	relative Energiedifferenz
R _z	µm	mittlere Rautiefe
s	variabel	Standardabweichung
S _z	µm	gemittelte Flächenrautiefe
T _A	°C	Starttemperatur
T _B	°C	Endtemperatur
T _C	°C	Mittelpunkttemperatur
\bar{y}_i	variabel	Mittelwert

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Grundlagen und Stand der Technik.....	7
2.1	Grundlagen der additiven Fertigung.....	7
2.1.1	Pulverbettbasiertes Schmelzen – Kunststoff.....	9
2.1.2	Materialextrusion.....	11
2.1.3	Additive Fertigungseigenschaften	13
2.1.4	Optische Eigenschaften	14
2.1.5	Materialien der additiven Fertigung	15
2.2	Aufbau und Eigenschaften von Polymeren	16
2.2.1	Polyamid 12.....	16
2.2.2	Polypropylen.....	19
2.3	Stand der Technik der gängigen Nachbehandlungsmethoden.....	19
2.3.1	Galvanisieren	21
2.3.2	Dip-Coating	22
2.3.3	Lackieren und Färben	23
2.3.4	Gleitschleifen.....	24
2.3.5	Tauchätzen und Bedampfen	26
2.4	Grundlagen der Nachbehandlungsmethoden.....	30
2.4.1	Chemisch-physikalische/lösungsmittelbedingte Nachbehandlung.....	32
2.4.2	Mechanische Nachbehandlung	36
3	Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	39
4	Methoden und Vorgehensweise	42
4.1	Probenplanung.....	42
4.1.1	Probenmaterialien	43
4.1.2	Probekörper	44
4.2	Mechanische Nachbehandlung.....	50
4.3	Chemische bzw. physikalische Nachbehandlung	51
4.3.1	Tauchätzen.....	53
4.3.2	Bedampfung.....	54
4.4	Charakterisierung der Bauteileigenschaften.....	54
4.4.1	Rauheitsmessung	55
4.4.2	Geometrie – Maß- und Formmessungen	57
4.4.3	Mikroskopie.....	57
4.4.4	Zugversuche.....	58
4.4.5	Schmelze-Volumenfließrate	60

Inhaltsverzeichnis

4.4.6	Dynamische Differenzkalorimetrie	61
4.4.7	Thermogravimetrie	63
5	Ergebnisse – Einfluss der Nachbehandlungsmethoden auf additiv gefertigte Polymer-Proben	66
5.1	Auswirkungen der Nachbehandlung auf die topographischen Eigenschaften.....	66
5.1.1	Einfluss auf PBF-LB/P-Proben.....	66
5.1.2	Einfluss auf materialextrudierte Polyamid-12-Proben.....	86
5.2	Auswirkung der Nachbehandlungsmethoden auf die mechanischen Eigenschaften.....	88
5.2.1	Einfluss auf PBF-LB/P -Proben.....	89
5.2.2	Einfluss auf materialextrudierte Polyamid-12-Proben.....	97
5.3	Auswirkung der Trifluoressigsäure auf die Schmelze-Volumenfließrate	101
5.4	Auswirkung der Trifluoressigsäure auf das Schmelzverhalten	103
5.5	Auswirkung der Trifluoressigsäure auf die Masseänderung in Abhängigkeit von der Temperatur	106
6	Zusammenfassung.....	110
7	Ausblick	114
	Abbildungsverzeichnis	117
	Tabellenverzeichnis.....	123
	Anhang	124
	Literaturangaben.....	138
	Publikationsverzeichnis.....	155

1 Einleitung

Seit Jahren nimmt die Popularität der Additiven Fertigung (AF) in den verschiedenen Branchen wie im Automobilbereich, in der Luft- und Raumfahrt, in der Medizintechnik und im allgemeinen Maschinenbau zu [1, 2]. Durch ihre vielfältigen Anwendungs- und die nahezu grenzenlosen Gestaltungsmöglichkeiten genießt die AF große Prominenz. Von Hinterschneidung über bionische Strukturen bis hin zu feinen Gitterstrukturen lassen sich viele Elemente nur mittels der additiven Fertigung realisieren. Aufgrund immer größer werdender Anlagen können Kleinserien von individuellen Einzelstücken bis hin zu gänzlich identischen reproduzierbaren Bauteilen gefertigt werden. Mit dem wachsenden Potential dieser Technologie steigt auch die Nachfrage nach additiv gefertigten Bauteilen und Anlagen. Um weitere Anwendungsgebiete zu schaffen oder bestehende Anwendungen mit Bauteilen mit verbesserten funktionalen Eigenschaften zu beliefern, werden stetig neue Materialien entwickelt. Ebenso und gerade durch die individuelle und personalisierbare Fertigung liegt ein großer Forschungsschwerpunkt u. a. in der Medizintechnik [3]. Für Prothesen, „Probeoperationen“ oder Implantate eignet sich die AF besonders [4]. Diese individuell an den Patienten angepassten medizinischen Produkte weisen klassisch eine Losgröße von 1 auf. Durch Verzicht auf Modelle und Formen etwa für das Gießen können neben der Fertigungszeit auch finanzielle Mittel eingespart und Ressourcen geschont werden. [5 - 7]

Zu den meisteingesetzten AF-Verfahren zählt das pulverbettbasierte Schmelzen mittels Laserstrahl (engl.: PBF-LB/P – powder bed fusion – laser beam/polymer), auch bekannt als Laser-Sintern (LS), das 1986 von Carl R. Deckard als Selective-Laser-Sintering (SLS) zum Patent angemeldet wurde [8]. Es erfährt ähnlich wie die weiteren additiven Fertigungsverfahren einen großen Absatz. Nach DIN EN ISO/ASTM 52900 wird das Verfahren seit 2017 als „powder bed fusion – laser beam“ bezeichnet und bekommt den Zusatz „P“ für Polymer zur Abgrenzung von dem prozessverwandten Verfahren mit Metallpulver, das den Zusatz „M“ besitzt [9]. [10]

In Abbildung 1-1 sind über die Jahre 2017 bis 2022 die Anzahl der Produkte aus den verschiedenen additiven Fertigungsmaterialgruppen aufgeführt. Nach dem Wohlers Report von 2023 liegt die Menge der erwerblich verfügbaren Bauteile aus Wachs, Sand und Keramik unter 40, während die Anzahl der verfügbaren Produkte aus Metall und Polymer über die aufgeführten Jahre hinweg signifikant gestiegen ist und eine stärker wachsende Polymer-Produktabelle vorliegt. [11]

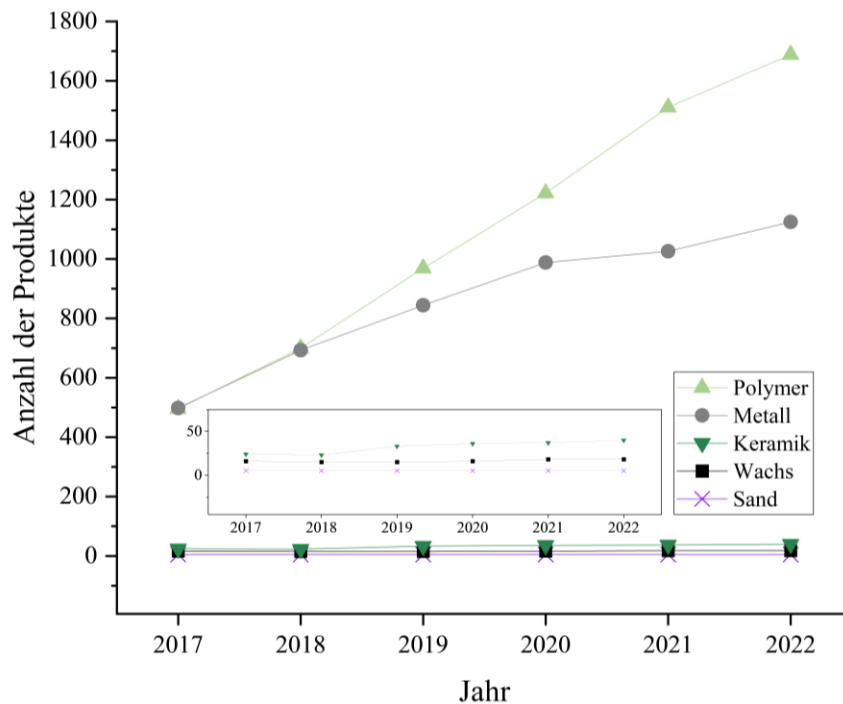


Abbildung 1-1: Anzahl der zwischen 2017 bis 2022 aus den meistgenutzten AF-Materialien hergestellten Produkte, Auszug aus [11]

In der Industrie hat sich das PBF-LB/P als Fertigungsverfahren seit Jahren für marktreife Produkte bereits etablieren können [11 - 13]. Gängige Materialien sind hier Polyamid (PA) 6, 11 und 12, die zu den sogenannten Ingenieurs-Polymeren oder technischen bzw. Konstruktionskunststoffen zählen, wobei PA11 und PA12 am häufigsten verarbeitet werden [14, 15]. Mit weiteren Kunststoffen aus diesem Bereich besitzen sie den größten Marktanteil [11]. Neben der Verwendung der reinen Polymerpulver, z. T. vermischt mit Titanoxid oder Ruß zur Einfärbung, stehen auch Materialsysteme zur Verfügung. Mischungen aus PA und z. B. Aluminium, Karbon-, Glasfaser oder Glaskugeln (GK) werden zur Steigerung der mechanischen Eigenschaften in der Industrie eingesetzt [16 - 20]. Aber auch Polypropylen (PP) erfährt aufgrund der großen Zahl der Anwendungsgebiete eine immer größere Bedeutung in der additiven Fertigung. PP ist als Massenkunststoff schon länger gefragt und wird besonders in Haushalts- und Kleinlektrogeräten für deren Gehäuse oder Formteile eingesetzt, ebenso für Karosserieteile. Da zunehmend die Additive Fertigung konventionelle Fertigungsverfahren ablöst oder ergänzt, findet dieses Polymer immer mehr Anwendung im Bereich der MEX (Materialextusion) und PBF-LB/P. [21 - 25]

Für den Wohlers Report werden u. a. über Senvol Daten zusammengefasst, die die Trendverläufe im Bereich der AF widerspiegeln [26]. Im Diagramm in Abbildung 1-2 ist die steigende Anzahl der Anbietenden für die Materialien PA, PP, PLA (Polylactide) und TPU (Thermoplastisches Polyurethan) von 2017 bis 2020 zu sehen. Hier wurden nicht gänzlich alle Herstellenden von Polymeren für die AF erfasst, es zeigt jedoch einen Trend über die letzten Jahre des Wachstums.

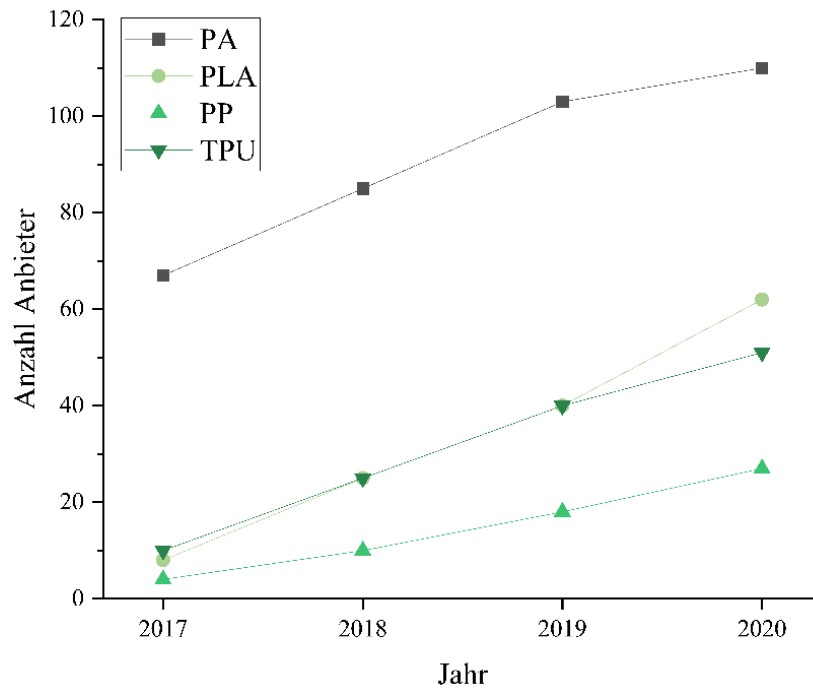


Abbildung 1-2: Anzahl der Anbietenden von Materialien für die AF-Verfahren PBF-LB/P und MEX von 2017 bis 2020, Auszug aus [26]

Durch den immer größer werdenden Einsatz von PBF-LB/P-Bauteilen wachsen zudem die Anforderungen an die Bauteile. Für nahezu alle Bereiche bedarf es an Teilen, die je nach Einsatz ausreichend belastbar sind sowie eine anwendungsorientierte Oberfläche und definierte, einsatzbedingte Beständigkeiten aufweisen. Ein fertigungstechnisches Merkmal der Additiven Fertigung ist der Treppenstufeneffekt, der von der gewählten Schichtstärke und Orientierung im Bauraum abhängt und die Oberfläche beeinflusst. Neben dem gewählten additiven Fertigungsverfahren und dem damit einhergehenden Ausgangsmaterial und dessen Form beeinflusst der Treppenstufeneffekt die Oberflächenbeschaffenheit und -rauheit. [27] Abbildung 1-3 verdeutlicht den Treppenstufeneffekt (rechts) und die Annäherung an das Volumenmodell (links).

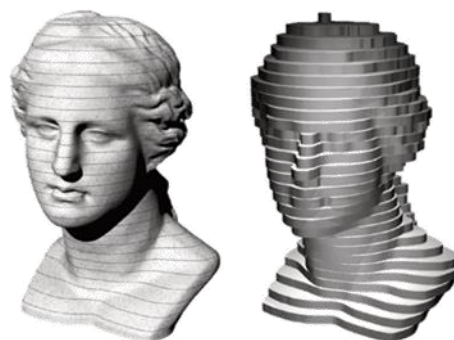


Abbildung 1-3: Graphische Darstellung eines Volumenmodells (links) und Zerlegung des Volumenmodells in einzelne Schichten (rechts) zur Darstellung der Schichtbauweise, aus und nach [27]

Je kleiner die Schichtstärke gewählt wird, desto höher ist die Auflösung des additiv gefertigten Objekts. Ebenfalls wird die Oberfläche und damit einhergehend die Rauheit durch die einzelnen aufeinander abgelegten Schichten bestimmt bzw. durch die sich ergebenden Zwischenräume ähnlich wie Rillen, vgl. Abbildung 1-4. [28, 29]

Einleitung

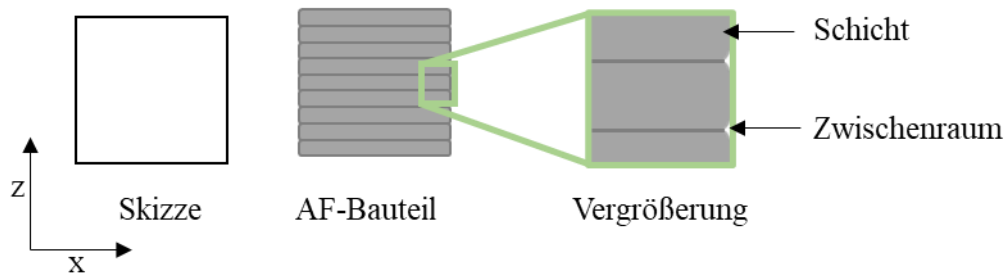


Abbildung 1-4: Schematische Darstellung eines quadratischen AF-Bauteils, abgeleitet aus einer Skizze und dem Schichteffekt PBF-LB/P-Proben weisen eine Oberflächentopographie auf, die im Vergleich zu Spritzgussbauteilen (SG) rauer und somit nicht gleichwertig ist [30, 31]. In Abhängigkeit von der verwendeten Anlage, dem Pulver und dem Pulvermischungsverhältnis, der Belichtungsstrategie und u. a. der Positionierung des Bauteils bzw. der Bauteile im Bauraum bilden sich charakteristische Oberflächentopographien des gefertigten Bauteils bzw. der gefertigten Bauteile [28, 32]. Unter der Oberflächentopographie wird die Beschaffenheit der Oberflächentextur wie Rauheit, Welligkeit, Gestalt verstanden, die sich dreidimensional entfaltet und über Messverfahren zu bestimmen ist [33].

Nach den gängigen Nachbearbeitungsschritten ist eine weitere Nachbehandlung nahezu unerlässlich. Von Einfärben über Gleitschleifen bis hin zu einer Nachbehandlung mit einem liquiden bzw. verdampften Medium reichen die Methoden, um die optischen wie auch die mechanischen Eigenschaften zu verbessern. Je nach Anwendung des additiv gefertigten Objekts, ob für einen technischen oder dekorativen Einsatz, eignen sich unterschiedliche Nachbehandlungsmethoden. [21, 34 - 37]

Eine Einteilung der Nachbehandlungsschritte kann u. a. in folgende relevante Verfahren für Oberflächen stattfinden: elektrochemische, auftragende, mechanische, mechanisch-chemische und chemisch-physikalische Nachbehandlung. Diesen Verfahrensgruppen lassen sich diverse Verfahren wie Schleifen, Gleitschleifen, Galvanisieren, Tauchätzen oder Vapour Smoothing zuordnen. Mit Blick auf die Nachbehandlung additiver Fertigungsverfahren weisen die verschiedenen Nachbehandlungsverfahren unterschiedliche Vor- und Nachteile auf, und über Versuche haben sich einzelne Verfahren als geeignet erwiesen [38].

Nachbehandlungsmethoden mit einer Chemikalie werden im Bereich der Materialextrusion schon weit- aus länger eingesetzt als für PBF-LB/P-Bauteile. Bauteile erhalten so eine Oberfläche, die optisch wie bei Spritzgussbauteilen aussieht [39]. Die zumeist im Heimbedarf anzutreffende Materialextrusion, besser bekannt als Fused Layer Modeling (FLM) oder Fused Deposition Modeling (FDM), Letzteres eine von der Firma Stratasys Ltd geprägte und als Eigenbegriff genutzte Bezeichnung, weist einen stark wachsenden Markt auf. Innerhalb des letzten Jahrzehnts ist der Verkauf von „3D-Druckern“ (3D – dreidimensional), so der umgangssprachliche gängige Begriff für MEX-Anlagen, um fast 900 % angestiegen (Abbildung 1-5) [40]. Für die Jahre 2019 und 2020 gab es einen weiteren Anstieg [39].

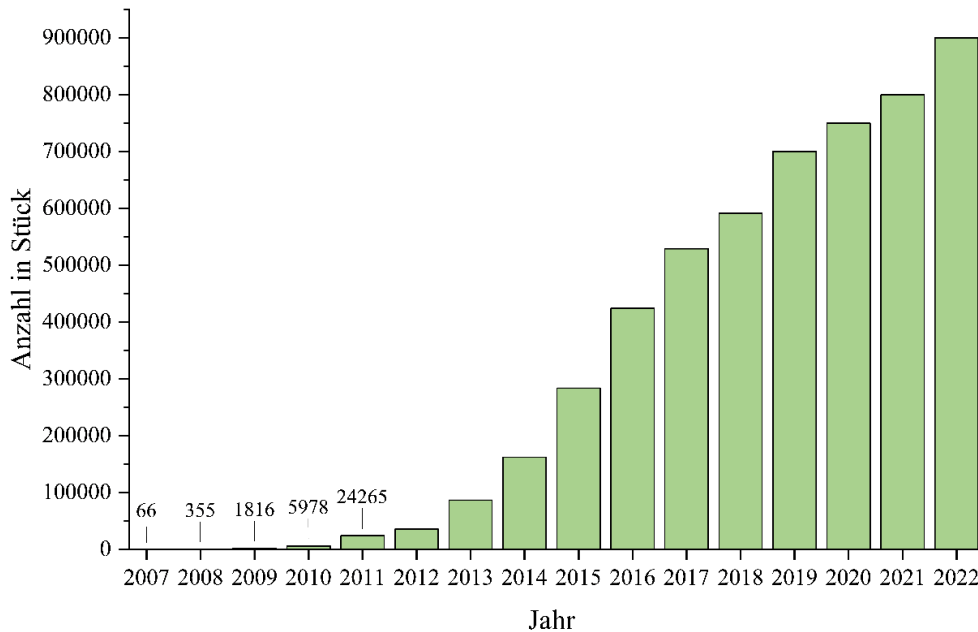


Abbildung 1-5: Anzahl der verkauften MEX-Anlagen von 2007 bis 2022 [11, 40]

Bei einem der ersten Materialien, die beim MEX-Verfahren verwendet wurden, dem ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol), wird als gängiges Nachbehandlungsmedium Aceton zur Glättung der Oberfläche eingesetzt [34, 41]. Auch für PLA, dem bisher meistgenutzten Filamentmaterial, werden verschiedenen Nachbehandlungsmedien, wie Tetrahydrofuran, zur Glättung der Oberfläche verwendet. [41]

Bereits 2011 wurde eine Nachbehandlungsanlage für additiv gefertigte Objekte von der Firma Stratasys Ltd patentiert. Diese Anlage besteht aus einem Zwei-Kammer-System; in der einen Kammer werden die Bauteile mit einem verdampften Medium geglättet, in der zweiten werden sie getrocknet. Dem Patent ist nicht weiter zu entnehmen, für welche AF-Materialien die Nachbehandlung geeignet ist; ausgehend von dem Patenteinreichenden kann die Nachbehandlungsmethode für vorhandene Stratasys-Materialien bis 2011 geeignet sein [42]. 2020 wurde ein Patent von Mitarbeitern der Firma DyeMansion GmbH zu einer Nachbehandlungsanlage veröffentlicht, bei dem additiv gefertigte Bauteile in einem Unterdruckbehälter mit einem erwärmten Lösungsmitteldampf nachbehandelt werden [43]. Bei den Nachbehandlungsmethoden beim PBF-LB/P-Verfahren wie auch bei der Materialextusion setzen sich die bedampfenden Methoden seit einigen Jahren durch; entsprechend findet sich ein wachsender Markt mit Dienstleistern und Nachbehandlungsanlagen [44].

Wie aufgezählt, gibt es bereits seit einigen Jahren Nachbehandlungsmethoden für additiv gefertigte Polymerbauteile. Für viele Anwendungen, z. B. in der Lebensmittelindustrie, im Automobilbereich oder auch in der Medizintechnik, wo PBF-LB/P-Bauteile eingesetzt werden, hat die unbehandelte (unbeh.) Oberfläche Einfluss auf die technischen Applikationen. Bauteile mit der typischen rauen Oberfläche lassen sich u. a. schwieriger reinigen und weisen eine empfundene schlechtere Haptik auf. Neben den optischen Vorteilen einer Nachbehandlung, wenn etwa die Reduzierung der Oberflächenrauheit eine besserer Reinhaltung sowie eine glänzende Oberfläche zur Folge haben kann, hat eine Nachbehandlung Auswirkungen auf weitere Faktoren [45, 46]. So wird z. B. im medizinischen Kontext durch eine ge-

Einleitung

glättete Oberfläche das von Bakterien verhindert [47]. Daneben werden auch die mechanischen Eigenschaften beeinflusst. Es sind erste Ansätze vorhanden, die die Zusammenhänge zwischen einer Nachbehandlung und der damit einhergehenden reduzierten Oberflächenrauheit sowie dem Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften aufzeigen. Weitere Aspekte werden hier allerdings bislang außer Acht gelassen, so z. B. die Auswirkung der Nachbehandlung, insbesondere bei der Verwendung einer Chemikalie, auf die molekularen Eigenschaften. Dabei ist ebenso zu betrachten, welche Auswirkungen die jeweilige Nachbehandlung auf die Arbeitssicherheit und die ökologische Umwelt hat.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Im Folgenden werden zunächst die Grundlagen der additiven Fertigung und die in diesem Zusammenhang für die Arbeit wichtigen Aspekte herausgearbeitet, um darauf folgend den Aufbau von Polymeren mit besonderem Blick auf PA12 und PP zu beschreiben. Anschließend werden die gängigen Nachbehandlungsmethoden für die PBF-LB/P- und MEX-Bauteile bzw. Proben vorgestellt, bevor auf die Grundlagen der hier angewandten Nachbehandlungsmethoden für die Proben eingegangen wird.

2.1 Grundlagen der additiven Fertigung

Nach DIN 8580 werden die Fertigungsverfahren in sechs Hauptgruppen unterteilt: Urformen, Umformen, Fügen, Trennen, Beschichten und Ändern der Stoffeigenschaften [48, 49]. Die Additive Fertigung wird wegen der Umwandlung des Ausgangsmaterial wie Pulver, Flüssigkeiten, Kunststoffstränge mit Hilfe von verschiedenen Energiequellen in Bauteile der ersten Hauptgruppe, Urformen, zugeordnet [21]. Die AF-Verfahren, die mit Polymeren arbeiten, lassen sich nach DIN EN ISO/ASTM 52900 wiederum in sechs Hauptgruppen unterteilen (s. Abbildung 2-1), wobei die meisten Hauptgruppen noch weiter unterteilt werden können. Viele der Verfahren wurden im Laufe der Zeit durch eine Variation z. B. der Energiequelle oder der Materialzuführung erweitert.

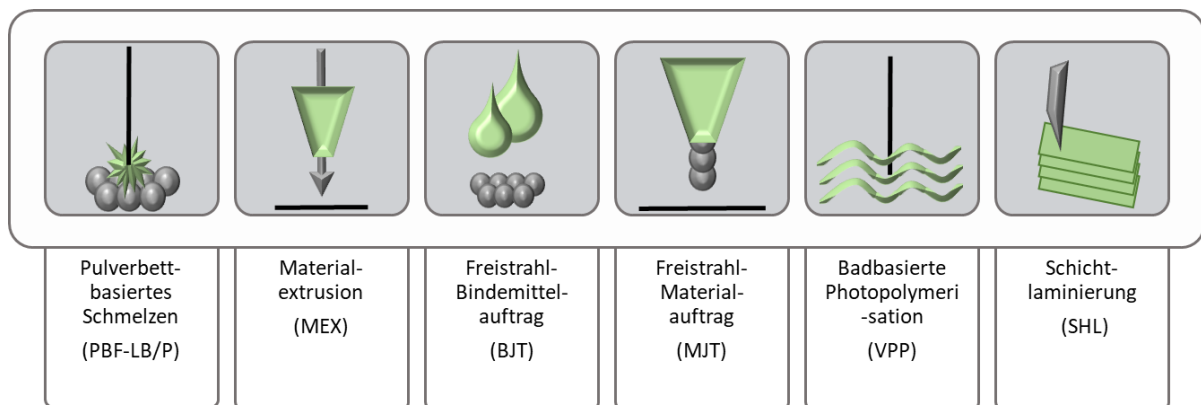


Abbildung 2-1: Graphische Darstellung der sechs Hauptgruppen der AF-Verfahren mit Polymeren nach [9] mit Verfahrensbezeichnung nach DIN EN ISO/ASTM 52900

In Kapitel 2.1.1 und 2.1.2 werden die Verfahrensprinzipien PBF-LB/P und MEX näher erläutert. Beim *BJT*-Verfahren wird ein pulverförmiges Material, z. B. Kunststoffe, Gips oder Keramik, mittels Bindemittel als Flüssigkeitströpfchen Schicht für Schicht verfestigt. Demgegenüber wird beim *MJT*-Verfahren flüssiger Kunststoff oder Wachs in Tröpfchenform auf eine Bauplatzform aufgebracht und über eine UV-Lichtquelle ausgehärtet. Für die badbasierte Photopolymerisation (*VPP*) wird ein lichtaushärtendes Harz verwendet, das über eine Lichtquelle, einen Laser oder Projektor, belichtet wird und sich dadurch verfestigt [9, 50]. Beim *SHL*-Verfahren werden Papier oder dünne Kunststoff- oder Metallfolien aufeinandergelegt und mit einem Kleber, Wärme oder Ultraschallvibration miteinander verbunden. Jede einzelne Schicht wird mit einem Messer oder Laser anhand der passenden digitalen 2D-Kontur geschnitten. [27]

Entlang der Prozesskette können die fünf Schritte der additiven Fertigung, vom digitalen Modell bis hin zum fertigen Bauteil, in drei Bereiche gegliedert werden: Modellerstellung (hellgrau), Fertigung (dunkelgrau) und Nachbehandlung (grün), s. Abbildung 2-2.

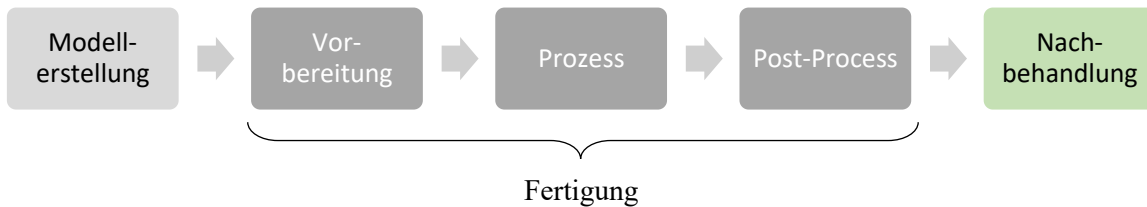


Abbildung 2-2: Die fünf Hauptverfahrensschritte der additiven Fertigung

Bei dieser Einteilung wird der in der AF übliche Post-Process der Fertigung zugeordnet, da erst im Anschluss an ihn das Bauteil zweckdienlich ist. Die Nachbehandlung dient als Optimierung u. a. der topographischen und mechanischen Eigenschaften. Häufig wird die Oberflächenbehandlung, hier unter Nachbehandlung gefasst, dem Post-Processing zugeordnet [51]. Für eine klarere Unterteilung wird hier eine Trennung zwischen Post-Processing und Nachbehandlung vorgenommen.

Modellerstellung:

Das zu fertigende Bauteil wird mittels Konstruktionsprogrammen modelliert und im Anschluss in ein Programm geladen, das den virtuellen Bauraum der Anlage anzeigt. Hier kann das Bauteil bzw. können die Bauteile so positioniert werden, wie es verfahrensbedingt von Vorteil ist. Beim Laser-Sinter-Verfahren können, da es ohne Stützkonstruktionen arbeitet, Bauteile übereinander angeordnet werden. Im Anschluss wird der virtuelle Baujob mit einer weiteren Software „Slicer“ in Schichten entsprechend der eingestellten Schichtstärke aufgeteilt. Diese Informationen werden an den Anlagencomputer gesendet, der die übermittelten Schichtinformationen im Prozessschritt „Prozess“ auf realer Ebene umsetzt.

Vorbereitung:

Zur Vorbereitung, häufig auch als Pre-Process bezeichnet, zählt die Aufbereitung und die Bereitstellung des Materials. Je nach Verfahren und verwendeter Anlage wird das Material zugeführt. Dieser Prozessschritt wird hier schon zum Bereich Fertigung gezählt, da der Beginn vom losen vorliegenden Material bis hin zum fertigen Bauteil mit dem Materialhandling bei der Vorbereitung beginnt.

Prozess:

Im Bauprozess werden die übermittelten Daten Schicht für Schicht umgesetzt. Auf dieser Grundlage entsteht das zuvor virtuell konstruierte Bauteil. Beim MEX-Verfahren kann geometrieabhängig im Slicer-Programm die Stützstruktur mit generiert werden, die nicht zum virtuell erzeugten Modell gehört. Diese Stützstruktur wird je nach MEX-Anlage mit einem zweiten Filament über einen weiteren Extruder gefertigt oder bei einem Single-Extruder, bei dem also nur ein Filament für den Baujob verarbeitet wurde, aus dem gleichen Material wie das Bauteil generiert.

Post-Process:

Im Post-Process wird das Bauteil der Anlage entnommen. Bedingt durch die Verfahrensauswahl erfolgen typische Schritte des Post-Processing. Diese individuellen Schritte können z. B. das Auspacken des Bauteils aus dem Pulverkuchen beim pulverbettbasierten Schmelzen oder das Entfernen der Stützstrukturen und die Nachhärtung des Bauteils bei der Stereolithographie sein. Beim PBF-LB/P erfolgt nach dem Auspacken des Bauteils aus dem Pulverkuchen ein Abbürsten des losen, aber noch anhaftenden Pulvers. Im Anschluss wird das Bauteil mit Glasperlen gestrahlt, wobei sich Pulverreste, die sich durch das Bürsten nicht haben entfernen lassen, abgetragen werden. Hier findet noch keine Modifikation der Oberfläche statt. Bei der Materialextrusion werden in Abhängigkeit von der Bauteilgeometrie die mitgefertigten Stützstrukturen mechanisch oder in einem Laugenbad entfernt. Bei einem Single-Extruder werden die Stützstrukturen aus demselben Material wie das Bauteil gefertigt. Anlagen mit einem Doppelnextruder können Filamente, die wasser- oder laugenlöslich sind, für den Support extrudieren.

Nachbehandlung:

Bei der Nachbehandlung kann zwischen verschiedenen Methoden differenziert werden. Eine bisher gängige Nachbehandlung, auch für die konventionelle Fertigung, ist das Gleitschleifen, das der mechanischen Nachbehandlung zugeordnet wird. Eine weitere Variante besteht bei der elektrochemischen Nachbehandlung darin, das Bauteil zu galvanisieren. Üblicherweise wird diese Methode bei elektrisch leitenden Materialien angewendet, während bei Kunststoffen das Bauteil zunächst mit einer Leitlackschicht überzogen wird. Bei der auftragenden Nachbehandlung können beim Dip-Coating eine Schicht bzw. über mehrmaliges Eintauchen in das flüssige Medium mehrere Schichten auf das Bauteil aufgetragen werden. Eine derzeit beliebte und im Bereich der additiven Fertigung häufig anzutreffende Nachbehandlungsmethode ist das Bedampfen der Bauteile mit einer Säure [11, 51]. Diese Methode wird in Abhängigkeit von der jeweiligen Reaktion zu den chemischen oder physikalischen Nachbehandlungsmethoden gezählt.

2.1.1 Pulverbettbasiertes Schmelzen – Kunststoff

Für das PBF-LB/P-Verfahren mit Polymeren wird das formlose Ausgangsmaterial in einem Mischer aus Alt- und Neupulver miteinander vermengt, so dass eine homogene Verteilung beider Pulver entsteht. Im Anschluss wird mittels eines Siebes die Pulvermischung gesiebt, um etwaige Agglomerationen herauszunehmen. Im Anschluss wird das Pulver der Anlage zugeführt. Diese Anlagen besitzen grundsätzlich alle einen ähnlichen Aufbau mit Variationen u. a. des Beschichtersystems, der Pulverzufuhr, der Art der Laserquelle und in der Anzahl der Laser.

Nach der Zuführung des Pulvers in die Anlage werden über das Beschichtersystem erste Schichten auf die Bauplattform aufgetragen. Nach einer definierten Schichtanzahl setzt das Vorheizen ein, um die Prozesskammer knapp unter die Schmelztemperatur des eingefüllten Polymers zu bringen. Wenn diese Temperatur erreicht ist, startet der Bauprozess.

Beim Bauprozess werden in die aufgetragene Pulverschicht mittels eines Lasers (1), meist ein CO₂-Laser, über einen Umlenkspiegel (2) Schicht für Schicht die digitalen Informationen ortsgenau eingebracht. Das heißt, der Laser schmilzt lokal die Pulverpartikel unter einer Stickstoffatmosphäre auf und erzeugt somit eine solide Schicht (4), die sich mit der darunterliegenden, bereits aufgeschmolzenen und verfestigten Schicht verbindet (Abbildung 2-3). [52]

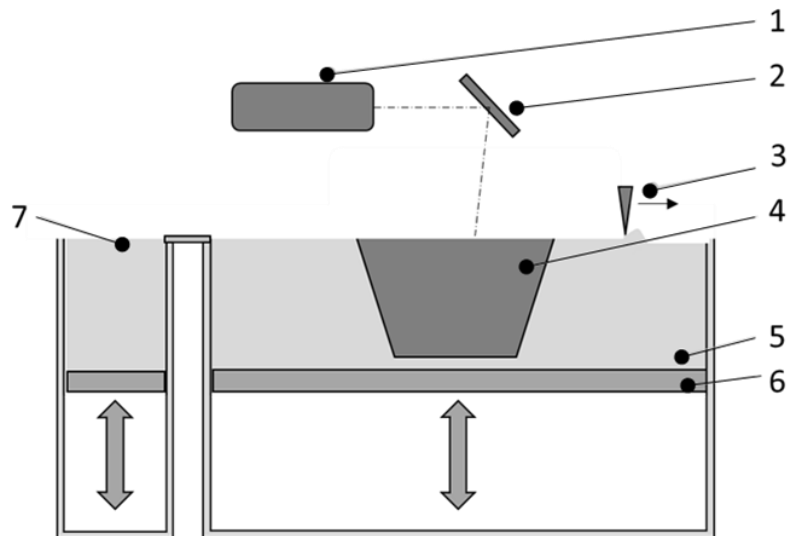


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung des PBF-LB/P-Prozesses nach [53] mit Nummerierungen einzelner Anlagenkomponenten

Eine Walze oder eine Rakel (3) trägt das Pulver nach dem Herabsenken der Bauplattform (6) aus dem Vorratsbehälter (7) auf. Das fertig generierte Bauteil (4) verweilt so lange in dem umgebenden Pulver, dem sogenannten Pulverkuchen (5), im Baubehälter, bis die Glasübergangstemperatur, auch Glaspunkt genannt, unterschritten wird. Amorphe Polymere oder teilkristalline Polymere im amorphen Bereich weisen unterhalb einer individuellen Glasübergangstemperatur einen dem Glas ähnlichen Zustand auf. Polymere zeigen hier die größte Änderung ihrer Eigenschaften, so z. B. beim E-Modul. Dieser kann zwischen dem 10- und 1.000-Fachen ansteigen. [21, 54]

Um jeglichen Verzug und jegliche Deformation zu vermeiden, wird daher nach einer Faustregel eine Abkühlzeit gleich der Bauzeit zum Auspacken der Bauteile gewartet. Eine Nachbearbeitung von PBF-LB/P-Bauteilen erfolgt im direkten Anschluss an das Auspacken der Bauteile aus dem Pulverkuchen. Lose anhaftendes Pulver kann mit Hilfe einer Bürste entfernt werden, jedoch erfolgt meist eine aufwändigere Nachbehandlung, sobald das Bauteile komplexe Strukturen, Kanäle oder z. B. Winkel besitzt. Im Auspackbereich fällt über ein integriertes Gitter das nicht verschmolzene Pulver in einen Auffangbehälter und kann anschließend mit Neupulver gemischt, gesiebt und für einen nächsten Baujob aufbewahrt werden. Anschließend wird jedes Bauteil in einer Strahlkabine mit Glasperlen gereinigt, um weitere Pulverrückstände zu entfernen. In Abhängigkeit von der Geometrie sollte auf eine weitere händische Nachbearbeitung zurückgegriffen werden, da sich Pulverreste mit einem Glasperlenstrahl nur schwer aus Löchern, Kanälen und engen Zwischenräumen entfernen lassen.

Bei der Belichtung des Bauteilquerschnitt werden Pulverpartikel angeschmolzen, da ein Teil des Partikels (2) zum Bauteil gehört und der restliche Teil außerhalb der Kontur (3) liegt, s. Abbildung 2-4. Partikel (1), die innerhalb der Kontur liegen, wenn die gesamte Fläche belichtet wird, gehören vollständig zu dem Bauteil. Pulverpartikel (4), die sich außerhalb der Kontur befinden, aber an der Grenze zur Kontur, werden zu lose anhaftenden Pulverrückständen, die bei der Reinigung mit Glasperlen abgestrahlt werden können. Partikel (2), die zum Teil angeschmolzen werden, bilden neben dem Treppenstufeneffekt die charakteristische Oberfläche von PBF-LB/P-Bauteilen. Hierzu zählen auch die Lücken, die an der Kontur entstehen, wenn dort aufgrund der Partikelgrößenverteilung kein Partikel zum Aufschmelzen liegt.

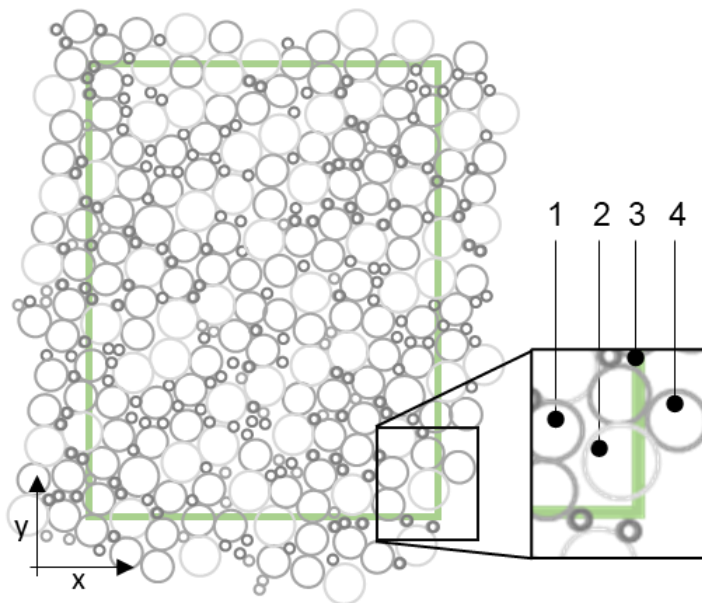


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung einer Draufsicht auf eine beschichtete PBF-LB/P-Fläche mit einer belichteten Kontur (grün) eines Bauteilquerschnitts zzgl. eine Vergrößerung der belichteten Kontur mit zusätzlicher Nummerierung

Aufgrund der beschriebenen prozess- und materialtypischen Bedingungen kommt die für diesen AF-Prozess repräsentative Oberflächenbeschaffenheit zustande. Weitere Einflüsse auf die Oberflächentopographie zeigen die Partikelform, die Pulverdichte oder anlagenseitige Parametereinstellungen [21, 55].

2.1.2 Materialextrusion

Bei der Materialextrusion wird zwischen dem privaten und dem industriellen Sektor unterschieden. Es ist eines der wenigen Verfahren, das im nicht kommerziellen Umfeld breite Anwendung findet. Die Anlagen sind einfach zu bedienen und bieten für jeden Anwendertyp Möglichkeiten zur Optimierung bis hin zur Veränderung des Programmcodes, des sogenannten G-Codes. Bei den industriellen Anlagen liegt meist ein geschlossenes System vor, das wenige bis gar keine Veränderungen zulässt. Häufig sind die einstellbaren Parameter begrenzt, ebenso liegt meist eine anlagenspezifische Materialauswahl vor. Zum Materialextrusionsprozess gehören, wie es in Abbildung 2-5 dargestellt ist, neben der Verarbeitung von Polymersträngen auch die Direktextrusion. Hier wird Kunststoffgranulat über einen Trichter einer

aufgeheizten Düse zugeführt. Bei der hier dargestellten Variante wird ein Polymerstrang (Filament) (2), der von einer Spule (1) abgewickelt wird, über eine beheizte Düse in der Druckkopfeinheit (3) auf der Bauplattform (5) abgelegt. Je nach Anlagenbauweise (kartesisch oder CoreXY) wird in z-Richtung (6) die Bauplattform oder die Druckkopfeinheit (3) verfahren; hiervon hängt ebenfalls die Bewegung der Komponenten in der x-y-Ebene ab. Bei weiteren Bauweisen wird nur die Druckkopfeinheit in x-, y- und z-Richtung (Delta) bewegt oder ein Filament wird über einen radial und in z-Richtung beweglichen Druckkopf auf eine rotierende Bauplattform abgelegt (Polar) [56]. In der schematischen Darstellung des MEX-Prozesses wird eine Stützstruktur (4) verwendet, um Überhänge oder Hohlräume abzustützen. Diese kann im Nachgang mechanisch entfernt werden. Nicht für jedes Bauteil ist ein sogenannter Support notwendig und kann in der Slicer-Software eingestellt werden. Ebenfalls kann z. B. auf wasser- oder laugenlösliches Supportmaterial zurückgegriffen werden, das sich bei Anlagen mit zwei Düsen (Doppelextruder) einsetzen lässt [52].

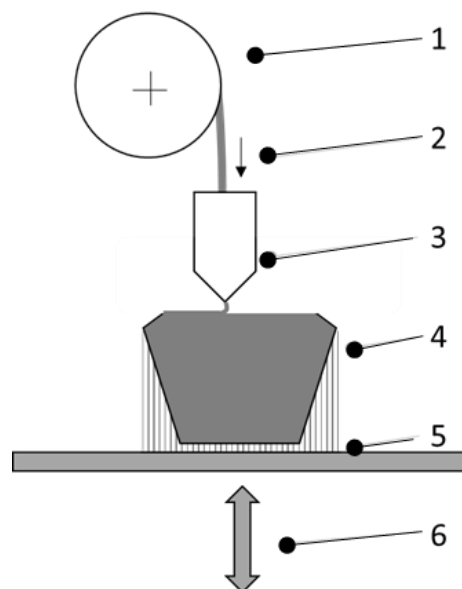


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung des Materialextrusionsprozesses nach [53] mit Nummerierung einzelner Komponenten

Nach der Fertigstellung des Bauteils kann dieses, sofern es ohne Stützstrukturen gefertigt wurde, mit keinem bis wenig Nachbearbeitungsaufwand genutzt werden. Bei einer Bauteilgenerierung mit Stützstrukturen werden diese im Anschluss entfernt. MEX-Bauteile können in einem Post-Process noch weiterbehandelt werden; Lackierungen, Epoxid-Harz-Aufträge oder chemische/physikalische Nachbehandlungen können hier zum Einsatz kommen. Durch diese Nachbehandlungen können der verfahrenstypische Treppenstufeneffekt und die Oberflächenrauheit reduziert, aber auch eine härtere Oberfläche oder eine andere Farbgebung erzielt werden.

MEX-Bauteile weisen durch ihre Fertigungsart mit schichtweise abgelegten Kunststoffsträngen eine charakteristische raue Oberfläche auf. Diese bedingt eine Oberflächenrauheit in direkter Abhängigkeit von der gewählten Schichtstärke. Übliche Schichtstärken sind 0,1 mm, 0,2 mm oder 0,3 mm; in diesem Zusammenhang kann die Oberflächenrauheit, gemessen in Baurichtung, zwischen 70 μm und 130 μm liegen [34, 57]. Auf der x-y-Ebene wird die Oberflächenrauheit durch das Muster der abgelegten Fila-

mentbahnen bestimmt, s. Abbildung 2-6 links. Weitere Einflussfaktoren wie „Druckgeschwindigkeit“, Materialfluss oder die Einstellung „Glätten“ haben ebenfalls Auswirkung auf die Oberflächenbeschaffenheit. Es können je nach gewähltem Füllmuster der oberen Schicht kleine Lücken, auch als Air Gap bezeichnet (1), zwischen den abgelegten Filamentbahnen aufgrund ihrer verschiedenen Ausrichtung (2 und 3) entstehen [58, 59]. In Aufbaurichtung bzw. in z-Richtung (Abbildung 2-6 rechts) ergibt sich die Oberflächentopographie und damit einhergehend die Rauheit über die einzelnen miteinander an den Kontaktflächen verschmolzenen Schichten, deren Schichtstärke und die Art der Rillen (II) [57]. Durch die Strangform des Filaments, das durch die Düse erzeugt wird, definiert sich die Haptik der Oberfläche in z-Richtung. [60]

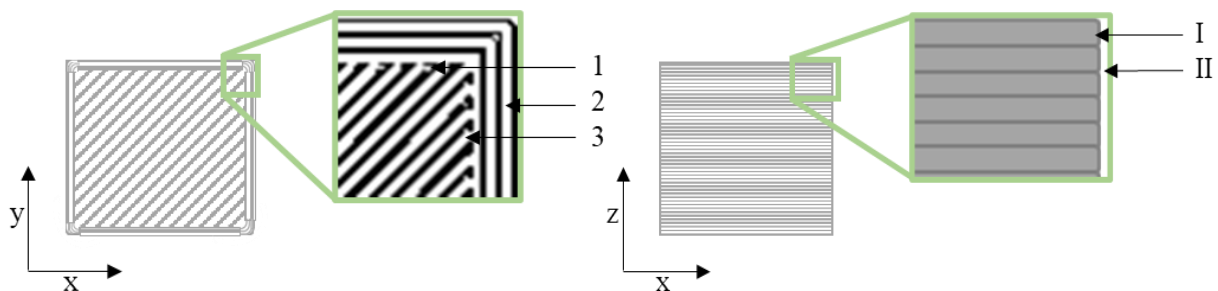


Abbildung 2-6: Schematische Darstellungen von quadratischen MEX-Bauteilen, links Draufsicht (y-x-Ebene) und rechts Seitenansicht (z-x-Ebene) mit Nummerierung einzelner Beschaffenheiten

In unmittelbarer Relation mit der Schichtstärke steht die Fertigungszeit, so dass ein Abwägen der benötigten Oberflächenbeschaffenheit zur Herstellungsdauer beim Bestimmen der Parameter zu treffen ist [61]. Bezüglich der Oberflächentopographie spielen die Beschaffenheit der Bauplattform und die Einstellungen der Parameter bei der Slicer-Software eine große Rolle. So können die Deckschichten in Verbindung mit der Fülldichte einen Einfluss auf die Oberflächentopographie haben, wie auch die Einstellung „Glätten“. Nach dem Ablegen der letzten Schicht verfährt die Düse ohne Materialförderung weiter aufgeheizt auf der zuvor eingestellten Düsentemperatur über die Bauteiloberseite und glättet bzw. „bügelt“ mit dieser Funktion die Oberseite des Bauteils.

2.1.3 Additive Fertigungseigenschaften

In Abhängigkeit von der Bauteilorientierung sind die anisotropen Eigenschaften der Zugproben und Bauteile im Allgemeinen verschieden. So ergeben sich aufgrund des Schichtaufbaus im Zusammenhang mit der Zugrichtung abweichende mechanische Eigenschaften. Allgemein zeigt sich, dass die mechanische Festigkeit innerhalb der Schicht höher ist als die Festigkeit der Verbindung zwischen den einzelnen Schichten.

In z-Richtung aufgebaute PBF-LB/P-Zugproben zeigen eine Reduzierung des E-Moduls, der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung, was im Umkehrschluss bedeutet, dass die mechanischen Eigenschaften von liegenden PBF-LB/P-Zugstäben höher sind. Hierfür ist die Schichtanbindung verantwortlich. Wie in Abbildung 2-7, links zu erkennen ist, wird diese auf Zug belastet. Anders bei den liegend gefertigten Zugstäben, hier wird an den Schichten selbst gezogen. Die Anbindung der einzelnen aufgeschmolzenen Pulverpartikel zueinander ist größer als die Anbindung der einzelnen Schichten untereinander. [10, 62, 63]

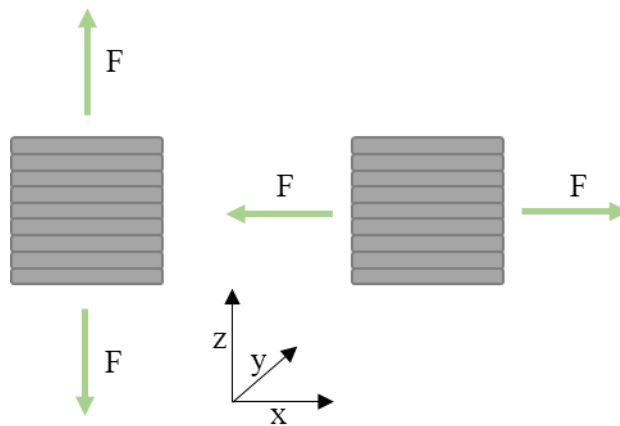


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Zugrichtung, dargestellt mit grünen-Pfeilen und F (Kraft) an z- (links) und x- oder y-orientierten (rechts) Zugstäben (Ausschnitt)

Neben dem anisotropen Verhalten der Zugproben kommt es ebenfalls zu einem Unterschied bei der Oberflächentopographie der Ober- und Unterseite bei Bauteilen mit ebenen Flächen. Die gemessenen Rauheitswerte sind an der Unterseite niedriger als an der Oberseite [64]. Unterschiede der Oberflächenrauheitswerte können hier zwischen 75 % und 85 % betragen [64, 65]. Beim ersten Energieeintrag in das Pulverbett können mehr Pulverpartikel aufschmelzen, und das Schmelzbad drückt sich förmlich nach unten. Die entstehenden Kanten kühlen als Erstes aus und ziehen sich nach oben. Bei der Oberseite hingegen bildet sich aufgrund des Abkühlverhaltens eine schärfere Kante aus. [30, 66]

Bei MEX-gefertigten Bauteilen verhält es sich bezüglich des anisotropen Verhaltens ähnlich wie bei den PBF-LB/P-gefertigten Zugproben [59]. Auch hier ist die Schichtanbindung schwächer als der abgelegte Strang, der eine Schicht bildet.

2.1.4 Optische Eigenschaften

Durch die Reduzierung der Rauheit, zu der es bei einer geeigneten Nachbehandlungsmethode kommt, ist der veränderte optische Eindruck auch mit bloßen Augen zu erkennen. Aufgrund der Reflexion des Lichts bzw. dessen Veränderung erscheinen nachbehandelte Proben glänzend. Entspricht der Einfallswinkel des Lichts dem Ausfallwinkel, wird von einer spiegelnden Reflexion gesprochen (Abbildung 2-8). Eine diffuse Reflexion zeichnet sich durch eine raue, unebene Oberfläche aus. Hier fallen die Lichtstrahlen parallel auf die Oberfläche, werden durch die Unebenheit jedoch in verschiedene Richtungen mit unterschiedlichen Ausfallwinkeln gestreut bzw. reflektiert. [67]

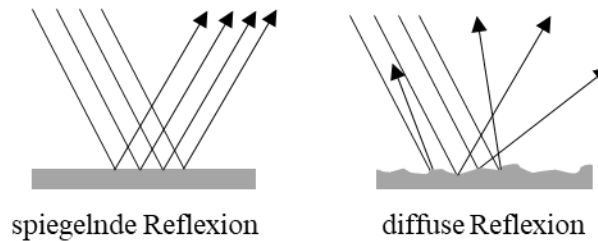


Abbildung 2-8: Schematische Darstellung von zwei Reflexionsarten nach [67], links: spiegelnde Reflexion, rechts: diffuse Reflexion

Eine glatte bzw. spiegelnde Oberfläche bedeutet, dass die Unebenheiten kleiner als die Wellenlänge des einfallenden Lichts sind [67, 68].

2.1.5 Materialien der additiven Fertigung

Für das PBF-LB/P-Verfahren werden am häufigsten Polyamide wie PA6, PA11 oder PA12 eingesetzt, wobei PA12 derzeit noch am häufigsten verwendet wird. Bei der Verwendung von PA12 von EOS GmbH kann zwischen PA2201 und PA2200 gewählt werden. PA2201 ist ein PA12 ohne Titanoxid, das aufgrund des Fehlens der weißen Farbpigmente transparenter als PA2200 erscheint; es wird im Folgenden mit PA12-natur abgekürzt. PA12 und PA12-natur unterscheiden sich nur marginal bei den mechanischen Eigenschaften. Zu den genutzten PBF-LB/P-Materialien zählen auch gefüllte Polyamide, die mit Glaskugeln (GK), Aluminium oder mit Fasern, etwa Kohlefasern, gemischt werden. [21, 55, 69, 70] Neben PA-Pulvern für den PBF-LB/P-Prozess kann ebenso Polypropylen (PP) verarbeitet werden [21, 71, 72]. Neben diesen klassischen thermoplastischen Materialien für das PBF-LB/P-Verfahren kommen auch Elastomere zum Einsatz, die nach dem Fertigungsprozess eine bestimmte Flexibilität aufweisen. Hierfür wird TPU eingesetzt, das sich, ähnlich wie Thermoplaste, oberhalb des Schmelzpunktes verarbeiten lässt [21].

Bedingt durch den PBF-LB/P-Prozess wird das verwendete Pulver zum Teil aufgeschmolzen und verfestigt sich zu dem gewünschten Bauteil, der andere Pulverteil wird prozessbedingt über die Heizstrahler ebenfalls aufgewärmt. Um für den Bauprozess ein optimales Pulver zu erhalten und Ressourcen zu sparen, werden Neu- und Altpulver miteinander vermengt. Mit zunehmender Alterung des Pulvers kann es durch Wärmeeinfluss zum einem zum physikalischen Effekt der Nachkristallisation kommen und zum anderen zum chemischen Effekt der Kettenspaltung [73]. Für den Bauprozess mit PA12 wird in der Regel Neupulver mit Altpulver im Verhältnis 1 : 1 gemischt [74, 75]. Geringere Anteile Neupulver sind z. B. über Schmelze-Volumenfließrate- oder auch Melt Volume Rate-(MVR)-Messungen vor dem Fertigungsprozess in der Regel zu überprüfen, sofern kein Pulvermanagement vorliegt. Bei einem zu hohen Altpulveranteil kann es zu einer Qualitätsminderung der Bauteile bis hin zu einem Prozessabbruch kommen [76, 77].

Durch die Hinzugabe von Glaskugeln zu PA-Pulver kann eine Reihe von mechanischen und auch thermischen Eigenschaften beeinflusst werden, so z. B. die Erhöhung der Festigkeit, des E-Moduls, der

Kristallisationstemperatur und auch der Schmelztemperatur [78 - 80]. Bauteile aus diesem Gemisch finden u. a. Anwendung im Motorbereich von Automobilen oder auch als Tiefziehwerkzeuge. [79]

Für das MEX-Verfahren steht eine breite Materialpalette zur Verfügung. Es gibt verschiedene Kunststoffe wie ABS, PLA, TPU, aber auch gefüllte Filamente mit Holzspänen oder Kupferpulver, die PLA beigemischt werden. Auf technischer Ebene werden PA12, PEI oder PEEK eingesetzt. Ebenso stehen fluoreszierende oder reflektierende Filamente zur Auswahl. [70]

2.2 Aufbau und Eigenschaften von Polymeren

Um die Verarbeitbarkeit der Polymere in der additiven Fertigung und die anschließende Nachbehandlung zu verstehen, wird ihr Aufbau näher erläutert und die Wirkzusammenhänge werden auf molekularer Ebene beschrieben.

Polymere sind miteinander verbundene Makromoleküle, die wiederum aus vielen Moleküleinheiten, den Monomeren, bestehen, s. Abbildung 2-9 [24, 81]

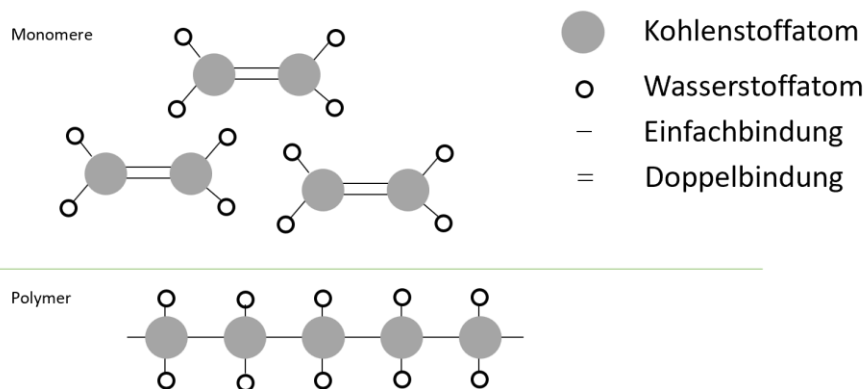


Abbildung 2-9: Graphischer Aufbau von Polymeren aus Monomeren (Ethylen/Polyethylen) in Anlehnung an [24] mit Verdeutlichung der Atome und Bindungen

Bei Thermoplasten können die Makromoleküle linear oder in verschiedenen verzweigten Formen vorliegen [82].

2.2.1 Polyamid 12

Am Beispiel von Polyamid 12 wird der Aufbau der Polyamide beschrieben und werden die Bindungskräfte erläutert. Über die Haupt- und Nebenvalenzbindungen werden Polymere zusammengehalten. Diese beiden Bindungskräfte unterscheiden sich in ihrer Art: Hauptvalenzbindungen sind chemische Bindungen, Nebenvalenzbindungen hingegen physikalische Bindungen. [54, 82]

Hauptvalenzbindungen sind für die chemische Vernetzung der Monomere zu Polymeren (Makromoleküle) verantwortlich [82]. Diese Bindungsart bleibt in der Regel bei Thermoplasten erhalten, solange keine Zersetzung des Polymers stattfindet [72]. Die Nebenvalenzbindungen, die auch als zwischenmolekulare Bindungen bezeichnet werden, bewirken hingegen einen Zusammenhalt zwischen benachbarten Makromolekülen [83]. Diese Bindungen können über eine Temperaturerhöhung geschwächt werden, wodurch es infolge von Krafteinwirkung wie Zug oder Druck dazu kommt, dass die Molekülketten

voneinander ableiten [22]. Nebervalenzbindungen lassen sich in folgende verschiedene Bindungsarten unterteilen: Wasserstoffbrückenbindungen und Bindung durch Van-der-Waals-Kräfte, zu denen die Bindungen durch Dispersionskräfte, Dipol-Dipol-Kräfte und Induktionskräfte gehören. Am Beispiel von PA12, das ein CONH-Polymer mit folgender Strukturformel ist (Abbildung 2-10), kann die Bildung von Wasserstoffbrückenbindungen gezeigt werden. [82]

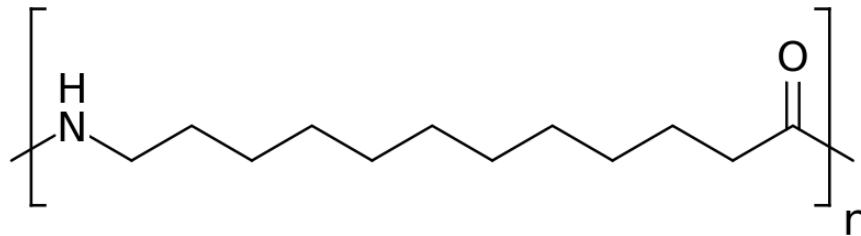


Abbildung 2-10: Strukturformel von PA12 nach [22]

Bei den Wasserstoffbrückenbindungen geht ein H-Atom eine Verbindung mit einem stark elektronegativ geladenen Element ein; zu diesen Elementen zählen Fluor (F), Sauerstoff (O), Stickstoff (N) und in bestimmten Fällen auch Chlor (Cl). Je nach Elektronegativität des Bindungspartners bildet sich die Bindungsenergie bzw. -stärke aus. [22]

PA12 besitzt ein O-Atom, das sich mit dem H-Atom verbindet, wodurch der Zusammenhalt über Wasserstoffbrückenbindungen des Thermoplasts geschaffen wird, siehe Abbildung 2-11 [82, 84].

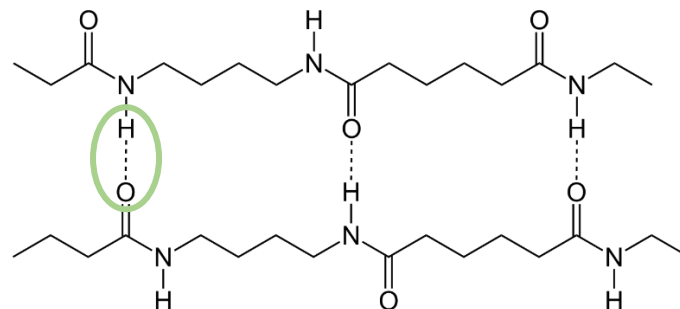


Abbildung 2-11: Darstellung der Polymerketten mit Hervorhebung der Wasserstoffbrückenbindungen (grün markiert) in PA12 nach [82, 84]

Bei Thermoplasten, zu denen u. a. Polyamide wie Polypropylen zählen, ist die Länge der Makromoleküle für den Zusammenhalt noch von maßgebender Bedeutung [72]. Polymere können in drei Hauptgruppen unterteilt werden, die auf der Struktur der Makromoleküle beruhen. Hierzu zählen die Duroplaste, die Elastomere und die Thermoplaste. Zu den Thermoplasten zählen die hier betrachteten Polymere, die amorphe oder teilkristalline Strukturen aufweisen. Polyamid wird den teilkristallinen Thermoplasten zugeordnet, die aus amorphen und kristallinen Bereichen aufgebaut sind. [72] In Abbildung 2-12 ist der Aufbau eines teilkristallinen Polymers mit seinen parallel verlaufenden kristallinen und verknäulten amorphen Bereichen zu erkennen.

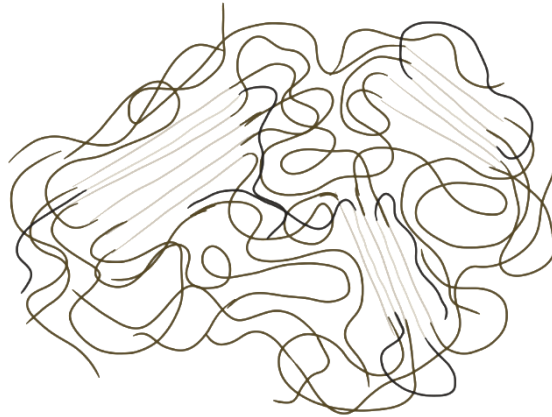


Abbildung 2-12: Teilkristalliner Thermoplast nach [82, 85], in Schwarz, knäuelartig: amorpher Bereich in Grau, lamellenartig: kristalliner Bereich

Unter Wärmeeinwirkung gleiten bei rein amorphen Thermoplasten die knäuelartigen Makromolekülketten leicht voneinander ab, während das bei den teilkristallinen Thermoplasten nicht der Fall ist, da hier in den kristallinen Bereichen die Molekülketten geordnet vorliegen. Durch die Nebenvalenzbindungen, die in den geordneten Bereichen starke Wechselwirkungen aufeinander ausüben, findet ein Abgleiten unter Wärmeeinfluss nur bedingt statt. Erst durch Aufschmelzung der kristallinen Bereiche fangen diese Thermoplaste an zu schmelzen, wobei die amorphen Bereiche nach Überschreiten der Glasübergangstemperatur erweichen. [24]

Unter der Glasübergangstemperatur T_G wird die Temperatur verstanden, bei der amorphe Kunststoffe bzw. im amorphen Bereich teilkristalline Kunststoffe vom starren, hartelastischen in den weichen, thermoelastischen Zustand übergehen. Hier fängt eine Kettenbeweglichkeit auf molekularer Ebene an [54, 85]. Beim Glasübergang tritt zudem die größte Änderung der Eigenschaften ein [54]. Beim PBF-LB/P-Prozess kann mit Hilfe einer DSC-Messung das Sinterfenster bestimmt werden, das oberhalb der Glasübergangstemperatur zwischen Kristallisationstemperatur und Schmelztemperatur liegt. [21] Aufgrund der moderaten Glasübergangstemperatur ergibt sich durch den Schmelzbereich zwischen 176 °C und 186 °C ein großes Sinterfenster. Es führt zu dem Vorteil von PA12 für das PBF-LB/P-Verfahren, dass eine langsame Abkühlung des Pulverkuchens ermöglicht wird und sich somit eine Minimierung der Rekristallisation ergibt. Ein weiterer positiver Aspekt ist die Reduzierung von Eigenspannungen und damit die mögliche Minimierung von Verformungen der Bauteile. [86 - 88]

Bei Sauerstoffkontakt, Lichteinfall oder Wärme kann es zu irreversiblen chemischen Alterungsvorgängen kommen, die u. a. durch Kettenspaltungen entstehen [82]. In Abhängigkeit von der Kettenlänge, die auch die Molmasse beeinflusst, sinkt oder steigt die Beweglichkeit der Makromoleküle in der Schmelze [73, 83]. Mit Hilfe von MVR-Messungen lässt sich die Schmelzfließrate bestimmen und so eine Anpassung des Pulvers für den PBF-LB/P-Prozess, als Mischung von Neu- und Altpulver, vornehmen. Im PBF-LB/P-Prozess werden neben PA12 auch weitere Polyamide eingesetzt, die sich im strukturellen Aufbau bei der Anzahl der C-Atome unterscheiden. Mit zunehmender Anzahl der C-Atome sinken bei PA die Dichte (PA6: $\delta = 1,14 \text{ g/cm}^3$ und PA12: $\delta = 1,01 \text{ g/cm}^3$, Angaben für Feststoffe) und auch die Schmelztemperatur (PA6: $T = 222 \text{ °C}$ und PA12: $T = 178 \text{ °C}$). Die Werte von PA11 liegen zwischen

denen von PA6 und PA12. Ebenso nimmt die Feuchtigkeitsaufnahme von Wasser ab, wodurch besonders PA12 im Vergleich zu den anderen Polyamiden eine höhere Spannungsris- und Witterungsbeständigkeit aufweist. [22, 72, 82]

2.2.2 Polypropylen

PP ist wie PA12 ein teilkristalliner Thermoplast und wird aus Propylen, einem farblosen Gas, in einem Suspensions- oder Gasphasenprozess gewonnen [82]. In dem Prozess werden Kohlenstoff-Doppelbindungen des Gases in langkettige Kohlenwasserstoffketten mit Methylgruppen umgewandelt [89]. PP kann isotaktisch, syndiotaktisch oder ataktisch vorliegen, es wird demnach unterschieden, wo und wie die CH₃-Gruppen angeordnet sind. Aufgrund der Anordnung kommt es zu verschiedenen Eigenschaften des Polymers. Wenn sich alle CH₃-Gruppen auf einer Seite der Kohlenstoffkette befinden (isotaktisch), s. Abbildung 2-13, zeigt das Polymer u. a. die höchste Zugfestigkeit, Schmelztemperatur und Härte, zudem ist es schnell kristallisierend.

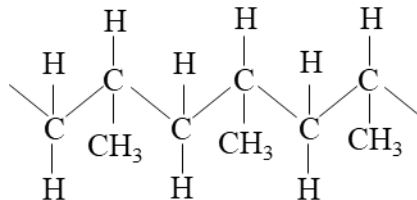


Abbildung 2-13: Darstellung des isotaktischen Polypropylen

Bei der syndiotaktischen Variante ist PP langsam kristallisierend bzw. weniger kristallin, und die CH₃-Gruppen liegen abwechselnd auf beiden Seiten der Kohlenstoffkette. Demgegenüber sind beim ataktischen PP, das amorph ist, die Methyl-Seitengruppen räumlich zufällig an der Kohlenstoffkette angeordnet. Hauptsächlich wird im technischen Bereich isotaktisches bzw. PP mit hoher Isotaktizität aufgrund seiner Teilkristallinität eingesetzt. [25, 83, 90]

Im Gegensatz zu Polyamid ist PP ein unpolarer Thermoplast und somit beständig gegen die meisten polaren Lösungsmittel (z. B. organische Säuren, Ketone). [72, 91] PP ($\delta = 0,895 \text{ g/cm}^3$) weist eine geringere Dichte als PA12 auf und hat eine Schmelztemperatur zwischen $T = 158 \text{ °C}$ und $T = 168 \text{ °C}$. Optimiertes PP-Pulver für den PBF-LB/P-Prozess kann eine vorteilhafte hohe Bruchdehnung von über 200 % aufweisen und ist im Gegensatz zu PA12 zu 100 % recyclebar. [21, 71, 72] Aufgrund der Biokompatibilität können PP-Teile auch als chirurgische Implantate eingesetzt werden [92].

2.3 Stand der Technik der gängigen Nachbehandlungsmethoden

Als Grundlage für die vorliegende Arbeit wird im Speziellen auf den Verfahrensschritt im Anschluss an die Bauteilfertigung eingegangen. Hier kann in zwei verschiedene Nachbehandlungsschritte (s. Abbildung 2-14) unterteilt werden: zum einen in das klassische Post-Processing, zu dem die notwendigen Nachbehandlungsschritte wie die Entfernung der Stützstrukturen bei MEX-Bauteilen oder das Abbürs-

ten des lose anhaftenden Pulvers von den PBF-LB/P-Bauteilen gehören [52], zum anderen die optionalen Nachbehandlungsverfahren wie das Lackieren, Galvanisieren, Einfärben, Beschichten oder Tauchätzen [10, 21, 37, 38, 93, 94]. [38]

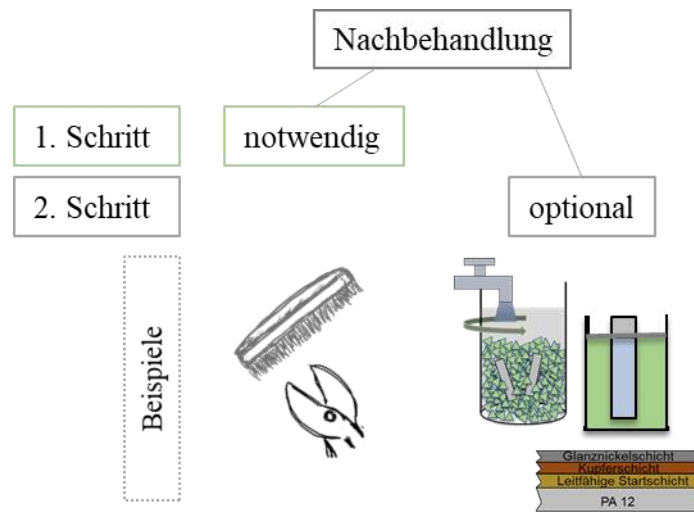


Abbildung 2-14: Darstellung der notwendigen und optionalen Nachbehandlungsoptionen mit Beispielen

Zu den genannten Nachbehandlungsverfahren zählen ebenfalls Kombinationen aus beiden Ansätzen. Jedes dieser Verfahren zeichnet sich durch die zu erreichende spezifische Oberflächentopographie und deren Eigenschaften aus. Mittels der Nachbehandlungsverfahren können neben der Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit, wie einer Reduzierung der Welligkeit oder der Rauheit, zudem weitere Eigenschaften, wie z. B. die Härte und weitere mechanische Eigenschaften, beeinflusst werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass sowohl bei PBF-LB/P-Proben aus PA12 (Material erworben von der EOS GmbH) als auch bei MEX-Proben aus PA12 (Material bezogen von Stratasys Ltd) die mechanischen Eigenschaften zum Teil durch die Nachbehandlung bedingt werden. [95 - 99]

Im Rahmen der Nachbehandlungsoptionen zur Veränderung der Oberflächentopographie und der mechanischen Kennwerte kann bei der Prozessvorbereitung durch die Orientierung der Bauteile bereits Einfluss auf die Eigenschaften genommen werden [100]. So führt etwa durch das anisotrope Verhalten der Bauteile die Ausrichtung z. B. bei liegenden Zugstäben zu höheren Festigkeitswerten als bei stehenden. [30, 101]

Prozesseitig wurden bereits viele Ansätze bei PBF-LB/P zur Steigerung der mechanischen Eigenschaften untersucht und validiert. So hat der Energieeintrag des Lasers, durch den das Polymerpulver aufgeschmolzen wird, ebenso Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften wie die Scangeschwindigkeit [102]. Dabei muss je nach Anlage und verwendetem Ausgangsmaterial zunächst ein Optimum gefunden werden. Abhängig vom Energieeintrag des Lasers konnte zudem ein Einfluss auf die Rauheit der Probe ausgemacht werden. [62, 103 - 106] Ebenfalls nehmen prozesseitige Einstellungen bei der Materialextrusion neben der gewählten Schichtstärke Einfluss auf die Oberflächenrauheit und die mechanischen Eigenschaften [107 - 109].

Beim PBF-LB/P-Verfahren zeigt das Ausgangsmaterial andere materialtypische bzw. formtypische Auswirkungen auf die Rauheit als bei der MEX [110]. In der Form unterscheiden sich die eingesetzten

Materialien, entweder als Pulver beim PBF-LB/P oder als Strang bzw. Filament beim MEX-Verfahren. In Kapitel 4.1 und 4.2 wird der Einfluss des Ausgangsmaterials auf die Rauheit näher beschrieben. Durch das PBF-LB/P-Verfahren werden PA12-Bauteile gefertigt, die anlagen- und materialabhängig Rauheitswerte R_z (mittlere Rautiefe), die in Aufbaurichtung des Bauteils gemessen werden, zwischen $75\ \mu\text{m}$ und $120\ \mu\text{m}$ aufweisen [111]. PP-Proben weisen hingegen eine in z-Richtung gemessene Rauheit R_z von $100\ \mu\text{m}$ bis $134\ \mu\text{m}$ auf [66, 112]. Neben diesen Einflussfaktoren zeigt die Pulverqualität ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Oberflächenrauheit [32].

Für eine Vielzahl von Anwendungen reichen die topographischen Eigenschaften nicht aus, was dazu führt, dass optionale Nachbehandlungsschritte von großer Bedeutung sind. Ebenso werden beim MEX-Verfahren die Oberflächen der erzeugten Bauteile und Objekte für viele Anwendungen zusätzlich nachbehandelt. Neben dem Material, der Materialform und der Anlage gilt als ein maßgebliches Kriterium für einen prominenten Einfluss auf die Rauheit bei allen Verfahren der additiven Fertigung die Schichtdicke [113].

2.3.1 Galvanisieren

Aus dem Bereich der konventionellen Fertigung ist Galvanisieren als Nachbehandlungsverfahren üblicherweise bei Metallbauteilen bekannt. Mittels dieses elektrochemischen Verfahrens können aber auch Kunststoffbauteile durch den zusätzlichen Auftrag eines Leitlacks galvanisiert werden. Durch das Galvanisieren der Proben wird eine elektrisch leitende Schicht erzeugt, die neben funktionellen Eigenschaften die Vorteile einer metallischen Oberfläche mit sich bringt und als Schutzschicht dienen kann. Zudem sind galvanisierte Kunststoffbauteile leichter als, aber optisch äquivalent zu Metallbauteilen. Für additiv gefertigte Polymerbauteile wird dieses Nachbehandlungsverfahren bereits eingesetzt [38, 114]. Das Galvanisieren wird nach DIN 8580 den Beschichtungsverfahren aus dem ionisierten Zustand zugeordnet. Hierbei wird das Niederschlagen einer metallischen Schicht auf einem Substrat verstanden, das in ein Elektrolytbad getaucht wird. Elektrolyte sind Metallsalzlösungen, in denen die abzuscheidenden Metalle in Form von Ionen vorliegen. An den Kanten von Bauteilen kommt es während des Galvanisierungsvorganges zu höheren Stromdichten mit der Folge, dass hier keine gleichmäßige galvanische Schicht gebildet werden kann. [10, 34, 49, 115]

Durch das Galvanisieren kann die Oberflächenrauheit reduziert werden, wobei in Abhängigkeit von der Menge der abgeschiedenen Metallionen die aufgetragene Schicht und damit die Maße des Grundkörpers zunehmen. In Zusammenhang mit der aufgetragenen Schichtstärke steigt der E-Modul bei einer Zunahme der galvanischen Schicht an, s. Tabelle 2-1. Ebenfalls nehmen die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung zu. [30, 116]

Allgemein sind im Bereich der MEX bei den meisten Untersuchungen Auswirkungen von Nachbehandlungsverfahren für die häufig verwendeten Materialien PLA und ABS zu finden. Hingegen zeigen sich die Einflüsse auf PBF-LB/P-gefertigte Proben zumeist für PA12.

Tabelle 2-1: Ergebnisse von galvanisierten MEX- und PBF-LB/P-Proben

Quelle	Aufgetragene Schichtstärke in μm	Rauheit in μm	E-Modul in N/mm^2	Zugfestigkeit in N/mm^2	Bruchdehnung in %
PBF-LB/P/PA12		↑ Erhöhung, ↓ Reduzierung, → gleichbleibend, (↑)/(↓) Trend, – keine Angabe			
Saleh et al. [116]	20–120	↓	↑	–	–
Wiedau et al. [99]	45–110	↓	↑	–	–
Abschlussbericht AiF-IGF: 19623 N [30]	100 und 150 Kupfer Nickel	– ↓	↑ ↑	↑ ↑	↑ ↑
MEX					
Sathishkumar et al. [117]	HIPS / 250	↓	↑	↑	↑
Javelin Technologies Inc. [118]	ABS / –	↓	–	↑	–

Beim Galvanisieren können somit die mechanischen Eigenschaften gesteigert werden und die Oberflächenrauheit lässt sich reduzieren, wobei eine Maßhaltigkeit der Ausgangsgeometrie nicht gegeben ist.

2.3.2 Dip-Coating

Beim Dip-Coating, auch Tauchbeschichtung genannt, wird das nachzubehandelnde Bauteil (1) in ein Sol-Gel-Bad (2) getaucht, s. Abbildung 2-15. Das Sol-Gel-Verfahren ist ein Bereich der chemischen Nanotechnologie, der sich auf Oberflächenbeschichtungen spezialisiert hat. Über die Verweilzeit, die Abzugsgeschwindigkeit, die Konzentration des Sol-Gels und die Tauchwiederholungen wird die Schichtstärke des Auftrags auf dem Bauteil (3) eingestellt [36]. Für die Beschichtung werden zwei Komponenten zu einer Suspension (Sol-Gel) miteinander vermengt, eine verdampfende und eine aktive Komponente, der schichtbildende Anteil. [119]

Über diese Art der Tauchbeschichtung können z. B. die chemischen, physikalischen und thermischen Eigenschaften durch die aufgetragene Schicht im Randbereich verändert werden [120]. Mit Hilfe des Dip-Coatings lässt sich je nach gewählter Aktivkomponente ebenso eine Wasserdichtigkeit des Bauteils erzielen [36].

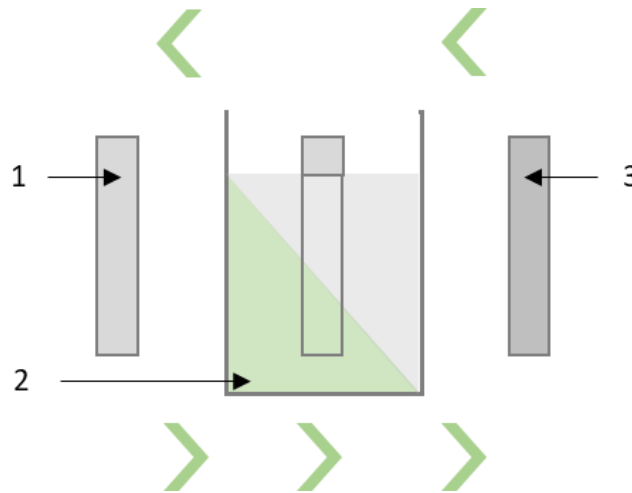


Abbildung 2-15: Schematischer Ablauf in drei Schritten des Dip-Coatings am Beispiel einer rechteckigen Probe mit Nummerierungen

Das Dip-Coating ist ein verbreitetes auftragendes Nachbehandlungsverfahren, das für die AF zwar weniger prominent ist, aber eingesetzt wird [121, 122]. Tabelle 2-2 sind die Ergebnisse zu nachbehandelten PA12-Proben nach dem Auftrag von Natronwasserglas mittels des Dip-Coating-Verfahrens zu entnehmen.

Tabelle 2-2: Ergebnisse von PA12-Proben nach dem Dip-Coating

Quelle	Nachbehandlungsparameter	Rauheit in μm	E-Modul in N/mm^2	Zugfestigkeit in N/mm^2	Bruchdehnung in %
PBF-LB/P/PA12		↑ Erhöhung, ↓ Reduzierung, → gleichbleibend, (↑)/(↓) Trend, – keine Angabe			
Abschlussbericht AiF-IGF: 19623 N [30]	Fünf Schichten, Natronwasserglas	↓	↓	↓	↑
MEX					
Keine Angaben					

Weitere Angaben für PBF-LB/P- und MEX-Proben sind in der Literatur nicht zu finden.

2.3.3 Lackieren und Färben

Ähnlich wie beim Dip-Coating werden beim Lackieren von Bauteilen je nach Werkstoff ebenfalls mehrere Schichten aufgetragen. Dabei werden meist verschiedene Materialschichten aufgebracht, z. B. ein Grund-, ein Vor- und ein Decklack [93, 123]. Ein Lack ist eine mehrkomponentige Substanz, die zumeist aus flüchtigen Bestandteilen, Bindemitteln, Farbmitteln sowie weiteren Additiven besteht [123]. Über das Auftragen von Lack können, wie auch beim Einfärben, Farbwünsche realisiert werden. Neben einer farblichen Veränderung des Bauteils lassen sich über ausgewählte Lacke auch ein UV-Schutz oder antimikrobielle Eigenschaften erzielen [124]. Indem beim Lackieren wie auch beim Galvanisieren und beim Dip-Coating Material aufgetragen wird, nehmen die Ausgangsmaße des Bauteils zu. Durch vorherige Konstruktionsanpassungen kann diese Abweichung kompensiert werden, so dass das nachbehandelte Bauteil die gewünschten Maße erreicht.

delte Bauteile die erforderlichen Endmaße aufweist. Hingegen wird beim Einfärben das Bauteil mit dem Farbmittel bis in die Randschicht bis ca. 0,5 mm durchdrungen, was minimalen Einfluss auf die Oberflächenrauheit zeigt [125]. Hierfür wird in einem meist rotierenden Behälter Wasser mit dem Farbmittel gemischt und mit PBF-LB/P-Bauteilen bestückt. Nach einer definierten Prozesszeit können die eingefärbten Bauteile entnommen und getrocknet werden. [126]

Tabelle 2-3: Ergebnisse von PA12-Proben nach dem Lackieren und Färben

Quelle	Nachbehandlungsparameter	Rauheit in μm	E-Modul in N/mm^2	Zugfestigkeit in N/mm^2	Bruchdehnung in %
PBF-LB/P/PA12		↑ Erhöhung, ↓ Reduzierung, → gleichbleibend, (↑)/(↓) Trend, – keine Angabe			
Holländer u. Co-semans [124]	Lack, mind. vier Schichten	↓	–	–	–
Kaddar [127]	Gespachtelt, geschliffen und lackiert	↓	–	–	–
MEX					
Keine Angaben					

Für MEX-Bauteile sind keine Angaben zur Nachbehandlung mittels Lackieren und Färben zu finden. Über die gebräuchliche Methode des Lackierens, bei der Bauteile gespachtelt, geschliffen und lackiert bzw. mehrere Lackschichten aufgetragen werden (z. B. Basis- und Decklack oder Primer, Basis- und Klarlack) kann abgeleitet werden, dass eine Reduzierung der Oberflächenrauheit eintritt. In der Regel werden pro Lackschicht 10 μm bis 35 μm Lack aufgetragen [128]. Beim Färben dürfte es ähnlich wie bei den PBF-LB/P-Teilen keinen Einfluss geben.

2.3.4 Gleitschleifen

Ein weiteres aus der konventionellen Nachbearbeitung bekanntes Verfahren ist das Gleitschleifen, auch als Trowalisieren bekannt. In Abbildung 2-16 ist beispielhaft das Schema einer Gleitschleifrommel mit Schleifgut (4) und Bauteilen (5) zu erkennen. In einer rotierenden Trommel oder in einem vibrierenden Behälter werden unter Zugabe von Gleitschleifkörpern und Prozesswasser (1) die Bauteile mechanisch bearbeitet. Durch die Bewegung (2) des Behälters (3) bzw. der Trommel findet eine Relativbewegung zwischen den Bauteilen und den Gleitschleifkörpern statt, so dass die Schleifkörper über Kanten und Flächen des Werkstücks gleiten und so Material abtragen oder die Oberfläche verdichten. Dieses Verfahren ist geeignet bei einer großen Anzahl auf einmal nachzubehandelnder Bauteile [129]. [130]

Neben einer rein mechanischen Nachbehandlung durch Gleitschleifen ist auch eine Kombination aus mechanisch-chemischem Nachbehandeln möglich, was von den eingesetzten flüssigen Chemikalien bzw. dem verwendeten Compound abhängig ist [130].

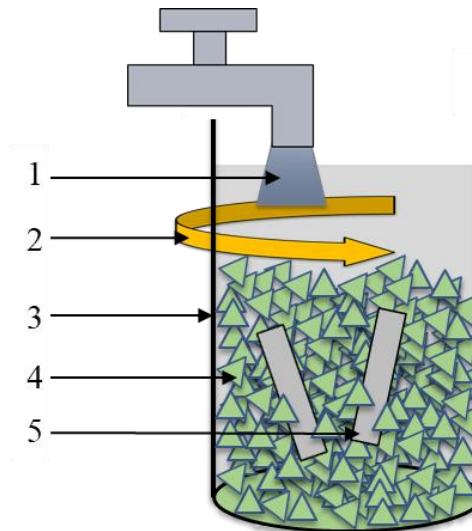


Abbildung 2-16: Schematische Darstellung eines Gleitschleifbehälters mit Prozesswasserzuführung, Bauteilen und Gleitschleifkörpern

Die Schleifkörper unterscheiden sich in Form, Größe und Material und sind beim Gleitschleifen als Werkzeug anzusehen. Am häufigsten wird Kunststoff- oder Keramikschleifgut mit Querschnittsformen, z. B. stern-, zylinder- oder dreiecksförmiges Schleifgut, eingesetzt. Die als Prozesswasser bezeichnete Compound-Lösung ist eine Mischung aus chemischem Behandlungsmittel, dem Compound, und Wasser. Sie dient dazu, den Abrieb aufzunehmen und Verschmutzungen sowie Öle oder Schmierstoffe von den Werkstoffen zu lösen, und kann auch als Korrosionsschutz eingesetzt werden. Beim Gleitschleifen wird eine gleichzeitige, automatisierte Bearbeitung mehrerer Werkstücke ermöglicht. [10, 36, 66, 130, 131]

Mit Hilfe dieses Nachbehandlungsverfahrens kann die Oberflächenrauheit auf ca. 35 % bis 18 % des Ausgangswertes reduziert werden [36, 132]. Dabei können Teile mit komplexen Geometrien kaum bis gar nicht gänzlich nachbehandelt werden, und Flächen von Bohrungen und Hinterschneidungen bleiben unberührt [125, 133]. Tabelle 2-4 zeigt die Ergebnisse aus der Literatur für beide hier betrachteten AF-Verfahren. Je nach Anwendung unterscheiden sich die Einstellungen aufgrund der großen Variation der Prozessparameter und des Gleitschleifgutes.

Tabelle 2-4: Ergebnisse von PBF-LB/P- und MEX-Proben nach dem Gleitschleifen

Quelle	Nachbehandlungsparameter	Rauheit in μm	E-Modul in N/mm^2	Zugfestigkeit in N/mm^2	Bruchdehnung in %
PBF-LB/P/PA12		↑ Erhöhung, ↓ Reduzierung, → gleichbleibend, (↑)/(↓) Trend, – keine Angabe			
Khan et al. [134]	1 h bis 4 h, Keramiksleifgut, 25 mmx 25 mm, dreieckige Prismaform	↓	–	↓	→ (↑)
Schmid et al. [132]	8 h, Keramiksleifgut, Stabform	↓	–	–	–
PBF-LB/P/PP					
Reinhardt [66]	0,5 h bis 3 h divers	↓	–	–	–
MEX					
Boschetto [135]	0,5 h bis 16 h, Keramiksleifgut, 3 mmx 10 mm, Zylinderform	↓	–	–	–

Bei weiteren abrasiven Nachbehandlungsmethoden wie dem Schleifen kann die Rauheit um ca. 82 % reduziert werden, wobei ebenfalls mit zunehmender Nachbehandlungszeit ein unerwünschter Materialabtrag von ca. 65 μm nach 1 h erfolgt [136].

2.3.5 Tauchätzen und Bedampfen

Für eine Nachbehandlung, die nahezu komplexitätsunabhängig ist, eignet sich das Tauchätzen oder das Bedampfen („Vapour Smoothing“) mit einer Chemikalie, meist Säure [10, 95, 97]. Hierfür finden sich seit Jahren einige Anbietende als Dienstleistende oder als Anlagenverkaufende auf dem internationalen Markt. Der polnische Hersteller von 3D-Druckern und Filamenten Zortrax hat ein Nachbehandlungssystem mit dem Namen „Zortrax Apoller“ (Abbildung 2-17) entwickelt, mit dem sich die Oberflächenrauheit von Bauteilen reduzieren lässt. Dabei werden Bauteile in einer Kammer verschlossen und mit Aceton oder Ethanol bedampft, wonach sie sich anschließend gebrauchsfertig entnehmen lassen.

Die Dauer des gesamten Prozesses wird mit drei Stunden angegeben. Bauteilgrößen, die maximal nachbehandelt werden können, sind durch die Maße der Kammer mit 300 mm x 250 mm x 250 mm limitiert. Temperatur, Druck und Konzentration der Lösungsmitteldämpfe werden automatisch gesteuert. In der Kammer herrscht stets Unterdruck, um einen Austritt von Dämpfen aus dem Gehäuse zu verhindern. [137]

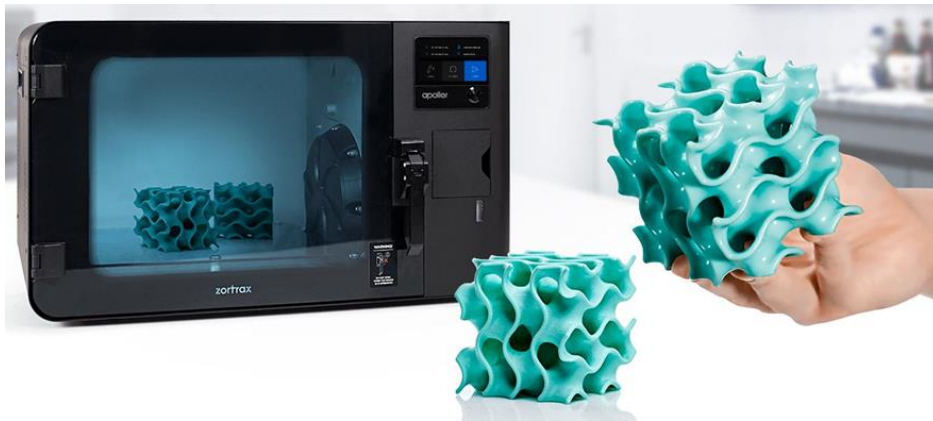


Abbildung 2-17: Zortrax Apoller, Nachbehandlungsanlage und nachbehandelte Bauteile [137]

Anwenden lässt sich das Verfahren jedoch nur auf solche Bauteile, die aus firmeneigenen Filamenten wie „Z-ABS“, „Z-ULTRAT“, „Z-ULTRAT Plus“, „Z-ASA Pro“ und „Z-HIPS“ oder deren Äquivalenten von anderen Herstellern gefertigt wurden. Somit ist das Verfahren für die Anwendung auf Bauteile aus z. B. PA12 oder PLA ungeeignet.

Für eine glättende Nachbehandlung bei PLA-Bauteilen eignet sich Tetrahydrofuran (THF), das wie die Nachbehandlung von ABS-Bauteilen mit Aceton schon seit vielen Jahren in der „Maker-Szene“ bekannt ist und angewendet wird. Sowohl in flüssiger als auch in verdampfter Form kann bei additiv gefertigten PLA-Bauteilen mit THF die Oberflächenrauheit signifikant reduziert werden, was weitergehend zu einer glänzenden Oberfläche, ähnlich wie bei ABS-Bauteilen, führt, s. Abbildung 2-17. [138]

Im Jahr 2016 publizierte die Universität Sheffield einen eigens entwickelten Nachbehandlungsprozess mit dem Namen „PUSH“, der eine glatte Oberfläche auf Bauteilen aus thermoplastischen Polymeren erzeugt. Dieser Prozess wurde erfolgreich an Werkstoffen wie PA12 und PA11 sowie an thermoplastischem Polyurethan getestet. Er ist anwendbar auf komplexe Bauteilstrukturen ohne Einschränkungen hinsichtlich der Bauteilgröße. [139]

Auf dieser Basis hat das Unternehmen Additive Manufacturing Technologies Ltd aus Sheffield in Kooperation mit der Universität einen Prozess, mit der Bezeichnung „BLAST“, entwickelt. Grundlage sind die Lösungsmittelmischungen des „PUSH“-Prozesses, die von der Universität Sheffield ermittelt wurden. Da diese Chemikalien nicht toxisch sind, kann das Verfahren auch auf medizintechnische Produkte angewendet werden. Unter dem Namen „POSTPRO3D“ ist das von Additive Manufacturing Technologies Ltd entwickelte patentierte Nachbehandlungssystem kommerziell verfügbar [140]. Mit dieser Apparatur wurden in Tests Mittenrauwerte von $R_a < 1 \mu\text{m}$ erzeugt. [139]

Die Größe der Prozesskammer wird mit 600 mm x 400 mm x 400 mm und die Prozesszeit mit 90 bis 120 min angegeben. Weiterhin konnte durch Tests gezeigt werden, dass der „BLAST“-Prozess zu keinen Verlusten der Zugfestigkeit führt, wobei die Bruchdehnung jedoch zunimmt. Ein Anstieg der Bruchdehnung ist mit einer Verringerung der Anzahl an möglichen Initiierungsstellen für Risse aufgrund der Glättung der Oberfläche zu erklären. Nachbehandelte Bauteile zeigen darüber hinaus eine maximal 0,4%ige Maßabweichung vom unbehandelten Bauteil. [139]

Die DyeMansion GmbH hat eine Nachbehandlungsanlage „VaporFuse Surfacing (VFS)“ auf den Markt gebracht, in der die Bauteile erst bedampft und dann durch Vakuumtrocknung nachbehandelt werden. Mit Hilfe des Trocknungsvorgangs wird das Lösungsmittel, auch Solvens genannt, von den Objekten entfernt, wodurch sich deren Oberfläche verfestigt. Bauteile aus PA11, PA12, TPU oder PP erfahren durch die Nachbehandlung in der VFS eine versiegelte Oberfläche, die dadurch abwaschbar ist und spritzgussähnliche Qualitäten aufweist. [141, 142]

Eine weitere Nachbehandlungsanlage wird von der Firma LuxYours vertrieben, die auch eine „chemische Glättung“ als Dienstleistung anbietet. Bauteile aus PA, TPU oder u. a. PLA können in der Nachbehandlungsanlage „LUXMatic 700“ geglättet werden. Hier werden die Vorteile einer Nachbehandlung mit Glanz, Hygiene und leichter Reinigung angegeben. [45]

Im Wesentlichen unterscheiden sich die Anlagen in ihrem Aufbau und ihrer Größe. In allen vorgestellten Nachbehandlungsanlagen werden die nachzubehandelnden Bauteile von einem verdampften Medium umgeben und nach einer definierten Prozesszeit entnommen. Das eingesetzte und verdampfte Medium wird anlagenintern zurückgewonnen, so dass keine gesundheitsschädigenden Stoffe austreten und das Medium mehrmalig wieder verwendet werden kann [55].

In Tabelle 2-5 sind im ersten Abschnitt unter PBF-LB/P/PA12 die Ergebnisse des Nachbehandlungsprozesses nach VFS und Push dargestellt, darunter nachbehandelte MEX-Proben. Bei den MEX-Proben variieren ebenfalls die konkrete Nachbehandlungsmethode und das Probenmaterial. Aufgrund der verschiedenen Probenmaterialien, wie PLA und ABS, sind ebenfalls die Nachbehandlungsmedien angepasst. Bei der Nachbehandlung von PLA-Proben kommt es durch das Bedampfen von Dichlormethan zu einer signifikanten Reduzierung der Zugfestigkeit um ca. 60 %. Diese Auswirkung wird durch Schwächung der Molekülketten und den Einfluss auf die molekulare Struktur der Chemikalie auf den Kunststoff erklärt. [143]

Tabelle 2-5: Ergebnisse von AF-Proben nach dem Tauchätzen und Bedampfen

Quelle	Nachbehandlungsparameter	Rauheit in μm	E-Modul in N/mm^2	Zugfestigkeit in N/mm^2	Bruchdehnung in %
PBF-LB/P/PA12		↑ Erhöhung, ↓ Reduzierung, → gleichbleibend, (↑)/(↓) Trend, – keine Angabe			
DyeMansion GmbH [144]	Bedampfen (VFS)	↓	–	–	–
Oehlmann et al. [145]	Bedampfen (VFS)	↓	↓	↓	↓
Crane et al. [146]	Bedampfen (PUSH)	↓	→	→ (↑)	↑
MEX					
Mazlan et al. [147]	Bedampfen (kalt), zw. 5 min und 30 min ABS – Aceton ABS – MEK	↓ ↓	–	↓ ↓	–
Jin et al. [143]	Bedampfen (kalt), 30 s PLA – Dichlormethan	↓	–	↓	↑

Mit einer geeigneten Nachbehandlungsmethode kann neben den dekorativen Eigenschaften auch auf die funktionellen Eigenschaften Einfluss genommen werden. Hierzu zählen neben der Rauheit auch die Reibung, die Festigkeit und die Härte. [10, 55, 148]

Zusammenfassend sind in Tabelle 2-6 alle aufgeführten Verfahren mit der Eignung für Bauteile dargestellt, die mittels Materialextrusion oder pulverbettbasiertem Schmelzen mit Polymeren gefertigt wurden.

Tabelle 2-6: Zusammenfassung der Nachbehandlungsarten und deren Eignung für MEX und PBF-LB/P, zzgl. [38, 133, 149, 150]

Art der Nachbehandlung	MEX	PBF-LB/P	
Gleitschleifen	(x)	(x)	
Tauchätzen	x	x	x geeignet
Bedampfen	x	x	– ungeeignet
Färben	–	x	(x) bedingt geeignet
Lackieren	x	x	
Galvanisieren	x	x	
Dip-Coating	(x)	x	

Ein großer und prominent genannter Vorteil der additiven Fertigung ist die Generierung komplexer und bionischer Strukturen. Dieser Vorteil wird häufig als Alleinstellungsmerkmal der AF gegenüber konventionellen Verfahren wie dem Gießen, Fräsen oder Drehen genannt. Daraus ergibt sich ein Nachteil des Gleitschleifens, aber auch des Dip-Coatings und des Galvanisierens. Besonders das Gleitschleifen, bei dem die Erreichbarkeit von Bauteilstrukturen durch die Größe der Gleitschleifkörper begrenzt ist, ist für die meisten komplexen Strukturen ungeeignet. Alle direkt sichtbaren Oberflächen können zwar nachbehandelt werden, jedoch bleiben verdeckte Oberflächen oder Spalten, Bohrungen und Ecken, die kleiner als die Gleitschleifkörper sind, unbehandelt. Davon ausgehend, dass neben der optischen auch eine mechanische Verbesserung erzielt werden kann, sind das Trowalisieren, aber auch das Dip-Coating mit pastöser Substanz und das Galvanisieren eher ungeeignet. Beim Tauchätzen bzw. Bedampfen können MEX- und PBF-LB/P-Bauteile aus den gängigen AF-Polymeren, wie PA12, PP, ABS oder PLA, nachbehandelt werden, wodurch sich diverse Eigenschaften vorteilhaft ändern. So verbessert sich die Oberflächenrauheit, womit sich das Bauteil besser reinigen lässt; zudem steigt die Bruchdehnung an.

2.4 Grundlagen der Nachbehandlungsmethoden

In Abhängigkeit von der gewählten additiven Fertigungsmethode zur Generierung des Bauteils ergeben sich unterschiedlich einstellbare Anlagenparameter, und es zeigen sich unterschiedliche verfahrensprominente Bauteileigenschaften. So weisen z. B. PBF-LB/P-Bauteile andere charakteristische Rauheitswerte auf als MEX-Bauteile. Ebenso können die mechanischen Eigenschaften beim Verwenden des gleichen Ausgangsmaterials infolge verschiedener Verfahren beim Fertigen variieren. Zugleich sind bei gleichem Fertigungsprozess auch anlagen- oder materialabhängige Einflüsse möglich. In Abbildung 2-18 sind die Einflussparameter des additiven Fertigungsprozesses nach Ishikawa dargestellt.

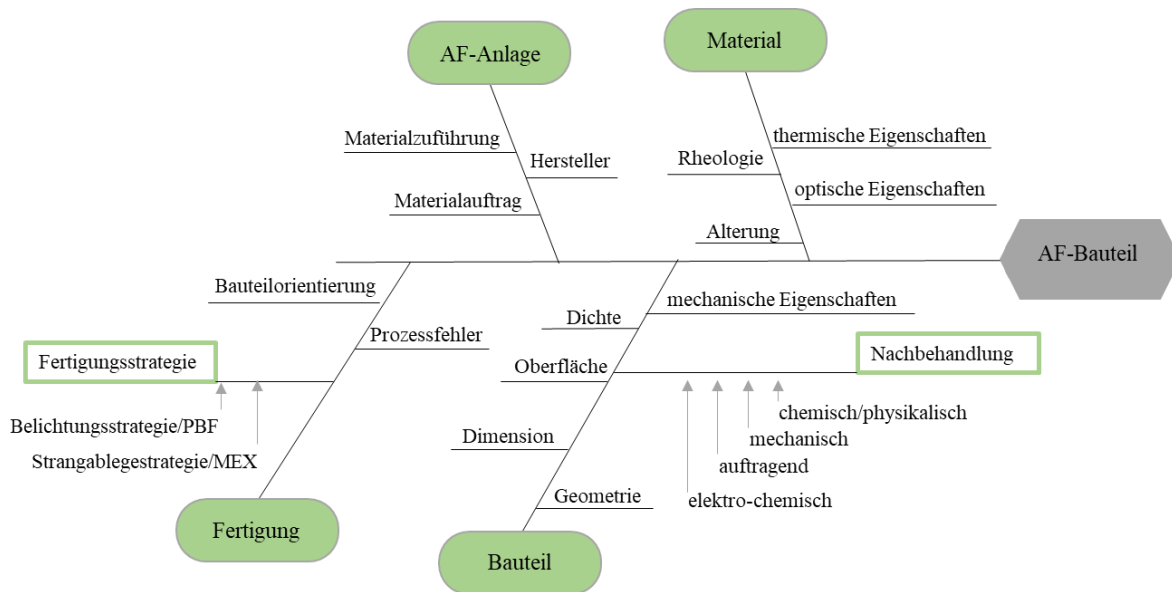


Abbildung 2-18: Einflüsse auf die Additive Fertigung, Diagramm nach Ishikawa [21, 151], Darstellung für das PBF-LB/P- und das MEX-Verfahren mit Hervorhebung der Nachbehandlungsarten

Anlagenseitige Einflüsse sind die Art der Materialzuführung, beim MEX-Verfahren z. B., ob der Bauraum geschlossen oder offen ist, und beim PBF-LB/P-Verfahren etwa der Materialauftragsmechanismus. Hersteller haben verschiedene Materialzuführungssysteme und auch Materialauftragsysteme beim pulverbettbasierten Schmelzen oder bei der Stereolithographie entwickelt. Bei den verwendeten Materialien für die AF besitzt die Alterung des Ausgangsmaterials einen erheblichen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit und folglich auf die topographischen Eigenschaften. So werden bei der Materialextusion Filamente verwendet, die vor der Verarbeitung getrocknet werden müssen, da sie hydrophil sind, z. B. PA12 oder TPU. Auch die Bauteilorientierung hat Auswirkung auf die Oberflächenrauheit der Bauteile. Je nach Geometrie und Positionierung im Bauraum kann die Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst werden [152]. Vielfache Untersuchungen zeigen beim PBF-LB/P und bei der MEX eine Auswirkung der Bauteilausrichtung auf die Oberflächentopographie [47, 153, 154].

Abgesehen von diesen Einflussfaktoren werden in der Regel je nach Anwendungszweck die rohen Bauteile einer Nachbehandlung unterzogen. Um zu dem fertig einsatzbereiten Bauteil zu gelangen, können bzw. müssen, bedingt durch die bereits aufgeführten Abhängigkeiten, geeignete Nachbehandlungsmethoden zum Einsatz kommen. In Abbildung 2-19 ist der für diese Arbeit hauptsächlich relevante Teil des oben dargestellten Ishikawa-Diagramms dargestellt. Dabei zeigt die gewählte Nachbehandlungsmethode Einflüsse auf das PBF-LB/P- oder MEX-gefertigte Bauteil. Die chemisch-physikalische Nachbehandlungsmethode stellt eine für die AF entwickelte und bereits etablierte Oberflächenglättung dar [51, 145]. Eine mechanische Nachbehandlung, das Gleitschleifen, wird als konventionelles Verfahren betrachtet, bei dem größere Mengen an Bauteilen in einem Prozessschritt bearbeitet werden können. Bei dieser Methode hat die Bauteilgeometrie einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis einer gleichmäßigen nachbehandelten Oberfläche [132].

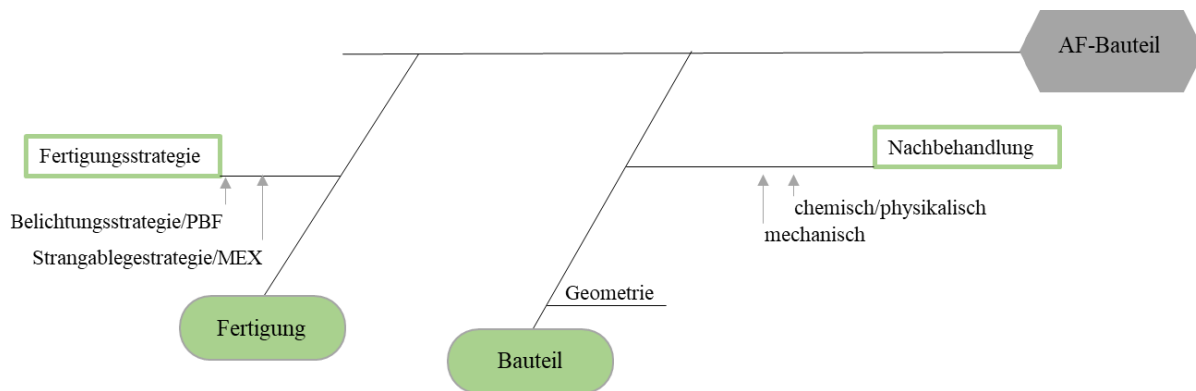


Abbildung 2-19: Auszug aus Abbildung 2-18, Teil des dargestellten Ishikawa-Diagramms

Hieraus resultiert, dass aus den PBF-LB/P- und MEX-Verfahren Zugproben zur Ermittlung mechanischer Eigenschaften und für Rauheitsmessungen sowie weitere Probengeometrien zur Bestimmung etwaiger Grenzen der Nachbehandlungen chemisch-physikalisch und mechanisch nachbehandelt werden.

2.4.1 Chemisch-physikalische/lösungsmittelbedingte Nachbehandlung

Zumeist wird von einer chemischen Nachbehandlung gesprochen, da eine Chemikalie verwendet wird und mit der Begrifflichkeit „chemische Nachbehandlung“ eine naheliegende Adaption vorliegt. Sofern vorerst keine Aussage über die Art getroffen werden kann, sollte von einer lösemittelbedingten Nachbehandlung gesprochen werden. In vielen Quellen wird der Begriff „chemische Beständigkeit“ verwendet, dem eine Liste der Säuren und Laugen beigegeben ist, gegen die der jeweils betrachtete Kunststoff „beständig“, „bedingt beständig“ oder „unbeständig“ ist [72]. Ehrenstein und Pongartz beschreiben in ihrem Buch „Beständigkeit der Kunststoffe“ den geeigneteren Begriff „Widerstandsfähigkeit“ als Synonym für die Begrifflichkeit „chemische Beständigkeit“ [91]. Abgeleitet ist dies aus DIN 16888-1/2, in der die Werkstoffe in widerstandsfähig (W), bedingt widerstandsfähig (BW) und nicht widerstandsfähig (NW) gegliedert werden und die im Jahr 2016 zurückgezogen wurde. In der ISO Norm 4433-1 werden die gleichen Einteilungen getroffen: „satisfactory resistance“ (S), „limited resistance“ (L) und „non-satisfactory resistance“ (NS) [155].

Grundsätzlich kann bei Medieneinwirkungen in einen chemischen und einen physikalischen Vorgang unterteilt werden. Bei einem chemischen Vorgang findet eine irreversible Veränderung des Polymers statt. Hierbei wird die Molekülstruktur angegriffen, was den Kunststoff verändert, so z. B. bei einem Oxidationsvorgang oder der Hydrolyse, bei der eine Verkürzung der Molekülketten vorliegt. Hingegen findet bei einem physikalischen Vorgang keine Änderung der Molekülstruktur statt. Zwischen dem eindiffundierenden Medium und den Molekülketten kommt es zu Wechselwirkungen, die ein mögliches Quellen des Werkstoffs verursachen können. Dabei setzt bei Thermoplasten eine Spannungsrisskorrosion vor dem Quellen ein und ist für einen etwaigen Schaden verantwortlich. Bei Polyamid, das hydrophil ist, kann eine Zähigkeitszunahme infolge einer Wasseraufnahme vorliegen. Wenn es zu einem Aufquellen kommt, sind meist die Randbereiche betroffen, der Kern bleibt dabei unberührt. Die Ursachen

der physikalischen Medieneinwirkung sind reversibel. Chemische und physikalische Einwirkungen auf den nachzubehandelnden Kunststoff treten meist zusammen auf. [24, 91, 156]

Mit Hilfe der Hanse'schen Löslichkeitsparameter, die auf den Erkenntnissen von Hildebrand beruhen (Hildebrand'sche Löslichkeitsparameter), können Paarungen von Kunststoff und Chemikalie gefunden werden, bei denen das Polymer bedingt widerstandsfähig bzw. bedingt beständig bzw. nicht widerstandsfähig bzw. unbeständig gegen die Chemikalie ist.

Hildebrand hat eine eindimensionale Bewertungszahl aufgestellt, die die Lösungs- und Quellgeschwindigkeit beschreibt. Hier spielen nahe beieinander liegende Löslichkeitsparameter eine Rolle; je näher zusammen sie liegen, desto effektiver ist die Quellung bzw. Lösung des Polymers in der Chemikalie. Wasserstoffbrückenbindungen werden hierbei jedoch nicht betrachtet und lediglich energetische Werte berücksichtigt [91]. Über die Verdampfungsenthalpie, die beim Verdampfen von Substanzen freigesetzt werden, können Rückschlüsse z. B. auf die van-der-Waals-Kräfte gezogen werden. Da beim Verdampfen intramolekulare Kräfte überwunden werden müssen, schloss Hildebrandt auf das Löslichkeitsverhalten der Substanzen. In seiner Formel werden weitere Kräfte nicht beachtet. Hansen hat sie weiterentwickelt, um auch komplexere Substanzen einbeziehen zu können. [157]

Hansen berücksichtigt in seiner Formel 1 zur Berechnung der Löslichkeitsparameter Dispersionskräfte δ_d (2), Dipolkräfte δ_p (3) und Wasserstoffbrückenbindungen δ_h (4). Eine Addition der Werte der aufgeführten zwischenmolekularen Wechselwirkungen ergeben den Längenvektor des Hanse'schen Löslichkeitsparameters δ_{SP} bzw. entsprechen dem Hildebrand'schen Löslichkeitsparameter δ . Eine Weiterentwicklung der Formel bildet damit die dreidimensionalen Löslichkeitsparameter ab.

$$\delta_{SP}^2 = \delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2 \quad 1$$

Diese Formel setzt sich aus folgenden weiteren Formeln nach [158] zusammen, wobei V dem Molvolumen des Lösungsmittels b zw. der Substanzprobe und E der Kohäsionsenergiedichte entspricht [159].

$$\delta_d^2 = E_d/V \quad 2$$

$$\delta_p^2 = E_p/V \quad 3$$

$$\delta_h^2 = E_h/V \quad 4$$

In einem dreidimensionalen Raum ergibt sich aus den Hanse'schen Löslichkeitsparametern ein Punkt, der den Mittelpunkt einer Sphäre bildet, dessen Radius (R_0) stoffspezifisch ist und experimentell bestimmt wird [158]. Geeignete Lösungsmittel bzw. Säuren befinden sich innerhalb dieser Sphäre. Über den Abstand R_a der Löslichkeitsparameter von der Chemikalie zu dem Polymer lässt sich rechnerisch über die relative Energiedifferenz (RED, Formel 5) die Löslichkeit bestimmen. [157, 160, 161]

$$RED = \frac{R_a}{R_0} \quad 5$$

Hierbei ergibt sich R_a nach Formel 6, wobei der Index 1 für die Größen des Lösungsmittels und der Index 2 für die Größen des Polymers stehen.

$$Ra = \sqrt{4(\delta_{d1} - \delta_{d2})^2 + (\delta_{p1} - \delta_{p2})^2 + (\delta_{h1} - \delta_{h2})^2}$$

Über die relative Energiedifferenz können folgende Aussagen getroffen werden:

RED < 1 Lösungsmittel und Polymer sind sich ähnlich und lassen sich sehr gut mischen.

RED = 1 Lösungsmittel und Polymer mischen sich zum Teil.

RED > 1 Lösungsmittel und Polymer mischen sich schlecht oder gar nicht.

In diesem Kontext bedeutet Mischbarkeit, dass Lösungsmittel und Polymer sich miteinander vermischen lassen, sich das Polymer folglich in dem Lösungsmittel auflöst. Dadurch ist eine Einteilung als „gute“ und „schlechte“ Mischbarkeit nach Hansen gegeben [157, 158].

In der Literatur finden sich für eine Vielzahl von Polymeren wie auch von Chemikalien Löslichkeitsparameter. Tabelle 2-7 führt beispielhaft in Anlehnung an Beständigkeitstabellen die Löslichkeitsparameter der verwendeten Materialien für die folgenden Versuche auf. Typischerweise werden die Löslichkeitsparameter der Substanzen bei 25 °C berechnet oder mit Hilfe von Experimenten bestimmt [162].

Tabelle 2-7: Löslichkeitsparameter für PA12, PP und die verwendeten Chemikalien [163 - 167]

Substanz (alphabetisch)	Dispersionskraft δ_d in MPa ^{1/2}	Dipolkraft δ_p in MPa ^{1/2}	Wasserstoffbrückenbindung δ_h in MPa ^{1/2}	δ_{SP} in MPa ^{1/2}
PA12	18,5	8,1	9,1	22,15
PP	17,7	2,9	1,2	17,97
Ameisensäure	14,3	11,9	16,6	24,9
Chloroform	17,8	3,1	5,7	19,0
Salpetersäure	13,5	18	18,6	29,19
Salzsäure	–	–	–	48,6
Schwefelsäure	–	–	–	–
Toluol	18,0	1,4	2,0	18,2
Trifluoressigsäure	15,6	9,9	11,6	21,82

Zu Salz- und Schwefelsäure fehlen die einzelnen Angaben der Löslichkeitsparameter, wobei zur Schwefelsäure der berechnete Löslichkeitswert in der Literatur nicht zu finden ist.

Bei der Berechnung des Abstandes Ra von PA12 zu den einzeln aufgeführten Chemikalien (mit Ausnahme von Salz- und Schwefelsäure) ergeben sich folgende Werte, s. Tabelle 2-8. Der Ra-Wert von PA12 zu Salzsäure wird aufgrund des signifikant höheren δ_{SP} größer sein als die zu den aufgeführten Chemikalien berechneten Werte.

Tabelle 2-8: Ra-Werte von PA12 zu den aufgeführten Chemikalien, berechnet nach Formel 6

Ra von PA12 zu	Ra in MPa ^{1/2}
Ameisensäure	22,95
Chloroform	11,79
Salpetersäure	29,52
Trifluoressigsäure	19,07

Aufgrund der experimentellen Bestimmung von R_0 lässt sich erst nach den bzw. nach einem Teil der Versuche eine Aussage treffen. Dennoch wird hier beispielhaft zur Veranschaulichung der Hanse'sche Löslichkeitsparameter aufgeführt, s. Abbildung 2-20. Zu sehen ist in einem dreidimensionalen Raum PA12 als graue Kugel mit einem potentiellen R_0 . Hinzu kommen die in Tabelle 2-8 aufgeführten Chemikalien im HSP-Raum. Aus der Literatur ist bereits bekannt, dass erwärmte Ameisensäure PA12 löst und sich somit nicht außerhalb der PA12-Sphäre befinden kann. Betrachtet werden hier die Werte bei Raumtemperatur, weshalb Ameisensäure außerhalb des PA12-Raumes liegt.

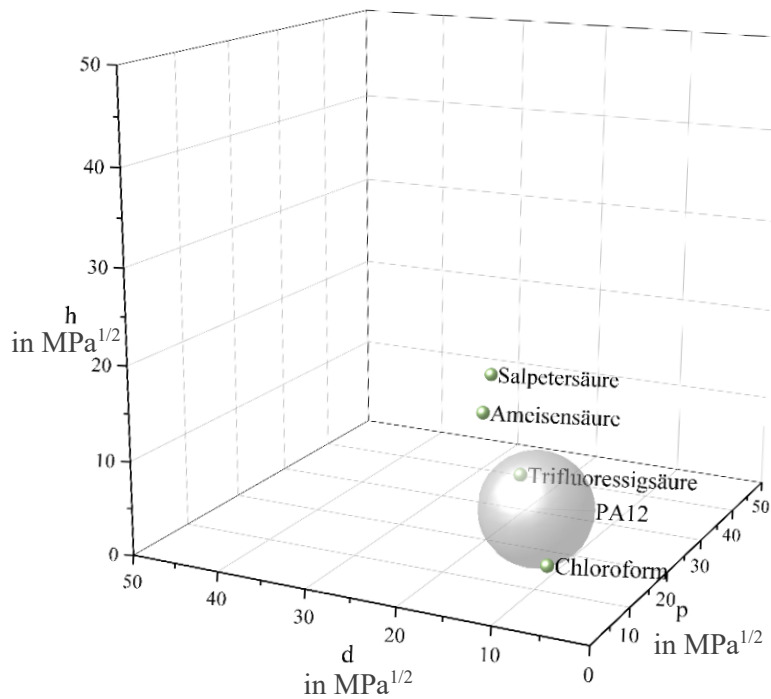


Abbildung 2-20: Hanse'sche Löslichkeitsparameter im dreidimensionalen Raum bei Raumtemperatur

Über Beständigkeitstabellen können ebenfalls die Paarungen von Kunststoff-Lösungsmittel ermittelt werden. Diese beruhen auf den oben beschriebenen Berechnungen und ebenfalls auf Versuchen. Zusätzlich zu den aufgeführten Säuren werden weitere Säuren anhand der Literatur ausgewählt. Neben den berechneten und experimentell bestimmten Paarungen von Kunststoff und Lösungsmittel für eine gute bis sehr gute Mischbarkeit liegen weitere Faktoren für Quellung bis Lösung vor. So können Fehlstellen wie Risse das Eindringen eines Solvens begünstigen, wodurch eine großflächigere Interaktion stattfindet. Ein kontrolliertes Abbrechen der Reaktion wird erschwert und führt zu etwaigen weiteren Einflüssen auf die mechanischen und topographischen Eigenschaften. Schlussfolgernd sollten Bauteile vor einer chemischen bzw. physikalischen Nachbehandlung auf ihre intakte Oberfläche hin kontrolliert wer-

den. Das gilt insbesondere für MEX-Teile, die in der Regel nicht aus Vollmaterial gefertigt werden und bei denen Ansammlungen von Chemikalien im Inneren begünstigt werden. [91]

2.4.2 Mechanische Nachbehandlung

Bei der mechanischen Nachbehandlung, einem spanenden Fertigungsverfahren, werden die Oberflächen und Kanten der nachzubehandelnden Bauteile mittels abrasiver Medien beeinflusst. Zu diesem Fertigungsverfahren zählt das Gleitspanen, auch als Gleitschleifen oder Trowalisieren, Schleifen, Polieren und Bürsten bekannt [123]. Das Gleitspanen, das in DIN 8589-17 beschrieben wird, kann weiter in Entgraten, Reinigen und Glätten unterteilt werden [130, 168]. Dieses Verfahren zeichnet sich durch die hohe Menge der in einem Prozess nachzubehandelnden Bauteile aus.

Beim Gleitschleifen werden abrasive Medien als „Werkzeug“ eingesetzt, z. B. Strahlgut aus Korund oder Metall; ebenfalls werden Gleitschleifkörper aus Keramik oder Kunststoff verwendet. Je nach gewünschtem Effekt und Bauteilgeometrie werden unterschiedliche Schleifkörpergrößen eingesetzt, und auch die Geometrie der stab- bis sternförmigen Schleifkörper ist variabel. [123, 130]

In einer Tellerfliehkraftmaschine CF 1x18 (s. Abbildung 2-21) der Firma OTEC GmbH werden die hier vorgestellten Versuche durchgeführt. Beim Gleitschleifen werden, gesteuert über einen Schaltschrank (1), in einem Arbeitsbehälter (2) einer Gleitschleifanlage neben den Schleifkörpern Prozesswasser (Zufuhr: 5) und Compound zugeführt. Durch die Rotation des trommelähnlichen Behälters wird das Gemisch aus Gleitschleifkörpern und einem Wasser-Compound-Gemisch entlang der Innenseite der Trommel in Bewegung gebracht. Dieses Vorgehen zählt zum Rotationsschleifen. Nach Beendigung des Gleitschleifprozesses wird der Arbeitsbehälter durch Kippen über einem Art Sieb (3) entleert. Das Siebgitter hat eine Maschenweite, die zu den Gleitschleifkörpern passt, so dass diese in den Auffangbehälter (4) fallen können. Dem Sieb können anschließend die nachbehandelten Proben bzw. Bauteile entnommen werden. [131]



Abbildung 2-21: Tellerfliehkraftmaschine CF 1x18 des Herstellers OTEC GmbH [131] mit Nummerierung einzelner Komponenten

Zu den Gleitschleifanlagen zählen auch die Schleppschleifanlage und die Zentrifugaltrommel. Bei der letztgenannten Anlage werden die Bauteile eingespannt und durch das sich nicht in Bewegung befindende Schleifgut gezogen. [130][169] Beim Vibrationsschleifen vibriert der Arbeitsbehälter, wodurch das Schleifgut in Schwingung gebracht wird. Durch die Größe und Masse des Schleifguts im Vergleich zu den nachzubearbeitenden Bauteilen kann ein Abtrag stattfinden. [170] Die Bearbeitungszeit ist je nach gewünschter Oberflächenbeschaffenheit variabel und kann zwischen 0,5 h und 5 h liegen. Die Firma OTEC, Hersteller von Anlagen zum Oberflächenfinishing, wozu u. a. das Entgraten, Schleifen und Polieren zählt, unterteilt das Gleitschleifen je nach Wassermenge und Bearbeitungszeit in Nassschleifen und Nasspolieren. [130, 131]

Zu den Vorteilen dieser Nachbehandlung zählt zum einem die einfache Handhabung und ungefährliche Benutzung aufgrund der eingesetzten Betriebsmittel. Neben den Gleitschleifkörpern wird eine Compound-Lösung, die mit dem zugeführten Wasser vermengt wird, eingesetzt und lässt sich nach einer chemischen Reinigung je nach verbleibenden Inhaltsstoffen über den Abfluss entsorgen [171].

Nachteile der beschriebenen Nachbehandlungsmethode ergeben sich durch die Ausgangsgeometrie des Bauteils bzw. der Bauteile. Vorgegeben durch die Größe der Gleitschleifkörper können Bereiche, die Winkel, Zwischenräume und Vertiefungen besitzen, die im Abstand oder Durchmesser kleiner oder gleich dem durchschnittlichen Durchmesser des Schleifkörpers sind, nicht erreicht werden. Auch ein

Verkleben der Schleifkörper z. B. in Bohrungen und Nuten ist möglich. Ebenso wenig eignet sich dieses Verfahren, wenn nicht alle Flächen oder Grate eines Bauteils nachbehandelt werden sollen.

Für die Reduzierung der Oberflächenrauheit von PBF-LB/P-Bauteilen eignet sich das Gleitschleifen mit Keramik- oder Kunststoffschleifkörpern. Dabei bestehen für die beiden Werkstoffe der Gleitschleifkörper unterschiedliche Vorteile. So sind Keramiksleifkörper preiswerter, können aber splintern. Kunststoffschleifkörper werden entsprechend für eine schonendere Bearbeitung und bei weicheren Materialien eingesetzt, und auch die resultierenden Oberflächen sind feiner als nach dem Gleitschleifprozess mit Keramiksleifgut. [130]

3 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit von additiv gefertigten Bauteilen ist die Nachbehandlung zur Optimierung der Rauheitswerte in der Forschung wie auch in der Industrie von großer Bedeutung. Diverse Ansätze werden bereits erfolgreich als Dienstleistung angeboten, und es sind auch einige dieser Nachbehandlungsanlagen zu erwerben. In den letzten Jahren konnte der Markt wachsen, was den Bedarf an nachbehandelten additiv gefertigten Bauteilen deutlich macht. Ein weiterer wichtiger Faktor neben der Verbesserung der Oberflächentopographie ist das Beibehalten bzw. das Verbessern der mechanischen Eigenschaften. Entsprechend wichtig ist es, Aufschluss über den Einfluss einer Nachbehandlung auf die mechanischen Eigenschaften zu gewinnen und dabei gleichzeitig die Geometrie sowie die Form- und Maßhaltigkeit zu berücksichtigen. Neben diesen Untersuchungen kann zudem eine mögliche Auswirkung auf das thermische Verhalten geprüft werden. Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit gliedert sich deshalb in die folgenden Teilziele bzw. Forschungsfragen:

Welchen Einfluss zeigen die untersuchten Nachbehandlungsverfahren auf die topographischen Eigenschaften und in welchem Zusammenhang stehen dazu die mechanischen Eigenschaften?

Welche Auswirkung hat die Nachbehandlung mit einer Chemikalie auf das Schmelzverhalten?

Welche Eignung besitzen die Nachbehandlungsverfahren für die Materialextrusion und für das pulverbettbasierte Strahlschmelzen?

Welches Nachbehandlungsverfahren eignet sich für komplexe Geometrien?

Aus den ermittelten Teilzielen bzw. Forschungsfragen ergibt sich die Vorgehensweise dieser Arbeit, deren Aufbau im folgenden Schaubild (Abbildung 3-1) erläutert wird. Beginnend mit den Ausgangsmaterialien und ihrer jeweiligen Zusammensetzung zur Fertigung von Proben, werden basierend auf dem Stand der Technik die Nachbehandlungsmethoden festgelegt. Dabei sollen verschiedene Nachbehandlungsmethoden zum Vergleich angewendet werden. Im Anschluss werden die nachbehandelten Proben anhand ihrer relevanten Eigenschaften charakterisiert. Je nach Geometrie sollen die angewendeten Nachbehandlungsverfahren im Hinblick auf die erzielten Oberflächenrauheiten, die Form-, Maß- und Geometrieänderungen, die mechanischen Eigenschaften sowie die Anwendbarkeit bewertet werden. Die so ermittelten Daten werden aufbereitet, visualisiert und analysiert.

Aufgabenstellung und Zielsetzung

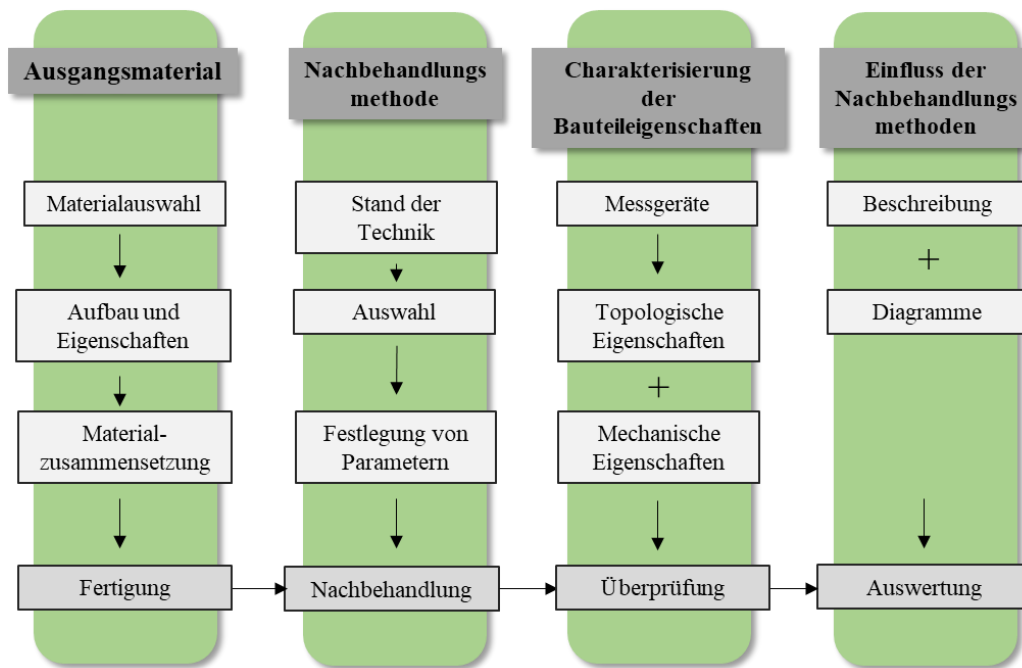


Abbildung 3-1: Schaubild zur Aufgabenstellung, aufgeteilt in vier Blöcken: Ausgangsmaterial, Nachbehandlungsmethode, Charakterisierung der Bauteileigenschaften und des Einflusses der Nachbehandlungsmethode, zzgl. der einzelnen Schritte

Neben einfachen Probegeometrien und Zugstäben werden Probekörper untersucht, die mögliche Grenzen der einzelnen Verfahren aufzeigen. Neben den Probegeometrien, die mit verschiedene Wandstärken, Säulendurchmessern und Ecken für die Versuche mit PBF-LB/P/PA12-Proben angewendet werden, werden verschiedene Materialien berücksichtigt. Ebenso werden Zugproben aus mit Glasperlen durchmischtem PA12 und PP-Zugproben betrachtet. Hinzu kommt die Untersuchung von PA12-Proben aus der MEX, wobei sich auch hier das Material unterscheidet, da es beim PBF-LB/P-Verfahren in Pulverform und beim MEX-Verfahren in Strangform vorliegt. Beim MEX-Verfahren werden zwei verschiedene Filamente betrachtet. Das Hauptaugenmerk liegt weniger auf der Fertigung, obwohl Einstellungen von Parametern wie z. B. Laserleistung und Scangeschwindigkeit beim PBF-LB/P-Verfahren oder Füll-dichte und Schichtstärke beim MEX-Verfahren Auswirkungen auf die Topographie oder auch die mechanischen Eigenschaften haben. Bei den Vergleichen der auf unterschiedlichen Anlagen unterschiedlich nachbehandelten Proben aus verschiedenen Materialien wird ein Einfluss der drei aufgeführten Komponenten erwartet. Allerdings werden die jeweiligen Proben untereinander verglichen, um die aufgeführten weiteren Einflussfaktoren außen vor zu lassen.

Nach den eingesetzten Nachbehandlungsverfahren wird die Oberflächentopographie mittels der Rauheitsmessung analysiert und miteinander verglichen. Mit Hilfe von Zugprüfungen werden die mechanischen Eigenschaften bestimmt, um so festzustellen, welchen Einfluss eine Nachbehandlung auf die Kennwerte zeigt. Zur Untersuchung des Einflusses der Nachbehandlung mit einer Chemikalie auf das verarbeitete Material werden Dynamische-Differenzkalorimetrie-(DSC-)Messungen eingesetzt. Mittels der DSC-Analyse kann überprüft werden, welche Auswirkung gerade die Nachbehandlung mit einer Säure auf das Schmelz- und Kristallisationsverhalten des untersuchten Polymers besitzt. Ebenso werden nachbehandelte Proben einer thermogravimetrischen Analyse (TGA) unterzogen. Hierüber kann eine

Masseänderung bei Erwärmung der Probe aufgezeichnet werden. Je nach Einfluss der Chemikalie auf das Polymer lässt sich ermitteln, ob es zu einer chemischen Änderung während der Nachbehandlung kam. Im Anschluss können mit Hilfe einer FTIR-Spektroskopie (Fourier-Transformations-Infrarot) Rückschlüsse auf die einzelnen Bestandteile der nachbehandelten Probe gezogen werden, sofern über die TGA ein Bedarf festzustellen ist.

Die ermittelten Werte werden im Anschluss aufbereitet und analysiert, um Aussagen über die Einwirkungen der Nachbehandlungsmethoden treffen zu können.

4 Methoden und Vorgehensweise

Für die Versuche werden definierte Probekörper gefertigt, die aus verschiedenen Materialien und aus zwei unterschiedlichen additiven Fertigungsverfahren stammen. Für die Nachbehandlung werden die zwei geeignetsten Verfahren und der dazugehörige Versuchsaufbau dargestellt. Zur Charakterisierung der Bauteileigenschaften der unbehandelten und nachbehandelten Proben werden die durchgeführten Messmethoden zur Bestimmung der Rauheit, der Maße, der mechanischen Eigenschaften und des Schmelzverhaltens beschrieben.

4.1 Probenplanung

Für die Versuche werden verschiedene Probekörper herangezogen. Der größte Teil der hier vorgestellten Versuche wird mit Proben aus PA12 durchgeführt, die auf der EOS-Anlage Formiga P100 mit dem Standardparametersatz gefertigt wurden.

Ein Großteil der hier beschriebenen und ausgewerteten Versuche erfolgte in dem gemeinsam mit dem Lehrstuhl Kunststofftechnik (LKT) der Universität Erlangen-Nürnberg durchgeführten Projekt „LZE- LS II“. In diesem wurden die Kurz- und Langzeiteigenschaften nachbehandelter PA12-Zugproben untersucht, zudem aber auch PP-Proben betrachtet. Hierfür erfolgten die Nachbehandlungsversuche am eigenen Lehrstuhl Fertigungstechnik, die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften und die Auswertung über REM-Aufnahmen fanden am LKT statt.

Zu weiteren Versuchen an glasgefüllten PA12-(PA2201-)Zugproben kam es am Lehrstuhl Fertigungstechnik im Rahmen des Projekts „LS-Prop – Einfluss der Materialzusammensetzung und Oberflächenstruktur von Laser-gesinterten Modellpropellern auf die Prognosegenauigkeit von Propulsionsversuchen“ [16]. Für dieses Projekt wurden Vielzweckprüfkörper des Typs 1A aus PA12 mit einem Füllstoff vermengt und auf einer Vanguard HiQ HS des Anlagenherstellers 3D Systems liegend mit den Parametern nach Tabelle 4-1 gefertigt. Für das Projekt ist neben den verschiedenen Füllstoffen und -mengen der Einfluss einer Nachbehandlung von Interesse. Für die vorliegende Arbeit werden Zugproben mit 30 Vol% Glaskugeln betrachtet.

Tabelle 4-1: Prozessparameter für PA12 mit 30 % GK aus [16]

Experiment-Nr.	Oberflächenenergiedichte Es in J/mm ²	Laserleistung P in W	Prozesstemperatur T in °C
V 1	0,018	36,6	175
V 2	0,021	42,7	175
V 3	0,024	48,8	175

Bei konstanten Werten liegt der Hatchabstand bei 0,2 mm und die Schichthöhe bei 0,1 mm. Die Scangeschwindigkeit wird auf 10.160 mm/s festgelegt. Für die Untersuchungen werden anhand von Vorver-

suchen Parameter zur Nachbehandlung ermittelt, die im Anschluss auf die Nachbehandlung von Zugproben übertragen werden.

4.1.1 Probenmaterialien

Polyamid 2200 (PBF-LB/P)

Für die Versuche wird PA12 mit Titanoxid mit einem E-Modul von 1.650 N/mm^2 , einer Zugfestigkeit von 48 MPa und einer Bruchdehnung von 18 % verwendet [172]. Als Basispulver wird ein PA12-Pulver der Evonik Industries AG von der Firma EOS GmbH aufbereitet und angepasst. Das im Prozess verwendete PA12-Pulver liegt als Mischung aus Neu- und Altpulver vor. Als Altpulver wird jenes Pulver bezeichnet, das im Laser-Sinter-Prozess zur Verfügung stand, aber nicht zum Bauteil verarbeitet wurde und als sogenannter Pulverkuchen übrig bleibt. Über MVR-Messungen kann das geeignete Mischungsverhältnis bestimmt werden. Ein gemäß der Literatur optimaler MVR-Wert für PA12 liegt zwischen $30 \text{ cm}^3/10 \text{ min}$ und $50 \text{ cm}^3/10 \text{ min}$ [21]. Bei einem Mischungsverhältnis von 60 % Neupulver und 40 % Altpulver kann ein MVR-Wert von durchschnittlich $32 \text{ cm}^3/10 \text{ min}$ am Lehrstuhl Fertigungstechnik für die vorliegende Arbeit erreicht werden. In Kapitel 4.4.5 wird auf die MVR-Messmethode näher eingegangen. In der Literatur wird meist ein Mischungsverhältnis von 50 : 50 empfohlen, um Prozesssicherheit zu garantieren, jedoch ist auch ein höherer Altpulveranteil zwischen 60 % und 70 % zu verarbeiten [21]. Die MVR-Messungen erfolgen über MeltFlow von der Firma Karg Industrietechnik. [55, 173]

Polyamid 2201 mit Glaskugeln (PBF-LB/P)

Für das Gemisch aus PA12-natur-Pulver und Glaskugeln wird PA2201 verwendet. Dazu werden 30 Vol% Borsilikatperlen (Spheriglass 3000E CP03, Potters Industries) mit einer Partikelgröße von 30 bis $50 \mu\text{m}$ dem PA12-natur mittels eines dreidimensionalen Mischers (Turbula, Willy A. Bachofen) bei einer Nenndrehzahl von 23 U/min beigemischt. Nach einer Stunde liegt eine homogene Verteilung der Glaskugeln im PA12 vor. Der so erreichte Elastizitätsmodul von 68.900 N/mm^2 liegt um das ca. 40-Fache höher als der E-Modul von PA12-natur (1.700 N/mm^2). [16, 174] Durch die Beimischung von Glaskugeln kann neben der Erhöhung des E-Moduls die Wärme- und Temperaturbeständigkeit und u. a. die Verschleißfestigkeit gesteigert werden [175].

Polypropylen (PBF-LB/P)

Für die Zugproben aus PP wird das Ausgangsmaterial Rolaserit PP01 als Neupulver auf einer Vanguard HS des Anlagenherstellers 3D Systems bei der Firma AM Polymers GmbH verarbeitet. Hier wird auf die Zumischung von Altpulver verzichtet, da beim Neupulver ein definierter Zustand vorliegt, der somit näher am Referenzwert der Datenblätter liegt. Bei einer Prozess Temperatur von $120 \text{ }^\circ\text{C}$ werden mit einer Schichtstärke von 0,1 mm die Zugproben gefertigt.

Nylon 12 (MEX)

Für die MEX-Zugproben wird Nylon 12 FDM der Firma Stratasys Ltd verwendet; das Material ist nur in Schwarz erhältlich, weshalb hier dem Ausgangsmaterial noch ein Färbemittel beigemischt wird. Da

das Filament von Stratasys Ltd stammt und auf einer Anlage dieser Firma verarbeitet wird, liegen die Parameter als vordefinierter Datensatz vor.

PA 2200 – MeltFox (MEX)

Weitere MEX-Zugproben werden ebenfalls aus PA12 gefertigt. Allerdings ist das Ausgangsmaterial recyceltes PA12-Pulver der EOS GmbH aus dem PBF-LB/P-Prozess. Überschüssiges Altpulver, das bei dem Prozess immer anfällt, wird aufgeschmolzen und zu Filament verarbeitet. Das verwendete Melt-Fox-Filament stammt von der Firma AM Filament und ist, wie das Ausgangsmaterial, weiß.

4.1.2 Probekörper

Polyamid 2200 (PBF-LB/P)

Auf einer P100-Laser-Sinter-Anlage der Firma EOS GmbH werden die PA2200-Proben für die Vor- und Hauptversuche generiert.

Für die Zugversuche zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften werden Vielzweckprüfkörper (Zugprobe) des Typs 1A, s. Abbildung 4-1, mit einer Gesamtlänge von 180 mm (1) nach DIN EN 527-2 aus PA12 stehend gefertigt. Zwischen den beiden Enden der Schultern des sogenannten Prüfkopfes (3) liegt die Versuchslänge (2), auch als Messlänge bezeichnet; über diesen Bereich besitzt die Zugprobe einen konstanten Querschnitt (4), der sich beim Ziehen verzängt. [176]

Eine Ausrichtung der Zugprobe in z-Richtung (stehend) wird in der Regel gewählt, da aufgrund der Anisotropie in dieser Aufbaurichtung und damit in Zugrichtung reduziertere mechanische Eigenschaften gegenüber liegenden Vielzweckprüfkörpern vorliegen, vgl. Kapitel 2.1.3. Ebenfalls sind bei stehenden Zugproben die Rauheitswerte, z. B. R_z , größer und somit die Oberflächen rauer.

Basierend auf den Grundmaßen dieser Zugprobe werden für die Vorversuche quadratische PBF-LB/P-Probekörper (5) mit einem Maß von 50 mm x 4 mm x 10 mm (L x B x H) hergestellt.

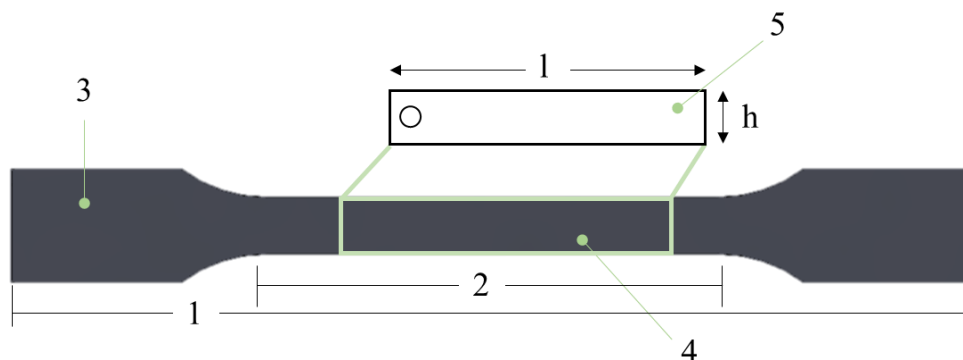


Abbildung 4-1: Darstellung eines Vielzweckprüfkörpers Typ 1A nach DIN EN 527-2 mit Skizze eines Probekörpers für Vorversuche

Hinzu kommen PA12-Probekörper mit Säulen „S“, Ecken „E“ und Wänden „W“. Diese Proben sollen dazu dienen, die einzelnen Nachbehandlungsverfahren auf ihre Grenzen zu überprüfen.

Probekörper „S“, s. Abbildung 4-2, zeigt neben den kreisrunden Aussparungen Säulen. Der Grundkörper besitzt die Grundmaße von 35 mm x 18 mm x 10 mm (L x B x H). Auf der gegenüberliegenden, in der Abbildung nicht sichtbaren Seite befinden sich, gespiegelt am Grundkörper, in gleicher Formation

und gleichen Maßen die Säulen. Mit den Maßen zwischen 2 mm und 10 mm werden die kreisrunden Aussparungen definiert, die Säulen besitzen Durchmesser zwischen 1 mm und 4 mm. Für alle drei Probekörper (S, W und E) finden sich die Zeichnungsableitungen im Anhang 7.

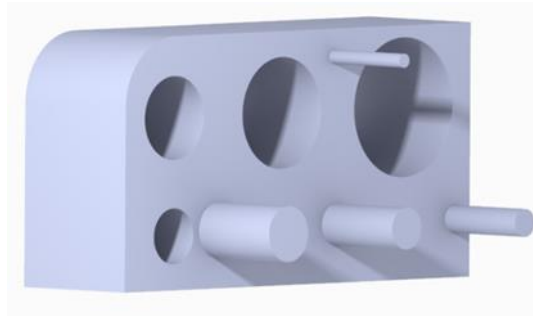


Abbildung 4-2: Probekörper „S“ mit Säulen und Löcher, Maße in der Zeichnungsableitung im Anhang 7

Eine Herausforderung wird hier das Gleitschleifen der Proben darstellen, da im Gegensatz zur Nachbehandlung mit einer Chemikalie mechanische Kräfte insbesondere auf die Säulen wirken. Hier besteht die Gefahr einer Deformation bzw. des Abbruchs der Säulen. Eine ähnliche Problematik liegt bei der Probengeometrie „W“ vor.

Probekörper „W“ besitzt in unterschiedlichen Wandstärken mit verschiedenen Abständen zueinander Stege, zudem ein extrudiertes Kreuz mit einer Wandstärke von 1 mm, s. Abbildung 4-3. Mit den Maßen 50 mm x 40 mm x 5 mm (L x B x H) definiert sich der Grundkörper.

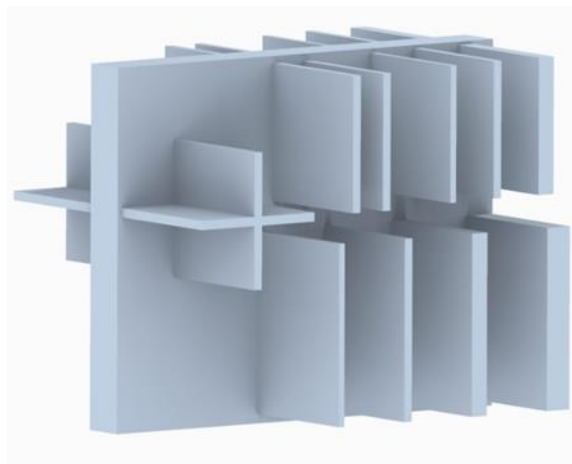


Abbildung 4-3: Probekörper „W“ mit Wänden, Maße in der Zeichnungsableitung im Anhang 7

Zwischen den Wänden sind Abstände von 3 mm bis 8 mm, die Wandstärken reichen von 0,75 mm bis 3 mm.

In der nachfolgenden Abbildung 4-4 wird der Probekörper „E“ mit seinen recht- und dreieckigen Aussparungen und Winkeln dargestellt.

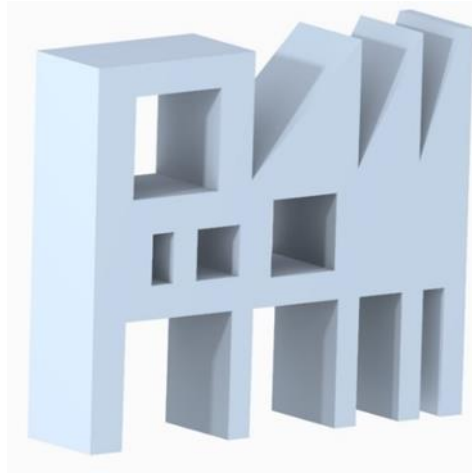


Abbildung 4-4: Probekörper „E“ mit Ecken und rechteckigen Aussparungen, Maße in der Zeichnungsableitung im Anhang 7

Die Winkel der offenen dreieckigen Einschnitte betragen zwischen 20° und 45° , die Maße der offenen rechteckigen Aussparungen sind zwischen 2 mm und 10 mm groß und die quadratischen Aussparungen liegen bei 4 mm und 6 mm, wobei der rechteckige Ausschnitt Maße von 2 mm x 4 mm misst. Insgesamt belaufen sich die Außenmaße der Probe „E“ auf 35 mm x 8 mm x 30 mm (L x B x H).

Bei den drei Geometrien besteht das Risiko, dass Gleitschleifkörper in Abhängigkeit von ihrer Größe zwischen den Stegen oder in den Löchern und Aussparungen verklemmen und nachträglich entfernt werden müssen. Eine Nachbehandlung mit einem liquiden Medium kann je nach Positionierung der Probe die Problematik einer Ansammlung in den Ecken mit sich bringen.

In Abbildung 4-5 ist die Anordnung der Proben im virtuellen Bauraum der PBF-LB/P-Anlage Formiga P100 zu erkennen. Zur visuellen Unterscheidung ist der sich in der Mitte befindende Probekörper „W“ in Orange dargestellt.

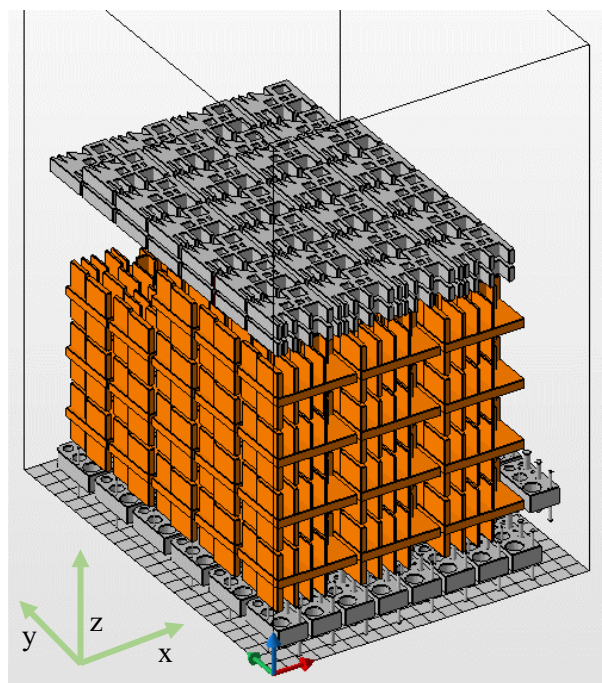


Abbildung 4-5: Baujoblayout der Probenfertigung „W“, dargestellt in Orange, „E“ und „S“ auf der PBF-LB/P-Anlage Formiga P100

Polyamid 2201 mit Glaskugeln (PBF-LB/P)

Für die Nachbehandlungsversuche mit Säure und anschließenden Zugversuchen werden aus PA12 mit GK Zugstäbe auf einer Vanguard am Lehrstuhl Fertigungstechnik liegend gefertigt. In Bewegungsrichtung der Walze (x-Richtung) werden die Proben ausgerichtet, s. Abbildung 4-6.

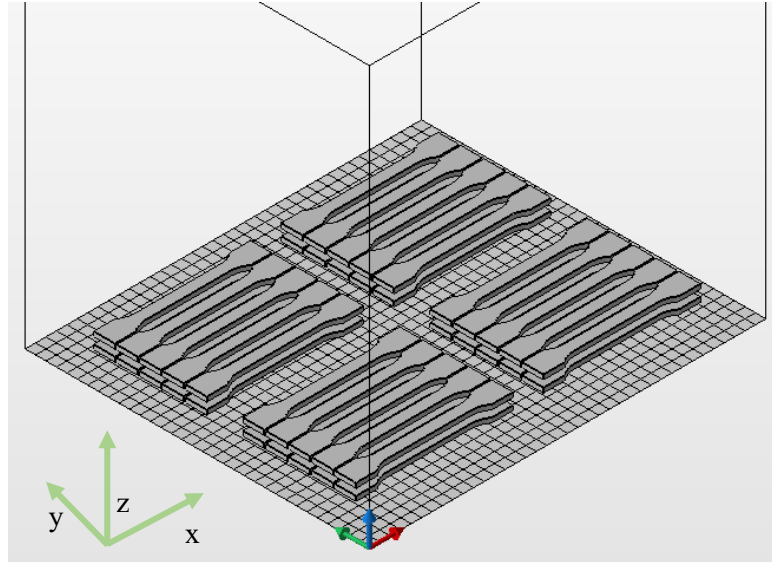


Abbildung 4-6: Baujoblayout der liegenden Zugproben auf der PBF-LB/P-Anlage Vanguard

Für die Zugproben wird eine liegende Ausrichtung gewählt, da die Ergebnisse innerhalb des Projektes mit denen zu weiteren Vielzahlprüfkörpern vergleichbar sein sollen. Aufgrund der verfügbaren Materialmengen wird die x-Baurichtung als materialsparende Bauweise ausgewählt, da für diese Baujobs 100 % Neupulver verwendet werden soll.

Polypropylen (PBF-LB/P)

Für die Versuche werden Vielzahlprüfkörper als Zugproben des Typs 1A mit einer Länge von 150 mm nach DIN EN ISO 527-2 [177] ebenfalls auf einer Vanguard HS bei der Firma AM Polymers GmbH (Willich, Deutschland) stehend gefertigt, siehe Abbildung 4-7.

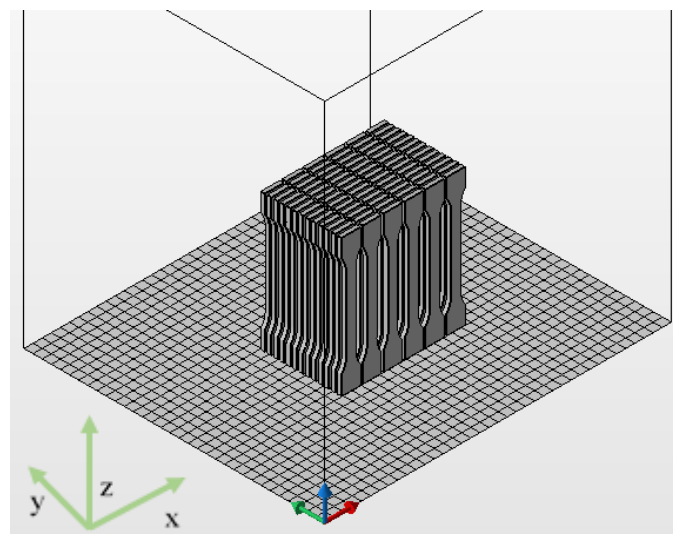


Abbildung 4-7: Baujoblayout der stehenden PP-Zugstäbe auf der PBF-LB/P-Anlage Vanguard

Nylon 12 (MEX)

Im Rahmen eines MERCUR-Forschungsvorhaben mit dem Titel „Analyse des Produktentstehungsprozesses bei der Kombination additiver und subtraktiver Fertigungsverfahren für die Herstellung von Multimaterialprodukten“ werden auf der Fortus 450mc Zugproben des Typs 1A stehend und liegend aus schwarzem PA12 gefertigt. Die Anlage gehört zu den mechanischen Werkstätten der Universität Duisburg-Essen. Aufgrund der verfahrensbedingten Eigenschaften werden die Zugproben in drei Bauteilorientierungen gefertigt. Mit einer Schichthöhe von 0,33 mm werden sie mit der Infillart „solid“, also mit 100 % Füllichte, generiert. Für die Extrusion wird eine Düse des Typs „T20“ verwendet, die einen Austrittsdurchmesser von 0,52 mm besitzt. Eine schematische Darstellung des Aufbaus der z- und y-Vielzweckprüfkörper ist in Abbildung 4-8 zu sehen.

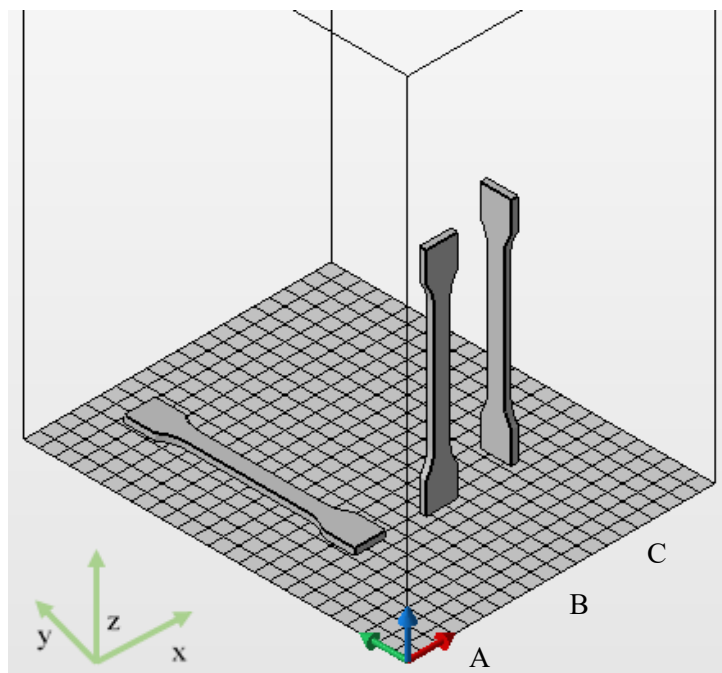


Abbildung 4-8: Orientierung der Nylon-12-MEX-Zugstäbe auf der Fortus 450mc, beispielhaftes Baujoblayout zur Anzeige der jeweiligen Ausrichtung (A, B und C)

Für die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften wird für das Projekt die stehende Ausrichtung nochmals variiert (B und C).

Zusammen mit dem Lehrstuhl für Produktionssysteme (Universität Bochum), dem Institut für Konstruktion und Werkstoffprüfung (Technische Universität Dortmund) und dem Institut für spanende Fertigung (Technische Universität Dortmund) wird das Projekt durchgeführt. In diesem Rahmen entstand eine Veröffentlichung mit dem Titel „Untersuchung des Einflusses verschiedener Nachbehandlungsmethoden auf die Eigenschaften additiv gefertigter FDM-Nylon-12-Proben“ [96]. In dem Paper wird der Begriff FDM stellvertretend für MEX verwendet, da die Zugproben auf einer Anlage der Firma Stratasys gefertigt wurden.

PA 2200 – MeltFox (MEX)

Vergleichend hierzu werden PA12-Zugstäbe liegend auf einer-Desktop-MEX-Anlage gefertigt, da stehende MEX-Proben beim Fertigen ohne Stützstrukturen bei der Materialextrusion ein höheres Risiko für einen Prozessabbruch mit sich bringen. Besonders durch ihre geringe Kontaktfläche zur Bauplattform sind Prozessabbrüche bei einer Desktop-MEX-Anlage aus Erfahrung wahrscheinlicher als z. B. auf einer Industrieanlage wie die Fortus 450mc. Um einen weitestgehend anwendbaren Vergleich zu den Zugproben, die auf der Fortus gefertigt wurden, zu haben, werden die Parameter für die Desktop-Anlage möglichst vergleichbar bzw. identisch eingestellt, s. Tabelle 4-2. Da eine Fülldichte (Infill) von 100 % gewählt wird, wird kein Infillmuster generiert, die Ablegestrategie der Bahnen im Inneren verläuft im 90°-Winkel zur Außenkontur.

Tabelle 4-2: Eingestellte Fertigungsparameter für Nylon 12/Fortus und PA12/Qidi

Einstellungen	Material	Nylon 12 (Stratasys)	PA12 (AM Filament)
Schichthöhe		0,33 mm	0,3 mm
Konturbreite		0,58 mm	0,4 mm
Infillmuster		„One contour“	linear
Infilldichte		100 %	100 %
Düsendurchmesser (Austritt)		T20 / 0,52 mm	0,4 mm

Auf der MEX-Anlage „Qidi X-pro“ wird das recycelte Filament mit einer Temperatur von 250 °C aufgeschmolzen und auf die 100 °C beheizte Bauplattform aufgebracht. Das Baujoblayout ist in Abbildung 4-9 zu sehen.

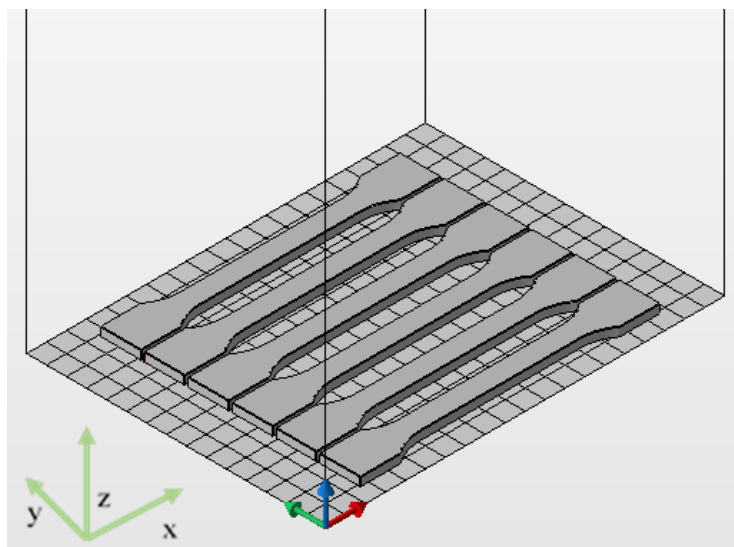


Abbildung 4-9: Orientierung der PA12-MEX-Zugstäbe im virtuellen Bauraum einer MEX-Desktopanlage „Qidi X-pro“

Die „Qidi X-pro“ bietet sich zudem den Vorteil, dass die MEX-Anlage einen geschlossenen Bauraum besitzt und somit eine gleichmäßige Wärmeverteilung aufweist, die sich durch die beheizte Bauplattform und das Fehlen von Zugluft ergibt. Dies gewährleistet einen Prozess mit wenigen bis keinen Temperaturschwankungen im abgelegten Material.

4.2 Mechanische Nachbehandlung

In Abbildung 4-10 lassen sich die im Ishikawa-Diagramm aufgeführten potentiellen Einflussgrößen auf AF-Bauteile ansehen, die durch eine mechanische Nachbehandlung, das Trowalisieren bzw. Gleitschleifen, Einfluss auf die Reduzierung der Rauheit nehmen. Neben der Reduzierung der Rauheit können diese Einflussgrößen auch Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften mit sich bringen.

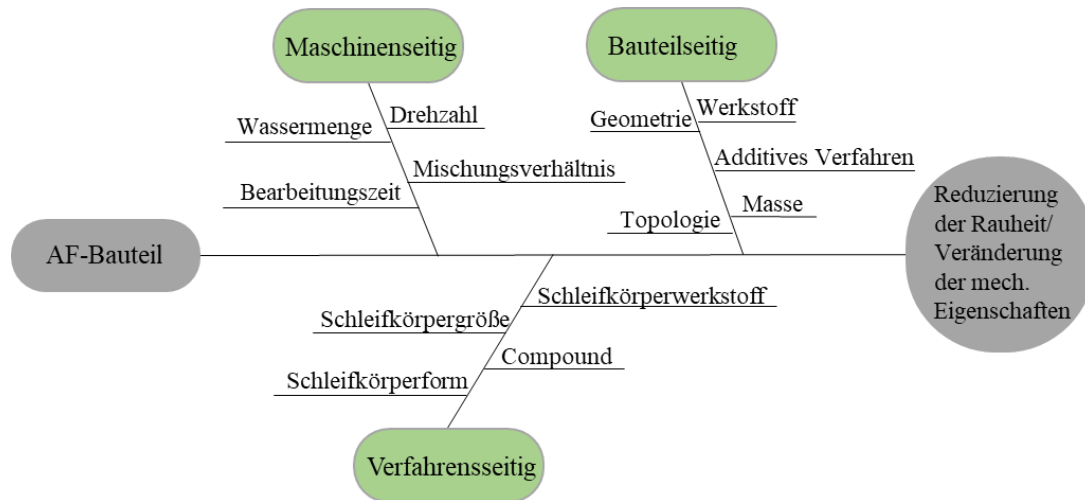


Abbildung 4-10: Potentielle Einflussgrößen nach Ishikawa durch das Gleitschleifen von AF-Bauteilen zur Reduzierung der Rauheit und Veränderung der mechanischen Eigenschaften nach [66]

Bei der mechanischen Nachbehandlung wird auf die Tellerfliehkraftanlage der Firma OTEC zurückgegriffen, die neben verschiedenen Gleitschleifkörpern am Lehrstuhl Fertigungstechnik zur Verfügung steht. Bei den Gleitschleifkörpern handelt es sich um Keramik- und Kunststoffschleifgut in unterschiedlichen Größen und Formen. Für die Versuche wird von den vorhandenen Schleifmitteln pyramidenförmiges Keramikschleifgut mit einer Grundfläche und Höhe von 4 mm ausgewählt. Diese Auswahl basiert auf Vorversuchen, bei denen verschiedene Gleitschleifkörpergeometrien bei gleichen Parametereinstellungen in der Gleitschleifanlage mit Proben verwendet und anhand der Ergebnisse der Rauheitswerte ausgewertet wurden.

Über die statistische Versuchsplanung lässt sich der Einfluss der verschiedenen einstellbaren Parameter ermitteln. Für die mechanische Nachbehandlung und die drei zu variierenden Größen wird ein vollfaktorierter Versuchsplan erstellt. Beim Gleitschleifen werden die Faktoren Rotationsgeschwindigkeit (A), Prozesszeit (B) und Wasserzulaufmenge (C) eingestellt. Die Schleifkörpermenge, die Probenmenge pro Durchlauf und die Schleifkörpergeometrie bleiben unverändert. Über Formel 7 kann der Versuchsaufwand bestimmt werden, dabei gibt n_1 die Stufenanzahl und n_f die Anzahl der Faktoren an.

$$n_r = n_1^{n_f}$$

7

Mit den hier zu variierenden drei Faktoren mit je zwei Stufen ergibt sich ein Versuchsaufwand von acht Faktorstufenkombinationen. Die Stufen sind die einzustellenden Werte der Faktoren, der niedrigere Wert wird im Versuchsplan mit einem „-“ und der höhere Wert mit einem „+“ gekennzeichnet. Welchen Effekt der jeweilige Faktor auf das zu untersuchende Ergebnis besitzt, kann mittels Formel 8 bestimmt

werden. Zur Ermittlung sind die Messwerte erforderlich. Im vorliegenden Fall sind es die Rauheitswerte der nachbehandelten Proben.

$$Eff. = \frac{2}{m} \sum_{i=1}^m (\text{Vorzeichen} \cdot \bar{y}_i) \quad 8$$

Zur Berechnung von \bar{y}_i wird der Mittelwert nach Formel 9 gebildet.

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{i=1}^m y_i}{m} \quad 9$$

Mit m wird die Faktorstufenkombination, hier m = 8, angegeben. Ein 2³-Versuchsplan wird tabellarisch wie folgt dargestellt: [178, 179]

Tabelle 4-3: Vollfaktorieller Versuchsplan nach [178]

	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	\bar{y}_i
1	-	-	-	+	+	+	-	
2	+	-	-	-	-	-	+	
3	-	+	-	-	+	+	+	
4	-	-	+	+	-	-	+	
5	+	+	-	+	-	-	-	
6	+	-	+	-	+	+	-	
7	-	+	+	-	-	-	-	
8	+	+	+	+	+	+	+	
Eff.								

Mit Hilfe dieses Versuchsplanes können die Effekte der Rotationsgeschwindigkeit, der Prozesslaufzeit und der Prozesswassermenge abgeschätzt und bewertet werden. Wenn eine signifikante Zwei-Faktor-Wechselwirkung vorliegt, das heißt AB, AC oder BC einen hohen Effekt zeigen, dann werden die Mittelwerte der Faktorstufenkombinationen betrachtet. Falls eine Drei-Faktor-Stufenkombination (ABC) signifikant vorliegen sollte, müssen die drei Faktoren zusammen betrachtet werden. [178]

4.3 Chemische bzw. physikalische Nachbehandlung

Für die Auswahl der Chemikalien für die chemische bzw. physikalische Nachbehandlung wird anhand von „Beständigkeitstabellen“ eine Auswahl für PA12 getroffen. Durch einen Abgleich der Literatur [22, 72] mit den Tabellen von Materialherstellern [180, 181] und einer Auflistung einer Chemietechnik GmbH [182] werden in der Tabelle im Anhang 1 die Chemikalien aufgeführt, gegen die PA12 nicht widerstandsfähig ist. Einige Quellen sind hier recht allgemein gehalten und geben eine Nicht-Widerstandsfähigkeit gegenüber Mineralsäuren, organischen Säuren und oxidierenden Säuren an. Zu den starken Mineralsäuren zählen u. a. Schwefel-, Salpeter- und Salzsäuren (grün markiert) und zu den starken organischen Säuren z. B. Phosphor- und Trifluoressigsäure (blau markiert), wobei Trifluoressigsäure zu

der Gruppe der Carbonsäuren zählt (schwarz umrandet) [183]. Einige der aufgelisteten Säuren kommen nicht zum Einsatz, da sie ein zu hohes Risiko in der Anwendung darstellen. Königswasser, ein Gemisch aus Salz- und Salpetersäure, das zu den oxidierenden Säuren (orange markiert) zählt, wird aufgrund der Entsorgungsproblematik über das Chemikalienlager der Universität Duisburg-Essen nicht verwendet [22].

In Abbildung 4-11 sind im Ursache-Wirkungs-Diagramm verschiedene Einflussgrößen aufgeführt, die zu einer Reduzierung der Oberflächenrauheit und zu einer Veränderung der mechanischen Eigenschaften führen können. So liegt eine Beeinflussung durch die Fertigung des Bauteils selbst vor, ebenso durch die äußeren Faktoren, die Nachbehandlungsmedien und die Einwirkbedingungen.

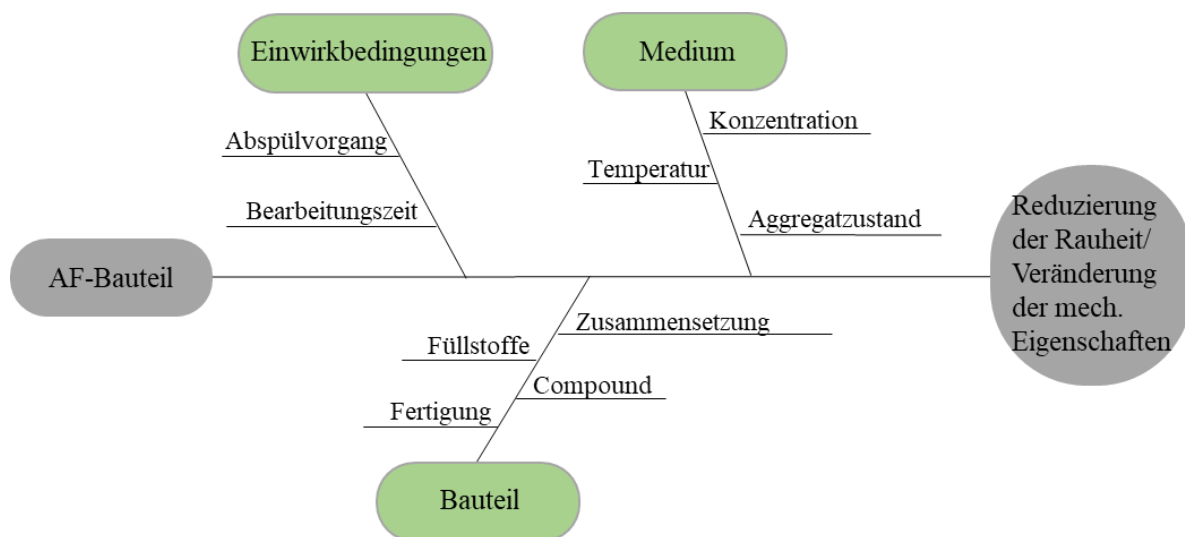


Abbildung 4-11: Potentielle Einflussgrößen nach Ishikawa durch die Nachbehandlung eines AF-Bauteils mit einer Chemikalie zur Reduzierung der Rauheit und Veränderung der mechanischen Eigenschaften nach [66]

Anhand der Literatur und durch Belegung der Hanse'schen Löslichkeitsparameter wird eine Auswahl der Chemikalien festgelegt. Neben den Säuren selbst sind deren Konzentration und Temperatur sowie die Einwirkzeit und ihr Aggregatzustand, also ob flüssig oder dampfförmig, von Bedeutung. Tabelle 4-4 zeigt eine Auswahl (Auszug aus der Literaturrecherche aus dem Anhang 1) von Säuren zur Nachbehandlung von PA12 neben der verwendeten Konzentration. Unter der Angabe der Konzentration [c] ist die Stoffmengenkonzentration zu verstehen. Diese gibt Auskunft über die Stoffmenge des gelösten Stoffes [n] pro Volumen [V] Lösung. [183]

Tabelle 4-4: Konzentrationen der verwendeten Chemikalien zur Nachbehandlung von PA12

Chemikalie	Konzentration in %
Ameisensäure	98
Chloroform	93,9
Methansulfonsäure	99
Salpetersäure	65
Salzsäure	37
Schwefelsäure	95
Trifluoressigsäure	99

Für PP ergibt sich anhand der Literatur die im Anhang 2 befindliche Tabelle mit Chemikalien, gegen die Polypropylen unbeständig ist. Oxidierend wirkende Säuren greifen PP bei Raumtemperatur an, so z. B. Chlorsulfonsäure oder konzentrierte Salpetersäure. Toluol liegt im sphärischen Raum von PP, ermittelt über die Hanse'schen Löslichkeitsparameter, wodurch ein Einfluss erklärt werden kann. Für die PP-Nachbehandlungsversuche wird Toluol als Lösungsmittel verwendet. [66, 72, 91]

4.3.1 Tauchätzen

Unter einer Absaughaube werden die Versuche mit den aufgeführten Chemikalien durchgeführt. Dazu werden Bechergläser und Haken zum Aufhängen für die Proben benötigt. Hinzu kommt eine geeignete persönliche Schutzausrüstung, um Hautkontakte und das Einatmen der Dämpfe zu vermeiden. Alle Chemikalien werden für die Nachbehandlung von PA12 bei Raumtemperatur verwendet und nicht erwärmt. Für die Nachbehandlung von PP wird Toluol auf 50 °C und 100 °C erwärmt.

Die nachbehandelten Proben bleiben aufgehängt an einem Stativ unter der Absaughaube für mindestens 24 Stunden, um eine vollständig trockene Probe zu gewährleisten. So können sich Chemikalienreste verflüchtigen, die durch eine im Anschluss an die Nachbehandlung stattfindende Neutralisation nicht entfernt wurden.

Zur Neutralisation ausgewählter Proben wird eine Wanne mit VE-Wasser gefüllt und die Proben nach der Nachbehandlung in die gefüllte Wanne gelegt. Über pH-Messungen mit dem Lackmus-Test kann festgestellt werden, dass nach sechs bis sieben Spülvorgängen das VE-Wasser nicht mehr sauer ist und die Proben frei von noch anhaftenden Säureresten sind. Für jeden Spülvorgang wird neues VE-Wasser in die Wanne gefüllt. Hierfür dienen Teststreifen, die mit einem Farbstoff, Lackmus, versehen sind. Kommt der Teststreifen mit sauren oder basischen Stoffen in Kontakt, verändert er seine Farbe, und anhand einer Farbskala kann der pH-Wert bestimmt werden.

Nach Verwendung der Säuren werden diese in vorgesehene Behälter umgefüllt und nach Versuchsabschluss über das universitätsinterne Chemikalienlager entsorgt.

4.3.2 Bedampfung

Da TFA zu den leichtflüchtigen Stoffen zählt, bedarf es keiner Erwärmung der Säure für eine Nachbehandlung [184]. Flüchtige Stoffe zeichnen sich durch ihren hohen Dampfdruck bzw. niedrigen Siedepunkt aus und können dadurch über die Atmosphäre verbreitet werden [185].

Für die Bedampfung der Proben mit Trifluoressigsäure kommt eine eigens dafür entwickelte Apparatur zum Einsatz. Nach dem ihr zugrunde liegenden Prinzip, schematisch in Abbildung 4-12 zu sehen, erfolgt eine Nachbehandlung über die Dämpfe der leichtflüchtigen TFA. In einer geschlossenen Kammer (1) aus dem Edelstahl X6CrNiMoTi17-12-2, der im chemischen Apparatebau eingesetzt wird, befindet sich an der Decke ein über einen Elektromotor angetriebenes Ventilationssystem (3) [186]. Im Inneren der Kammer wälzt ein Propeller die Säuredämpfe um, so dass eine gleichmäßige Verteilung stattfinden kann. Über die Kühlrippen, die außen an der Kammer angebracht sind, kann die verflüchtigte Trifluoressigsäure nach Beendigung des Nachbehandlungsprozess kondensieren und sich am Boden sammeln. Nach Ablauf der Einwirkzeit kann die Kühlung (5) eingeschaltet werden. Über ein Abflussventil wird die Säure in eine dafür vorgesehene Flasche geleitet und über einen Wasseranschluss (4) gereinigt.

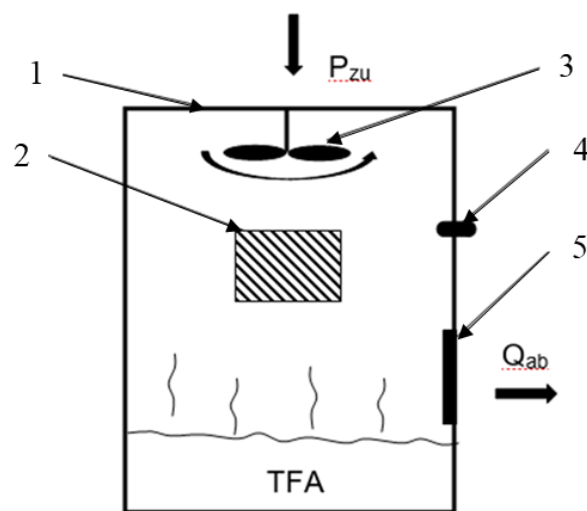


Abbildung 4-12: Graphische Darstellung einer Apparatur zur Nachbehandlung von PA12-Proben mit TFA-Dampf

An den Seitenwänden der Kammer sind Schienen angebracht, auf die Lochbleche eingeschoben werden können. Darauf können Proben (2) zur Nachbehandlung platziert oder wahlweise mit Haken aufgehängt werden.

4.4 Charakterisierung der Bauteileigenschaften

Zur Charakterisierung der Bauteileigenschaften werden verschiedene Messmethoden angewendet. Es werden die topographischen Eigenschaften, die Maßhaltigkeit, die mechanischen Eigenschaften wie auch die thermischen Eigenschaften der vorgestellten Polymerproben mit jeweils geeigneten Messmitteln bestimmt. Bei jeder Messung wird ein Maß bzw. eine Eigenschaft mindestens drei Mal gemessen. Aus den mindestens drei gemessenen Werten wird der Mittelwert (\bar{y}) nach Formel 9 und die Standardabweichung (s) nach Formel 10 berechnet, mit i = Anzahl der Messungen.

$$s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \mu)^2}$$

Für eine bessere Vergleichbarkeit werden die Messwerte in der vorliegenden Arbeit in einem Punktdiagramm dargestellt.

4.4.1 Rauheitsmessung

Rauheitsmessungen können taktil, also berührend, oder berührungslos stattfinden. Ebenso kann entlang einer Strecke oder über eine definierte Fläche gemessen werden.

Taktile Messungen erfolgen mit einer Tastspitze (2), die in Abhängigkeit von dem zu messenden Material (3) und der zu erwartenden Oberflächenrauheit in ihrer Geometrie und Größe bzw. in ihrem Durchmesser variiert, s. Abbildung 4-13 [187]. Bei der Messung wird die Nadel mit der Tastspitze von der Vorschubeinheit (1) linear über die Probe bewegt, so dass der Ausschlag von der Messspitze aufgenommen werden kann.



Abbildung 4-13: Schematische Darstellung einer taktilen Rauheitsmessung mit Nummerierung wichtiger Komponenten

Die Taststrecke teilt sich in sieben Teile auf: die Gesamtmessstrecke sowie die Vor- und die Nachlaufstrecke, wobei die eigentliche Messung (Gesamtmessstrecke) in fünf Bereiche unterteilt erfolgt, bei denen jeweils der Abstand zwischen dem höchsten und dem niedrigsten Wert gemessen wird, s. Abbildung 4-14. Aus diesen Werten wird der Mittelwert gebildet, der den R_z -Wert in μm angibt. Neben diesem Wert wird häufig der R_a -Wert gebildet, der arithmetische Mittenrauwert, der die mittlere Abweichung zur mittleren Linie angibt. [188]

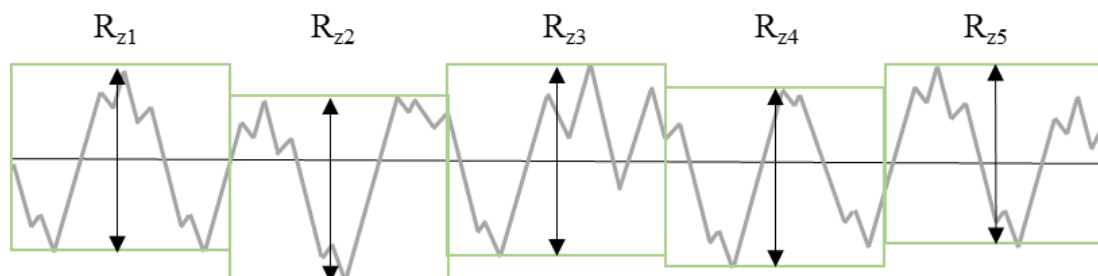


Abbildung 4-14: Ermittlung des Rauheitswertes R_z , Darstellung des Rauheitsprofils mit Einteilung der Einzelmessstrecken und Anzeige der einzelnen Rautiefen nach [188]

Für die Rauheitsmessung wird zwischen periodischen und aperiodischen Profilen unterschieden. So entsteht z. B. beim Drehen ein wiederkehrendes Muster im Gegensatz zu den Oberflächen eines Gussteils

(aperiodisch). Bei Dreh- oder Frästeilen mit ihrem wiederkehrenden Profil sollte auf die Messrichtung geachtet werden, ebenso bei den hier betrachteten PBF-LB/P- und MEX-Bauteilen. [188]

Verfahrensbedingte charakterisierende Treppenstufeneffekte müssen bei den Rauheitsmessungen berücksichtigt werden. Für eine größtmögliche Vergleichbarkeit, auch mit Literaturwerten, werden die Rauheitsmessungen in Baurichtung (z-Richtung) durchgeführt. In Ausnahmefällen, bei besonderen Testgeometrien, kann die Messrichtung von der Baurichtung abweichen; entsprechende Angaben werden im Weiteren darauf hinweisen.

Um die Oberflächeneigenschaften wie Rauheit und Maße ermitteln und einen Vorher-nachher-Vergleich vornehmen zu können, werden verschiedene Messmittel eingesetzt. Zur Bestimmung der Oberflächenrauheit wird ein Tastschnittgerät SJ-400 mit passender Messspitztaste der Firma Mitutoyo verwendet. Nach DIN EN 4288 wird die Messspitze anhand der zu erwartenden Rauheit ausgewählt. Zum Vergleich wird neben der Messspitze mit einem Radius von 10 μm die Messspitze mit einem Radius von 5 μm eingesetzt. Ebenfalls in Abhängigkeit der Ausgangsrauheit wird die Länge der Einzelmessstrecken und der gesamten Messstrecke festgelegt. Für die Rauheiten R_z zwischen 50 und 200 μm wird für Kunststoffbauteile eine Messspitze mit einem Radius von 10 μm und eine Gesamtmessstrecke von 40 mm mit Einzelmessstrecken von 8 mm empfohlen. Bei zu erwartenden Rauheiten R_z zwischen 10 und 50 μm kommt eine Messspitze mit einem Radius von 5 μm zum Einsatz; hier beträgt die Messstrecke 12,5 mm mit einer Einzelmessstrecke von 2,5 mm. [187, 189]

Mit einer Messlänge von 48 mm wird der mittlere Bereich des Zugstabs gemessen. Für einen qualitativen Vergleich der Ergebnisse werden die Messwerte der verschiedenen Messspitzen miteinander verglichen, und angesichts nur marginaler Abweichungen wird der 10 μm -Tastspitzenradius für alle Messungen ausgewählt. Somit werden, wie in Tabelle 4-5 zusammengefasst, die Proben mit folgenden Messbedingungen ausgewertet:

Tabelle 4-5: Messbedingungen der durchgeführten Rauheitsmessung zur Bestimmung von R_z

Parameter	Werte
Radius der Messspitze	10 μm
Taststrecke	48 mm
Gesamtmessstrecke	40 mm
Einzelmessstrecke	8 mm
Anzahl Einzelmessstrecken	5
Vor- und Nachlaufstrecke	je 4 mm

Die Messungen werden drei Mal durchgeführt, um im Anschluss anhand der gewonnenen Werte den Mittelwert und die Standardabweichung zu bilden.

4.4.2 Geometrie – Maß- und Formmessungen

Messungen der Außen- und Innenmaße werden mittels einer digitalen Messschieblehre vorgenommen. Für kleinere Maße, die mit einer Schieblehre nicht zu erreichen sind, wird ein Lichtmikroskop Olympus BX51 verwendet. Mit der zugehörigen Software können Durchmesser, Abstände und Winkel mit einer zugehörigen Bildsoftware bestimmt werden. Besonders für verformte Stege eignet sich eine Messung mittels Mikroskop, da hier über die Bildsoftware Hilfslinien eingefügt werden können. Aufgrund des Einflusses von Chemikalien und deren Auswirkung auf den Werkstoff kann es zu Verrundungen der Kanten und Ecken kommen. Ähnliches wird auch durch das Gleitschleifen erwartet, da hier ein Abrieb stattfinden kann. Neben den Verrundungen von Kanten und Ecken beim Gleitschleifen sind ebenfalls dünne Stege und filigrane Säulen von einer möglichen Deformation betroffen.

4.4.3 Mikroskopie

Unter Zuhilfenahme der Lichtmikroskopie (Lichtmikroskop Olympus BX51) können Oberflächen, Feststoffe oder lose Stoffe sowie Pulver in vielfacher Vergrößerung betrachtet werden. Dabei wird in der Regel nur ein Ausschnitt betrachtet, der unter dem Olympus-Mikroskop 5-fach bis 50-fach vergrößert dargestellt wird; für höhere Auflösungen bis in den einstelligen Nano-Bereich (nm) werden Rasterelektronenmikroskope (REM) verwendet. Über das Okular (1) oder eine geeignete Software bei einer Nutzung des Computers lässt sich die Probe (3) gemäß der eingestellten Vergrößerung durch die Objektive (2) betrachten, s. Abbildung 4-15. Der Tisch (6) mit der aufgelegten Probe kann in x-, y- und z-Richtung (5) bewegt werden. Unterhalb des Tisches befindet sich die Lichtquelle (4), über die die Probe beleuchtet werden kann. [190]

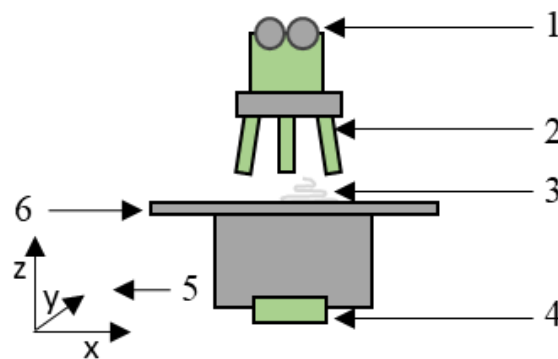


Abbildung 4-15: Schematische Darstellung eines Lichtmikroskops mit Nummerierung einzelner Komponenten

Um die Morphologie von Oberflächen bestimmen zu können, wird sie mit einem REM erfasst und abgebildet. Bei der Rasterelektronenmikroskopie tastet ein fein fokussierter Elektronenstrahl ein Raster auf einer Probe unter Vakuum ab. Anstelle der Objektive wie beim Lichtmikroskop wird hier ein elektronisches Linsensystem eingesetzt.

Polymerproben müssen für die REM vorbereitet werden, so dass sie elektrisch leitend sind. Hierzu werden die trockenen Proben, die ggf. vor der REM konditioniert werden, i. d. R. mit Gold bestäubt. Der

emittierter Elektronenstrahl aus einer Elektronenquelle wird über Blenden, Linsen und Spulen im Durchmesser sukzessive verkleinert und auf die Probe fokussiert. Beim Auftreffen des Strahls auf der Probe werden über die Wechselwirkung mit den Atomen zwei Elektronenprodukte erzeugt: Strahlenelektronen, die zurückgestreut werden, und Sekundärelektronen, die durch die Strahlenelektronen aus den Atomen, auf diese sie treffen, freigesetzt werden. Über ein oder mehrere Strahldetektoren werden die Elektronensignale aufgenommen und digitalisiert. Bei der Erstellung des Bildes werden die Daten in Graustufen mit ihren x-y-Positionen ausgegeben. [190 - 192]

REM-Aufnahmen werden über den Lehrstuhl Kunststofftechnik der Universität Erlangen-Nürnberg im Rahmen des Projektes „LZE-LS II“ durchgeführt und beim an der Universität Duisburg-Essen ansässigen Interdisciplinary Center for Analytics on the Nanoscale in Auftrag gegeben.

4.4.4 Zugversuche

Zugversuche gehören zu den zerstörenden Werkstoffprüfungen. Hierbei, s. Abbildung 4-16, wird ein Prüfkörper (4) in die Spannbacken (3) der Zugprüfmaschine eingeklemmt. Die obere Spannbacke wird definiert mit konstanter Geschwindigkeit hochgefahren (1), bis die Probe reißt. Über eine Kraftmessdose (2) werden die Längenänderung des Zugstabes mittels eines Feindehnmessers sowie die Krafthöhe erfasst. [193, 194]

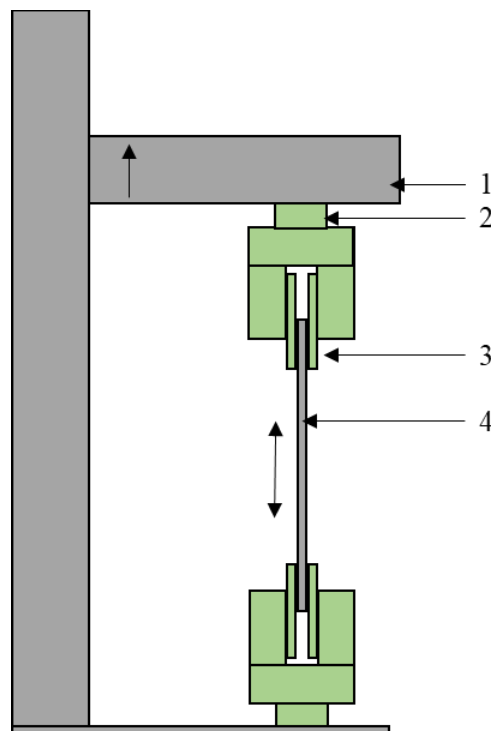


Abbildung 4-16: Schematische Darstellung einer Universalprüfmaschine nach [193] mit eingespannter Zugprobe und Nummerierung einzelner Komponenten

Als Ergebnis aus dem Zugversuch wird die aufgebrachte Spannung über die Dehnung des Prüfkörpers ausgegeben und in einem Diagramm visualisiert (Abbildung 4-17). Über die Hooke'sche Gerade kann der E-Modul über die Steigung bestimmt werden (Formel 11). Im Anfangsbereich der Kurve kann an

diese eine Tangente durch den Nullpunkt gelegt werden, deren Steigung durch $\Delta\sigma$ (Spannung) zu $\Delta\varepsilon$ (Dehnung) beschrieben wird. [195]

Hooke'sches Gesetz

$$\sigma = \varepsilon E$$

11

Weiter kann an der Kurve bei ihrem Maximum die Zugfestigkeit und an dessen Ende die Bruchdehnung abgelesen werden.

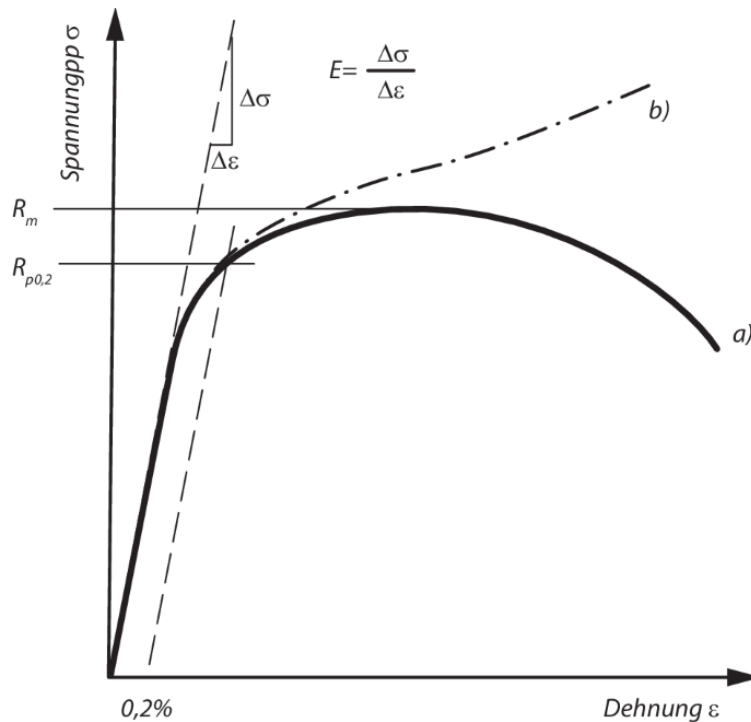


Abbildung 4-17: Spannungs-Dehnungs-Diagramm [195] mit Hooke'scher Gerade und Angabe zur Berechnung des E-Moduls

Nach aktueller DIN EN ISO 527-1 lässt sich eine Geschwindigkeitsänderung einstellen. Als Erstes wird bei einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min der Elastizitätsmodul (E-Modul) ermittelt und im Anschluss wird zur Bestimmung der weiteren Kennwerte der Zugversuch bei üblicherweise 5 mm/min oder 50 mm/min nach der besagten Norm bis zum Bruch fortgeführt [196, 197]. Bei einer erwarteten Bruchdehnung von unter 10 % wird eine Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min empfohlen, für die anderen Polymerwerkstoffe hingegen 50 mm/min [176, 198].

Ein weiterer Begriff von Bedeutung ist die Kerbwirkung. In der Regel reduziert eine Kerbe die Lebensdauer. Angefertigte Zugproben weisen aufgrund ihrer Fertigungsart und des verwendeten Werkstoffes nahezu gleichmäßig verteilte Kerben auf, bedingt durch Einschlüsse, Poren oder Risse, die als Mikrophenomene bezeichnet werden. In der Praxis entstehen aber ebenso ausgeprägte Kerben durch Fertigungsfehler, oder sie werden konstruktiv (technische Kerben), z. B. als Einstiche, eingefügt. An den Stellen eines Bauteils oder einer Probe mit Kerbe bzw. Kerben liegt eine Querschnittsänderung vor. Somit tritt dort eine Beanspruchungserhöhung auf, woraus eine Schwächung des Bauteils in diesen Zonen erfolgt. Das hat eine Änderung des Kraftflusses zur Folge, wodurch es zur Rissbildung kommt. [199 - 202]

Für die Untersuchungen der PA12- und der PP-Proben wird zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften eine Universalprüfmaschine der Firma Zwick vom Typ 1484 am Lehrstuhl für Kunststofftechnik an der Universität Nürnberg-Erlangen eingesetzt. Nach DIN EN ISO 527-1 [196] und -2 [203] wird das mechanische Verhalten mit unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten untersucht: mit 1 mm/min beim E-Modul und mit 50 mm/min im Hinblick auf die Zugfestigkeit und Bruchdehnung. Fünf Zugproben werden mit jeweils denselben Nachbehandlungsparametern gezogen, um aus diesen Werten im Anschluss den Mittelwert und die zugehörige Standardabweichung zu berechnen.

Eine Universalprüfmaschine „Shimadzu Autograph AG-X plus“ des Lehrstuhls Kunststofftechnik der Universität Bochum kommt zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften von MEX-PA12-Proben zum Einsatz. Diese Proben, die auf der Fortus 450mc gefertigt wurden, werden mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min getestet. Die glasgefüllten PA12-Proben und die MEX-Zugproben aus Filament der Firma AM Filament werden bei der Firma polymerphys IK GmbH auf einer „Zwick Z020 M (MultiXtense)“ aufgrund der erwarteten Bruchdehnung mit einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min gezogen. Zur Ermittlung des E-Moduls wird ebenfalls eine Geschwindigkeit von 1 mm/min eingesetzt.

Für alle Zugprüfungen werden die Proben vorab bei einem Normklima von $23\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ konditioniert und im Anschluss in der Zugprüfmaschine belastet. Zur Darstellung der Ergebnisse werden Diagramme mit den Spannung-Dehnungs-Verläufen und Bruchdehnungen genutzt. Über die Zugversuche lässt sich somit das mechanische Verhalten der unbehandelten und der nachbehandelten Proben miteinander vergleichen.

4.4.5 Schmelze-Volumenfließrate

Bei den MVR-Messungen werden Proben auf ihre Schmelzfließfähigkeit untersucht. Zur Bestimmung des Pulververhältnisses von Neu- zu Altpulver für den PBF-LB/P-Prozess wird in der additiven Fertigung üblicherweise dieses Messverfahren eingesetzt. Aufgrund des Wärmeeinflusses der Heizstrahler während des Bauprozesses auf das nicht-aufgeschmolzene Pulver, das im Anschluss als Altpulver recycelt wird, findet eine Alterung statt [204]. MVR-Messungen werden nach DIN EN ISO 1133-1/-2 und nach der VDI-Norm 3405 Blatt 1.1 durchgeführt. Nach der VDI-Norm erfolgt die Messung von PA12-Proben mit 4,5 g Probenmasse. Diese wird nach Empfehlung des Anlagenherstellers und PA12-Pulverhändlers EOS GmbH für insgesamt 17 min getrocknet. Zum Trocknen wird ein Feuchtebestimmer (DBS) mit Wiegesystem von der Firma KERN eingesetzt, das für die PA12-Proben ein Heizprofil abfährt: erstens 15 min bei 105 °C , zweitens 2 min bei 150 °C .

Im Anschluss wird die Probenmasse in den aufgeheizten Messzylinder (235 °C) des MVR-Geräts (3) gefüllt, s. Abbildung 4-18. Ein Kolben (2) verschließt und verdichtet die Probenmasse mit einem Belastungsgewicht (1) von 5 kg. Nach Ablauf einer definierten Zeit (300 s) wird die Düse (4) freigegeben und die Polymerschmelze (5) fließt heraus. Über einen Wegaufnehmer, der am Stempel befestigt wird, wird der MVR-Wert in $\text{cm}^3/10\text{ min}$ bestimmt, der sich aus dem Polymervolumen ergibt, das innerhalb von 10 min aus der Düse austritt. [55, 205, 206]

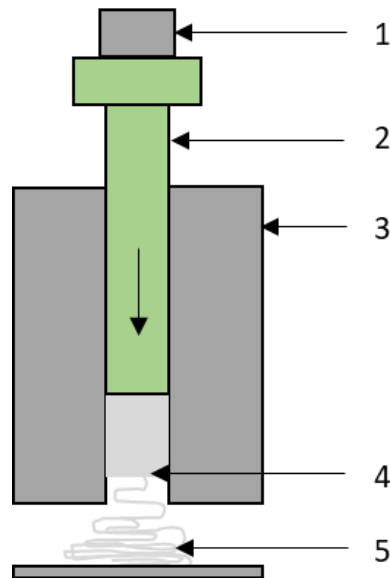


Abbildung 4-18: Schematische Darstellung eines MVR-Messgeräts mit Belastungsgewicht und heraustretender Polymer-schmelze mit Nummerierung einzelner Komponenten

Zur MVR-Messung steht das Schmelzindex-Prüfgerät „MeltFlow @on“ der Firma KARG zur Verfügung. Gemäß der Norm werden in Abhängigkeit vom Kunststoff u. a. Probenmasse, Temperatur des Messzylinders und Belastungsgewicht ausgewählt. Die Probenform darf nach DIN EN ISO 1133-1 so gewählt werden, dass sie in den Messzylinder passt [206]. Üblicherweise liegt die Probe für den PBF-LB/P-Prozess zur Bestimmung der Mischung aus Neu- und Altpulver in Pulverform vor.

4.4.6 Dynamische Differenzkalorimetrie

Ein häufig eingesetztes Verfahren innerhalb der Polymerverarbeitung ist die Dynamische Differenzkalorimetrie. Mit Hilfe dieses Verfahrens, das zu den thermischen Analyseverfahren zählt, können viele Informationen zum Schmelz- und Kristallisationsverhalten des untersuchten Polymers nach DIN EN ISO 11357-3 analysiert werden [207]. In den Ofenraum einer DSC-Analyseeinheit werden zwei Tiegel aus Aluminium eingelegt, ein Probentiegel (P) und ein Referenztiegel (R), Letzterer ist ohne Inhalt. Aus dem zu untersuchenden Material wird eine definierte Menge entnommen und dem Probentiegel zugeführt. In Abbildung 4-19 ist der schematische Aufbau einer DSC-Analyseeinheit zu sehen. Beide Tiegel werden unter konstantem Druck erwärmt.

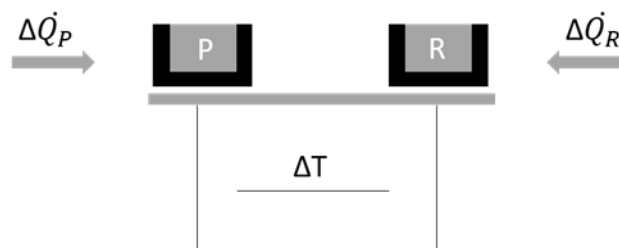


Abbildung 4-19: Schematischer Aufbau einer DSC-Analyseeinheit nach [208] mit Angabe der Wärmeströme

Zwischen den beiden Tiegeln entsteht aufgrund einer physikalischen und/oder chemischen Änderung der Probe eine Temperaturdifferenz bzw. eine Differenz des Wärmeflusses. Bedingt wird dies durch die

Erwärmung, die einen Schmelzvorgang einleitet, bzw. durch die Abkühlung, die einen Kristallisationsvorgang freisetzt. Je nach untersuchtem Kunststoff fangen die kristallinen Bereiche zu schmelzen bzw. zu erstarren an. [208]

In Thermogrammen (s. Abbildung 4-20) können die Verläufe der Aufheiz- und der Abkühlphase graphisch über die Zeit oder über die Temperatur dargestellt werden.

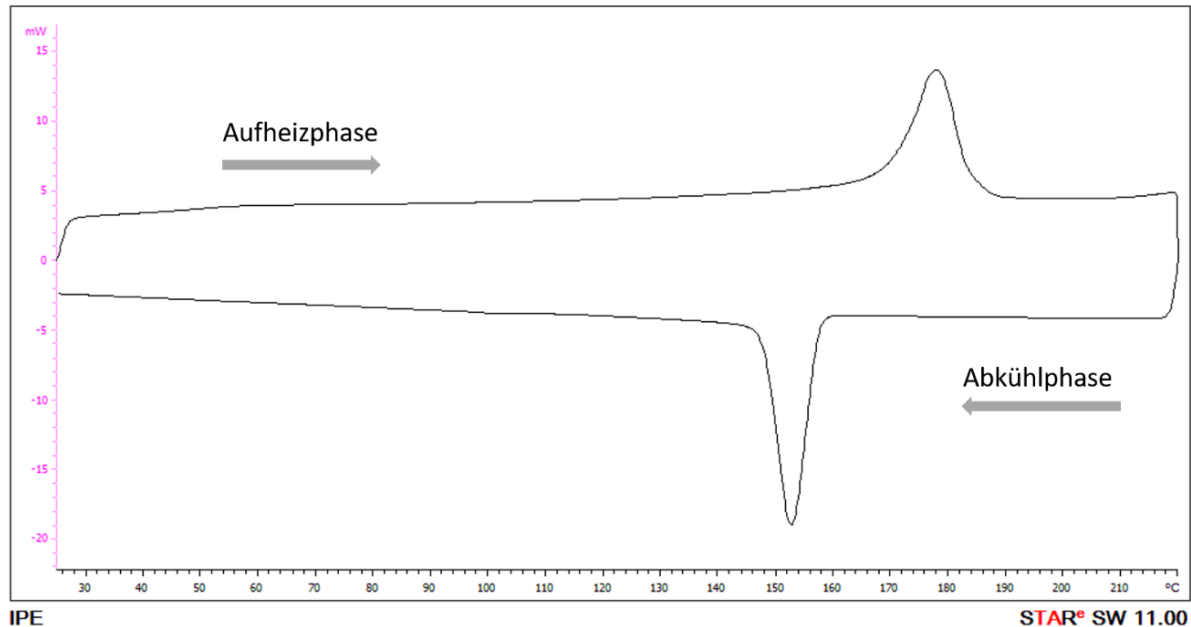


Abbildung 4-20: Thermogramm einer DSC-Analyse mit Darstellung einer Aufheiz- und Abkühlphase

Bei dem hier beispielhaft dargestellten Thermogramm gibt die y-Achse die Leistung in mW und die x-Achse die Temperatur in °C (Grad Celsius) an; alternativ zu den hier vorgestellten Diagrammen ist auf der y-Achse die Heizrate in W/g wiedergegeben. Über den Peak der Aufheizphase, auch als endothermer Peak bezeichnet, wird der Schmelzbereich des Polymers angegeben, der nächste Peak (exothermer Peak) gibt den Kristallisationsbereich an. [207 - 210]

In Abbildung 4-21 links ist der markierte Ausschnitt aus der vorangegangenen Abbildung zu sehen; rechts in der Abbildung ist der Bereich unter der Kurve markiert. Mit einer Auswerte-Software können die Temperaturbereiche markiert werden, um zu sehen, wann die Aufheizphase startet bzw. endet. Ebenfalls wird der Peak als Temperatur ausgegeben. Über das Setzen der rechten und linken Markierung (linke bzw. rechte Grenze / initiale und finale Temperatur [211]) wird eine Basislinie gezogen, so dass unter der Kurve mit dem Maximum beim Peak das Integral berechnet wird, das die Schmelz- bzw. Kristallisationsenthalpie ausgibt. Charakteristische Punkte wie T_{Onset} und T_{Endset} werden über die Tangenten- bzw. die Onset-Methode bestimmt [212]. Zur Ermittlung der beiden Temperaturen (Onset, Endset) wird eine Tangente an die Peakflanke mit einer maximalen Steigung gelegt, wobei der Schnittpunkt mit der Basislinie die beiden genannten Temperaturen angibt [213]. [194, 211]



Abbildung 4-21: Ausschnitt aus der Aufheizphase des Thermogramms aus Abbildung 4-20 (links) und von einem bearbeiteten Thermogramm (rechts)

Für die Versuche werden mittels einer Mikrowaage XS3DU von Mettler Toledo Probenmassen von 9,8 mg mit einer tolerierten Abweichung von $\pm 0,2$ mg abgewogen. Zur Analyse organischer Stoffe wird eine Probenmenge zwischen 2 und 10 mg empfohlen, wird davon ausgegangen, dass nur schwache Effekte bestehen, wird zu einer höheren Menge geraten [214]. In einem Aluminiumtiegel werden mit Hilfe eines Stempels die Proben verschlossen und im Anschluss in den Ofenraum des DSC-Analysegeräts Mettler Toledo DSC 1 vom Lehrstuhl Konstruktion und Kunststoffmaschinen der Universität Duisburg-Essen neben den Referenztiegel eingelegt. Abhängig vom gewählten Material der Probe wird das Programm gewählt. Bei Polyamid 12 wird die Temperatur von 25 °C bis 220 °C in Schritten von 10 K/min erhöht. Zur Analyse liegen die in TFA-Säure eingetauchten PA12-Proben vor. Untersucht werden im Vergleich zur Referenzprobe Proben, die 10 s, 30 s, 60 s, 90 s und 120 s im TFA-Bad eingetaucht waren. Von den nachbehandelten Proben wird von der Oberfläche Material abgetragen, so dass rein nachbehandeltes PA12 analysiert werden kann. Bei der Referenzprobe wird passend zu dem Tiegel ein zylindrisches Probenstück ausgestanzt.

4.4.7 Thermogravimetrie

Bei der thermogravimetrischen Analyse wird, s. Abbildung 4-22, eine definierte Probenmenge (2) passend zu der verwendeten Thermowaage (3) so weit in einem isolierten Ofen (1) erwärmt, dass eine Masseänderung eintritt, die über die Waage bestimmt wird. Über einen angeschlossenen Computer wird die Gewichtsänderung der Probe aufgezeichnet. Die Hinzunahme von Schutz- bzw. Spülgasen wie z. B. Stickstoff, Argon oder Sauerstoff ermöglicht eine Trennung der Bestandteile bei verschiedenen Zersetzung- und Verdampfungstemperaturen. Je nach eingestelltem Temperaturbereich separieren sich bei der Analyse Kunststoff und Ruß oder andere Füllstoffe wie Weichmacher oder niedermolekulare Bestandteile. Für Kunststoffe wird in der Regel die Temperatur ausgehend von der Raumtemperatur in Schritten von 10 K/min bis 20 K/min unter einer Stickstoffatmosphäre bis 600 °C erhöht [215, 216]. Anschließend wird ab 600 °C eine Sauerstoffatmosphäre zur Verbrennung des Rußes verwendet. In der Regel wird dann die Temperatur bis zur Zersetzungsgrenze des Polymers erhöht. [156, 176, 217 - 221]

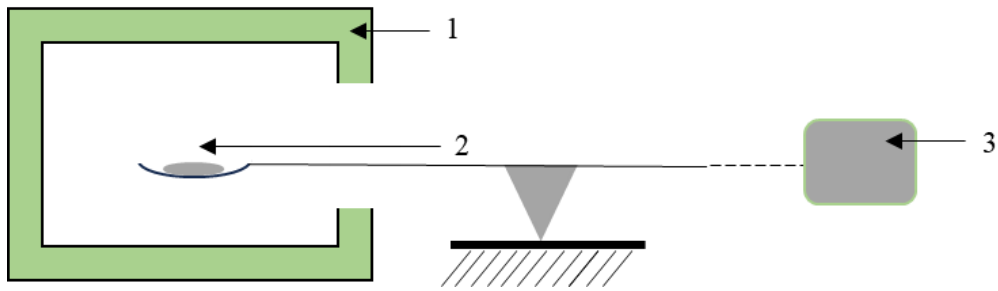


Abbildung 4-22: Schematische Darstellung einer Thermowaage in Anlehnung an [222] mit Nummerierung einzelner Komponenten

Nach DIN EN ISO 11358 [219] und DIN 51006 [223] wird das Analyseverfahren genormt. Eine Auswertung der Ergebnisse kann an einer TG-Kurve, s. Abbildung 4-23, mit Hilfe einer Tangentenkonstruktion erfolgen, mit deren Hilfe die Punkte A, B und C abzulesen sind. Diese Punkte entsprechen bei einem Auftrag der Masse über die Temperatur den Punkten T_A , T_B und T_C .

Die Tangente bzw. Extrapolationsgerade mit ihrem Wendepunkt C schneidet die Horizontale, die durch m_s verläuft, hieraus ergibt sich Punkt A. Äquivalent dazu ergibt sich Punkt B aus der Tangente und der Geraden durch m_f . Auf der y-Achse wird die Masse mit m_s (Startmasse) und m_f (Endmasse) in Masse oder Prozent über die Temperatur bzw. Zeit (x-Achse) aufgetragen. Bei der Temperatur bzw. der Zeit geben die Indizes wie auch die Punktebezeichnungen A den Anfang, B das Ende und C die Mitte an. Die Schnittlinie von C und x-Achse liegt mittig der Basislinien von A bzw. B mit der x-Achse. [219] Über Analysis lassen sich die aufgeführten Punkte berechnen.

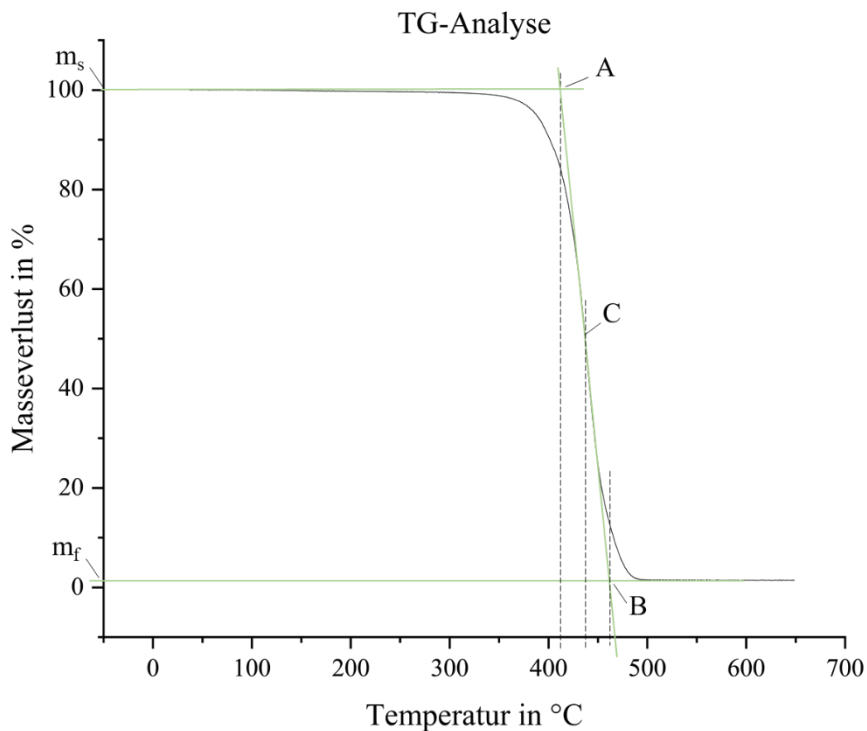


Abbildung 4-23: TG-Kurve von PA12 mit einstufiger Massenabnahme nach [78, 219] mit Markierungen von Temperaturpunkten (A, B und C)

Eine Massenabnahme M_L ist nach folgender Formel zu berechnen [218]:

$$M_L = \frac{m_s - m_f}{m_s} 100 \%$$

12

Für PA12 werden Parameter nach [21, 218, 220] und nach den Messmethoden vom ICAN (Interdisciplinary Center for Analytics on the Nanoscale), ein Gerätezentrum der Universität Duisburg-Essen, festgelegt. In Schritten von 10 K/min wird die Temperatur unter Verwendung von Argon als Inertgas bis auf 650 °C erhöht. Erste Messungen zur Voruntersuchung des Messprofils haben gezeigt, dass die Restmasse für eine weitere Analyse mit Sauerstoff zu gering ist, weshalb ab 600 °C kein Wechsel der Atmosphäre stattfindet. Für die TGA werden zwei verschiedene Probenformen verwendet. Für die erste Messreihe werden mit Hilfe einer Raspel (1) mit Hiebnummer 1 Proben nachbehandelter Zugstäbe entnommen, s. Abbildung 4-24.

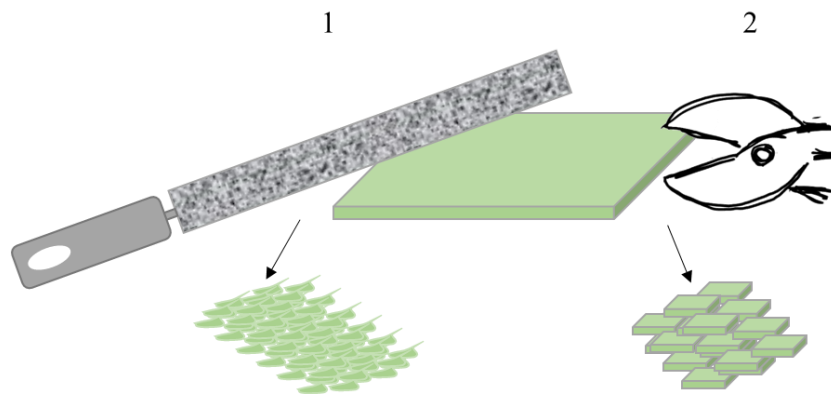


Abbildung 4-24: Graphische Darstellung der Probenvorbereitung für TGA mit zwei verschiedenen Fertigungsverfahren und zwei verschiedenen resultierenden Probenformen

Diese Zugstäbe wurden zuvor für 10 bis 120 s in TFA getaucht. Insgesamt ergeben sich sechs Proben: eine unbehandelte Probe und fünf nachbehandelte Proben. Bei dieser Probenentnahme ist das Verhältnis von nachbehandelter Oberfläche zu unbehandeltem Probenmaterial so groß wie möglich, damit ein signifikanter Einfluss zu erkennen ist. Für die zweite TGA-Untersuchungsreihe werden von einer 2 mm starken nachbehandelten PA12-Platte 2 x 3 mm große Stücke (Plättchen) mittels einer Zange (2) herausgetrennt. Im Vergleich zur ersten Probenentnahme ist das Verhältnis von nachbehandelter Masse zu unbehandelte Probenmasse geringer.

5 Ergebnisse – Einfluss der Nachbehandlungsmethoden auf additiv gefertigte Polymer-Proben

Mit Hilfe verschiedener Nachbehandlungsmethoden kann die Oberfläche von Proben und Bauteilen verändert, z. B. geglättet werden. Durch Einflussnahme auf die topographischen Eigenschaften wird die gemessene Oberflächenrauheit reduziert. Einen weiteren Einfluss können Nachbehandlungsmethoden auf die mechanischen Eigenschaften besitzen, wobei auch aus einer reduzierten Oberflächenrauheit eine höhere Bruchdehnung infolge einer reduzierten Kerbwirkung auftreten kann. Je nach angewandter Nachbehandlung können die topographischen und mechanischen Eigenschaften unterschiedlich stark und in unterschiedlicher Ausprägung verändert werden, was im folgenden Kapitel betrachtet wird. Ebenfalls wird der Einfluss einer chemischen bzw. physikalischen Nachbehandlung auf die Schmelze-Volumenfließrate und auf das Aufschmelz- und Kristallisationsverhalten untersucht.

Dargestellt werden im Folgenden die Auswirkungen der Nachbehandlungsmethoden auf die Rauheit von PBF-LB/P- und MEX-Proben, die Erreichbarkeit der chemisch bzw. physikalischen sowie der mechanischen Nachbehandlung an weiteren Geometrien und die mechanischen Eigenschaften von nachbehandelten Zugstäben. Des Weiteren werden die Auswirkungen von TFA-Nachbehandlungen auf PA12-Proben durch DSC-, MVR- und TG-Analysen und -Messungen ermittelt.

Daten zu PA12-natur und PA12-natur glasgefüllt (γ -PBF-LB/P-Zugstäbe) finden sich im Anhang 3 bis 5, ebenso die Ergebnisse zu den nachbehandelten PA12 γ -Zugstäben. Proben aus diesen Materialien werden auf ihr topographisches und mechanisches Verhalten betrachtet. Da hier von ähnlichen Auswirkungen der Nachbehandlungen ausgegangen werden kann, werden diese Proben nur rudimentär dargestellt. Auch die Ergebnisse der Rauheitsmessungen der PP-Proben (z -Zugstäbe), die mit 50 °C warmem Toluol nachbehandelt wurden, finden sich im Anhang 6.

5.1 Auswirkungen der Nachbehandlung auf die topographischen Eigenschaften

Im Folgenden werden die ermittelten Ergebnisse mit Blick auf die topographischen Eigenschaften der betrachteten Bauteile dargestellt. Neben dem visuellen Eindruck vom Einfluss der Nachbehandlungsmethoden auf die Oberfläche der Proben und Bauteile, z. B. als auftretender bzw. verstärkter Glanz, wird eine Rauheitsmessung mit dem Tastschnittverfahren herangezogen. Untersucht werden Laser-gesinterte und materialextrudierte Proben.

5.1.1 Einfluss auf PBF-LB/P-Proben

Aufgrund des umfassenden Einsatzes von PA12 in der Industrie besteht für Bauteile aus diesem Material eine hohe Anforderung an die Nachbehandlung. Als Ergänzung zu den PA12-Proben werden ebenfalls PP-Proben betrachtet und vergleichend dargestellt. Alle PA12- und PP-Proben werden mittels Gleit-

schleifen in einer Tellerfliehkraftmaschine nachbehandelt. Eine Nachbehandlung mittels einer Säure wird ebenfalls bei den verschiedenen Ausgangsmaterialien angewendet. Für PP wird Toluol und somit eine andere Chemikalie als für PA12 eingesetzt, da die Polymere unterschiedlich aufgebaut sind und dementsprechend verschieden reagieren.

5.1.1.1 Polyamid 12

Chemische bzw. physikalische Nachbehandlung

Für die Zugproben aus PA12 wurden mittels kurzer Probekörper die Auswirkungen der verschiedenen ausgewählten Chemikalien untersucht und die Eintauchzeiten bzw. Einwirkzeiten und Neutralisationsvorgänge ermittelt. Zur Nachbehandlung werden für die PA12-Proben Ameisen-, Salz-, Salpeter-, Schwefel-, Trifluoressigsäure und Chloroform ausgewählt. Alle Chemikalien werden dazu bei Raumtemperatur verwendet.

Bei einem Ausgangsrauheitswert R_z von ca. $76 \mu\text{m}$ der unbehandelten PA12-Proben wird nach einer Nachbehandlung in einem Tauchbad aus Salzsäure eine minimale Reduzierung der Oberflächenrauheit gemessen. Abbildung 5-1 zeigt links einen Vergleich zwischen un behandelter und nachbehandelter Probe und rechts die nachbehandelten PA12-Proben mit aufsteigender Einwirkzeit von links (10 s) nach rechts (120 s). Durch die Nachbehandlung mit Salzsäure ist eine Verfärbung der Proben unabhängig von der Interaktionszeit zu erkennen.

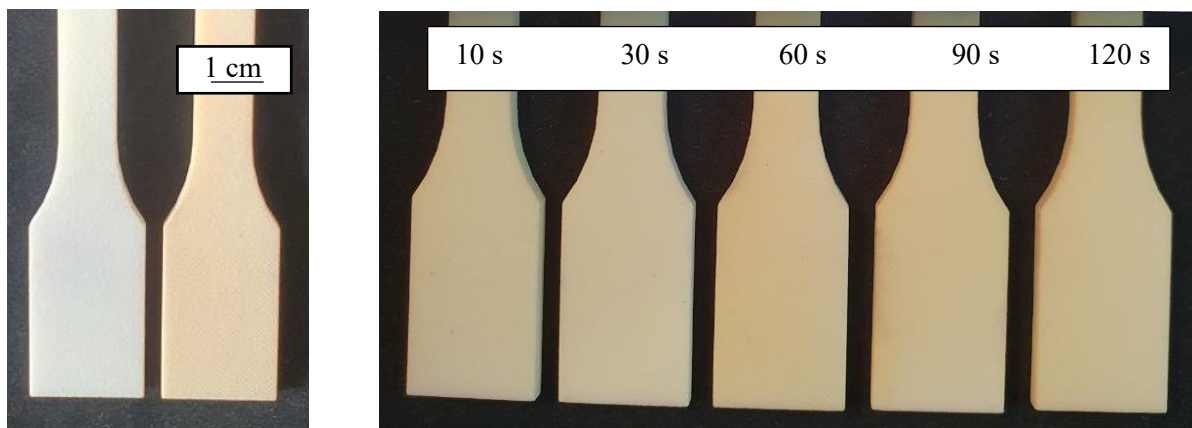


Abbildung 5-1: Unbehandelte vs. nachbehandelte Probe (links), nachbehandelte PA12 Zugproben mit Salzsäure zu unterschiedlichen Eintauchzeiten (rechts)

Nach einer Eintauchzeit von 30 und 90 s wird die geringste Rauheit (ca. $R_z = 73 \mu\text{m}$) gemessen (s. Abbildung 5-2). Bei den beiden Einwirkzeiten wird ebenfalls die geringste Breite gemessen. In dem Diagramm wird neben den Rauheitswerten (oben) die gemessene Breite der Proben über die Eintauchzeit (unten) dargestellt. Gemessen werden die Proben an der schmalsten Stelle mit einer Breite der un behandelten Probe von $9,96 \text{ mm}$ im Mittel. Sie schwanken ebenfalls und es ist kein Trend mit zunehmender Einwirkzeit zu erkennen. Es zeigt sich jedoch ein Zusammenhang mit der gemessenen Oberflächenrauheit. Es ist zu erkennen, dass unabhängig von der Eintauchzeit eine reduzierte gemessene Rauheit durch Einebnung Einfluss auf die Maße besitzt.

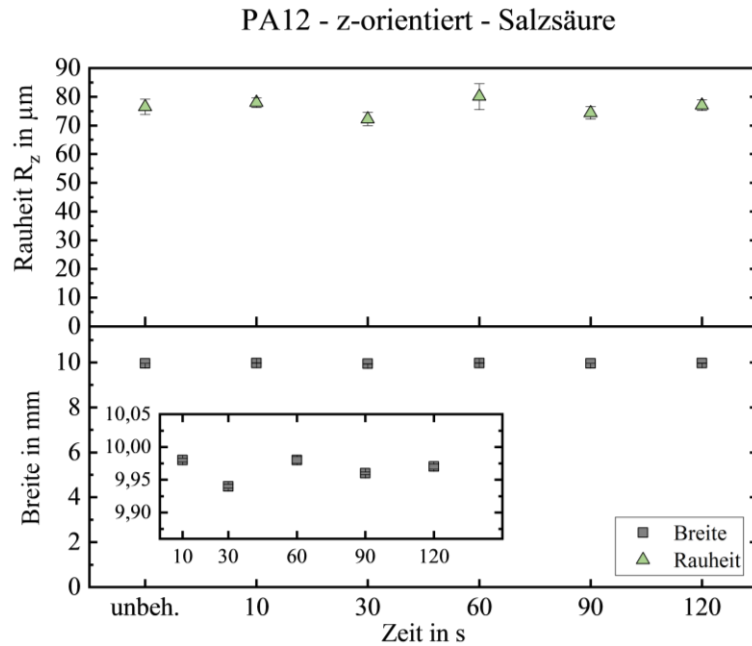


Abbildung 5-2: Diagramm von mit Salzsäure nachbehandelten PA12-Proben, Rauheit und Breite über die Einwirkzeit

Mikroskopieaufnahmen (s. Abbildung 5-3) der Querschnitte der nachbehandelten Proben mit Salzsäure zeigen nach 10 s und 120 s Einwirkzeit Veränderungen im Randbereich gegenüber der unbehandelten Probe. Bei der unbehandelten Probe sind Pulveranhaftungen durch die prozess- und materialtypischen Eigenschaften zu erkennen. Nach 120 s Nachbehandlungszeit ist eine ausgefranste Oberfläche zu sehen. Äquivalent zu den Rauheitsmessergebnissen zeigt sich auch hier, dass keine Glättung stattgefunden hat. Es scheint eine rauere Oberfläche als bei der unbehandelten Probe vorzuliegen, obwohl die Messwerte das nicht widerspiegeln. Unter Berücksichtigung des Durchmessers bzw. der Größe der Messspitze und der Breite der entstandenen Tiefen und Höhen wird hier die tatsächliche Oberfläche nicht erreichbar sein und die tatsächliche Rauheit nicht erfasst werden können.

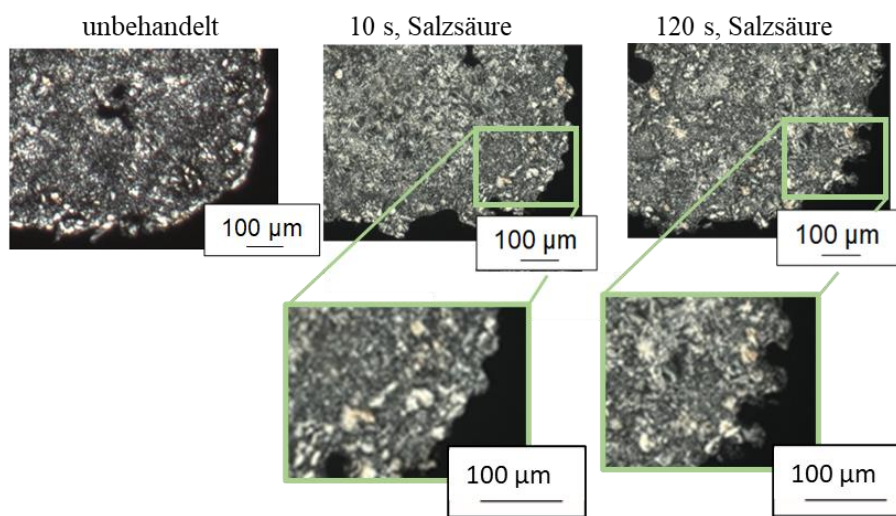


Abbildung 5-3: Mikroskopieaufnahmen der unbehandelten (links) und der mit Salzsäure nachbehandelten (rechts) PA12-Zugprobe, Graphik in Anlehnung an [30]

Bei Betrachtung der morphologischen Oberfläche werden die Ergebnisse der Rauheitsmessungen und die Schlussfolgerung aus den Mikroskopieaufnahmen bestätigt. Salzsäure hat in dem angewendeten Interaktionszeitraum bei Raumtemperatur keinen Einfluss auf die Oberfläche von PA12.

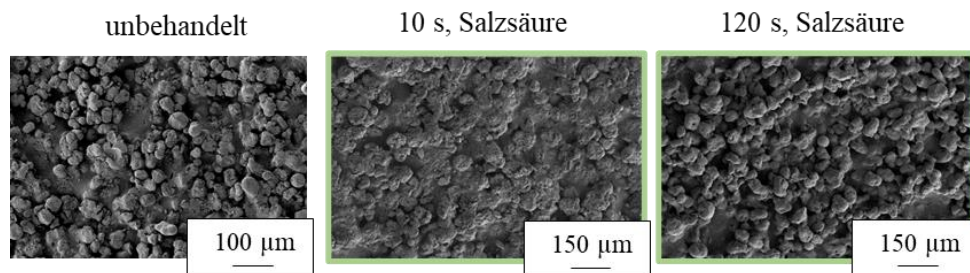


Abbildung 5-4: REM-Aufnahmen von PA12-Proben – Nachbehandlung mit Salzsäure, nach [30]

Bei der Nachbehandlung mit Chloroform sind größere Standardabweichung auszumachen, hier ist allerdings ein leichter Abnahmetrend der Rauheit mit steigender Eintauchzeit zu messen. Jedoch ist kein direkter Zusammenhang zwischen Reduzierung der Rauheit und einer Ab- bzw. Zunahme der Breite zu erkennen. Schwankungen bei der Geometrie können an den Ausgangsproben liegen; da nur eine marginale Abnahme des R_z -Wertes vorliegt, wird kein Einfluss auf die Maße stattgefunden haben.

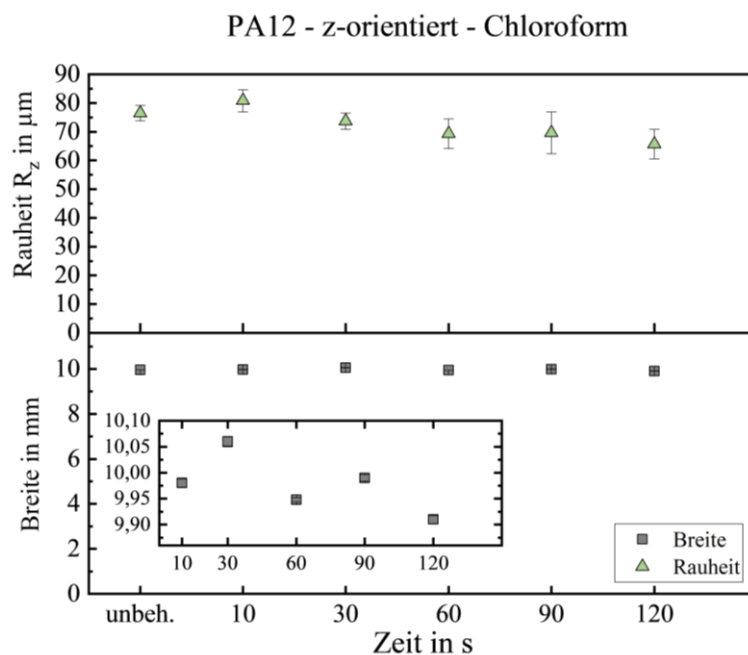


Abbildung 5-5: Diagramm von mit Chloroform nachbehandelten PA12-Proben, Rauheit und Breite über die Einwirkzeit

Bei den mit Salpetersäure nachbehandelten Proben ist eine deutliche Verfärbung der Oberfläche im orange-bräunlichen Farbbereich zu sehen. Eine Abstufung in der Farbintensität ist nach einer Eintauchzeit von 10 s bis 30 s und von 60 s bis 120 s vorhanden.

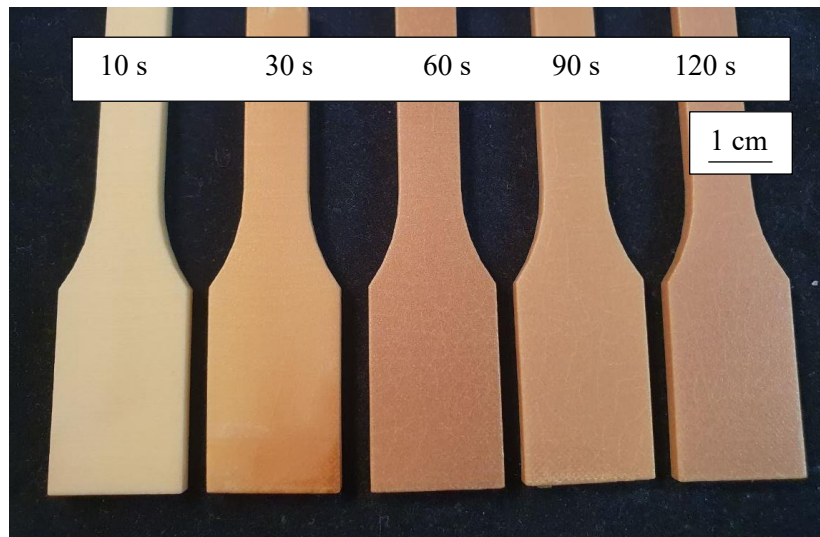


Abbildung 5-6: Mit Salpetersäure nachbehandelte PA12-Zugproben zu unterschiedlichen Eintauchzeiten

Eine Abnahme der Oberflächenrauheit ist bei nachbehandelten PA12-Proben mit Schwefel- als auch mit Salpetersäure zu erkennen. Bei der Nachbehandlung mit Schwefelsäure wird ein Minimum (ca. im Mittel von $R_z = 43 \mu\text{m}$) bei 60 s Eintauchdauer erreicht, während nach 90 s und 120 s Eintauchzeit höhere Rauheitswerte gemessen werden, s. Abbildung 5-7. Ebenso ist ein leichter Anstieg der gemessenen Breite der Probe, die für 60 s im Schwefelsäure-Bad war, von 9,96 mm auf 10,03 mm zu erkennen. Hier kann auf ein leichtes Quellen der Randschicht geschlossen werden, jedoch liegt der gemessene Unterschied im Nachkommastellenbereich und ist marginal.

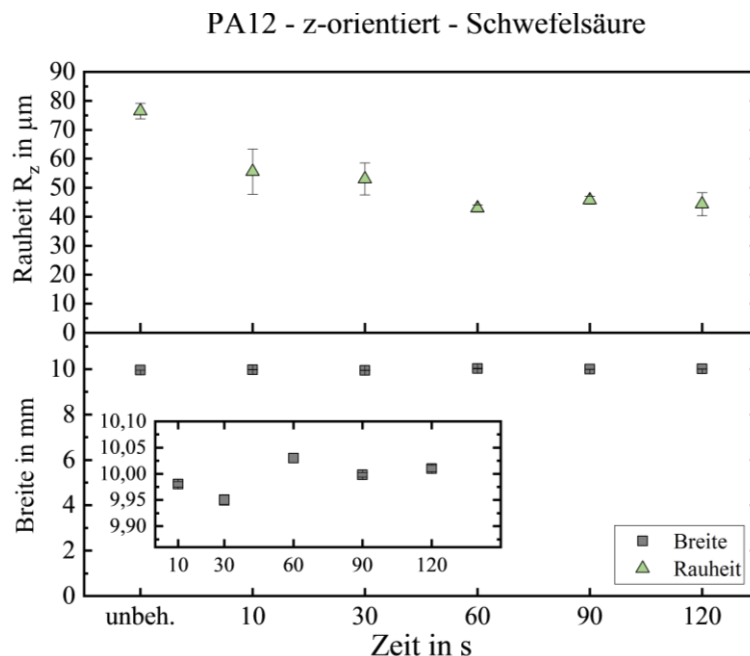


Abbildung 5-7: Diagramm von mit Schwefelsäure nachbehandelten PA12-Proben, Rauheit und Breite über die Einwirkzeit

Nach 120 s Eintauchzeit der PA12-Proben in Salpetersäure kann eine gemittelte Rauheit R_z von ca. $32 \mu\text{m}$ gemessen werden. Bei den hier angewendeten Eintauchzeiten entspricht das dem minimalen Rauheitswert (vgl. Abbildung 5-8). Hier ist ein eindeutigerer Verlauf über die steigende Eintauchzeit mit Reduzierung der Rauheit als bei der Nachbehandlung mit Schwefelsäure zu erkennen. Nach 10 s,

30 s, 60 s und 120 s Eintauchzeit liegen die Werte der gemessenen Breite leicht unter dem Ausgangswert, wobei diese nach einer Einwirkzeit von 90 s dezent angestiegen ist. Insgesamt findet eine Veränderung im zweiten Nachkommastellenbereich statt, von 9,96 mm auf minimal 9,90 mm und auf maximal 9,98 mm, weshalb dem keine weitere Bedeutung beigemessen wird.

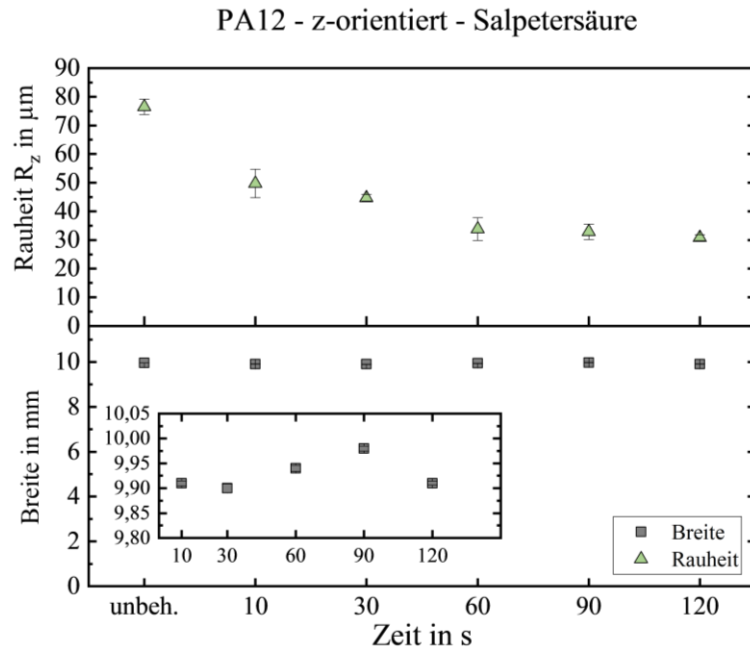


Abbildung 5-8: Diagramm von mit Salpetersäure nachbehandelten PA12-Proben, Rauheit und Breite über die Einwirkzeit

Bei der Nachbehandlung mit Salpetersäure lässt sich anhand der Mikroskopieaufnahmen der Querschnitte eine Veränderung im Randbereich der nachbehandelten Proben erkennen (vgl. Abbildung 5-9). Mit Zunahme der Einwirkzeit bildet sich eine ebenmäßigere Randschicht aus. Nach 10 s Eintauchzeit ist nach außen noch die Grundstruktur zu erkennen. Hingegen ist eine deutlichere Einebnung der Oberfläche nach 120 s Nachbehandlungszeit auszumachen, was mit den Ergebnissen der Rauheitsmessungen korreliert.

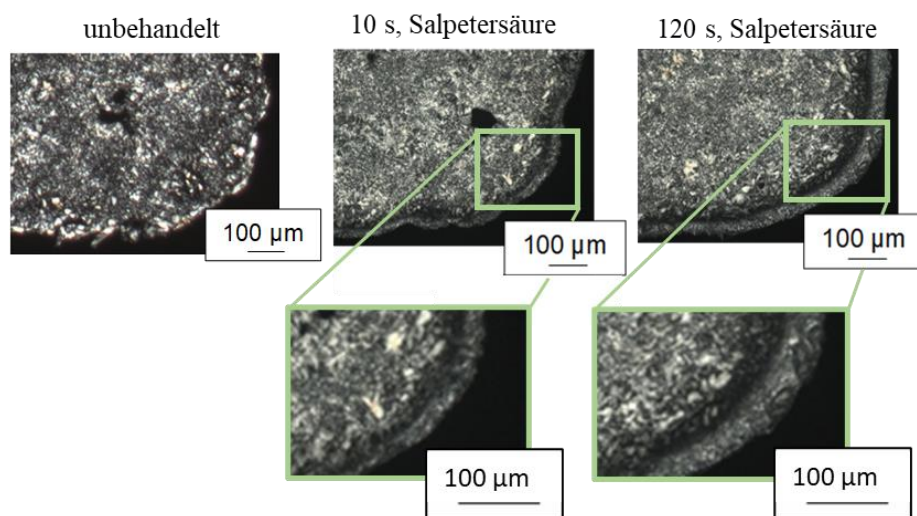


Abbildung 5-9: Mikroskopieaufnahmen der unbehandelten (links) und der mit Salpeter nachbehandelten (rechts) PA12-Zugprobe, Graphik in Anlehnung an [30]

Auch die Betrachtung der REM-Aufnahmen bestätigt die Messergebnisse. Eine Abnahme des R_z -Wertes ist anhand der Oberflächenstruktur zu erkennen. Durch die Salpetersäure ergibt sich eine strukturelle Veränderung aufgrund des Lösens der anhaftenden Pulverpartikel.

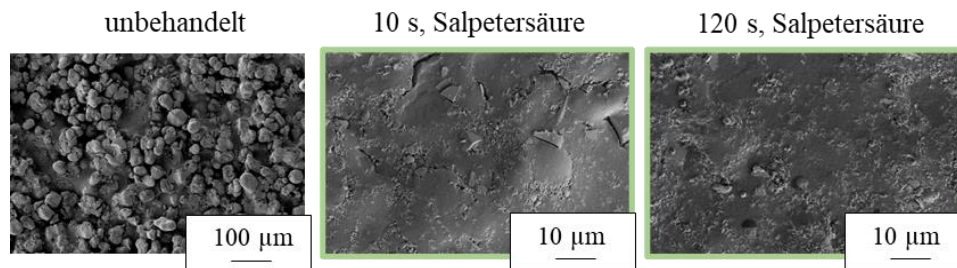


Abbildung 5-10: REM-Aufnahmen von PA12-Proben – Nachbehandlung mit Salpetersäure, nach [30]

In Abbildung 5-11 sind die unbehandelte (links) und die nachbehandelte Zugprobe (rechts) nach dem Eintauchen in TFA zu sehen. Unabhängig von der Nachbehandlungszeit erfolgt durch TFA eine glänzende Optik und eine sichtbare Einebnung der Oberfläche bereits nach 10 s Eintauchzeit. Über die Rauheitsmessung kann der optische Eindruck der Einebnung bestätigt werden.

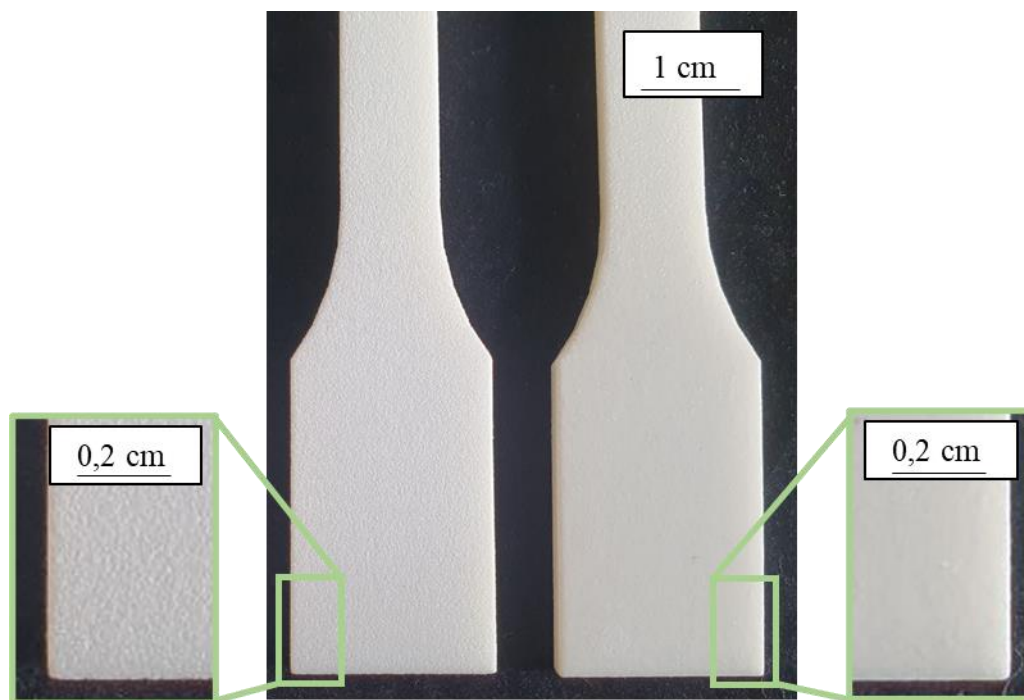


Abbildung 5-11: Unbehandelte PA12-Zugprobe mit Ausschnitt (links), TFA-nachbehandelte PA12-Zugprobe mit anschließender Neutralisation (rechts)

Aufgrund der veränderten Reflexion des Lichts durch die Reduzierung der Rauheit werden die Lichtstrahlen weniger diffus gestreut und es kommt zu einer glänzenden Erscheinung der Oberfläche.

Im Diagramm (s. Abbildung 5-12) ist im oberen Bereich die Rauheit auf der y-Achse und darunter die Breite der Proben aufgetragen. Zu sehen ist eine Abnahme der Rauheit über die Eintauchzeit in TFA von R_z ca. 76 μm auf nahezu $R_z = 9 \mu\text{m}$ (120 s Eintauchzeit).

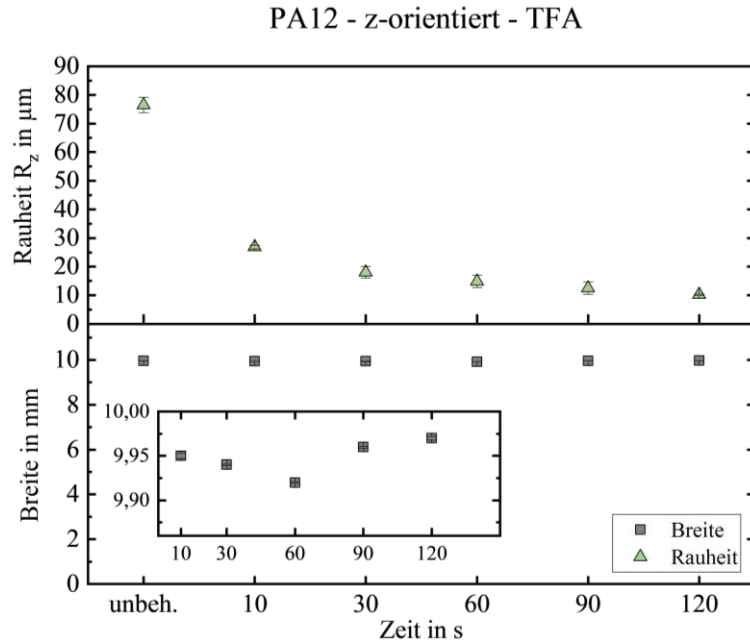


Abbildung 5-12: Diagramm der Rauheit und Breite der TFA-nachbehandelten Proben

In Abbildung 5-13 sind in der Mitte und rechts die Querschnitte der TFA-nachbehandelten PA12-Proben zu erkennen. Nach 10 s Eintauchzeit ist bereits eine deutlich ausgebildete ebene Randschicht zu erkennen. Diese nimmt in der Stärke bei steigender Verweilzeit in TFA zu. Durch das Anlösen der Partikel an der Oberfläche durch TFA, wie auch bei den anderen untersuchten Chemikalien, findet ein Fließen der amorphen Strukturanteile statt, die Unebenheiten ausgleichen und eine Randschicht bilden.

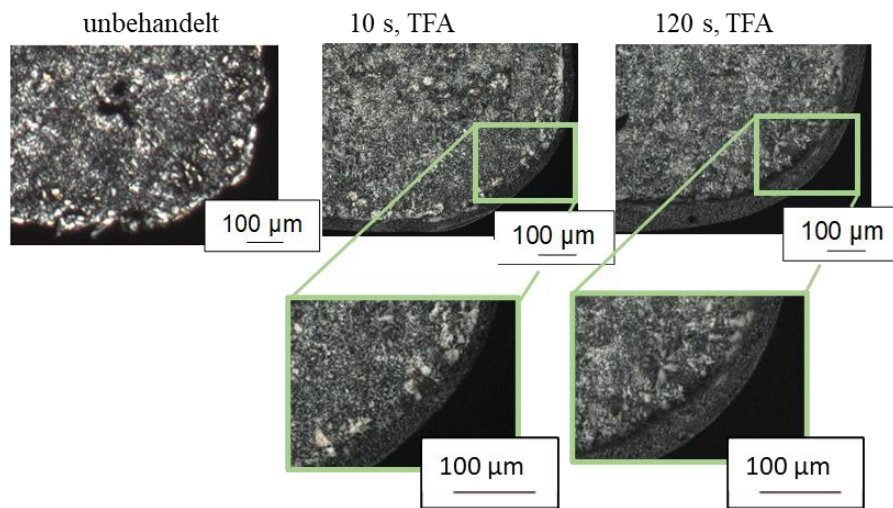


Abbildung 5-13: Mikroskopieaufnahmen der unbehandelten (links) und der TFA-nachbehandelten (rechts) PA12-Zugprobe, Graphik in Anlehnung an [30]

Mit Hilfe der REM-Aufnahmen (Abbildung 5-14) ist zu erkennen, dass an der Oberfläche der nachbehandelten Proben nach 10 s und nach 120 s Eintauchzeit keine Partikel mehr vorhanden sind. An der Probenoberfläche bilden sich durch die Reaktion mit TFA sphärolithische Strukturen.

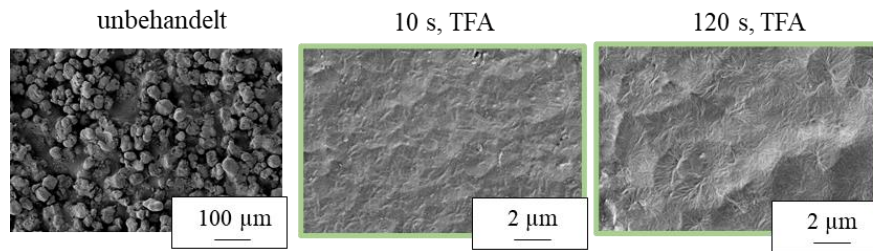


Abbildung 5-14: REM-Aufnahmen von PA12-Proben, links unbehandelt, Mitte und rechts Nachbehandlung mit TFA, nach [30]

Zusätzlich zum Eintauchen der Proben in Trifluoressigsäure werden die Proben in einer Apparatur mittels TFA-Dampf nachbehandelt. Mit Hilfe von Vorversuchen konnten drei geeignete Nachbehandlungszeiten ermittelt werden: 3 min, 4 min und 5 min, die für spätere Versuche weiterverwendet werden. Ähnlich wie die Proben, die zu verschiedenen Interaktionszeiten im TFA-Tauchätzbad waren, sehen die mit Dampf nachbehandelten Proben aus. Ihre Oberfläche glänzt und die Kanten haben an Schärfe verloren. Bei allen drei Proben ist eine Reduzierung der Rauheit zu messen. Nach einer Nachbehandlungszeit von 4 min ist mit $18,7 \mu\text{m}$ der geringste R_z -Wert zu messen. Bei den Messungen der Rauheit zu den verschiedenen Nachbehandlungszeiten ist eine Zunahme mit steigender Standardabweichung der Oberflächenrauheit ab einer Einwirkzeit von 5 min auf 6 min zu vermerken (vgl. Abbildung 5-15). Aufgrund der Erweichung der Oberfläche durch den Kontakt mit der Säure und die damit verbundene Reaktion findet eine Art des Fließens des Polymers statt. Mit steigender Einwirkzeit kann das zur Folge haben, dass zwar die Rauheit geebnet wird, aber dadurch, dass die Probe aufgehängt wird, eine Welligkeit an der Oberfläche entsteht. Über die Rauheitsmessungen kann diese mitabgebildet werden. Erst durch die anschließende Neutralisation wird die weitere Reaktion unterbunden.

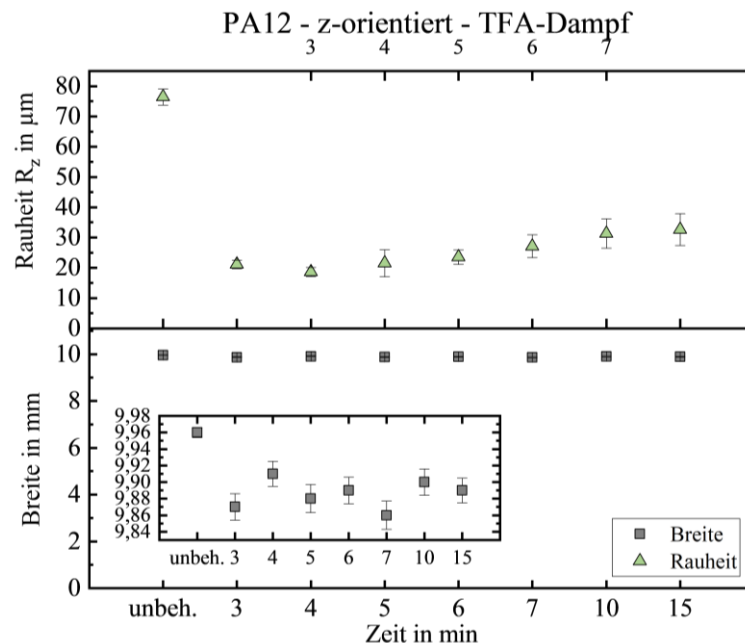


Abbildung 5-15: Diagramm der Rauheit und Breite der mit TFA-Dampf nachbehandelten Proben

Bei den mit TFA-Dampf nachbehandelten Proben ist keine Korrelation zwischen der Rauheit und der gemessenen Breite zu erkennen. In Abbildung 5-16 sind die Mikroskopieaufnahmen der unbehandelten

Probe (links) und der nachbehandelten Proben (rechts) nach 5 min, 10 min und 15 min Verweilzeit im TFA-Dampf zu erkennen. Hier ist mit steigender Interaktionszeit keine Zunahme der ausgebildeten Randschicht zu sehen. Im Gegensatz zur Nachbehandlung mit flüssigen TFA verändert sich hier die Randschicht bei einer Ausweitung der Nachbehandlungszeit von 5 min auf 10 min nicht, während die Oberflächenrauheit steigt. Ein Grund wird sein, dass das Tauchätzen aggressiver auf die Probe einwirkt, was durch die kürzeren Interaktionszeiten in Verbindung mit den geringeren Rauheitswerten zu erklären ist.

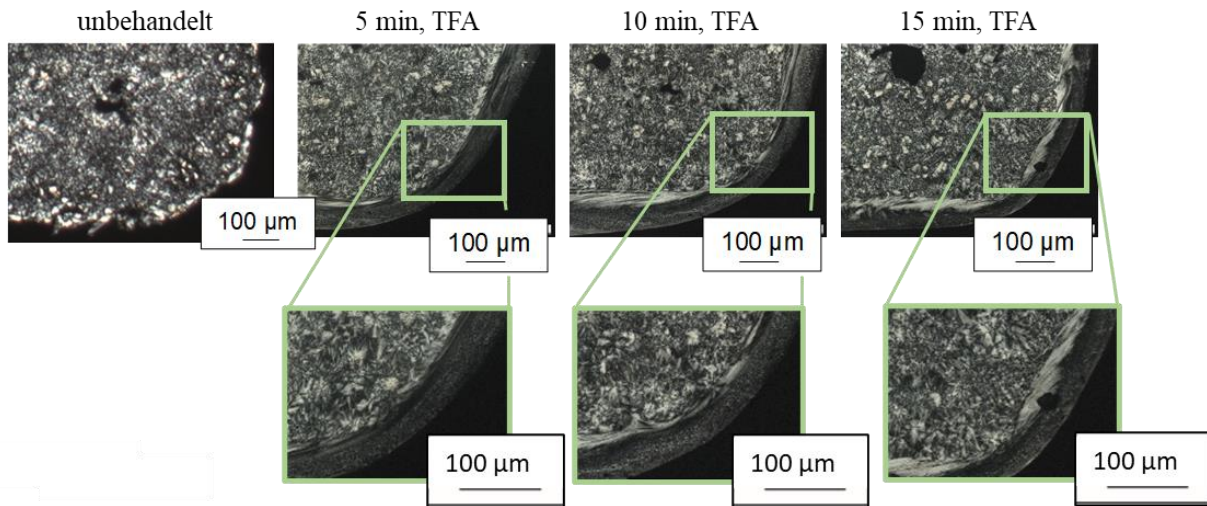


Abbildung 5-16: Mikroskopieaufnahmen der unbehandelten (links) und der mit TFA-Dampf nachbehandelten (rechts) PA12-Zugprobe, Graphik in Anlehnung an [30]

Ebenso wird die sich verflüchtigende Säure, die zur Nachbehandlung bei Raumtemperatur verwendet wird, in geringerer Konzentration auf die Proben einwirken. Bei einer Erwärmung der Säure würde es zu einer stärkeren Interaktion des Dampfes mit der Probe kommen: Werden die Säuremoleküle stärker angeregt, kommt es gemäß der Reaktionsgeschwindigkeit-Temperatur-Regel (van-'t-Hoff'sche Regel bzw. Arrhenius-Gleichung) zu einer schnelleren chemischen Reaktion. [30, 224]

Abbildung 5-17 fasst die signifikanten Ergebnisse der Nachbehandlung von PA12-Proben zusammen. Es zeigt sich eine Abnahme der Rauheit durch Säuren wie Salpeter- oder Trifluoressigsäure bei Raumtemperatur, wodurch es, wie durch REM-Aufnahmen zu erkennen ist, zu einer Änderung im Randbereich und auf morphologischer Ebene kommt. Ähnliche Ergebnisse werden in [145] zusammengefasst, wobei hier auf das industriell eingesetzte Nachbehandlungsverfahren der Firma DyeMansion GmbH „Powerfuse S“ zurückgegriffen wird. Ebenso konnten Crane et al. [146] eine Abnahme der in R_a gemessenen Rauheit um ca. 73 % an PA12-Proben durch das PuSh-Verfahren nachweisen, wie auch Turek et al. [225] eine Reduzierung des R_z -Wertes um ca. 80 % fanden.

Es zeigt sich somit eine Beeinflussung der Polymeroberfläche durch eine Chemikalie, die durch MVR-, DSC- und TGA-Messungen noch weiter untersucht werden soll, vgl. Kapitel 5.3 bis 5.5.

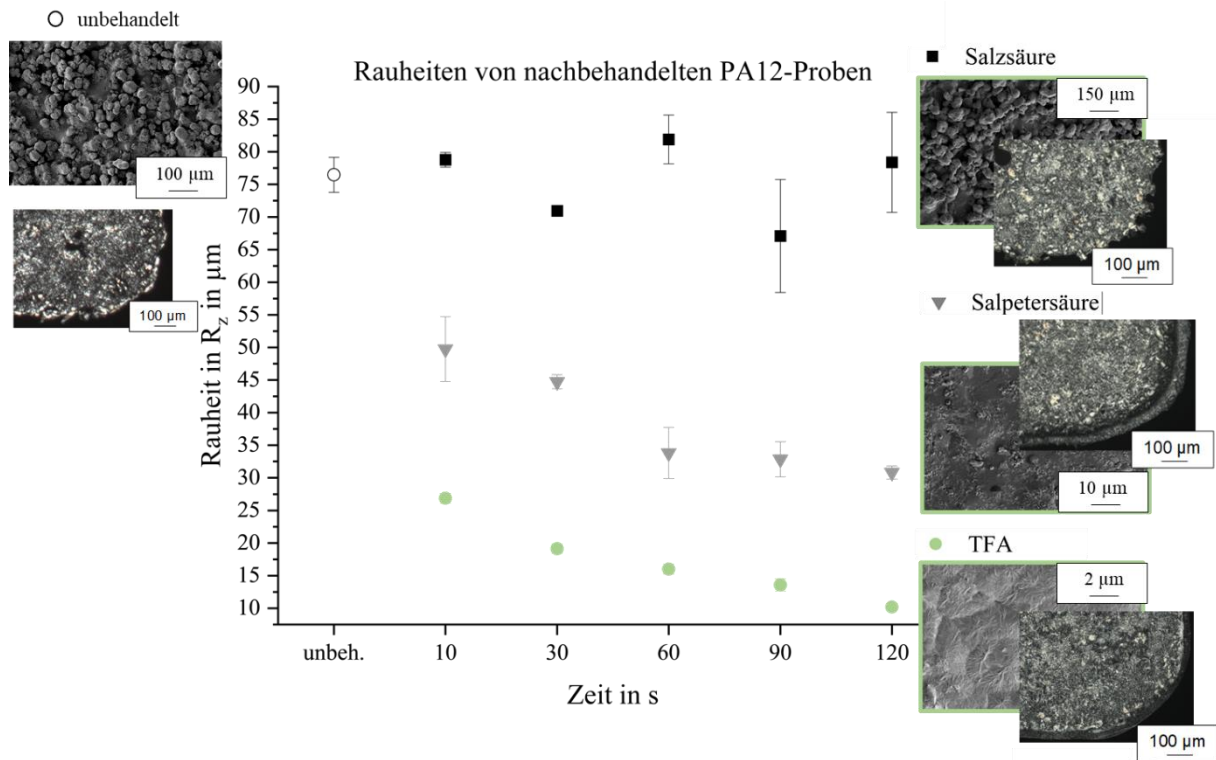


Abbildung 5-17: Zusammenfassung der Ergebnisse zu mit Salzsäure, Salpetersäure und TFA nachbehandelten PA12-Proben

Mechanische Nachbehandlung

Im Folgenden werden die Auswirkungen der mechanischen Nachbehandlung, des Gleitschleifens, auf die Topographie der untersuchten Proben dargestellt. Tabelle 5-1 zeigt die Effekte auf Faktoren, Rotationsgeschwindigkeit (A), Prozesszeit (B) und Prozesswassermenge (C). In der letzten Spalte mit \bar{y}_i wird der resultierende Rauheitswert R_z in μm der untersuchten Proben gebildet.

Tabelle 5-1: Vollfaktorieller Versuchsplan mit resultierenden Effekten

	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	\bar{y}_i
1	-	-	-	+	+	+	-	44,1702
2	+	-	-	-	-	-	+	39,0412
3	-	+	-	-	+	+	+	38,3884
4	-	-	+	+	-	-	+	44,7956
5	+	+	-	+	-	-	-	37,0746
6	+	-	+	-	+	+	-	40,9176
7	-	+	+	-	-	-	-	41,957
8	+	+	+	+	+	+	+	34,5096
Eff.	-4,44205	-4,24875	0,87635	0,06145	-1,22065	-1,22065	-1,84615	

Tabelle 5-2 sind die eingestellten Parameter und die Zuordnung zum vollfaktoriellen Versuchsplan zu entnehmen.

Tabelle 5-2: Parameter beim Gleitschleifen

Probe	Umdrehungen in 1/min	Bearbeitungszeit in h	Prozesswassermenge in 1/h	Entspricht Bezeichnung aus vollfakt. Versuchsplan
I	325	2	6	8
II	325	1	4	2
III	275	2	4	3
IV	275	1	4	1

Mit dieser Nachbehandlungsmethode kann die Ausgangsrauheit der PA2200-Proben auf ca. die Hälfte reduziert werden, wobei der größte Effekt durch die Einstellung der Prozesswassermenge erzielt wird. Ein wichtiger Aspekt bei den verschiedenen Nachbehandlungsmethoden ist die Maßhaltigkeit. Beim Gleitschleifen zeigt sich ein tendenzieller Zusammenhang zwischen Abnahme des R_z -Wertes und der Reduzierung der Maße, s. Abbildung 5-18. Nach dem Gleitschleifen mit den Parametereinstellungen von Probe I lässt sich im Vergleich zu den anderen Proben (II bis IV) eine geringere Rauheit messen und ebenso eine marginale Reduzierung der Maße. Insgesamt liegen die Maße aller Proben bei mindestens 97 % des Ausgangswertes.

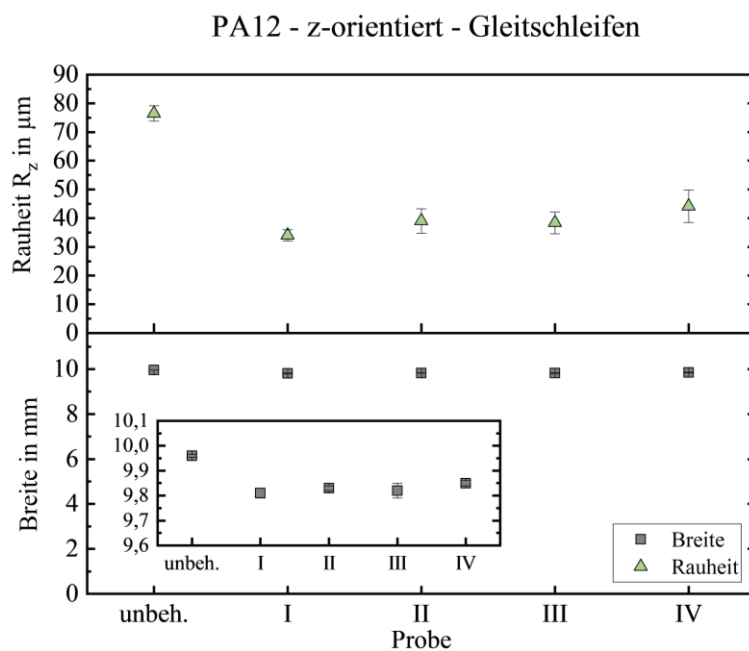


Abbildung 5-18: Diagramm der Rauheit und Breite der Gleitschleifproben

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass ein minimaler Abtrag beim Gleitschleifen stattfindet, der Auswirkungen auf die Rauheit durch ein Entfernen der Rauheitsspitzen mit sich bringt.

Bei der Nachbehandlung der Zugstäbe und der rechteckigen Probekörper für die Vorversuche lässt sich über die gesamte Probenfläche eine einheitliche Rauheit R_z mit geringen zulässigen Abweichungen in Baurichtung messen. Anders ist es bei den Probekörpern „S“, „E“ und „W“. Hier ist keine einheitliche Rauheit über den gesamten Probekörper unabhängig von der Probegeometrie messbar. Am Probekörper „E“ haben sich in den Öffnungen mit einer Breite kleiner als 4 mm die Gleitschleifkörper während des Bearbeitungsprozesses verkeilt und festgesetzt, s. Abbildung 5-19.

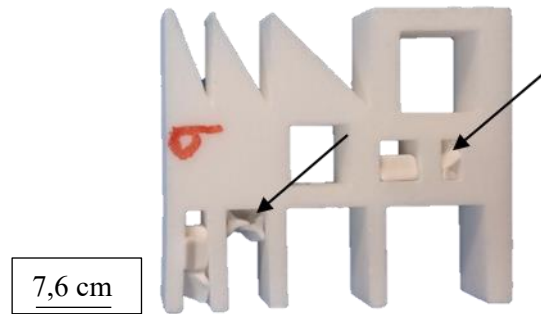


Abbildung 5-19: Probekörper „E“ nach der Nachbehandlung

Beim Probekörper „W“, s. Abbildung 5-20, sind Deformationen bei den Stegen bis zu einer Wandstärke von 1 mm zu erkennen. Ebenso ist zu beobachten, dass zwischen Wänden mit einem Abstand zueinander von 2 mm bis 4 mm die verwendeten Gleitschleifkörper zum Teil sich verkeilen. Zudem konnte festgestellt werden, dass bei Abständen der Wände unter 4 mm eine nur unzureichende bis keine Oberflächenbehandlung stattgefunden hat.



Abbildung 5-20: Probekörper „W“ nach der Nachbehandlung

Für den Probekörper „S“ stellt das Gleitschleifen Nachteile bei einem Säulendurchmesser kleiner als 1 mm (s. Abbildung 5-21, Markierung 1) dar. Ähnlich wie beim Probekörper „E“ sind Aussparungen unter 4 mm für die hier gewählte Gleitschleifkörpergröße zu klein, um die innenliegenden Flächen (2) zu erreichen, bzw. die Gleitschleifkörper verkeilen sich gegenseitig und bleiben in den Bohrungen stecken.

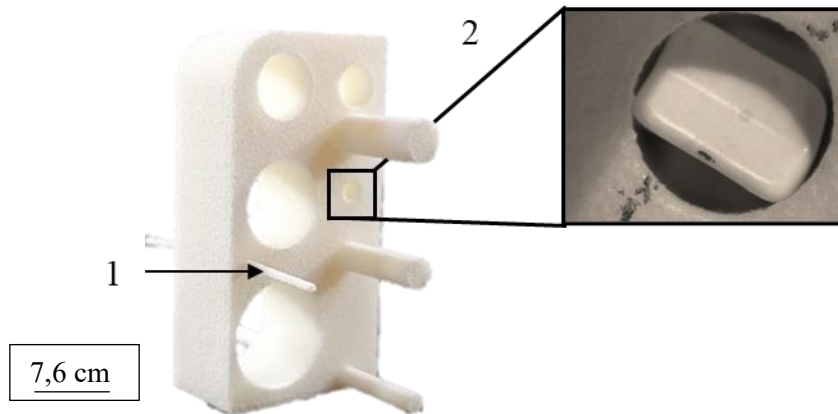


Abbildung 5-21: Probekörper „S“, links vor der Nachbehandlung und rechts mit verkantetem Gleitschleifkörper

Für das Gleitschleifen von additiv gefertigten Bauteilen eignet sich nicht jede Ausgangsgeometrie, wenn eine vollständige nachbehandelte Oberfläche erreicht werden soll. Bei einfach geformten Masseteilen mit ausreichend großen Durchgängen, Durchmessern von Säulen und Wandstärken bewährt sich das Gleitschleifen jedoch durchaus. Khan et al. [134] sowie Schmid et al. [132] konnten ebenfalls Abnahmen der Rauheit durch eine mechanische Nachbehandlung mittels Gleitschleifen nachweisen.

5.1.1.2 Polypropylen

Chemische bzw. physikalische Nachbehandlung

Bei den bisher vorgestellten Proben aus Polyamid erfolgte eine Nachbehandlung nach den ersten Testversuchen mit verschiedenen Chemikalien mit Trifluoressigsäure. Eine weitere Testreihe untersucht die Nachbehandlung mit einer Chemikalie bei PBF-LB/P/PP -Proben. Aus Voruntersuchungen konnte auf Toluol als Nachbehandlungsmedium für PP zurückgegriffen werden. Für die Versuche wird Toluol erwärmt, und in Abhängigkeit von der Interaktionszeit bei 100 °C warmem Toluol zeigt sich nach 4 min bzw. 5 min eine Reduzierung der Rauheit auf $R_z = 6 \mu\text{m}$ bzw. $R_z = 7 \mu\text{m}$ bei einem Ausgangswert der unbehandelten PP-Zugprobe (s. Abbildung 5-22) von ca. $R_z = 135 \mu\text{m}$.



Abbildung 5-22: Unbehandelte PP-Zugprobe (Ausschnitt)

Links in Abbildung 5-23 ist die unbehandelte Probe zu sehen, rechts die nachbehandelten Proben in aufsteigender Eintauchzeit. Ab 4 min Eintauchzeit ist eine Verrundung der Ecken (3) zu erkennen.

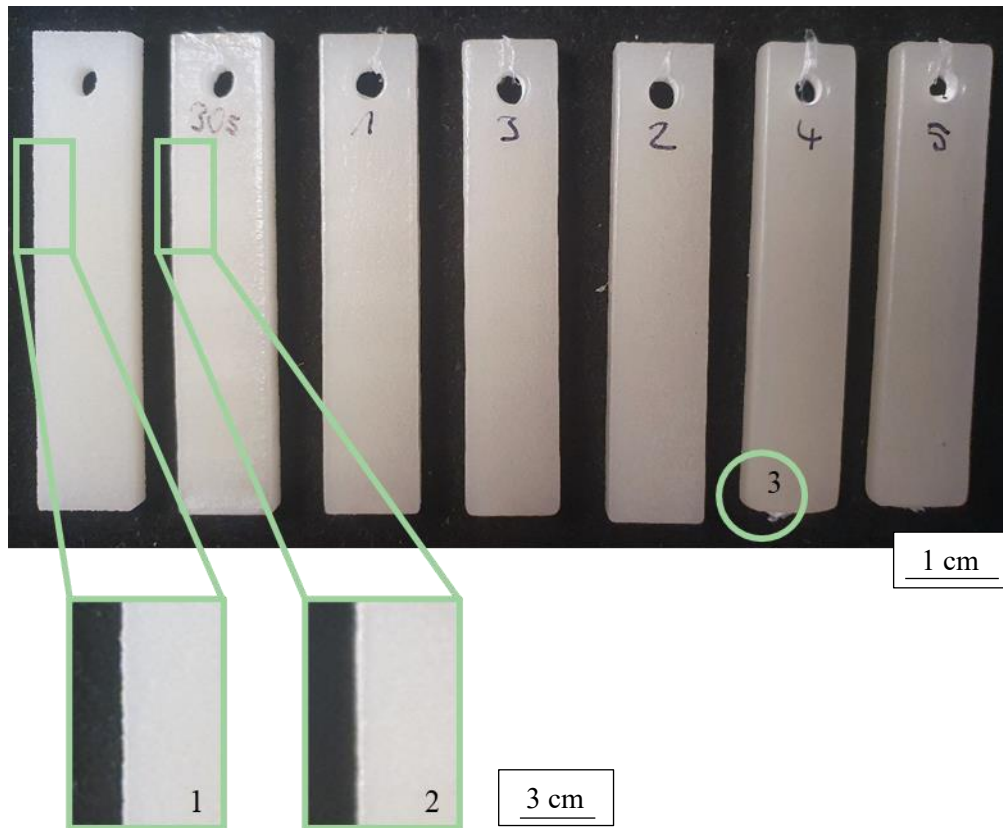


Abbildung 5-23: Unbehandelte PP-Probe (links) und nachbehandelte PP-Proben bei einer Einwirkzeit in Toluol von 30 s bis 5 min (rechts), Abbildung mit markierten Hinweisen

Im Gegensatz zur unbehandelten PP-Probe weisen die anderen infolge der Einebnung und der damit verbundenen Lichtreflexion eine glänzende Oberfläche auf. In Abbildung 5-24 sind die Rauheitswerte bezogen auf die Interaktionszeit von 0,5 min bis 30 min über die Eintauchzeit dargestellt.

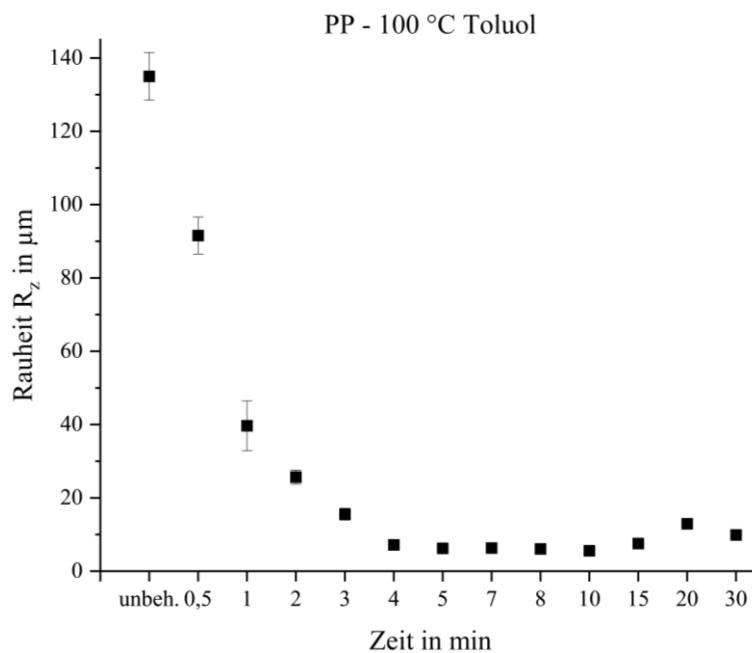


Abbildung 5-24: Einfluss des 100 °C warmen Toluols auf den R_z -Wert von PP-Proben zu verschiedenen Einwirkzeiten

Im Bereich unbehandelt bis zu einer Nachbehandlungszeit zwischen 1 min und 3 min findet die größte Reduzierung der Rauheit statt: von unbehandelt mit einem $R_z = 135 \mu\text{m}$ auf $R_z = 39,7 \mu\text{m}$ nach 1 min

Nachbehandlungszeit und auf $R_z = 15,5 \mu\text{m}$ nach 3 min Interaktionszeit. Angesichts dessen wird dieser Bereich separat zuzüglich der gemessenen Breiten dargestellt, s. Abbildung 5-25. Mit einer Zunahme der Eintauchzeit ist eine Abnahme der Breite der Proben um maximal 2,3 % (Interaktionszeit: 2 min) zu messen.

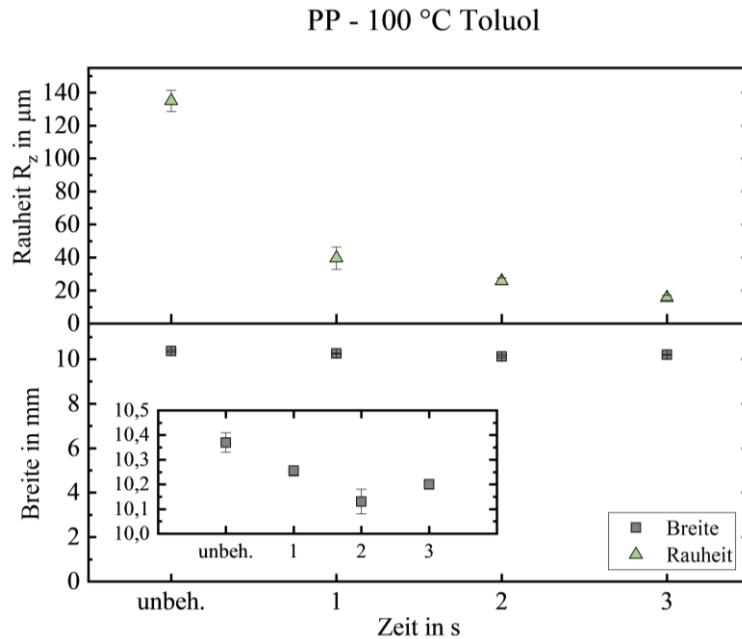


Abbildung 5-25: Einfluss des 100 °C warmen Toluols auf die Rauheit und Breite der PP-Proben zwischen 1 min und 3 min Nachbehandlungszeit

Ab einer Einwirkzeit von 15 min liegt die gemessene Rauheit über $R_z = 7 \mu\text{m}$ und damit über den Rauheitswerten bei den Eintauchzeiten zwischen 4 min und 10 min. Es ist ebenfalls mit steigender Nachbehandlungszeit eine starke Verrundung der Ecken wie auch eine Maßabweichung der Proben zu erkennen, s. Abbildung 5-26.

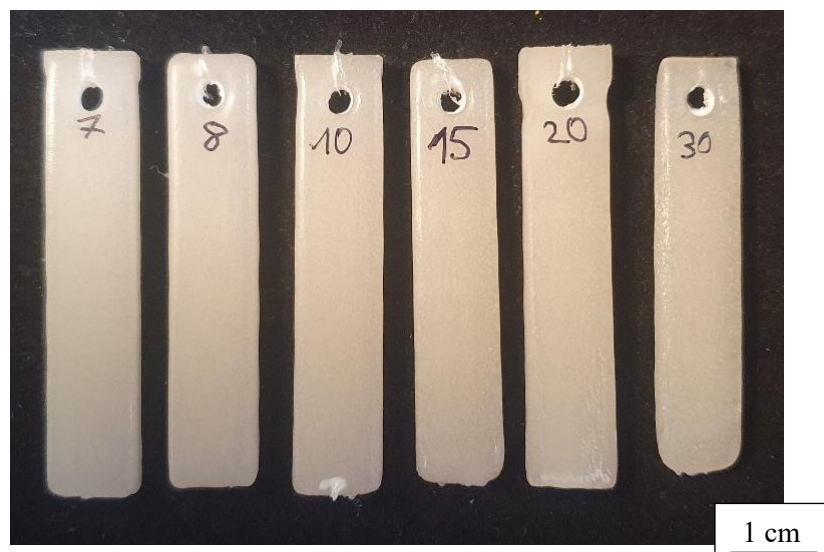


Abbildung 5-26: Mit Toluol nachbehandelte PP-Proben, Eintauchzeit von 7 min bis 30 min

Nach einer Eintauchzeit von 8 min und von 15 min werden die PP-Proben mit destilliertem Wasser abgespült. Für den zweifachen Spülvorgang wird jeweils frisches destilliertes Wasser verwendet. Bei beiden Proben ist eine Art deutlicher weißlicher Belag zu erkennen, der durch den Abspülvorgang mit dem Wasser entstanden ist. Durch die Reaktion von Toluol mit Wasser und den angelösten PP-Molekülen bildet sich auf der Probe eine neue Schicht, s. Abbildung 5-27.

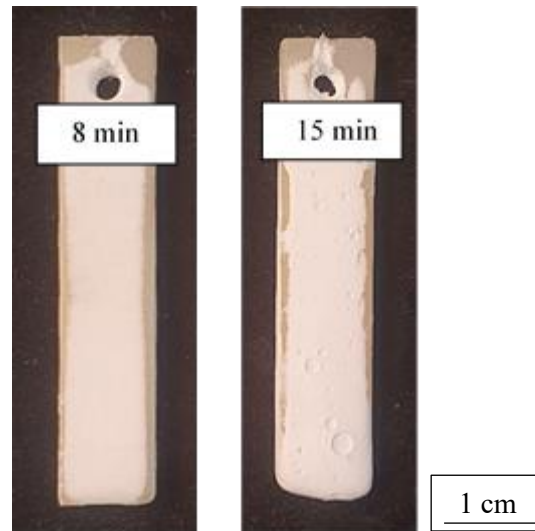


Abbildung 5-27: Mit 100 °C warmem Toluol nachbehandelte PP-Proben nach anschließender Neutralisation

Durch diese Art der Neutralisation wird ein höherer Rauheitswert als bei der Vergleichsprobe ohne Abspülvorgang gemessen, s. Diagramm in Abbildung 5-28. Mit dem Abspülen kann die Einwirkung des Toluols abgebrochen und ein Nachwirken auf der Oberfläche der Probe unterbunden werden, was zur Folge hat, dass die Rauheitswerte der nicht neutralisierten Probe niedriger sind. Ein weiterer Grund für die höheren Rauheitswerte der neutralisierten Proben liegt am Belag, der sich neu gebildet hat und sich negativ auf die Oberflächentopographie auswirkt.

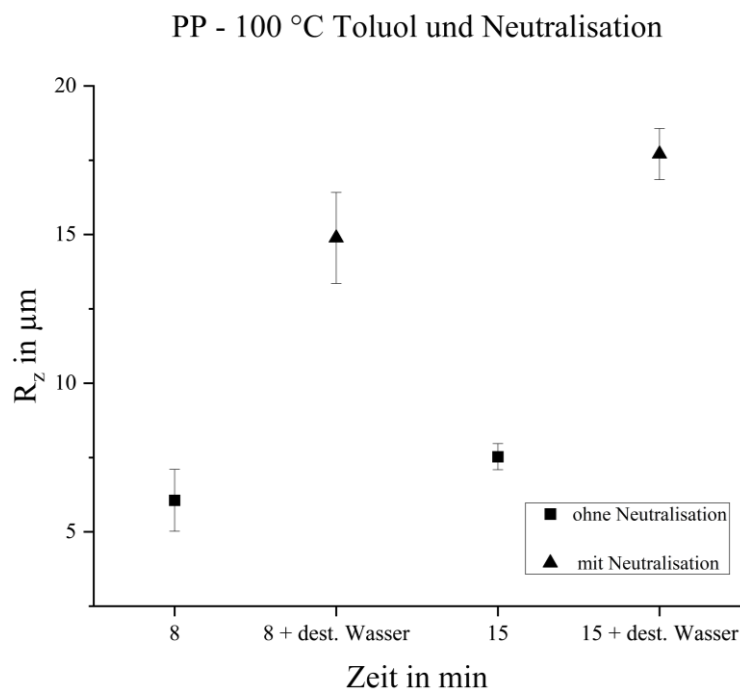


Abbildung 5-28: Einfluss des 100 °C warmen Toluols auf PP-Proben mit und ohne Neutralisation

In Abbildung 5-29 ist links der Querschnitt mit der darunter liegenden Vergrößerung der unbehandelten Probe zu erkennen und rechts die nachbehandelte Probe (1 min im 100-°C-Toluol-Bad). In der Randzone ist eine Veränderung des Gefüges zu erkennen.

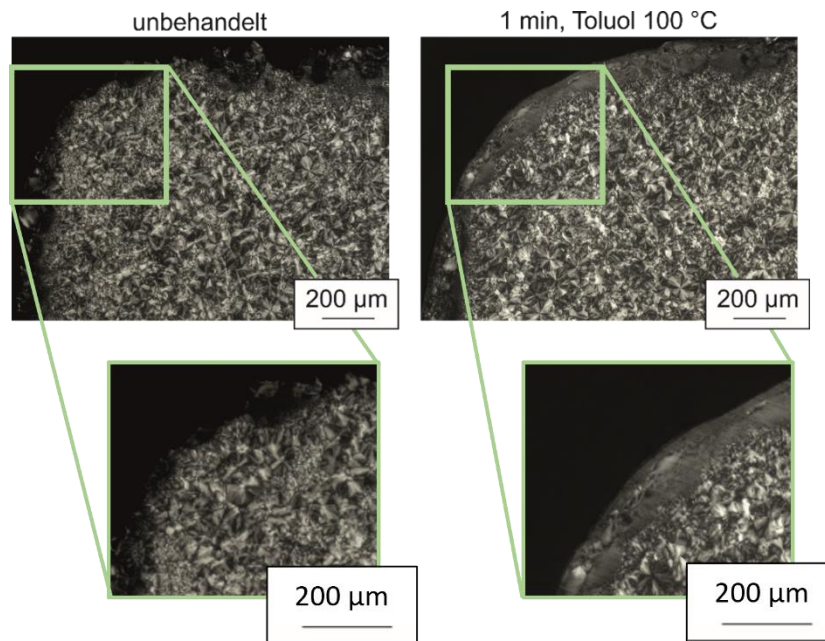


Abbildung 5-29: Mikroskopieaufnahmen der unbehandelten (links) und der nachbehandelten (rechts) PP-Zugprobe, Graphik in Anlehnung an [112]

Mit steigender Eintauchzeit ist auch eine Zunahme der Strukturänderung in der Randzone zu sehen, s. Abbildung 5-30. Etwaige Hohlräume, die bei der unbehandelten, aber auch noch bei der nachbehandelten Zugprobe nach 1 min Eintauchzeit an der Oberfläche zu erkennen sind, schließen sich mit steigender Eintauchzeit durch ein Anlösen der Moleküle und deren Fließen.

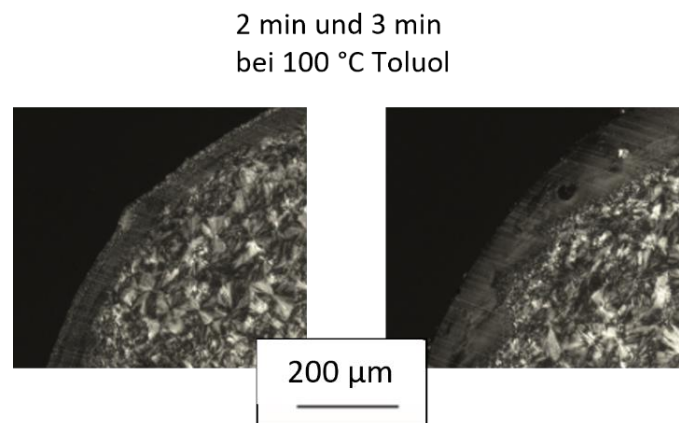


Abbildung 5-30: Mikroskopieaufnahmen der 2 min (links) und 3 min nachbehandelten (rechts) PP-Zugprobe, Graphik in Anlehnung an [112]

Diese Chemikalie-Bauteil-Interaktion zeigt einen Einfluss auf die Randzone, die durch die Nachbehandlung homogener erscheint. Ebenso lässt sich ersehen, dass die Randzone sich vom inneren Bereich abhebt und zunimmt, was zu der Annahme führt, dass mit steigender Eintauchzeit die Chemikalie in das Gefüge eindringt. Dadurch wird eine Veränderung herbeigeführt, was darauf hindeutet, dass ein nicht reversibler Vorgang stattgefunden hat. Somit ist anzunehmen, dass zumindest ein Teil der Nachbehand-

lung auf chemischer Ebene stattgefunden hat. Angesichts ähnlicher Mikroskopieaufnahmen von den nachbehandelten PA12-Proben wird auch bei diesen in vergleichbarer Art und Weise eine teilweise chemische Nachbehandlung vorliegen.

Mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie (Abbildung 5-31) ist zu erkennen, dass äquivalent zu den Veränderungen der Randzonen der behandelten PP-Proben sich die Oberflächenstruktur glättet. Durch ein Anlösen der Oberfläche, so ist der Abbildung zu entnehmen, findet mit steigender Nachbehandlungsdauer eine Ebnung statt.

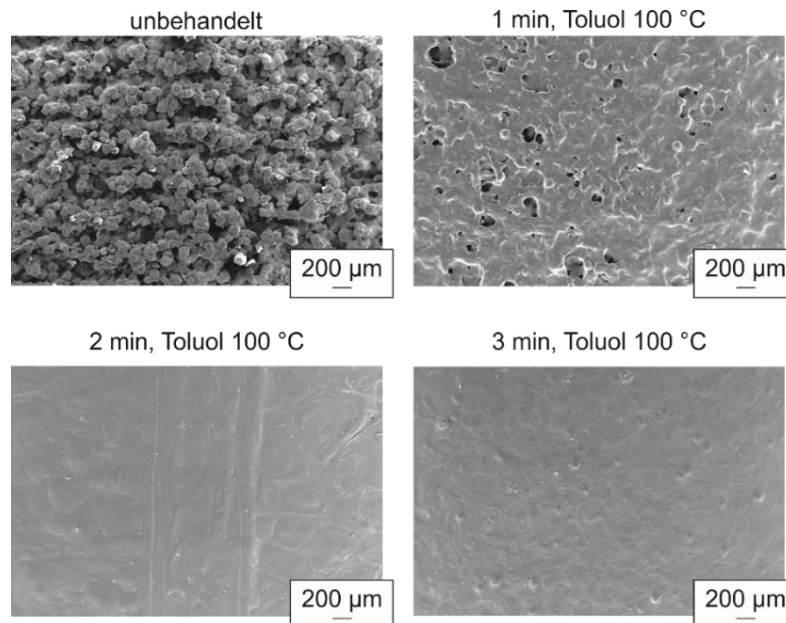


Abbildung 5-31: Veränderung der Oberflächenstruktur bei der chemischen Nachbehandlung von PP mittels 100 °C warmen Toluols bei variierten Eintauchzeiten(0, 1, 2 und 3 min) [112]

Eine Reduzierung der Rauheit von PP-Proben konnte ebenfalls in [66] nachgewiesen werden. Mit steigender Nachbehandlungszeit von Toluol, das auch hier auf 100 °C erwärmt wurde, fand eine Glättung der Oberflächenstruktur statt.

Mechanische Nachbehandlung

Tabelle 5-3 lassen sich die Einstellungen für die trowalisierte Proben I–IV entnehmen. Für eine bessere Übersicht werden in den nachfolgenden Diagrammen die Probenbezeichnungen I bis IV verwendet. Aufgrund der Vorversuche mit den resultierenden Ergebnissen der Rauheitsmessungen werden Proben mit den Einstellungen von Probe II nicht weiter betrachtet.

Tabelle 5-3: Einstellungen Gleitschleifen von Probe I, III und IV

Probe	Umdrehungen in 1/min	Bearbeitungszeit in h	Prozesswasser- menge in l/h
I	325	2	6
III	275	2	4
IV	325	2	4

In Abbildung 5-32 sind die Rauheit und die Breite der mittels Trowalisieren nachbehandelten Proben dargestellt. Mit steigender Umdrehungszahl und größerer Prozesswassermenge ist eine geringere Rauheit zu messen. Im Vergleich zur unbehandelten Probe ist eine Reduzierung der Rauheit von ca. $R_z = 135 \mu\text{m}$ (unbehandelt) auf minimal $R_z = 123 \mu\text{m}$ (IV) festzustellen.

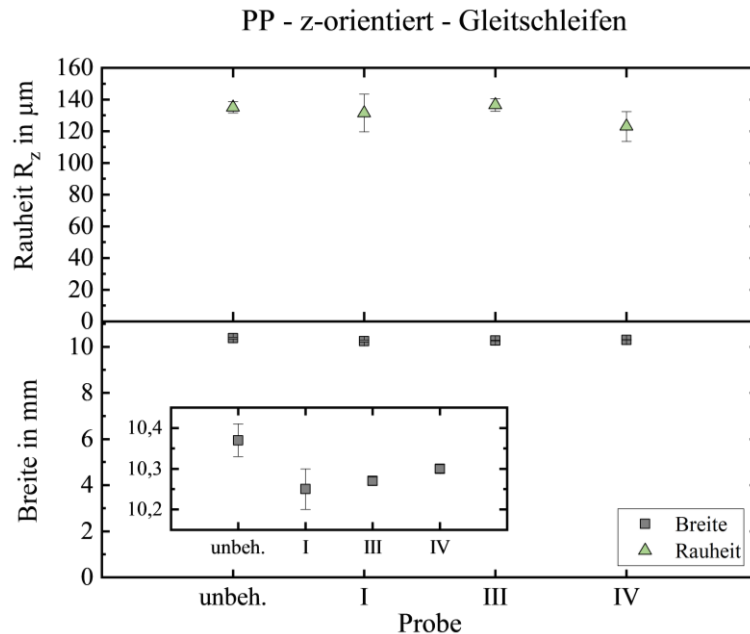


Abbildung 5-32: Veränderung der Rauheit und der Breite von PP-Bauteilen in Abhängigkeit von den Parametereinstellungen bei der mechanischen Nachbehandlung

Bei Beibehalten der Parameter, die auch zum Gleitschleifen der PA12-Proben verwendet wurden, findet bei den PP eine geringere mechanische Interaktion zwischen den Probenoberflächen und den Gleitschleifkörpern statt. Es ist ebenfalls eine Reduzierung der Breite gegenüber der unbehandelten Probe zu messen. Eine Korrelation zu den Rauheitswerten ist nicht zu erkennen.

Aufgrund der einfachen Geometrie der quadratischen Proben findet ein einheitlicher Abtrag statt. Beim Gleitschleifen erfolgt eine Einebnung im Randbereich der PP-Proben durch die mechanische Interaktion. Aufgrund der noch anhaftenden bzw. der angeschmolzenen Pulverpartikel, die als Erstes mit den Gleitschleifkörpern in Kontakt treten, findet eine nur geringe Abnahme der Breite und Dicke der Proben im Vergleich zu den Toluol-behandelten Proben statt. Es zeigt sich eine größere Abnahme bei geringerer Prozesswassermenge und höherer Umdrehungszahl. Das lässt sich mit dem höheren Abrieb aufgrund der geringeren Schmierung durch die reduzierte Prozesswasserzufuhr erklären.

Eine Reduzierung der Rauheit durch das Gleitschleifen von PP-Proben beim Einsatz von stab-, pyramiden- und kugelförmigen Keramik- und Kunststoffgleitschleifkörpern konnte auch bei Reinhardt [66] nachgewiesen werden. Hier zeigt sich ein Abtrag ebenfalls über die Nachbehandlungsdauer. Mit aufgeführt wird ein Masseverlust mit zunehmender Nachbehandlungszeit, was bedeutet, dass eine Glättung der Oberfläche infolge eines Materialabtrags stattfindet.

5.1.2 Einfluss auf materialextrudierte Polyamid-12-Proben

Chemische bzw. physikalische Nachbehandlung

Zur Nachbehandlung stehen materialextrudierte Proben aus schwarzem PA12 (Nylon 12) zur Verfügung. Diese werden wie die PBF-LB/P-Proben in Trifluoressigsäure zur Nachbehandlung eingetaucht. Basierend auf Vorversuchen und den Erfahrungen aus den mit PBF-LB/P nachbehandelten PA12-Proben, werden die MEX-Zugproben für 30 s, 60 s und 90 s in TFA eingetaucht. In Abbildung 5-33 sind vier z-Zugproben (Bauteilorientierung B) zu sehen. Probe B.1 befindet sich im unbehandelten Zustand. Die Proben B.2 bis B.4 wurden für 60 s in ein TFA-Bad gehalten, wobei Probe B.3 an der Luft trocknete, Probe B.2 mit Isopropanol zur Neutralisation ab gespült wurde und Probe B.4 in destilliertes Wasser getaucht wurde. Durch den Abspülvorgang mit destilliertem Wasser hat sich die Oberfläche weißlich verfärbt.

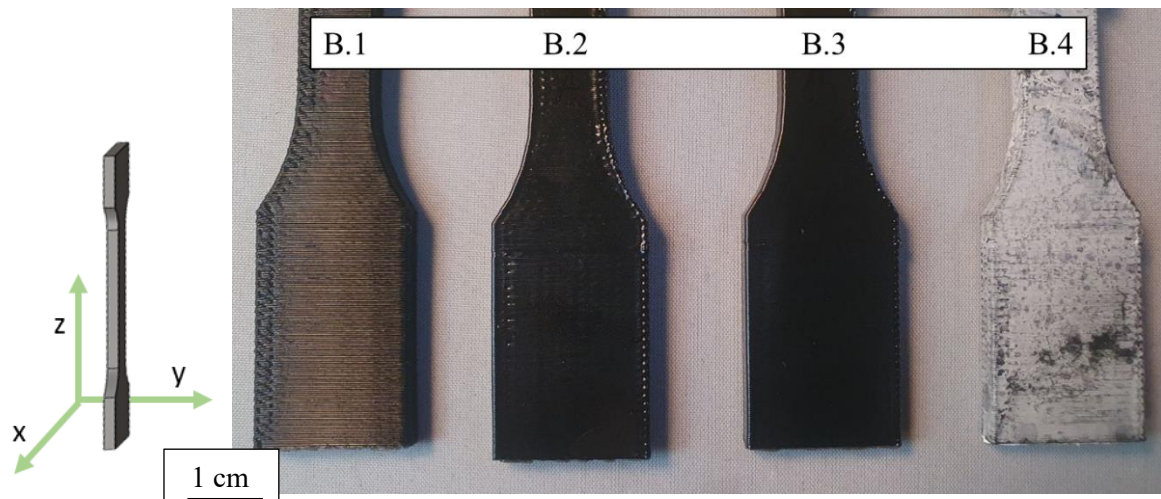


Abbildung 5-33: Bauteilorientierung B (links) und unbehandelte PA12-MEX Zugprobe B.1 sowie nachbehandelte Proben (60 s TFA-Bad) B.2 bis B.4 (rechts)

Bei den Ergebnissen der Rauheitsmessungen ist eine signifikante Reduzierung von der unbehandelten MEX-Probe ($R_z = 74,19 \mu\text{m}$) zu den nachbehandelten Proben zu erkennen. Obwohl alle drei nachbehandelten Proben die gleiche Eintauchzeit in TFA hatten, liegt ein Unterschied des R_z -Wertes durch die Art des 2. Nachbehandlungsschrittes vor. Probe B.4 weist unter den nachbehandelten Proben den höchsten Wert mit durchschnittlich $36,33 \mu\text{m}$ auf; sie wurde nach dem TFA-Bad mit destilliertem Wasser ab gespült. Probe B.2 ($R_z = 21,34 \mu\text{m}$) wurde im Anschluss an die Nachbehandlung mit Isopropanol gespült und besitzt einen ähnlichen Rauheitswert R_z wie die nicht ab gespülte Probe ($R_z = 20,13 \mu\text{m}$), s. Diagramm in Abbildung 5-34.

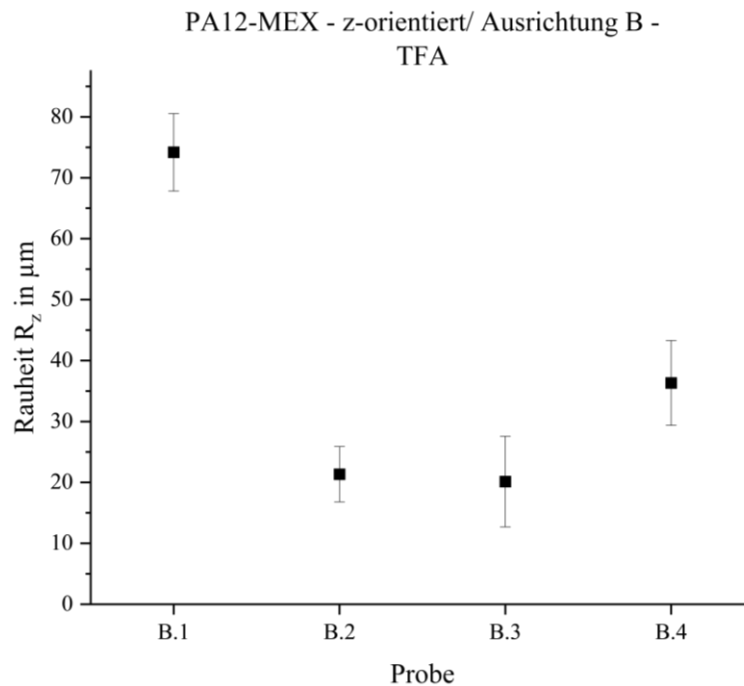


Abbildung 5-34: Rauheitswerte der MEX-PA12 Proben, z-Zugstäbe unbehandelt und im TFA-Bad

Bei den REM-Aufnahmen in Abbildung 5-35 zu Probe B.3 (links) und Probe B.4 (rechts) sind Unterschiede der Oberflächenstruktur zu erkennen. Schon in Abbildung 5-33 war eine weißliche Verfärbung durch den Abspülvorgang bei Probe B.4 zu sehen, bei den Rauheitsmessungen ist die Auswirkung ebenfalls zu messen, vgl. Abbildung 5-34. Die Oberflächen der Probe B.4 bei 3.000-facher Vergrößerung zeigt eine offene, Bläschen-artige Struktur, die bei der Probe B.3 (ohne Neutralisation) nicht vorhanden ist.

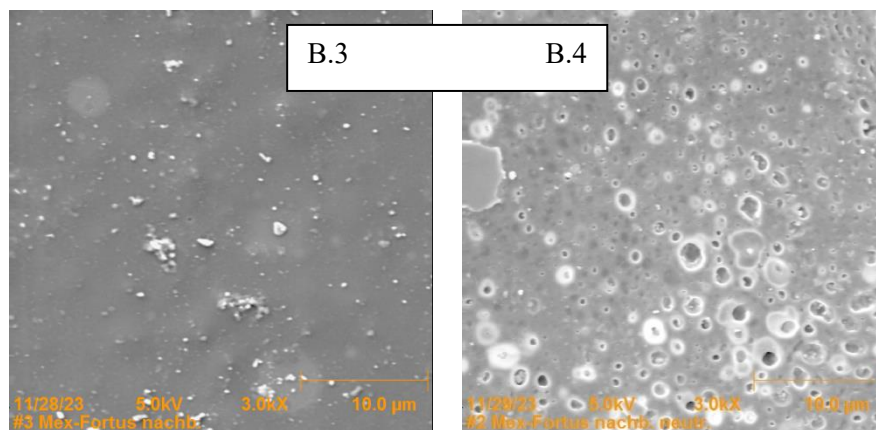


Abbildung 5-35: REM-Aufnahmen TFA-nachbehandelter Proben, links mit Neutralisation und rechts ohne Neutralisation

Ein Abspülen mit destilliertem Wasser unterbindet ein weiteres Einwirken der Säure auf die Probe, nimmt jedoch angelöste Moleküle, wahrscheinlich Farbpigmente bzw. dessen Moleküle, mit, wodurch Mulden entstehen. Nach der Nachbehandlung der schwarzen Proben ist die TFA im Gegensatz zum Eintauchen der weißen Proben verfärbt. Hierdurch bestätigt sich die Annahme, dass Farbpigmente bei den schwarzen Zugstäben herausgelöst wurden.

Weitere PA12-MEX-Proben sind aus Filament aus recyceltem PA12-Pulver der Firma AM Filament gefertigt. Diese liegend extrudierten Proben weisen an ihrer Oberfläche eine mittlere Rauheit von $R_z = 53,14 \mu\text{m}$ (Standardabweichung $R_z = 7,37 \mu\text{m}$) auf. Nach der Nachbehandlung der Proben für 60 s im TFA-Bad sinkt die in Zugrichtung gemessene Rauheit auf $R_z = 13,69 \mu\text{m}$ (Standardabweichung $R_z = 0,44 \mu\text{m}$).

Weitere REM-Aufnahmen (s. Abbildung 5-36) zeigen die veränderte eingeebnete Oberflächenstruktur durch die Trifluoressigsäure-Nachbehandlung von MEX-PA12-Zugstäben, die mit VE-Wasser neutralisiert wurden. Hier sind keine Mulden an der Oberfläche zu erkennen.

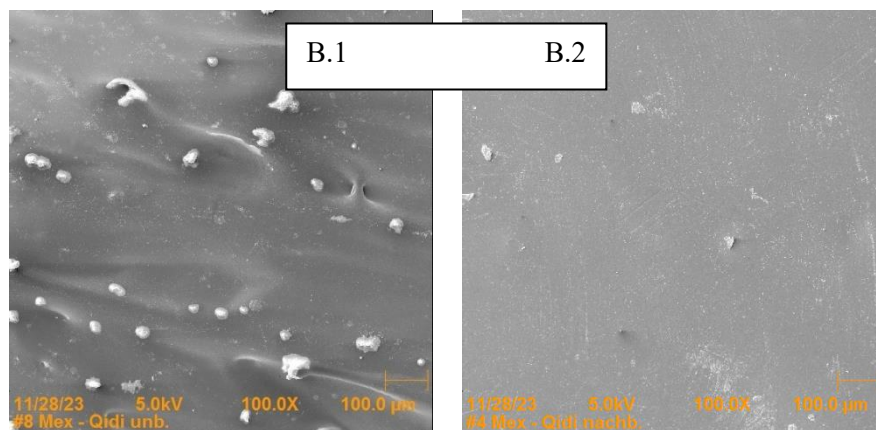


Abbildung 5-36: REM-Aufnahmen: un behandelter MEX-Zugstab (Qidi) (links) und nachbehandelter MEX-Zugstab (Qidi), 60 s TFA-Bad (rechts)

Zwischenfazit

Eine Nachbehandlung wie das Tauchätzen oder Bedampfen mit einer Chemikalie zeigt bei einer passenden Chemikalien-Polymer Kombination eine signifikante Reduzierung der Oberflächenrauheit über die Nachbehandlungszeit. Auch das Gleitschleifen reduziert die gemessene Rauheit. Ein Nachteil des Gleitschleifens gegenüber der Nachbehandlung mit einer Chemikalie ist die Erreichbarkeit der Schleifkörper. Zugproben können gleichmäßig in einer Gleitschleifrommel nachbearbeitet werden, während Testgeometrien mit Bohrungen und Aussparungen keine homogene Nachbehandlung erfahren.

5.2 Auswirkung der Nachbehandlungsmethoden auf die mechanischen Eigenschaften

Bei der Bewertung der mechanischen Eigenschaften wird auf SG-Bauteilen referenziert. Ergebnisse von Zugversuchen zeigen, dass die Zugfestigkeit in der gleichen Größenordnung liegt, wobei der E-Modul bei LS-Bauteilen sich im Durchschnitt etwas oberhalb von jenem der SG-Bauteile befindet. Hingegen ist die Bruchdehnung von SG-Bauteilen wesentlich höher. Dieser Vergleich basiert auf Angaben von Herstellerdatenblättern und der Campus-Plastics-Datenbank. [21, 30, 226]

5.2.1 Einfluss auf PBF-LB/P -Proben

Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften werden z- und y-orientierte nachbehandelte PBF-LB/P-Zugproben untersucht und mit den Werten der unbehandelten Zugproben verglichen. Hierzu wurde PA12 und PP als Ausgangsmaterial verwendet.

5.2.1.1 Polyamid 12

Zum Vergleich der nachbehandelten PA12-Zugproben liegen die mittleren Werte mit Standardabweichung von unbehandelten z- und y-Zugstäben wie folgt vor (Tabelle 5-4):

Tabelle 5-4: Mechanische Eigenschaften der unbehandelten PA12-Zugstäbe [30]

Mechanische Eigenschaft	gemittelter Messwert für z-Zugstäbe	Standardabweichung	gemittelter Messwert für y-Zugstäbe	Standardabweichung
Zugfestigkeit in N/mm ²	47,3	7,47	52,2	0,6
Bruchdehnung in %	3,96	1,39	18	1,8
E-Modul in N/mm ²	1.980	7,61	1.810	13,5

Chemische bzw. physikalische Nachbehandlung

In dem Diagramm in Abbildung 5-37 ist auf der y-Achse oben die Bruchdehnung in Prozent (%) und unten die Zugfestigkeit in N/mm² über die Zeit (x-Achse) in s aufgetragen. In einem zweiten Diagramm, s. Abbildung 5-38, ist aus derselben Zugprüfung der E-Modul in N/mm² auf der y-Achse über die Zeit in s aufgetragen. Für alle folgenden Diagramme, die die mechanischen Eigenschaften aufzeigen, gilt das beschriebene Schema; Ausnahme sind die Versuche mit der Nachbehandlung mit TFA-Dampf, hier wird die Zeit in min auf der x-Achse dargestellt.

Leichte Schwankungen der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung über die Eintauchzeit sind in dem zuerst beschriebenen Diagramm zu erkennen. Im Vergleich zu den Ausgangswerten der unbehandelten z-Zugproben ist ein Anstieg der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung zu beobachten.

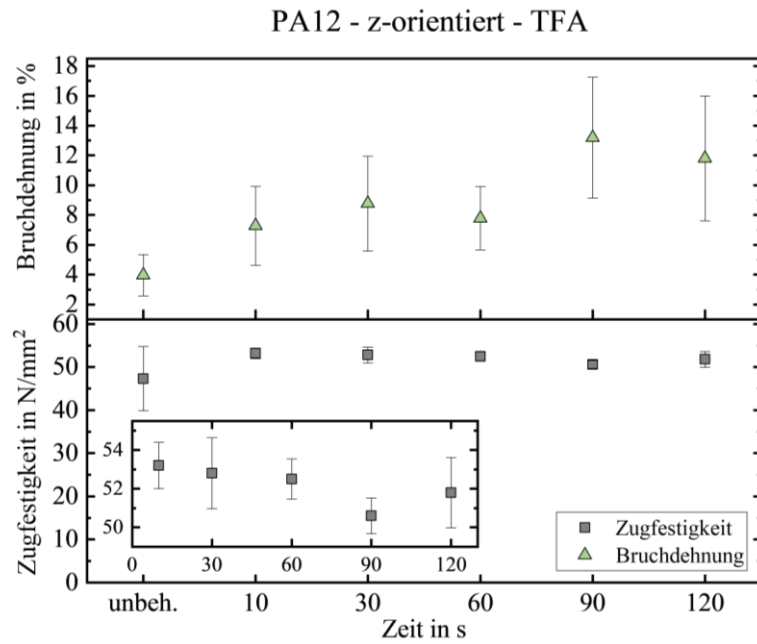


Abbildung 5-37: Vergleich der Zugfestigkeit und Bruchdehnung von unterschiedlichen Eintauchzeiten der TFA-Nachbehandlung von z-orientierten PA12-Zugproben [30]

Mit einem Ausgangswert von 1.980 N/mm^2 zeigt die Nachbehandlung mit TFA über die zunehmende Eintauchzeit ein abnehmendes E-Modul von ca. 10 %, s. Abbildung 5-38. Nach 90 s Einwirkzeit findet es bei den untersuchten Eintauchzeiten sein Minimum bei 1.760 N/mm^2 , nach 120 s Einwirkzeit liegt der E-Modul bei 1.790 N/mm^2 .

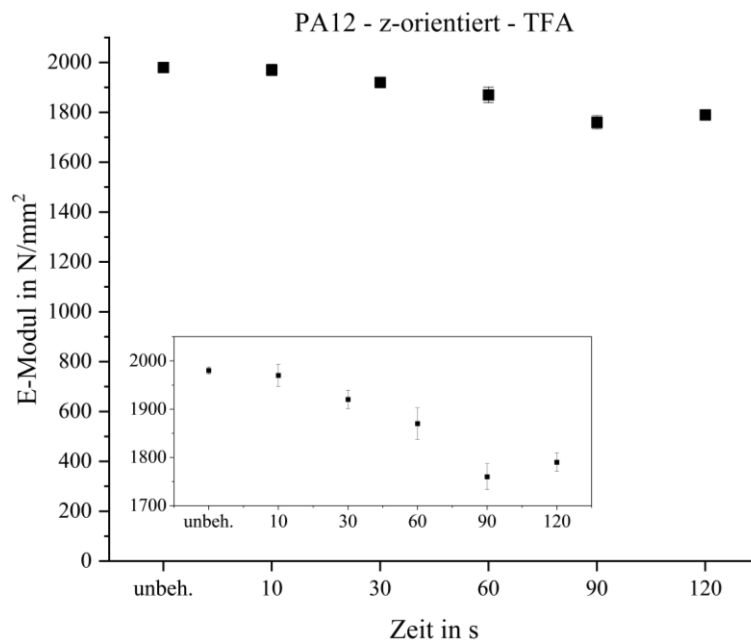


Abbildung 5-38: Vergleich des E-Moduls zu unterschiedlichen Eintauchzeiten bei einer TFA-Nachbehandlung von z-orientierten PA12-Zugproben [30]

In Abbildung 5-39 ist auf den y-Achsen die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung der y-orientierten Zugproben aus PA12, die mit TFA nachbehandelt wurden, über die Zeit dargestellt. Zu erkennen ist eine Abnahme der Zugfestigkeit mit zunehmender Einwirkzeit der Säure auf die Probe. Eine eindeutige Aus-

sage über das Verhalten der Zugfestigkeit mit längerer Einwirkzeit ist nicht umfassend möglich. Bei einer Einwirkzeit von 30 s bis 90 s kann eine Zunahme der Bruchdehnung gemessen werden.

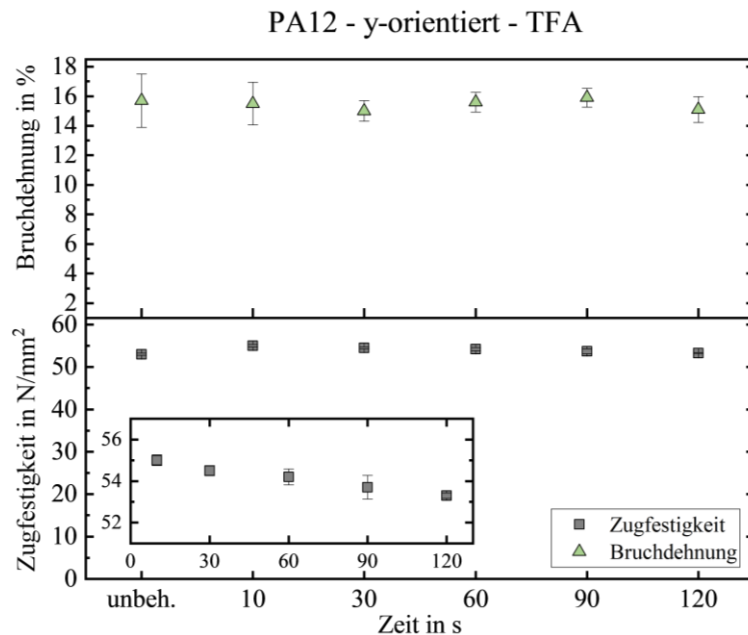


Abbildung 5-39: Diagramm TFA Nachbehandlung von y-orientierten PA12-Zugproben, Zugfestigkeit und Bruchdehnung [30]

Neben der Abnahme der Zugfestigkeit um ca. 3 % verringert sich in einer ähnlichen Größenordnung, nämlich um 4 %, der E-Modul, s. Abbildung 5-40. Mit steigender Nachbehandlungszeit sinkt der E-Modul von 1.980 N/mm² auf 1.900 N/mm² mit einer maximalen Standardabweichung von 2 % bei 60 s Interaktionszeit.

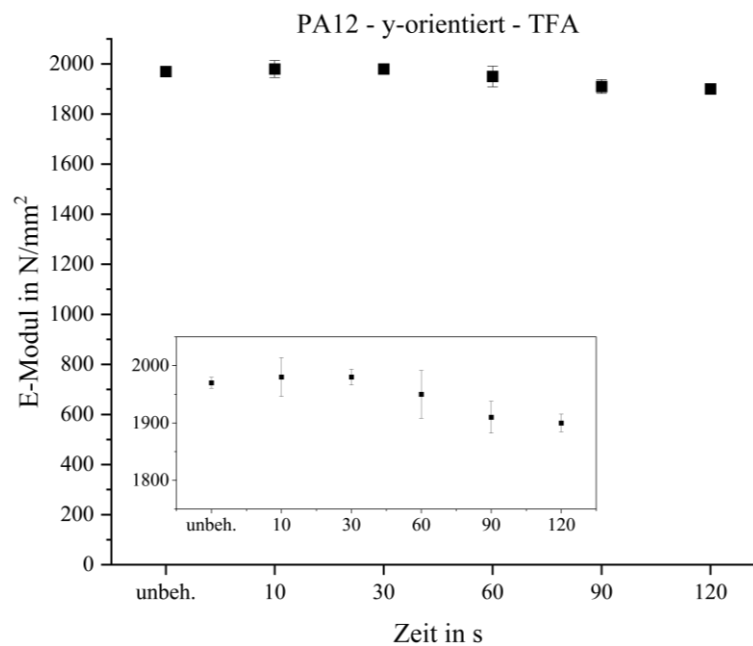


Abbildung 5-40: Diagramm zur TFA-Nachbehandlung von y-orientierten PA12-Zugproben, E-Modul [30, 227]

Ein Einfluss der Nachbehandlung auf die mechanischen Eigenschaften, wie ein Anstieg der Bruchdehnung und der Zugfestigkeit und eine Reduzierung des E-Moduls, konnte auch bei der Nachbehandlungs-

methode in der VFS in [145] nachgewiesen werden. Bei den nachbehandelten y-orientierten PA12-Zugproben im TFA-Dampf für 5 min, 10 min und 15 min kann ein leichter Anstieg der Bruchdehnung um 7 % und ein ebenso leichter Abfall der Zugfestigkeit um 3 % erkannt werden, s. Abbildung 5-41

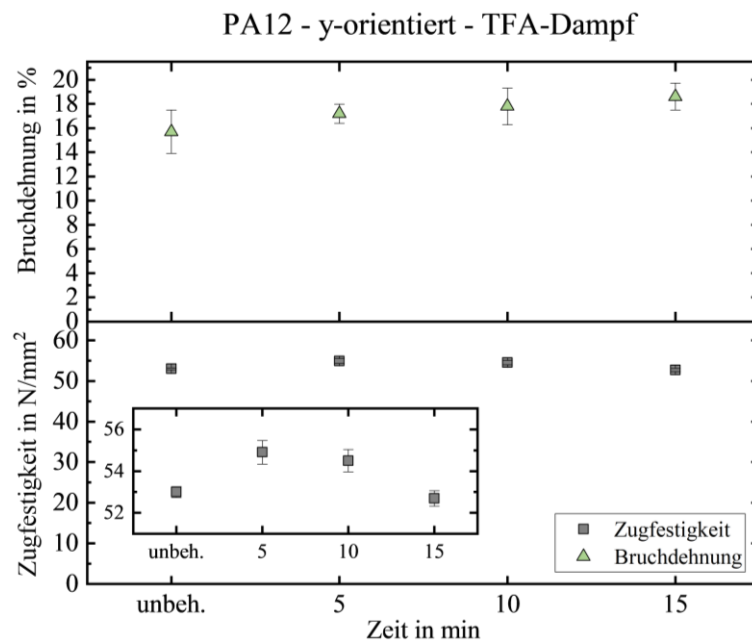


Abbildung 5-41: Vergleich der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung für unterschiedliche Eintauchzeiten bei der TFA-Dampf-Nachbehandlung von y-orientierten PA12-Zugproben [30]

In dem Diagramm in Abbildung 5-42 zeigt sich bei einem Anstieg der Nachbehandlungszeit eine Reduzierung des E-Moduls um ca. 8 %, ähnlich wie bei der Tauchätznachbehandlung von PA12-Proben.

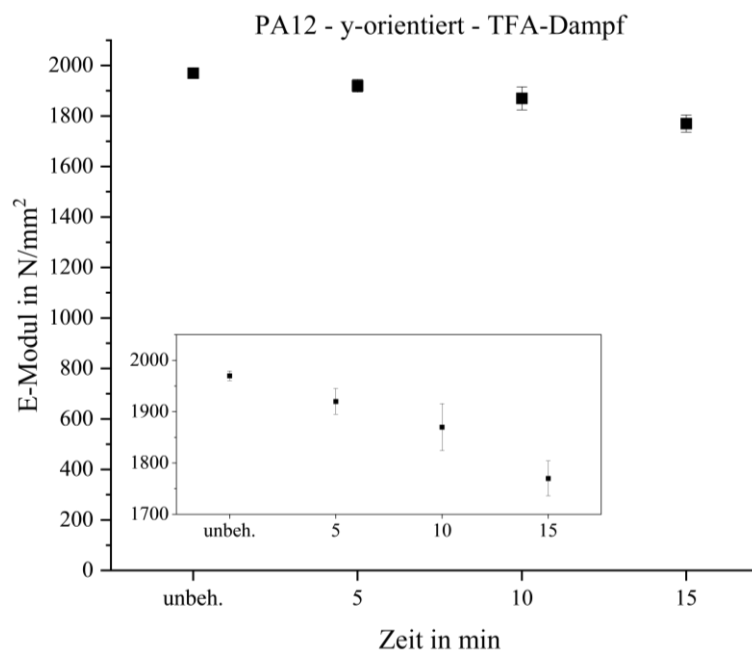


Abbildung 5-42: Vergleich des E-Moduls zu unterschiedlichen Eintauchzeiten bei einer TFA-Dampf-Nachbehandlung von y-orientierten PA12-Zugproben [30]

Auch bei den unterschiedlichen Methoden – TFA-Bad oder TFA-Dampf – und den damit verbundenen verschiedenen Einwirkzeiten zeigen die Ergebnisse der Zugprüfungen gleiche Tendenzen der Veränderungen der mechanischen Eigenschaften. Signifikante Unterschiede bei den Werten sind nicht festzu-

stellen. Bei den chemisch bzw. physikalisch nachbehandelten Zugproben ist allgemein eine Abnahme des E-Moduls mit steigender Interaktionszeit des Einwirkmediums zu messen. Demgegenüber ist die Zugfestigkeit nahezu gleichbleibend bzw. zeigt einen leichten Abnahmetrend. Die Bruchdehnung wiederum steigt in der Regel mit der Nachbehandlungsdauer an.

Oehlmann et al. [145] messen bei der Nachbehandlung von PA12-Proben in der „Powerfuse S“ ebenfalls einen Anstieg der Bruchdehnung, der mit nahezu 70 % angegeben wird. Auch eine Abnahme des E-Moduls (10,5 %) und ein weitaus geringerer Einfluss auf die Zugfestigkeit, die um ca. 3,5 % sank, kann ausgemacht werden. Ähnliche Tendenzen konnten Crane et al. [146] feststellen.

Mechanische Nachbehandlung

In Tabelle 5-5 sind die gewählten Einstellungen des Gleitschleifprozesses aufgeführt.

Tabelle 5-5: Parametereinstellungen beim Gleitschleifen für die Nachbehandlung von PA12-Proben

Probe	Umdrehungen in 1/min	Bearbeitungszeit in h	Prozesswassermenge in l/h
I	325	2	6
II	325	1	4
III	275	2	4
IV	275	1	4

Das Diagramm in Abbildung 5-43 zeigt einen Anstieg der Zugfestigkeit und der Bruchrechnung gegenüber den Ausgangswerten. Die Parametereinstellungen II haben den größten Einfluss auf die Bruchdehnung und einen nur marginalen Einfluss auf die Zugfestigkeit der Zugproben. Bei diesen gemessenen Proben liegt die Standardabweichung erkennbar unter jener der anderen Proben (I, III und IV). Mit der Reduzierung der Oberflächenrauheit und einer Art Verdichtung der Oberfläche kann auch hier wie bei den chemisch bzw. physikalisch nachbehandelten Proben der leichte Anstieg der Bruchdehnung erklärt werden.

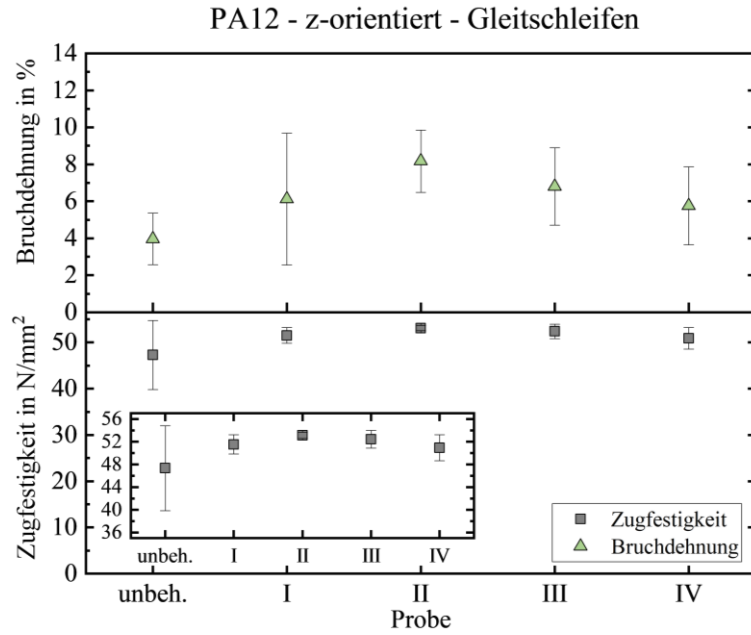


Abbildung 5-43: Vergleich der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung der z-orientierten PA12-Zugproben [30]

Zugproben mit den Parametereinstellungen III erfahren durch das Gleitschleifen eine leichte Zunahme des E-Moduls. Im Vergleich zu den Ergebnissen der Zugproben, die mit den Parametereinstellungen I trowalisiert wurden, liegen sie um 2 % höher. Unter Berücksichtigung der Standardabweichungen aller Ergebnisse sind die ermittelten E-Module nahezu gleichbleibend.

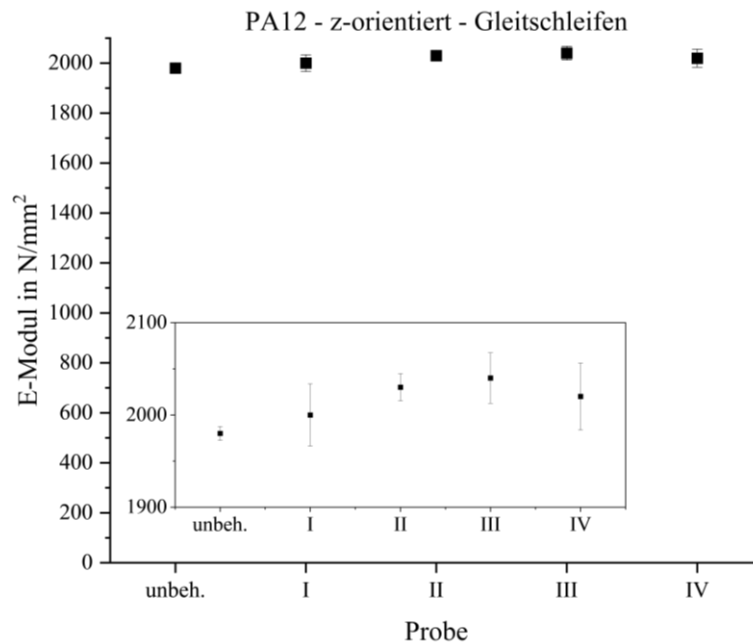


Abbildung 5-44: Vergleich des E-Moduls nach dem Gleitschleifen (Parametereinstellungen I bis IV) von z-orientierten PA12-Zugproben [30]

5.2.1.2 Polypropylen

Bei den unbehandelten in z-Richtung gefertigten PP-Proben liegt eine durchschnittliche Zugfestigkeit von ca. 19 N/mm² vor. Die Bruchdehnung liegt bei ca. 7,5 % und der E-Modul bei ca. 805 N/mm².

Chemische bzw. physikalische Nachbehandlung

Eine Beeinflussung der Bruchdehnung findet ihr Maximum bei einer Verweildauer von 3 min im 100 °C warmen Toluol (s. Abbildung 5-45). Durch eine Veränderung der Randbereiche auf morphologischer Ebene wie auch durch die Abnahme der Rauheit kann die Zunahme der Bruchdehnung beeinflusst werden. Eine Zu- oder Abnahme des E-Moduls liegt nicht vor, s. Abbildung 5-47.

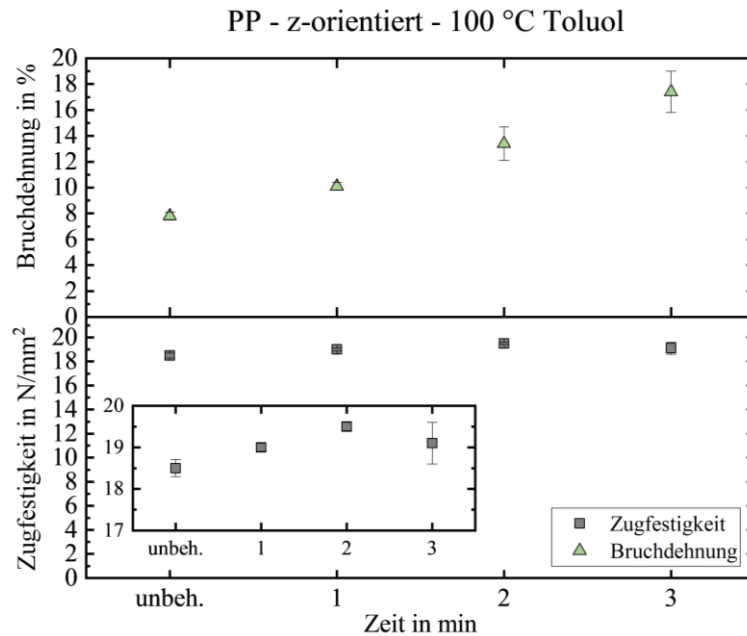


Abbildung 5-45: Diagramm der Veränderung der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung in Abhängigkeit von der Nachbehandlungsdauer bei PP-Proben, Toluol-Nachbehandlung

Mechanische Nachbehandlung

Nach dem Gleitschleifen zeigen sich leichte Veränderungen in der Bruchdehnung, während sie bei der Zugfestigkeit für die Zugproben mit den Einstellungen III am höchsten sind (vgl. Abbildung 5-46).

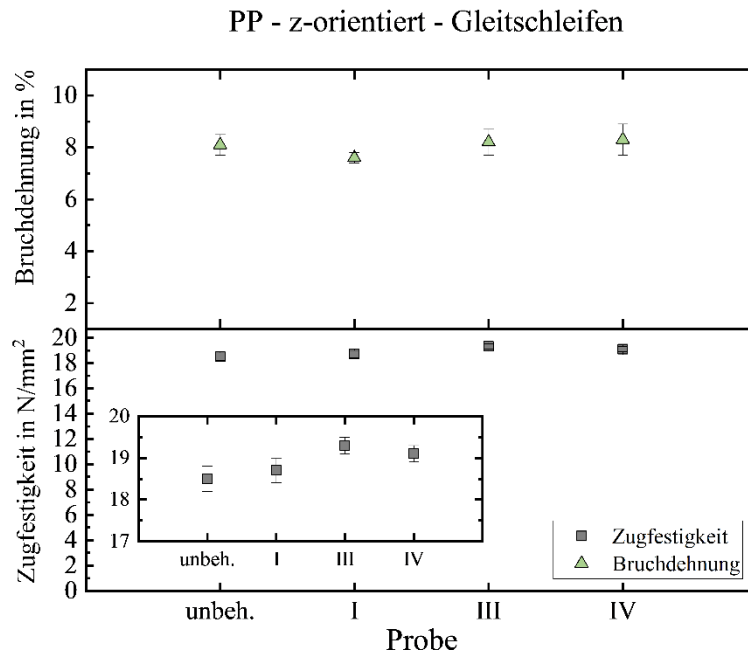


Abbildung 5-46: Diagramm der Veränderung der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung in Abhängigkeit von der Nachbehandlungsdauer bei PP-Proben, Gleitschleifen

Wie bei den Auswirkungen der Nachbehandlung auf die topographischen Eigenschaften schon beschrieben, zeigt die veränderte Randschicht auch einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Ein Merkmal hierfür ist die Ausbildung der feinsphärolithischen Struktur, die, wie unter dem Rasterelektronenmikroskop im Randbereich der Proben zu erkennen ist, bei zunehmender Verweildauer ansteigt. Mikroskopieaufnahmen von Querschnitten der PP der unbehandelten und der nachbehandelten Proben zeigen eine deutliche Veränderung des Randbereiches. Neben der Reduzierung der Oberflächenrauheit verändern sich die mechanischen Eigenschaften, was u. a. durch die Ausbildung der Randzone zu erklären ist. So zeigt ein Anstieg der Verweildauer (von 1 min auf 3 min) eine Zunahme der Bruchdehnung von 10,1 % auf 17,4 % bei einem Ausgangswert von 7,8 %. Auch hier sinkt die Kerbwirkung durch die Veränderung der Oberfläche und der Randzone, die durch Rauheitsmessungen erfasst werden und in Mikroskopieaufnahmen zu erkennen sind. Keine Auswirkung zeigt hingegen das Gleitschleifen auf die Bruchdehnung.

In Abbildung 5-47 sind die Ergebnisse der Zugversuche und die Auswirkung der Nachbehandlungsmethoden auf den E-Modul zu sehen.

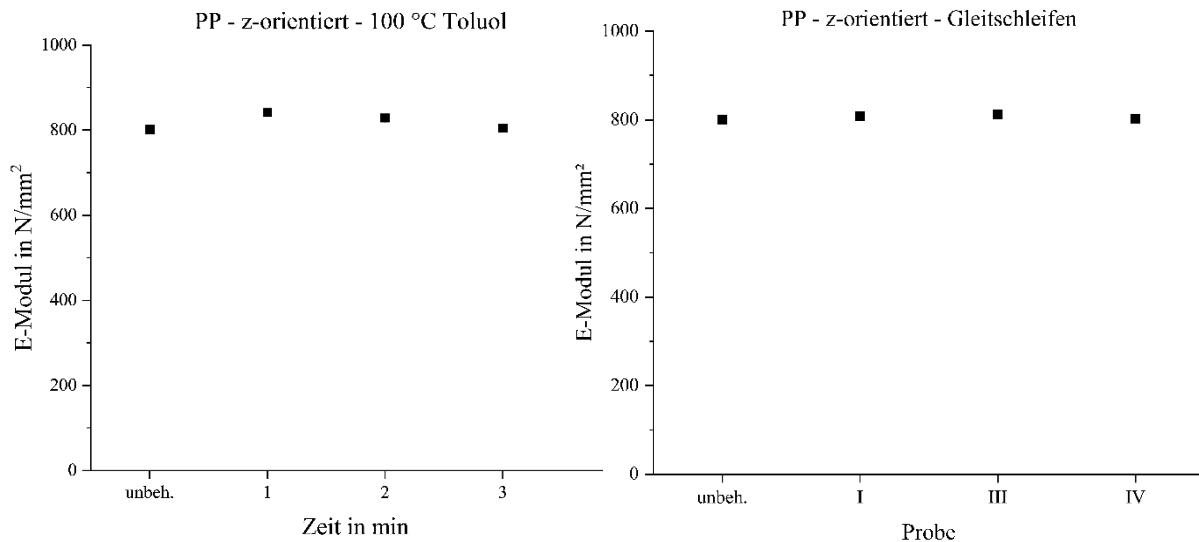


Abbildung 5-47: Diagramme zur Veränderung des E-Moduls in Abhängigkeit von der Nachbehandlungsdauer der Toluol-Nachbehandlung bei 100 °C (links) und der Variation der Parameter beim Gleitschleifen (rechts)

Auf die Bauteilsteifigkeit haben beide Nachbehandlungsverfahren keine Auswirkung, wie der resultierende E-Modul zeigt, der über die Verweildauern in Toluol und die variierenden Parameter beim Gleitschleifen nahezu konstant bleibt.

5.2.2 Einfluss auf materialextrudierte Polyamid-12-Proben

Nylon 12

Bei den materialextrudierten Proben, die auf der Fortus 450mc gefertigt wurden, zeigt die Bauteilorientierung im Fertigungsprozess einen dominanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Es lassen sich signifikante Unterschiede zwischen den liegenden und den stehenden Zugproben erkennen. So hat der E-Modul der unbehandelten liegenden Zugproben einen Mittelwert von 1.500 N/mm², während die stehenden Proben (B und C) mit einem nicht relevanten Unterschied im Mittel bei einem E-Modul von 1.240 N/mm² liegen.

Chemische bzw. physikalische Nachbehandlung

Bei den nachbehandelten Proben im TFA-Bad zeigen sich leichte Unterschiede zwischen den stehenden und den unbehandelten Proben, s. Abbildung 5-48. Demgegenüber ist bei den liegenden Proben ein deutlicher Unterschied beim E-Modul zu erkennen, so beträgt er bei der TFA-nachbehandelten Probe $E = 1.075 \text{ N/mm}^2$.

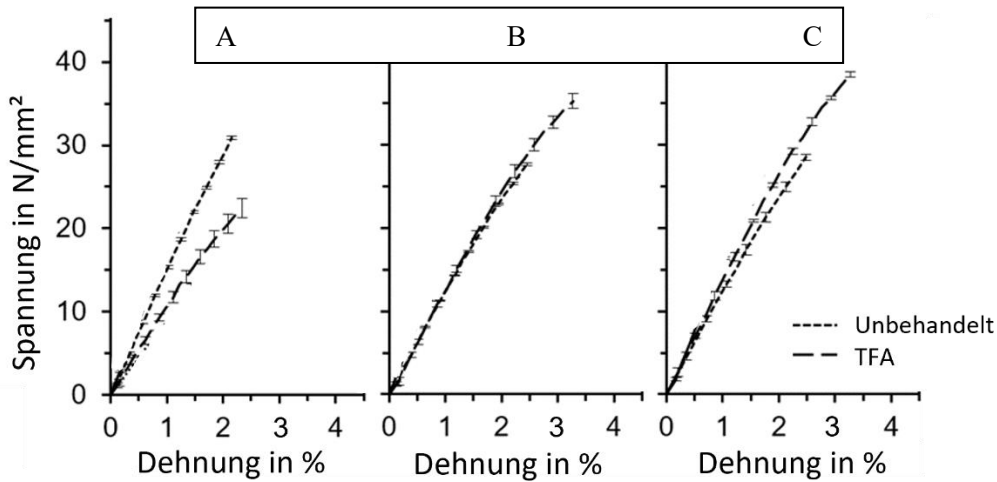


Abbildung 5-48: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der MEX-Zugproben (Fortus 450mc) in Anlehnung an [96]

Bei den in z-Richtung orientierten Zugproben führt das interlaminare Versagen vorrangig zum Bruch. Durch den charakteristischen Schichtverbund der MEX-Proben liegt hier ein dominanter Unterschied der x-y-orientierten Zugprobe „A“ zu den z-orientierten Zugproben „B“ und „C“ vor.

Eine Steigerung der Bruchdehnung ohne maßgebliche Beeinflussung der Steifigkeit wird durch den Tauchätzvorgang mittels TFA hervorgerufen. Unter Berücksichtigung der Reduzierung der Oberflächenrauheit bei der Nachbehandlung wirkt auch hier die gesenkte Kerbwirkung auf die Bruchdehnung ein.

PA 2200

In einer weiteren Versuchsreihe werden die liegend gefertigten PA12-Zugproben aus Filament der Firma AM-Filament im Zugversuch getestet. Im Vergleich zu den unbehandelten Zugproben steigt die Bruchdehnung der nachbehandelten Zugproben nach 60 s im TFA-Bad um 15 % an, s. Abbildung 5-49. Hingegen bleibt die Zugfestigkeit unter Berücksichtigung der Standardabweichung gleich.

PA12 - y-orientiert - TFA

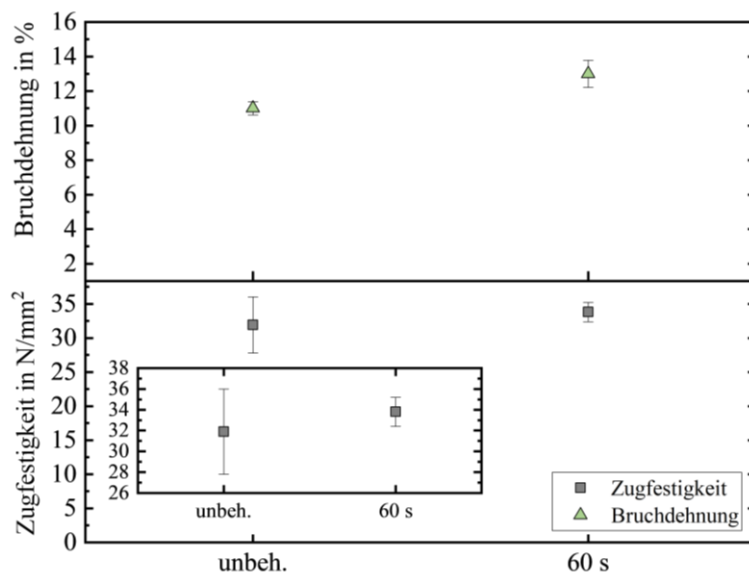


Abbildung 5-49: Zugfestigkeit und Bruchdehnung von PA12-MEX-Zugproben (Qidi), die mit TFA für 60 s nachbehandelt wurden

Ein signifikanter Unterschied ist beim E-Modul nicht zu erkennen. Dieser steigt im Mittel von 975 N/mm^2 (nachbehandelt) mit einer Standardabweichung von $63,8 \text{ N/mm}^2$ auf 998 N/mm^2 mit einer Standardabweichung von $60,0 \text{ N/mm}^2$ (unbehandelt) an.

Bezogen auf die auf der MEX-Anlage Fortus 450mc liegend gefertigten Zugproben ist der E-Modul kleiner, wobei die Bruchdehnung signifikant höher ist. Zum einen liegt das Ausgangsmaterial; Stratasys gibt FDM Nylon mit einer Bruchdehnung von 9,5 % (x-z-Ausrichtung) an [228], wobei PA12 eine Bruchdehnung von 18 % nach EOS GmbH aufweist [174]. Hierbei sind die Zwischenschritte der Materialbelastung im PBF-LB/P-Prozess, die anschließende Granulierung und die Plastifizierung zum recycelten Filament noch nicht mit aufgenommen worden. Zum anderen werden die unterschiedlichen Filamente auf verschiedenen Anlagen verarbeitet.

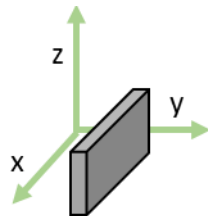


Abbildung 5-50: xz-Fertigungsorientierung nach Stratasys zur Ermittlung mechanischer Eigenschaften, Graphik nach [229]

Zwischenfazit

Mit Hilfe der Zugversuche kann gezeigt werden, dass eine mechanische Nachbehandlung, das Gleitschleifen, einen marginalen Einfluss auf die hier betrachteten mechanischen Eigenschaften hat. Hingegen zeigt die chemische bzw. physikalische Nachbehandlung von PA12-Zugproben, das Tauchätzen und die Bedampfung mit TFA, einen Anstieg der Bruchdehnung, während die Zugfestigkeit über die Nachbehandlungszeiten hinweg gleich bleibt. Beim E-Modul findet eine Reduzierung maximal um ca. 1 % statt.

Durch das Tauchätzen steigt bei den z-Zugstäben aus dem PBF-LB/P-Verfahren die Bruchdehnung von ca. 4 % auf 12 % an, während bei den y-Zugstäben (PBF-LB/P) keine eindeutige Tendenz über die verschiedenen Verweilzeiten hinweg zu erkennen ist, s. Abbildung 5-51. Hingegen zeigt die TFA-Dampfnachbehandlung einen Anstieg über die Einwirkzeit von 15,5 % (unbehandelt) zu 18,5 % (15 min TFA-Dampf). Ebenfalls bei den liegend gefertigten MEX-Zugstäben ist eine Erhöhung der Bruchdehnung von 11 % (unbehandelt) auf 13 % nach 60 s Einwirkzeit im TFA-Bad zu erkennen. Beim Betrachten des Bruchbildes der MEX-Zugprobe (2) lässt sich eine leichte Einschnürung feststellen, die PBF-LB/P-Proben (1 und 3) weisen dieses Bruchverhalten hingegen nicht auf.

Ein ähnliches Verhalten des Anstiegs der Bruchdehnung über die Einwirkzeit ist bei der Nachbehandlung mit Toluol bei 100°C Erwärmung auf PP-Zugproben festzustellen. Hier hat das Tauchätzen jedoch keinen Einfluss auf den E-Modul.

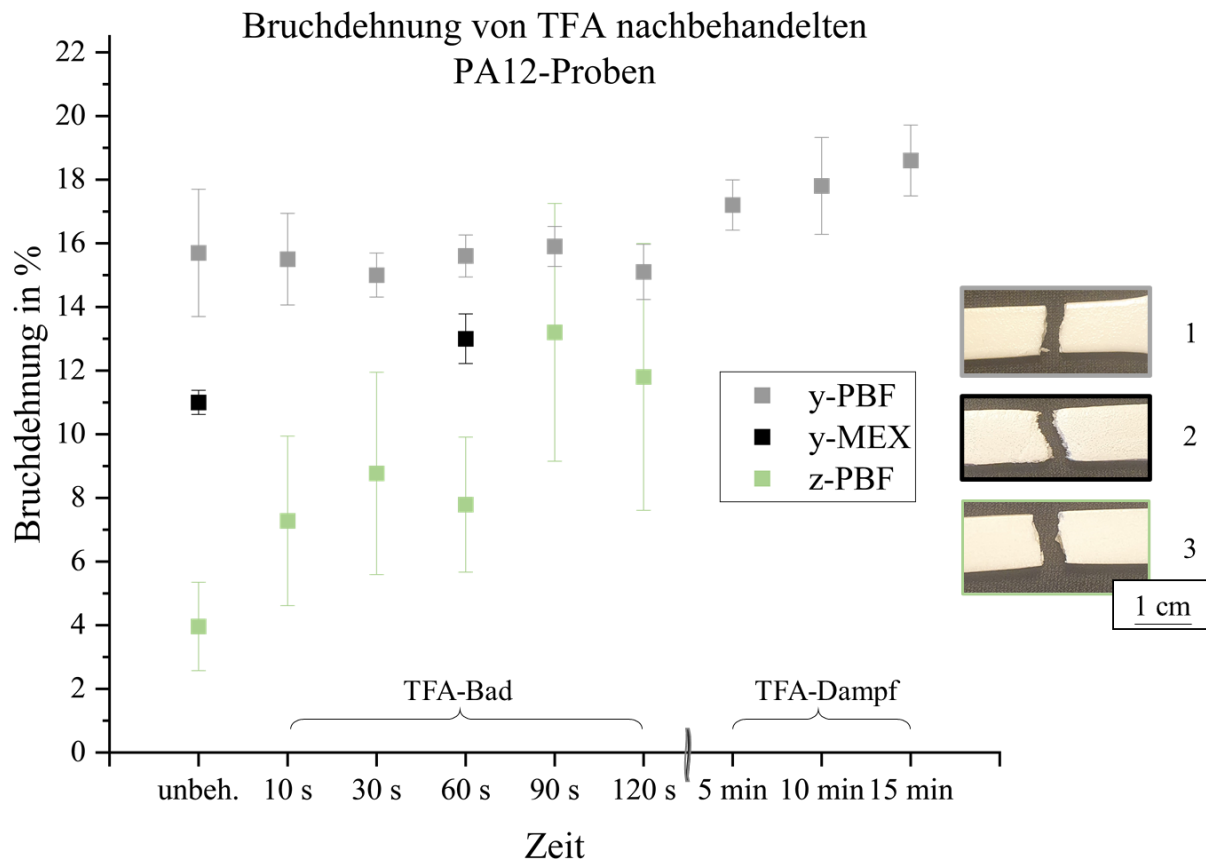


Abbildung 5-51: Zusammenfassung der Ergebnisse von TFA-nachbehandelten PBF-LB/P- und MEX-Zugstäben

Ein Unterschied im Bruchverhalten zeigt sich im Hinblick auf die Form des Ausgangsmaterials, ob Pulver oder Filament, und die Schichtenbindungsart. Infolge der Herabsetzung der Kerbwirkung aufgrund der Reduzierung der Rauheit durch die Nachbehandlungen steigt die Bruchdehnung an und wird entsprechend eine Auswirkung auf die Bruchart haben. Über den Randbereich der PBF-LB/P-Probe setzt der Sprödbbruch als dominanter Bruch ein. Mögliche Ursachen für einen duktilen induzierten Bruch bzw. für Zonen, die einen duktilen Bruchbereich aufweisen, können Inhomogenitäten sein, wo Pulverpartikel nur teilweise oder nicht aufgeschmolzen sind; das ist unabhängig von der Bauteilorientierung besonders im Randbereich einer Probe der Fall. Primär ist bei PBF-LB/P-Proben sprödes Bruchverhalten festzustellen [230]. [231, 232]

Song et al. [233] diagnostizieren in Abhängigkeit von der Strangablegerichtung beim MEX-Verfahren ein duktiler oder spröder Bruchverhalten bei Zugbelastung. So zeigt der Strangverlauf mit einer Ausrichtung von 0° und 45° ein duktiler und bei 90° ein spröder Verhalten, s. Abbildung 5-52. Aufgrund verschiedener Einflussfaktoren, etwa der Bauteilorientierung oder der Temperatureinflüsse (wie Bauplattform-, Düsentemperatur), kommt es in der Regel zu Mischbrüchen [234]. Brucheinschnürungen weisen, wie bei den untersuchten nachbehandelten MEX-Proben zu erkennen ist, auf einen duktilen induzierten Bruch hin, wobei ein Mischbruch vorliegen kann.

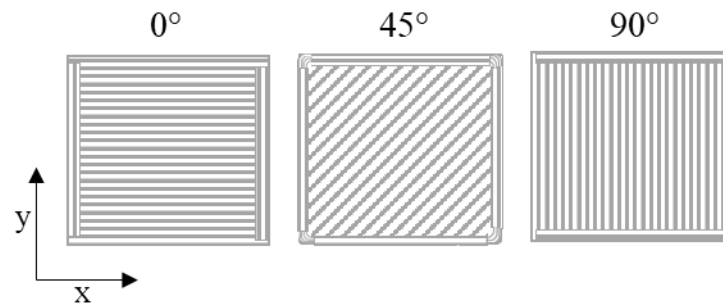


Abbildung 5-52: Drei Optionen der Strangablegerichtung bei MEX in y-x-Richtung (liegend)

5.3 Auswirkung der Trifluoressigsäure auf die Schmelze-Volumenfließrate

Neben den Untersuchungen des Einflusses der TFA auf die topographischen und mechanischen Eigenschaften wird im Folgenden mit Blick auf PA12 (PBF-LB/P-Proben) ein möglicher Einfluss des Tauchätzens auf das Fließverhalten betrachtet. Mit Hilfe der MVR-Messung kann ermittelt werden, inwieweit eine Säure Einfluss auf das Fließverhalten von PA12 nimmt. Lösemittel werden als Newton'sche Flüssigkeiten bezeichnet, da ihre Viskosität konstant ist, während Polymerschmelzen und auch die Polymerlösungen Nicht-Newton'sche Flüssigkeiten sind. [81] Hieraus ist abzuleiten, dass eine Säure, die mit einem Polymer eine Lösung bildet, eine Auswirkung auf die Viskosität hat. Mit abnehmender Molmasse wird ein „leichteres“ Fließen möglich, was einen steigenden MVR-Wert bedeutet. Werden also die Molekülketten durch eine Säurebeeinflussung gekürzt, nimmt die Viskosität ab und die Volumenfließrate steigt. [194]

Zur Bestimmung des MVR-Wertes nachbehandelter PA12-Proben werden Platten mit einer Stärke von 2 mm gefertigt, wobei die Größe so gewählt wurde, dass mindestens 4,5 g Probenmasse vorhanden ist. Nach der Fertigung werden die Platten für 10 s, 30 s, 60 s, 90 s und 120 s in TFA gehalten und im Anschluss neutralisiert. Für die MVR-Messungen werden die Platten zurechtgeschnitten, so dass kleine Quadrate mit Maßen von ca. 5 mm mal 5 mm vorliegen. Bei den unbehandelten Proben liegt, gemessen mit einer Prüftemperatur von 235 °C und einem Prüfungsgewicht von 5 kg, ein durchschnittlicher MVR-Wert von ca. 120 cm³/10 min vor. Es ist eine Zunahme des MVR-Wertes mit steigender Nachbehandlungszeit zu erkennen, s. Abbildung 5-53.

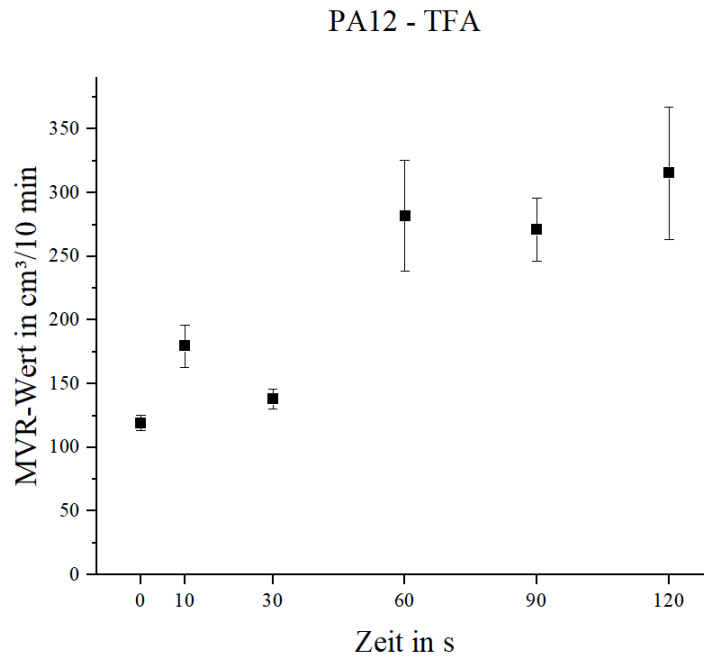


Abbildung 5-53: MVR-Werte über die Interaktionszeit der in TFA nachbehandelten PA12-Proben (PBF-LB/P)

Hervorzuheben sind die Proben, die 90 s und 120 s mit TFA nachbehandelt wurden. Nach Einfüllen der Probenmasse in den Zylinder zum Aufschmelzen für 300 s reicht die 5 kg Belastungsmasse nicht aus, um den Kolben mit Verbindung zum Wegaufnehmer aus konstanter vorgesehener Höhe zu halten. Nach kurzer Zeit (zwischen 50 s und 100 s) steigt der Kolben an. Um den Wegaufnehmer nicht auszulösen, wird die Belastungsmasse auf 8 kg für den Aufheizvorgang erhöht. Auf die Messung selbst hat die Erhöhung keinen Einfluss, da erst nach Öffnen des Düsenaustritts und das damit einhergehende Herabsenken des Wegaufnehmers die Messung ausgelöst wird. Unmittelbar vor der Freigabe der Düse und dem Starten der Messung am Computer wurde die Belastungsmasse auf 5 kg gemäß der Norm reduziert.

Durch das Aufschmelzen der Probenmasse auf 235 °C werden die eingelagerten TFA-Moleküle ebenfalls erwärmt. Da sich TFA-Moleküle in der PA12-Oberfläche eingelagert haben, werden sie durch die Erwärmung zum Teil verdampft. PA12 dehnt sich durch das erwärmte TFA aus und drückt den Kolben samt der Belastungsmasse nach oben. Das verdampfte TFA zeigt ebenfalls eine Auswirkung auf die Probenmasse, die nach dem Öffnen der Düse strangförmig austritt. Unbehandelte Probenmasse liegt erkaltet wie ein Filamentstrang vor, nachbehandelte Probenmasse sieht aufgeschäumt aus und tritt nicht kontinuierlich aus der Düsenöffnung aus, s. Abbildung 5-54. In der Abbildung ist links der glänzende Strang zu erkennen, rechts daneben ein Strang mit einer rauen, offenporig wirkenden Oberfläche. Alle herausgetretenen Stränge nachbehandelter Proben sehen wie die beispielhaft abgebildete erstarrte Polymerschmelze aus, deren Ausgangsprobe sich für 90 s im TFA-Bad befand.

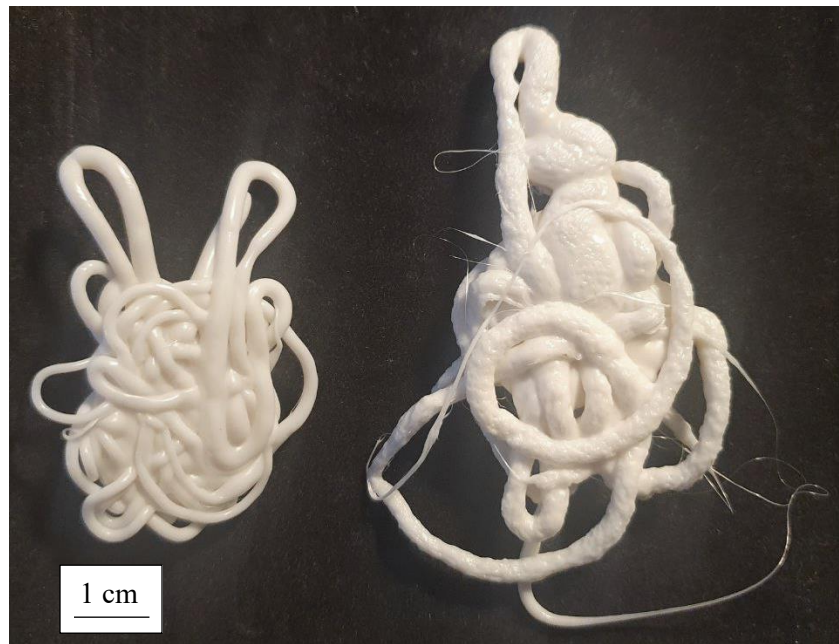


Abbildung 5-54: Erstarre Polymerschmelze, links: unbehandelte Probe, rechts: 90 s TFA-Nachbehandlung

Bei einer Zunahme der Kettenlänge, was eine höhere mechanische Festigkeit und Viskosität bei einer Abnahme der Kristallisationsneigung mit sich bringt, sinkt der MVR-Wert [235]. Aufgrund der Verschlaufungen bzw. Vernetzung der Polymerketten wird deren Abgleiten in der Schmelze behindert. Umgekehrt führen kürzere Polymerketten aufgrund von weniger Verschlaufungen in der Schmelze zu einem höheren MVR-Wert. [82, 90, 236 - 238]

Durch die Zunahme des MVR-Wertes mit steigender Nachbehandlungszeit könnte eine Abnahme der Polymerkettenlänge vorliegen, die durch die Säure bedingt wird. Da die Fluoratome der TFA die Wasserstoffbrückenbindungen des PA12 auflösen können, würde dies zu einer Verkürzung der Ketten führen. Allerdings wird auch aufgrund der Interaktion von eingelagerten TFA-Molekülen und Wärme eine Ausdehnung des PA12 bedingt. Infolge dieser Reaktion steigt das Volumen an, worauf Material durch die Düse des MVR-Messgerätes austritt, was u. a. zu einem höheren MVR-Wert führt.

5.4 Auswirkung der Trifluoressigsäure auf das Schmelzverhalten

Auf der Grundlage der DSC-Messungen der entnommenen Proben von unbehandelten und nachbehandelten Proben lassen sich Auswertediagramme erstellen. In Abbildung 5-55 ist das Thermogramm der Referenzprobe (unbehandelte PA12-Probe) zu sehen. Für die jeweiligen Kurven der Aufheiz- und der Abkühlphasen werden neben den Peak-Temperaturen die jeweiligen Flächen (grau und türkis) und die On- und Endsets mit Hilfe der Tangentenmethode bestimmt. Die Fläche ergibt umgerechnet die Enthalpie, woraus sich, zusammen mit der jeweiligen Starttemperatur und Endtemperatur, die Wärmemenge bestimmt, die eingebracht werden muss, um das Pulver zu schmelzen (graue Fläche) oder zu rekristallisieren (türkise Fläche).

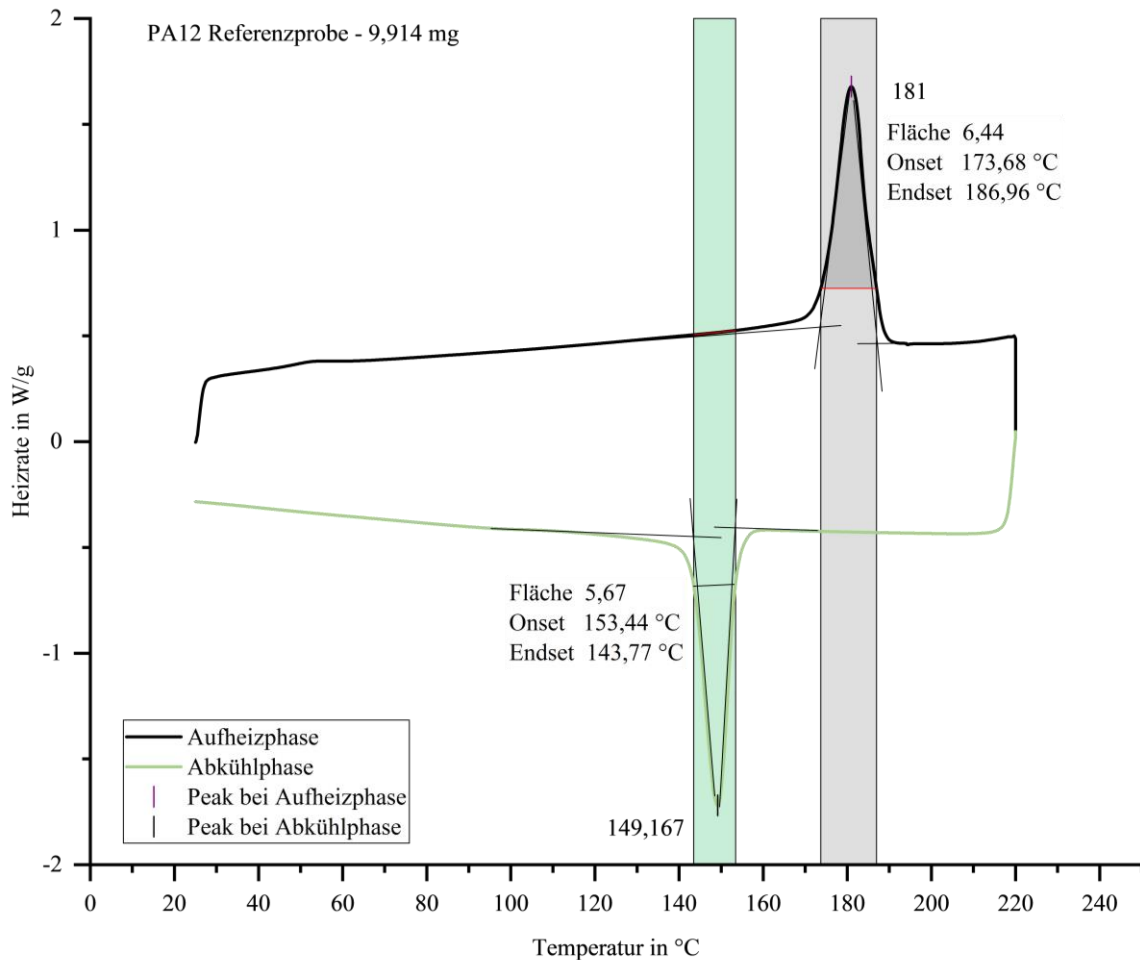


Abbildung 5-55: Thermogramm der unbehandelten PA12-Probe mit Aufheizphase in Schwarz und Abkühlphase in Grün mit zugehörigen Peaks

Für die vorliegenden Auswertungen der DSC-Messungen wird das Auswerte-Tool des DSC-Analysegeräts verwendet. Zum Abgleich werden als Referenz Auswertungen mittels Origin gemacht. Mittels der Tangentenmethode werden die Enthalpien sowie die On- und Endsets bestimmt. In Tabelle 5-6 sind die Peaks der Aufheiz- und der Abkühlphase sowie die jeweiligen On- und Endsets zu den verschiedenen Nachbehandlungszeiten aufgelistet. Zudem sind ihr die Werte der DSC-Messungen zu entnehmen. Zu erkennen ist eine leichte Reduzierung der Temperaturen beim Aufschmelzen und ein leichter Anstieg bei der Kristallisation mit zunehmender Nachbehandlungszeit der Proben.

Tabelle 5-6: DSC-Analyseergebnisse der unbehandelten und der nachbehandelten PA12-Proben mit TFA

Zeit in s	Mittelwert/ Standardabweichung	Aufschmelzen			Kristallisation		
		Onset	Endset	Peak	Onset	Endset	Peak
		Temperatur in °C					
unbehandelt	\bar{x}	174,18	185,93	180,47	153,86	143,71	149,82
	s	0,41	0,31	0,28	0,17	0,34	0,10
10	\bar{x}	169,36	184,86	177,17	157,69	147,89	152,99
	s	0,70	0,02	0,16	0,65	0,80	0,34
30	\bar{x}	169,41	183,10	177,44	158,40	149,17	153,78
	s	0,69	0,47	0,26	0,17	0,05	0,07
60	\bar{x}	169,99	183,53	177,79	158,17	148,50	153,74
	s	0,22	0,22	0,52	0,67	0,25	0,55
90	\bar{x}	170,61	182,19	177,15	157,23	148,28	153,42
	s	0,37	0,23	0,24	0,16	0,45	0,05
120	\bar{x}	167,21	180,56	175,23	158,13	148,86	153,38
	s	0,33	0,00	0,09	0,29	0,23	0,15

Mit den erhaltenen Messergebnissen, die eine Tendenz anzeigen, jedoch keine abschließende Aussage erlauben, kann in Kombination mit den MVR-Werten von der Dauer des Tauchätzens auf das Schmelzverhalten geschlossen werden. Trotz der nicht komplett eindeutigen Richtung der Messergebnisse zeigen die DSC-Werte einen Zusammenhang an. Unter Hinzunahme der MVR-Ergebnisse, können auch hier eingelagerte TFA-Moleküle zum einen eine Veränderung der Peak-Temperaturen und zum anderen eine Verkürzung der Kettenlängen mit sich bringen. Somit ist nicht auszuschließen, dass eine Nachbehandlung mit TFA, ggf. mit auch anderen Säuren, eine Veränderung der Kettenlänge des PA12-Moleküls mit sich bringt. Das wiederum könnte das mechanische Verhalten beeinflussen und so den Einsatzbereich der PA12-Bauteile verändern.

Schwankungen können aber auch aufgrund der Probenentnahmen auftreten, da die Eindringtiefe der TFA z. B. bei 10 s Nachbehandlungszeit beim Tauchätzen geringer ist als bei höheren Verweilzeiten. In Abbildung 5-56 ist die veränderte Randschicht im Vergleich zur unbehandelten Probe (links) zu erkennen. So ist sie nach 120 s (rechts) Einwirkzeit von Trifluoressigsäure auf die PBF-LB/P/PA12 weitaus stärker als nach 10 s (Mitte). Ebenfalls liegt keine gleichmäßig starke ausgebildete Randschicht bei den jeweilig nachbehandelten Proben vor; in der Abbildung links ist zu erkennen, dass der Abstand zwischen den grünen Pfeilen größer ist als zwischen den grauen Pfeilen. Es zeigt sich, dass an den Ecken und Kanten die beeinflusste Oberflächenstärke größer ist als an den Flächen der Probe. Beim Probenehmen für die DSC-Analyse wird von der Oberfläche Material abgetragen, und es kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei den nachbehandelten Proben auch unbeeinflusstes PA12 entnommen wurde. Mit steigender Einwirkzeit nimmt jedoch die Möglichkeit ab, eine nicht rein nachbehandelte Oberfläche als DSC-Probe zu erhalten.

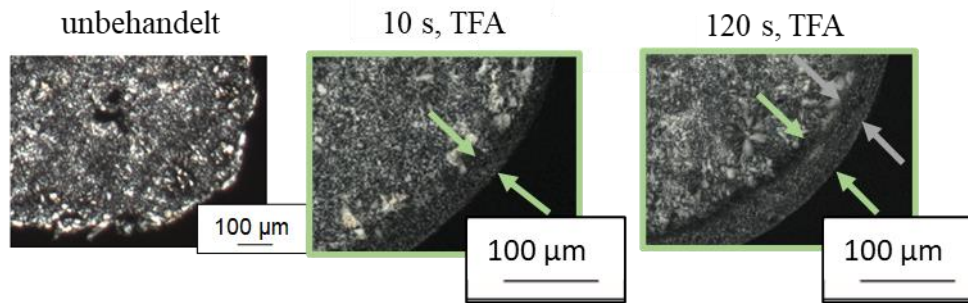


Abbildung 5-56: Mikroskopieaufnahmen von Querschnitten von PA12-Proben, links unbehandelt, Mitte und rechts nachbehandelt [30], mit Markierungen der Randschicht bei 10 s und 120 s Einwirkzeit von TFA

Eine TFA-Dampf-Nachbehandlung an PA12-gefertigten Proben zeigt im Vergleich zu dem Tauchätzen über die verschiedenen Einwirkzeiten eine nahezu gleichbleibende Stärke der Randschicht. Bedingt durch die Interaktion der Säure bzw. der verflüchtigten Säure (Dampf) und der PA12-Makromoleküle bilden sich in Abhängigkeit von der Verweilzeit verschieden starke Randzonen aus. Aufgrund der für das Polymer schonenderen Nachbehandlung mittels Dampf bildet sich über die verschiedenen Nachbehandlungszeiten eine nahezu gleich tiefe Randschicht aus. Bei DSC-Messungen gestattet deswegen der Abtrag keinen Rückschluss auf die unterschiedlichen Interaktionszeiten.

5.5 Auswirkung der Trifluoressigsäure auf die Masseänderung in Abhängigkeit von der Temperatur

Für die TGA werden zwei verschiedene Probenformen, geraspelt und klein geschnitten, untersucht. In Abbildung 5-57 ist der einstufige TGA-Kurven-Verlauf der mit einer Raspel entnommenen PA12-Proben zu sehen. An auffälligen Stellen der TGA-Kurven sind die Markierungen 1 bis 3 eingefügt. Bei Markierung 1 ist die erste Auffälligkeit zu erkennen: Von der Starttemperatur bis zu ca. 100 °C verlaufen die Kurven gleich ohne Masseverlust. Ab 100 °C bis zur nächsten Markierung 2 verlaufen die Kurven der unbehandelten (grün) und der 10 s nachbehandelten PA12-Probe (gelb) weiter bei nahezu 100 % der Ausgangsmasse bzw. bei annähernd keinem Masseverlust. Bei ca. 130 °C verliert die gelbe Kurve (10 s Nachbehandlung), wie auch die anderen nachbehandelten Proben, an Masse, während die grüne Kurve (unbehandelt) bis 250 °C weitgehend konstant ohne signifikanten Masseverlust verläuft. Die Markierung 3 bei ca. 410 °C zeigt wie bei 450 °C (5) eine Art Knotenpunkt an. Hier bewegen sich die Kurven parallel zu der Extrapolationsgeraden. Am Punkt 5 verlaufen sie parallel zur x-Achse, hier findet keine Masseänderung mehr statt. Es zeigt sich somit bis zum Punkt 3 ein Unterschied in der Masseänderung von der generell unbehandelten Probe und den nachbehandelten Proben.

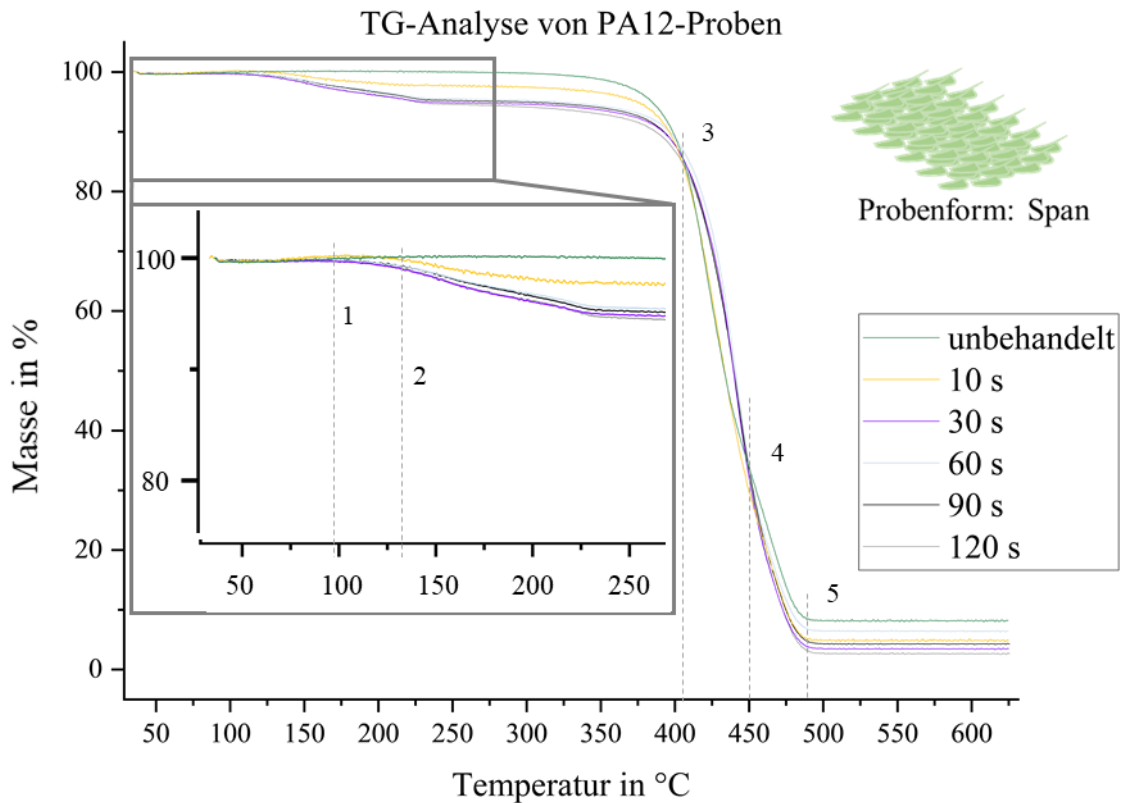


Abbildung 5-57: Einstufige TGA-Kurven von unbehandelten und nachbehandelten PA12-Proben, geraspelt, mit Markierungen 1 bis 5

Da sich TFA-Moleküle während der Nachbehandlung eingelagert haben, werden sie aufgrund des Siedepunktes von TFA von 72,5 °C beim Aufheizen zuerst verdampfen [239]. Ein ähnliches Verhalten von nachbehandelter zur unbehandelten PA12-Probe konnte bei einer TGA festgestellt werden, wofür die Proben in der „Powerfuse S“-Anlage von DyeMansion GmbH bearbeitet wurden. Bei der Analyse verläuft die Kurve der nachbehandelten Probe von ungefähr 150 °C bis 400 °C unterhalb der unbehandelten PA12-Probe. [145]

Im Bereich des größten Abstandes zwischen den Kurven, von 230 °C bis 330 °C, liegt die Abweichung zwischen der unbehandelten Probe und der für 10 s nachbehandelten Probe bei durchschnittlich 2,3 %. Im selben Temperaturbereich beträgt die Abweichung zwischen der unbehandelten Probe und den für 30 s bis 120 s nachbehandelten Proben ca. 5 %. Die PA12-Proben, die in der „Powerfuse S“-Anlage nachbehandelt wurden, lassen bei 300 °C eine Abweichung von 1,4 % erkennen [145].

In Abbildung 5-58 sind die TGA-Kurven der PA12-Plättchen zu sehen. Ein ähnlicher Verlauf wie bei den geraspelten Proben ist zu erkennen, jedoch sind die Unterschiede zwischen der unbehandelten Probe und den nachbehandelten Proben weniger ausgeprägt. Hier liegen die Abweichungen der für 10 s nachbehandelten Probe im Temperaturbereich von 230 °C bis 330 °C im Vergleich mit der unbehandelten Probe bei durchschnittlich 0,6 %.

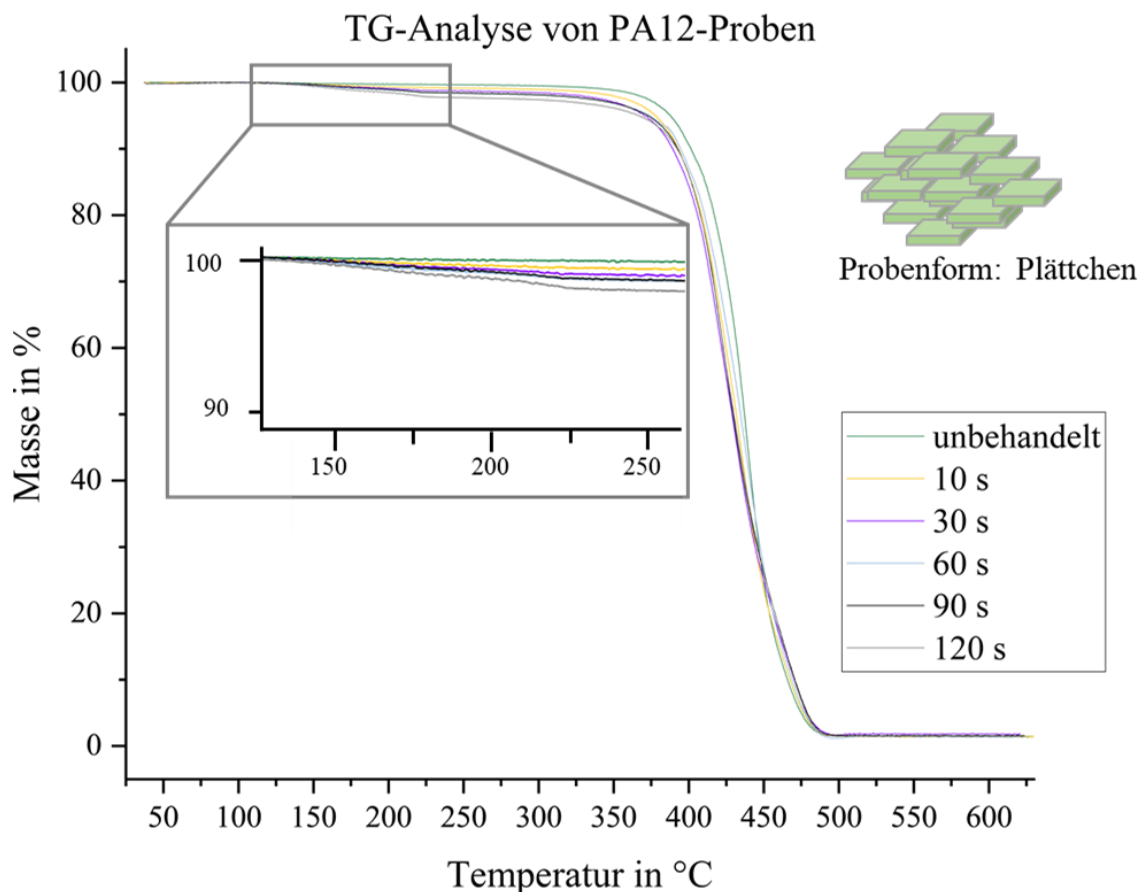


Abbildung 5-58: Einstufige TGA-Kurve von unbehandelten und nachbehandelten PA12-Proben, geschnitten

In Tabelle 5-7 sind die Massenabnahme M_L und die Temperaturen T_A , T_B und T_C zu den verschiedenen PA12-Proben aufgeführt; dabei wird in Nachbehandlungsdauer und Probenform unterschieden.

Tabelle 5-7: Einstufige Masseabnahme der untersuchten PA12-Proben, Nachbehandlung im TFA-Bad zw. 10 s und 120 s Einwirkzeit, links Abbildung der Probenform

Probe	M_L in %	T_A in °C	T_B in °C	T_C in °C
unbehandelt	98,6	414,6	458,4	440,2
10 s	98,54	402,7	460,3	437,6
30 s	98,21	396,4	460,2	430,5
60 s	98,63	404,3	464,1	437,5
90 s	98,44	398,6	458,6	423,0
120 s	98,57	398,2	458,7	416,5
unbehandelt	91,75	401,1	455,1	417,5
10 s	95,15	408,3	454,7	430,5
30 s	96,53	415,03	461,9	438,03
60 s	93,56	414,6	463,6	442,0
90 s	95,76	411,4	465,5	443,5
120 s	97,34	412,9	466,3	446,5

Bei den geschnittenen Proben/Plättchen kommt es zu einer gemittelten Massenabnahme von 98,5 % mit marginaler Abweichung, während die TGA der spanförmigen Proben eine größere Abweichung zueinander aufweisen, liegen hier doch die Werte zwischen 91,75 % und 97,34 %. Bei den Ergebnissen der

spanförmigen Ausgangsproben ist über die steigende Nachbehandlungszeit im TFA-Bad ein Anstieg der Temperaturen zu erkennen. Im Gegensatz hierzu zeigen die TG-Analysen der nachbehandelten PA12-Plättchen bei T_C eine Abnahme, während T_A und T_B Abweichungen von 1 % bis 4 % zueinander ohne einen Anstieg aufweisen.

Ein Einfluss der Probenform ist unabhängig von einer Nachbehandlung vorhanden. Aufgrund des Verhältnisses von Oberfläche zur Masse findet beim Vergleich von Pulverproben zu Bulkmaterial bzw. von zerstückelte Proben zu Proben aus einem Stück eine Zersetzung bei niedrigeren Temperaturen statt. [240] Der Messwert der unbehandelten Probe in Spanform wird neben dem Probenformeinfluss auch aufgrund weiterer Faktoren wie z. B. der Probenmasse eine Abweichung erkennen lassen, da dieser Wert aus einer Einzelmessung stammt. Bei den beiden Messreihen zeigt sich ein Einfluss der Form in Verbindung mit der TFA-Nachbehandlungszeit.

Aus den Ergebnissen lässt sich insgesamt schlussfolgern, dass die eingelagerten Säuremoleküle beim Anstieg der Temperatur als Erstes verdampfen und es somit zu einer größeren Masseänderung bei geringeren Temperaturen ($< 330 \text{ °C}$) kommt. Ebenfalls ist ein Unterschied bei der Masseänderung zwischen unbehandelten und nachbehandelten Proben aufgrund der Probenform zu erkennen. Wie vermutet, zeigt die Spanform der nachbehandelten Proben aufgrund der größeren nachbehandelten Oberfläche eine stärkere Ausprägung bei der TGA und der Masseänderung über der Temperatur.

6 Zusammenfassung

Allgemein betrachtet zeigen die Nachbehandlungsmethoden, ob mechanisch oder chemisch bzw. physikalisch, Auswirkungen auf die topographischen wie auch auf die mechanischen Eigenschaften der hier betrachteten Probestücke. In Abhängigkeit von der gewählten Nachbehandlungsmethode sind die Effekte unterschiedlich ausgeprägt. Mit Hilfe von Beständigkeitstabellen und der Hanse'schen Löslichkeitsparameter konnte für PA12 eine Auswahl an Chemikalien gefunden werden, die sich zur Nachbehandlung potentiell eignen. Für PP wurde auf eine Auswahl verzichtet und ein bereits untersuchtes Lösungsmittel (Toluol) verwendet [66]. Um einen Vergleich mit PBF-LB/P/PA12-Bauteilen durchführen zu können, wurden die Ergebnisse der PP-Nachbehandlung aufgeführt. Auch bei den MEX-PA12-Proben sind ähnliche bis gleiche Tendenzen in den Ergebnissen der Oberflächentopographie und der mechanischen Eigenschaften zu erkennen. Auch hier ist es nur möglich, eine Richtung anzugeben, da die Materialzusammensetzungen unterschiedlich sind (so etwa zwischen PA12 von EOS und Nylon-12 von Stratasys).

Bei den Nachbehandlungsversuchen zeigt von den verwendeten Chemikalien das Tauchätzen mit Trifluoressigsäure für PA12-Proben die größte Wirksamkeit hinsichtlich einer Reduzierung der Oberflächenrauheit. Gleiches gilt für Toluol zur Nachbehandlung von PP-Proben, wobei Toluol erst auf 100 °C erwärmt werden muss, da bei Raumtemperatur wie auch bei 50 °C kein Einfluss auf die Oberfläche zu erkennen ist. Bei beiden Polymeren konnte so jeweils die Rauheit, gemessen als R_z -Wert, von einem Ausgangswert von ca. 76,5 µm auf ca. 10 µm bei PA12 und von ca. 135 µm auf ca. 6 µm bei PP reduziert werden.

Eine Nachbehandlung mit TFA-Dampf hat ebenfalls Auswirkungen auf die Rauheit, hier fand nach 4 min Nachbehandlungszeit eine Reduzierung auf ungefähr 19 µm statt. Es ist anzumerken, dass die Dauer einen erheblichen Einfluss auf die Rauheit besitzt. Ab einer Nachbehandlungszeit von 6 min bis hin zu den betrachteten 15 min findet eine weniger starke Reduzierung der Rauheit statt. Einen großen Vorteil der Nachbehandlung mit einer flüssigen oder verdampften Chemikalie ist die sehr gute Erreichbarkeit von Hinterschneidungen, Gitterstrukturen und Bohrungen. Um eine Nachwirkung der Chemikalie zu unterbinden, kann im Anschluss ein Spülen des Bauteils mit VE-Wasser durchgeführt werden; Wasser zeigt eine neutralisierende Funktion bei TFA. Hier ist allerdings zu erwähnen, dass sich die untersuchten schwarzen MEX-Proben durch das Abspülen stellenweise farblich verändert haben und es zu weißlichen Flecken auf den Proben gekommen ist.

Bei den mehrfachen Messungen der Oberflächenrauheit konnte eine Abnahme der Standardabweichung bei den nachbehandelten Proben festgestellt werden. Demzufolge trägt eine Nachbehandlung neben der Reduzierung der Rauheit je nach verwendeter Säure oder entsprechend dem Gleitschleifen zu einer gleichmäßigeren ausgebildeten Oberflächentopographie bei.

Bei allen Nachbehandlungsversuchen mit den hier verwendeten Chemikalien ist eine Maßhaltigkeit bei den betrachteten Einwirkzeiten mit einer Abweichung bis zu ± 1 % gegeben. Auch beim Gleitschleifen

kommt es zu geringfügigen Abweichungen der Maße. Insgesamt betrachtet zeigen die Nachbehandlungsmethoden Auswirkungen auf die Maße, unter Berücksichtigung des Anwendungsfalls des nachbehandelten Bauteils besitzen diese jedoch wenig bis keine Relevanz. Abhängig von der Passungsart bei einer Baugruppe wird empfohlen, Testmodelle zu fertigen, um je nach Fertigungsverfahren und Material die möglichen Abweichungen zu ermitteln [241]. Unabhängig von einem etwaigen Einsatz einer Nachbehandlung kommt es zwischen Pre-Processing und Processing wie bei jedem anderen Fertigungsverfahren zu Maßabweichungen, was bei der Konstruktion berücksichtigt werden sollte. Typischerweise liegt die Toleranz bei der Materialeextrusion mit Blick auf Industrieanlagen und auch beim PBF-LB/P-Verfahren bei 0,25 mm [10, 242]. Die im Rahmen dieser Dissertation gemessenen Abweichungen der Maße der nachbehandelten von denen der unbehandelten Proben liegen innerhalb dieses Toleranzbereichs.

Eine Nachbehandlung mit (flüssiger oder verdampfter) TFA zeigt in Abhängigkeit von der Einwirkzeit und der daraus resultierenden Oberflächenrauheit marginale Maßabweichungen und eignet sich daher unter Berücksichtigung der steigenden mechanischen Eigenschaften. Anhand der Mikroskopieaufnahmen der Querschnitte der nachbehandelten Proben (PA12/PP) mit einer Chemikalie (TFA/Toluol) lässt sich anhand der ausgebildeten Randzonen auf das Verhalten der Interaktion zwischen Säure und Oberfläche des Polymers schließen. Beim Tauchätzen wächst die Randschicht mit steigender Nachbehandlungszeit im Gegensatz zur TFA-Dampf-Nachbehandlung bei PA12 an. Das deutet auf eine stärkere bzw. aggressivere Interaktion zwischen Säure und Polymer hin. Eine Ausbildung der Randzone, die mit steigender Einwirkzeit der Säure zunimmt, lässt die Schlussfolgerung zu, dass mitunter eine chemische Nachbehandlung vorliegt.

Die MVR-Messungen zeigen einen tendenziellen Einfluss der TFA auf die PA12-Proben in Abhängigkeit von der Nachbehandlungszeit. So lässt sich eine Zunahme des MVR-Wertes mit steigender Einwirkzeit der Säure auf die Probe feststellen. Daraus ist abzuleiten, dass die eingelagerten Säuremoleküle einen Einfluss auf das Fließverhalten besitzen und ebenfalls die Schmelzstruktur verändern. Bei den DSC-Messungen der mit TFA nachbehandelten PA12-Proben zu unterschiedlichen Einwirkzeiten konnte eine Tendenz der Abnahme des Peaks erkannt werden, jedoch liegen die gemessenen Werte innerhalb der Messtoleranzen und zeigen keine signifikante Änderung der Ergebnisse. Dennoch weisen die Ergebnisse auf einen Einfluss der TFA auf PA12 hin, wodurch die Schmelz- und Kristallisationseigenschaften beeinflusst werden. Ebenfalls bei den TG-Analysen zeigen die verschiedenen Einwirkzeiten der TFA insbesondere auf die spanförmig untersuchten PA12-Proben einen anhand der Literatur erwarteten Einfluss. Mit steigender Nachbehandlungszeit findet zeitlich früher bzw. bei niedrigeren Temperaturen eine Massenabnahme statt, da die eingelagerten Säuremoleküle zuerst verdampfen.

Beim Gleitschleifen findet eine gleichmäßige Nachbehandlung in Korrelation mit der Geometrie des Bauteils statt. Die Erreichbarkeit der zu glättenden Stellen hängt dabei signifikant von der gewählten Schleifkörpergeometrie und -größe ab. Zudem werden außenliegende Ecken und Kanten deutlich in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial (PA12/PP) abgerundet, da hier ein kontinuierlicher Kontakt zu

Zusammenfassung

den Schleifkörpern besteht. Eine Reduzierung der Rauheit R_r der PA12-Proben ließ sich um 65 % erreichen, während bei den PP-Proben eine Reduzierung um 30 % erfolgte. Stege mit einer Wandstärke kleiner als 1 mm, Säulen mit einem Durchmesser kleiner als 1 mm und Ecken mit einem Winkler kleiner als 30° erfahren bei diesem Nachbehandlungsprozess eine Deformation. Bei Aussparungen wie Bohrungen oder Ecken verkeilen sich Schleifkörper je nach Größe und setzen sich somit fest. Damit kann eine Nachbehandlung an diesen Stellen nicht stattfinden und ein nachträgliches Entfernen des Schleifgutes wird erforderlich. Eine Reduzierung der Rauheit lässt sich bei den ausgewählten Parametern beobachten, und ebenso findet eine Veränderung der Bruchdehnung bei weitgehender Konstanz von E-Modul und Zugfestigkeit statt.

Bei beiden untersuchten Nachbehandlungsverfahren kann neben der Reduzierung der Rauheit eine Steigerung der Bruchdehnung erzielt werden, die durch das Herabsetzen der Kerbwirkung bedingt ist. Bei der im Bereich der additiven Fertigung hohen Losgröße und einer simplen Geometrie (ohne Hinterschneidung, geringe Komplexität) lohnt sich das Gleitschleifen aufgrund der bearbeitbaren Stückzahlen und des im Vergleich zur chemischen bzw. physikalischen Nachbehandlung sauberen Prozesses. Vorteile der Nachbehandlung mit einer verdampften Chemikalie sind hingegen die sehr gute Erreichbarkeit bei komplexen Geometrien und im Vergleich zum Tauchätzen eine weniger aggressive Interaktion mit dem nachzubehandelnden Polymer.

Zusammenfassend sind in Tabelle 6-1 die Ergebnisse der PBF-LB/P/PA12-Proben dargestellt, die anhand von z-orientierten Zugstäben ermittelt wurden. Hinzu kommt eine Bewertung der Einsetzbarkeit für simple Geometrien, für simple Geometrien, die als Massenprodukt vorliegen, und für komplexe Geometrien, die Gitterstrukturen, filigrane Bereiche oder Hinterschneidungen aufweisen.

Tabelle 6-1: Zusammenfassung der erreichbaren Ergebnisse der PBF-LB/P/PA12-Proben mit Bewertung für verschiedene Geometriearten

Erreichbare Ergebnisse der z-orientierten PBF-LB/P/PA12-Proben mit Empfehlung für verschiedene Geometrien				
Geometrieart: <i>simpel</i> : s / <i>simpel u. Massenprodukt</i> : m / <i>komplex (Gitter/Hinterschneidungen)</i> : k Bewertung: geeignet: + / bedingt geeignet ~ / nicht geeignet –				
	Ausgangswerte	TFA-Bad	TFA-Dampf	Gleitschleifen
s		+	+	+
m		~ bis +	~ bis +	+
k		~ bis +	+	–
Rauheit R_r in μm	76,4	9,1	18,7	34
Bruchdehnung in %	3,9	15,9	18,6	8,2
Zugfestigkeit in N/mm^2	47,3	53,7	54,9	53,1
E-Modul in N/mm^2	1.980	1.910	1.920	2.040

Für MEX-PA12- und PBF-LB/P/PP-Proben bzw. -Bauteile liegt eine ähnliche Empfehlung zum Einsatz der beiden in dieser Arbeit betrachteten Nachbehandlungsmethoden vor; die zugehörigen Tabellen befinden sich im Anhang 8.

7 Ausblick

Es gilt, immer langlebigere Produkte zu entwickeln, die ressourcen- und zeiteffizient gefertigt werden sowie robust und kostengünstig sind. Daneben spielt es häufig eine je nach Anwendungsfall wichtige Rolle, optisch ansprechende Bauteile zu fertigen. Je nach Branche, z. B. in der Medizintechnik oder in der Lebensmittelindustrie, ist ein weiterer Faktor, dass sich keine Keime an der Oberfläche bilden sowie festsetzen dürfen und die Objekte leicht zu reinigen sind. Für diese Anwendungsfälle ist eine Nachbehandlung von PBF-LB/P-Bauteilen von höchstem Interesse. Beim Einsatz von Produkten aus PA12, PP oder aus anderen Polymeren ist das Post-Processing maßgeblich für die Bauteilqualität mitverantwortlich. Immer mehr lösen die additiven Fertigungsverfahren konventionelle Verfahren wie das Gießen oder Fräsen unter Berücksichtigung der Losgröße ab [243]. Weiter gilt es, neben den Nachbehandlungsmethoden, wie dem Bedampfen mit einer Chemikalie, Anwendungen für ein größeres Spektrum der verarbeitbaren Polymere im PBF-LB/P sicherzustellen. So müssen die Nachbehandlungsverfahren mit den eingesetzten Chemikalien angepasst und optimiert werden. Ebenfalls wächst der Markt an Kunststoffpulvern und Füllstoffen, die sich verarbeiten lassen. Neben der Reduzierung der Rauheit, die bereits ausreichend nachgewiesen werden konnte, sollte die Untersuchung der Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften, die bereits aufgezeigt werden konnten, weitergeführt werden. Hierzu zählen nicht nur die bisher betrachteten Eigenschaften wie Bruchdehnung, Zugfestigkeit und E-Modul, sondern auch weitere wie z. B. Dauerschwingfestigkeit und Torsion.

Weitere Untersuchungen nachbehandelter Proben und Bauteile könnten in Form von angepassten DSC-Messungen erfolgen, um das Schmelz- und Kristallisationsverhalten genauer zu analysieren. Die bisherigen Ergebnisse zeigen lediglich eine Tendenz an. Hierfür müssten Proben so vorbereitet werden, dass eine einheitliche Nachbehandlung vorliegt. Ähnlich verhält es sich mit den MVR-Messungen. Aufgrund der relativ hohen Standardabweichungen sollten für eine genauere Untersuchung mehr als fünf Messungen (bisher drei Messungen) vorgenommen werden. Ebenfalls könnte eine Anpassung der Konditionierung bzw. des Trocknens oder eine Reduzierung der Probenmasse und des Belastungsgewichts erfolgen. Über eine Anpassung der Methode könnten Messfehlerquellen reduziert bzw. ausgeschlossen werden, die sich möglicherweise aus dem Probenverhalten (nachbehandelte Proben) ergeben haben.

Neben den beschriebenen weiteren und ergänzenden Untersuchungen, etwa zu den mechanischen Eigenschaften, den DSC-Analysen und den MVR-Messungen, können technisch eingesetzte PA12-Bauteile auch auf eine Änderung ihrer geplanten Funktion hin überprüft werden. So könnten PBF-LB/P-gefertigte Prozessgasdüsen, von denen eine z. B. bei der PBF-LB/M-Anlage EOS M270 am Lehrstuhl Fertigungstechnik eingebaut ist, nachbehandelt werden. Über einen Vergleich der Druckdifferenz ließe sich so eine Auswirkung der Nachbehandlung feststellen. Ebenso könnten Kanäle im Falle einer Nachbehandlung auf ihre Strömungseigenschaften hin untersucht werden.

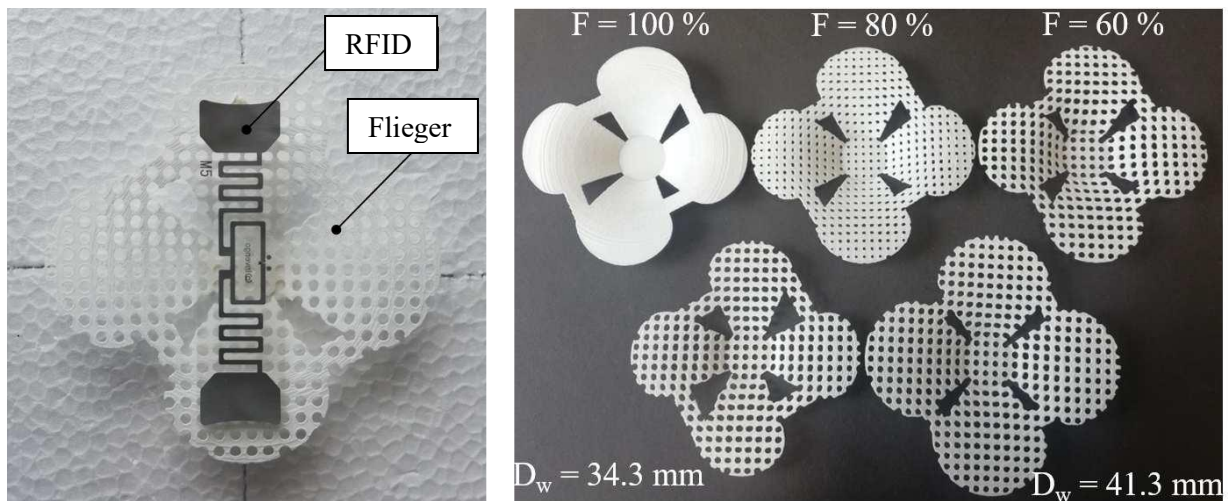


Abbildung 7-1: PBF-LB/P-gefertigte Flieger, links mit RFID-Applikation, rechts verschiedene Modelle [244]

Ein weiteres Beispiel aus der Forschung ist die Erfassung von Umweltparametern mit Hilfe von RFID- (radio-frequency-identification-)Infrastrukturen, die auf Fliegern, die einer Blüte ähneln, aufgebracht werden. Solche Flieger wurden bereits am Lehrstuhl Fertigungstechnik mittels PBF-LB/P aus PA12 in verschiedenen Varianten (Durchmesser ca. 80 mm) gefertigt. Dabei sind die Aerodynamik und die Masse von großer Bedeutung. Eine Nachbehandlung könnte Einfluss auf die Aerodynamik zeigen, da die Rauheit reduziert und Kanten leicht abgerundet werden. [244]

Neben verschiedenen weiteren Anwendungsfeldern der Nachbehandlung, um Druckdifferenzen, die Aerodynamik, mechanische und topographische Eigenschaften usw. zu beeinflussen, wäre auch eine Datenbank von Interesse. So wäre es hilfreich, aufgeschlüsselt nach dem jeweils verwendeten additiven Fertigungsverfahren, dem Ausgangsmaterial und etwaigen Füllstoffen die Nachbehandlungsmethoden mit erreichbaren Werten (z. B. Rauheit und mechanische Eigenschaften) in einer Datenbank zu erfassen. Damit könnten Nachbehandlungsmethoden qualifiziert und je nach Anwendungsfall, z. B. bei erforderlicher Eignung für die Lebensmittelindustrie oder die Medizintechnik, optimal eingesetzt werden. Ebenso ließen sich Aspekte wie Kosten oder die Umweltbeeinflussung aufführen. Die zuletzt genannten Punkte könnten im Allgemeinen für eine Gegenüberstellung unter Berücksichtigung der erreichbaren Qualität untersucht werden.

Eine Kombination aus MEX-Verfahren und Nachbehandlung während der Fertigung könnte neben der Oberflächennachbehandlung auch das Infill, also die innenliegenden Strukturen, mit glätten und somit beeinflussen. In einem derzeit laufenden AiF-ZIM Projekt „InNa-MEX – Erforschung und Entwicklung des Verfahrens der Lasernachbehandlung für die In-situ-Anwendung sowie Entwicklung eines kombinierten Einsatzes von Nachbearbeitungsmöglichkeiten (Laser, Wasser-Chemikaliensprühkopf) zur Materialersparnis“ wird der beschriebene Ansatz mit verschiedenen Nachbehandlungsmethoden am Lehrstuhl Fertigungstechnik untersucht. Es konnte z. B. bereits allgemein nachgewiesen werden, dass die Bruchdehnung mit einer chemischen bzw. physikalischen Nachbehandlung zunimmt. Somit wäre ein Vorteil bei nicht zu 100 % gefüllten MEX-Bauteilen, die in der Regel mit einer Fülldichte zwischen 5 % und 20 % gefertigt werden, dass eine Steigerung der Bruchdehnung das gesamte Bauteil betraf.

Ausblick

Noch ist der Markt der Dienstleister und Anbieter von Nachbehandlungsanlagen relativ klein. Ist dabei das Grundprinzip, die Bauteile mit einem verdampften Medium nachzubehandeln, bei allen Anbietern gleich, liegen die Unterschiede in der Größe der Anlage und in den Möglichkeiten der nachzubehandelnden Kunststoffe. Bei den günstigeren Anlagen im Bereich der Materialextrusion können nur eigene Filamente des Anlagenherstellers [245] geglättet werden oder es lässt sich nur eine Kunststoffgrundart bearbeiten (s. Zortrax, ABS [137]). Trotz dieser bislang spürbaren Einschränkungen ist seit Jahren ein wachsender Trend zu beobachten, dass Projektträger entsprechende Anträge im Bereich der Forschung bewilligen. Unverkennbar ist daher das große Interesse, die Eigenschaften (Oberflächentopographie, mechanische Parameter usw.) und Grenzen, wie z. B. Gitterstrukturen, Kanäle oder Hinterschneidungen, zu untersuchen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Anzahl der zwischen 2017 bis 2022 aus den meistgenutzten AF-Materialien hergestellten Produkte, Auszug aus [12].....	2
Abbildung 1-2: Anzahl der Anbietenden von Materialien für die AF-Verfahren PBF-LB/P und MEX von 2017 bis 2020, Auszug aus [27]	3
Abbildung 1-3: Graphische Darstellung eines Volumenmodells (links) und Zerlegung des Volumenmodells in einzelne Schichten (rechts) zur Darstellung der Schichtbauweise, aus und nach [28]	3
Abbildung 1-4: Schematische Darstellung eines quadratischen AF-Bauteils, abgeleitet aus einer Skizze und dem Schichteffekt.....	4
Abbildung 1-5: Anzahl der verkauften MEX-Anlagen von 2007 bis 2022 [12, 41].....	5
Abbildung 2-1: Graphische Darstellung der sechs Hauptgruppen der AF-Verfahren mit Polymeren nach [10] mit Verfahrensbezeichnung nach DIN EN ISO/ASTM 52900.....	7
Abbildung 2-2: Die fünf Hauptverfahrensschritte der additiven Fertigung	8
Abbildung 2-3: Schematische Darstellung des PBF-LB/P-Prozesses nach [54] mit Nummerierungen einzelner Anlagenkomponenten.....	10
Abbildung 2-4: Schematische Darstellung einer Draufsicht auf eine beschichtete PBF-LB/P-Fläche mit einer belichteten Kontur (grün) eines Bauteilquerschnitts zzgl. eine Vergrößerung der belichteten Kontur mit zusätzlicher Beschriftung	11
Abbildung 2-5: Schematische Darstellung des Materialextensionsprozesses nach [54] mit Nummerierung einzelner Komponenten	12
Abbildung 2-6: Schematische Darstellungen von quadratischen MEX-Bauteilen, links Draufsicht (y-x-Ebene) und rechts Seitenansicht (z-x-Ebene) mit Nummerierung einzelner Beschaffenheiten.....	13
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Zugrichtung, dargestellt mit grünen-Pfeilen und F (Kraft) an z- (links) und x- oder y-orientierten (rechts) Zugstäben (Ausschnitt).....	14
Abbildung 2-8: Schematische Darstellung von zwei Reflexionsarten nach [68], links: spiegelnde Reflexion, rechts: diffuse Reflexion.....	15
Abbildung 2-9: Graphischer Aufbau von Polymeren aus Monomeren (Ethylen/Polyethylen) in Anlehnung an [25] mit Verdeutlichung der Atome und Bindungen	16
Abbildung 2-10: Strukturformel von PA12 nach [23].....	17
Abbildung 2-11: Darstellung der Polymerketten mit Hervorhebung der Wasserstoffbrückenbindungen (grün markiert) in PA12 nach [83, 85]	17
Abbildung 2-12: Teilkristalliner Thermoplast nach [83, 86], in Schwarz, knäuelartig: amorpher Bereich in Grau, lamellenartig: kristalliner Bereich	18
Abbildung 2-13: Darstellung des isotaktischen Polypropylen	19
Abbildung 2-14: Darstellung der notwendigen und optionalen Nachbehandlungsoptionen mit Beispielen.....	20
Abbildung 2-15: Schematischer Ablauf in drei Schritten des Dip-Coatings am Beispiel einer rechteckigen Probe mit Nummerierungen.....	23
Abbildung 2-16: Schematische Darstellung eines Gleitschleifbehälters mit Prozesswasserzuführung, Bauteilen und Gleitschleifkörpern	25

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-17: Zortrax Apoller, Nachbehandlungsanlage und nachbehandelte Bauteile [139].....	27
Abbildung 2-18: Einflüsse auf die Additive Fertigung, Diagramm nach Ishikawa [22, 153], Darstellung für das PBF-LB/P- und das MEX-Verfahren mit Hervorhebung der Nachbehandlungsarten	31
Abbildung 2-19: Auszug aus Abbildung 2-18, Teil des dargestellten Ishikawa-Diagramms	32
Abbildung 2-20: Hanse'sche Löslichkeitsparameter im dreidimensionalen Raum bei Raumtemperatur.....	35
Abbildung 2-21: Tellerfliehkraftmaschine CF 1x18 des Herstellers OTEC GmbH [133] mit Nummerierung einzelner Komponenten	37
Abbildung 3-1: Schaubild zur Aufgabenstellung, aufgeteilt in vier Blöcken: Ausgangsmaterial, Nachbehandlungsmethode, Charakterisierung der Bauteileigenschaften und des Einflusses der Nachbehandlungsmethode, zzgl. der einzelnen Schritte.....	40
Abbildung 4-1: Darstellung eines Vielzweckprüfkörpers Typ 1A nach DIN EN 527-2 mit Skizze eines Probekörpers für Vorversuche	44
Abbildung 4-2: Probekörper „S“ mit Säulen und Löcher, Maße in der Zeichnungsableitung im Anhang 7	45
Abbildung 4-3: Probekörper „W“ mit Wänden, Maße in der Zeichnungsableitung im Anhang 7	45
Abbildung 4-4: Probekörper „E“ mit Ecken und rechteckigen Aussparungen, Maße in der Zeichnungsableitung im Anhang 7	46
Abbildung 4-5: Baujoblayout der Probenfertigung „W“, dargestellt in Orange, „E“ und „S“ auf der PBF-LB/P-Anlage Formiga P100	46
Abbildung 4-6: Baujoblayout der liegenden Zugproben auf der PBF-LB/P-Anlage Vanguard	47
Abbildung 4-7: Baujoblayout der stehenden PP-Zugstäbe auf der PBF-LB/P-Anlage Vanguard	47
Abbildung 4-8: Orientierung der Nylon-12-MEX-Zugstäbe auf der Fortus 450mc, beispielhaftes Baujoblayout zur Anzeige der jeweiligen Ausrichtung (A, B und C).....	48
Abbildung 4-9: Orientierung der PA12-MEX-Zugstäbe im virtuellen Bauraum einer MEX- Desktopanlage „Qidi X-pro“	49
Abbildung 4-10: Potentielle Einflussgrößen nach Ishikawa durch das Gleitschleifen von AF- Bauteilen zur Reduzierung der Rauheit und Veränderung der mechanischen Eigenschaften nach [67].....	50
Abbildung 4-11: Potentielle Einflussgrößen nach Ishikawa durch die Nachbehandlung eines AF- Bauteils mit einer Chemikalie zur Reduzierung der Rauheit und Veränderung der mechanischen Eigenschaften nach [67]	52
Abbildung 4-12: Graphische Darstellung einer Apparatur zur Nachbehandlung von PA12-Proben mit TFA-Dampf	54
Abbildung 4-13: Schematische Darstellung einer taktilen Rauheitsmessung mit Nummerierung wichtiger Komponenten	55
Abbildung 4-14: Ermittlung des Rauheitswertes Rz, Darstellung des Rauheitsprofils mit Einteilung der Einzelmessstrecken und Anzeige der einzelnen Rautiefen nach [190].....	55
Abbildung 4-15: Schematische Darstellung eines Lichtmikroskops mit Nummerierung einzelner Komponenten	57
Abbildung 4-16: Schematische Darstellung einer Universalprüfmaschine nach [195] mit eingespannter Zugprobe und Nummerierung einzelner Komponenten	58
Abbildung 4-17: Spannungs-Dehnungs-Diagramm [197] mit Hooke'scher Gerade und Angabe zur Berechnung des E-Moduls	59

Abbildung 4-18: Schematische Darstellung eines MVR-Messgeräts mit Belastungsgewicht und heraustretender Polymerschmelze mit Nummerierung einzelner Komponenten.....	61
Abbildung 4-19: Schematischer Aufbau einer DSC-Analyseeinheit nach [210] mit Angabe der Wärmeströme	61
Abbildung 4-20: Thermogramm einer DSC-Analyse mit Darstellung einer Aufheiz- und Abkühlphase.....	62
Abbildung 4-21: Ausschnitt aus der Aufheizphase des Thermogramms aus Abbildung 4-20 (links) und von einem bearbeiteten Thermogramm (rechts)	63
Abbildung 4-22: Schematische Darstellung einer Thermowaage in Anlehnung an [225] mit Nummerierung einzelner Komponenten	64
Abbildung 4-23: TG-Kurve von PA12 mit einstufiger Massenabnahme nach [79, 222] mit Markierungen von Temperaturpunkten (A, B und C).....	64
Abbildung 4-24: Graphische Darstellung der Probenvorbereitung für TGA mit zwei verschiedenen Fertigungsverfahren und zwei verschiedenen resultierenden Probenformen.....	65
Abbildung 5-1: Unbehandelte vs. nachbehandelte Probe (links), nachbehandelte PA12 Zugproben mit Salzsäure zu unterschiedlichen Eintauchzeiten (rechts)	67
Abbildung 5-2: Diagramm von mit Salzsäure nachbehandelten PA12-Proben, Rauheit und Breite über die Einwirkzeit	68
Abbildung 5-3: Mikroskopieaufnahmen der unbehandelten (links) und der mit Salzsäure nachbehandelten (rechts) PA12-Zugprobe, Graphik in Anlehnung an [31].....	68
Abbildung 5-4: REM-Aufnahmen von PA12-Proben – Nachbehandlung mit Salzsäure, nach [31]	69
Abbildung 5-5: Diagramm von mit Chloroform nachbehandelten PA12-Proben, Rauheit und Breite über die Einwirkzeit	69
Abbildung 5-6: Mit Salpetersäure nachbehandelte PA12-Zugproben zu unterschiedlichen Eintauchzeiten	70
Abbildung 5-7: Diagramm von mit Schwefelsäure nachbehandelten PA12-Proben, Rauheit und Breite über die Einwirkzeit	70
Abbildung 5-8: Diagramm von mit Salpetersäure nachbehandelten PA12-Proben, Rauheit und Breite über die Einwirkzeit	71
Abbildung 5-9: Mikroskopieaufnahmen der unbehandelten (links) und der mit Salpeter nachbehandelten (rechts) PA12-Zugprobe, Graphik in Anlehnung an [31].....	71
Abbildung 5-10: REM-Aufnahmen von PA12-Proben – Nachbehandlung mit Salpetersäure, nach [31].....	72
Abbildung 5-11: Unbehandelte PA12-Zugprobe mit Ausschnitt (links), TFA-nachbehandelte PA12-Zugprobe mit anschließender Neutralisation (rechts).....	72
Abbildung 5-12: Diagramm der Rauheit und Breite der TFA-nachbehandelten Proben	73
Abbildung 5-13: Mikroskopieaufnahmen der unbehandelten (links) und der TFA-nachbehandelten (rechts) PA12-Zugprobe, Graphik in Anlehnung an [31].....	73
Abbildung 5-14: REM-Aufnahmen von PA12-Proben, links unbehandelt, Mitte und rechts Nachbehandlung mit TFA, nach [31].....	74
Abbildung 5-15: Diagramm der Rauheit und Breite der mit TFA-Dampf nachbehandelten Proben....	74
Abbildung 5-16: Mikroskopieaufnahmen der unbehandelten (links) und der mit TFA-Dampf nachbehandelten (rechts) PA12-Zugprobe, Graphik in Anlehnung an [31].....	75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5-17: Zusammenfassung der Ergebnisse zu mit Salzsäure, Salpetersäure und TFA nachbehandelten PA12-Proben	76
Abbildung 5-18: Diagramm der Rauheit und Breite der Gleitschleifproben	77
Abbildung 5-19: Probekörper „E“ nach der Nachbehandlung	78
Abbildung 5-20: Probekörper „W“ nach der Nachbehandlung	78
Abbildung 5-21: Probekörper „S“, links vor der Nachbehandlung und rechts mit verkantetem Gleitschleifkörper.....	79
Abbildung 5-22: Unbehandelte PP-Zugprobe (Ausschnitt)	79
Abbildung 5-23: Unbehandelte PP-Probe (links) und nachbehandelte PP-Proben bei einer Einwirkzeit in Toluol von 30 s bis 5 min (rechts), Abbildung mit markierten Hinweisen.....	80
Abbildung 5-24: Einfluss des 100 °C warmen Toluols auf den Rz-Wert von PP-Proben zu verschiedenen Einwirkzeiten	80
Abbildung 5-25: Einfluss des 100 °C warmen Toluols auf die Rauheit und Breite der PP-Proben zwischen 1 min und 3 min Nachbehandlungszeit	81
Abbildung 5-26: Mit Toluol nachbehandelte PP-Proben, Eintauchzeit von 7 min bis 30 min	81
Abbildung 5-27: Mit 100 °C warmem Toluol nachbehandelte PP-Proben nach anschließender Neutralisation	82
Abbildung 5-28: Einfluss des 100 °C warmen Toluols auf PP-Proben mit und ohne Neutralisation ...	82
Abbildung 5-29: Mikroskopieaufnahmen der unbehandelten (links) und der nachbehandelten (rechts) PP-Zugprobe, Graphik in Anlehnung an [113].....	83
Abbildung 5-30: Mikroskopieaufnahmen der 2 min (links) und 3 min nachbehandelten (rechts) PP-Zugprobe, Graphik in Anlehnung an [113]	83
Abbildung 5-31: Veränderung der Oberflächenstruktur bei der chemischen Nachbehandlung von PP mittels 100 °C warmen Toluols bei variierten Eintauchzeiten(0, 1, 2 und 3 min) [113]	84
Abbildung 5-32: Veränderung der Rauheit und der Breite von PP-Bauteilen in Abhängigkeit von den Parametereinstellungen bei der mechanischen Nachbehandlung.....	85
Abbildung 5-33: Bauteilorientierung B (links) und unbehandelte PA12-MEX Zugprobe B.1 sowie nachbehandelte Proben (60 s TFA-Bad) B.2 bis B.4 (rechts).....	86
Abbildung 5-34: Rauheitswerte der MEX-PA12 Proben, z-Zugstäbe unbehandelt und im TFA-Bad	87
Abbildung 5-35: REM-Aufnahmen TFA-nachbehandelter Proben, links mit Neutralisation und rechts ohne Neutralisation.....	87
Abbildung 5-36: REM-Aufnahmen: unbehandelter MEX-Zugstab (Qidi) (links) und nachbehandelter MEX-Zugstab (Qidi), 60 s TFA-Bad (rechts).....	88
Abbildung 5-37: Vergleich der Zugfestigkeit und Bruchdehnung von unterschiedlichen Eintauchzeiten der TFA-Nachbehandlung von z-orientierten PA12-Zugproben [31]	90
Abbildung 5-38: Vergleich des E-Moduls zu unterschiedlichen Eintauchzeiten bei einer TFA-Nachbehandlung von z-orientierten PA12-Zugproben [31].....	90
Abbildung 5-39: Diagramm TFA Nachbehandlung von y-orientierten PA12-Zugproben, Zugfestigkeit und Bruchdehnung [31]	91
Abbildung 5-40: Diagramm zur TFA-Nachbehandlung von y-orientierten PA12-Zugproben, E-Modul [31, 230]	91

Abbildung 5-41: Vergleich der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung für unterschiedliche Eintauchzeiten bei der TFA-Dampf-Nachbehandlung von y-orientierten PA12-Zugproben [31]	92
Abbildung 5-42: Vergleich des E-Moduls zu unterschiedlichen Eintauchzeiten bei einer TFA-Dampf-Nachbehandlung von y-orientierten PA12-Zugproben [31]	92
Abbildung 5-43: Vergleich der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung der z-orientierten PA12-Zugproben [31]	94
Abbildung 5-44: Vergleich des E-Moduls nach dem Gleitschleifen (Parametereinstellungen I bis IV) von z-orientierten PA12-Zugproben [31]	94
Abbildung 5-45: Diagramm der Veränderung der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung in Abhängigkeit von der Nachbehandlungsdauer bei PP-Proben, Toluol-Nachbehandlung.....	95
Abbildung 5-46: Diagramm der Veränderung der Zugfestigkeit und der Bruchdehnung in Abhängigkeit von der Nachbehandlungsdauer bei PP-Proben, Gleitschleifen	96
Abbildung 5-47: Diagramme zur Veränderung des E-Moduls in Abhängigkeit von der Nachbehandlungsdauer der Toluol-Nachbehandlung bei 100 °C (links) und der Variation der Parameter beim Gleitschleifen (rechts).....	97
Abbildung 5-48: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der MEX-Zugproben (Fortus 450mc) in Anlehnung an [98].....	98
Abbildung 5-49: Zugfestigkeit und Bruchdehnung von PA12-MEX-Zugproben (Qidi), die mit TFA für 60 s nachbehandelt wurden	99
Abbildung 5-50: xz-Fertigungsorientierung nach Stratasys zur Ermittlung mechanischer Eigenschaften, Graphik nach [232].....	99
Abbildung 5-51: Zusammenfassung der Ergebnisse von TFA-nachbehandelten PBF-LB/P- und MEX-Zugstäben.....	100
Abbildung 5-52: Drei Optionen der Strangablegerichtung bei MEX in y-x-Richtung (liegend).....	101
Abbildung 5-53: MVR-Werte über die Interaktionszeit der in TFA nachbehandelten PA12-Proben (PBF-LB/P).....	102
Abbildung 5-54: Erstarre Polymerschmelze, links: unbehandelte Probe, rechts: 90 s TFA-Nachbehandlung.....	103
Abbildung 5-55: Thermogramm der unbehandelten PA12-Probe mit Aufheizphase in Schwarz und Abkühlphase in Grün mit zugehörigen Peaks	104
Abbildung 5-56: Mikroskopieaufnahmen von Querschnitten von PA12-Proben, links unbehandelt, Mitte und rechts nachbehandelt [31], mit Markierungen der Randschicht bei 10 s und 120 s Einwirkzeit von TFA	106
Abbildung 5-57: Einstufige TGA-Kurven von unbehandelten und nachbehandelten PA12-Proben, geraspelt, mit Markierungen 1 bis 5.....	107
Abbildung 5-58: Einstufige TGA-Kurve von unbehandelten und nachbehandelten PA12-Proben, geschnitten	108
Abbildung 7-1: PBF-LB/P-gefertigte Flieger, links mit RFID-Applikation, rechts verschiedene Modelle [247].....	115
Abbildung A-1: Diagramm zu den Rauheitswerte über die Eintauchzeit der y-Zugstäbe, TFA-Nachbehandlung.....	127
Abbildung A-2: Einfluss der Nachbehandlung mit TFA-Dampf auf die resultierende Rauheit R_z der PA12-natur Proben, x-orientiert.....	128

Abbildungsverzeichnis

Abbildung A-3: Diagramm TFA-Dampf von z-orientierten PA12-natur-Zugproben, Zugfestigkeit und Bruchdehnung	129
Abbildung A-4: Diagramm TFA-Dampf von z-orientierten PA12-natur-Zugproben, E-Modul	129
Abbildung A-5: Einfluss der TFA-Dampf-Nachbehandlung auf PA2201 + 30 % GK [249]	130
Abbildung A-6: Diagramm TFA-Dampf Nachbehandlung von y-orientierten PA12-Zugproben mit GK, Zugfestigkeit und Bruchdehnung [31]	131
Abbildung A-7: Diagramm TFA-Dampf Nachbehandlung von y-orientierten PA12-Zugproben mit GK, E-Modul [31].....	132
Abbildung A-8: Einfluss des 50 °C Toluols auf PP-Proben.....	133

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Ergebnisse von galvanisierten MEX- und PBF-LB/P-Proben	22
Tabelle 2-2: Ergebnisse von PA12-Proben nach dem Dip-Coating	23
Tabelle 2-3: Ergebnisse von PA12-Proben nach dem Lackieren und Färben	24
Tabelle 2-4: Ergebnisse von PBF-LB/P- und MEX-Proben nach dem Gleitschleifen.....	26
Tabelle 2-5: Ergebnisse von AF-Proben nach dem Tauchätzen und Bedampfen	29
Tabelle 2-6: Zusammenfassung der Nachbehandlungsarten und deren Eignung für MEX und PBF-LB/P, zzgl. [39, 136, 152, 153].....	30
Tabelle 2-7: Löslichkeitsparameter für PA12, PP und die verwendeten Chemikalien [166 bis 170] ...	34
Tabelle 2-8: Ra-Werte von PA12 zu den aufgeführten Chemikalien, berechnet nach Formel 6	35
Tabelle 4-1: Prozessparameter für PA12 mit 30 % GK aus [16]	42
Tabelle 4-2: Eingestellte Fertigungsparameter für Nylon 12/Fortus und PA12/Qidi.....	49
Tabelle 4-3: Vollfaktorieller Versuchsplan nach [182].....	51
Tabelle 4-4: Konzentrationen der verwendeten Chemikalien zur Nachbehandlung von PA12.....	53
Tabelle 4-5: Messbedingungen der durchgeführten Rauheitsmessung zur Bestimmung von R_z	56
Tabelle 5-1: Vollfaktorieller Versuchsplan mit resultierenden Effekten	76
Tabelle 5-2: Parameter beim Gleitschleifen	77
Tabelle 5-3: Einstellungen Gleitschleifen von Probe I, III und IV	84
Tabelle 5-4: Mechanische Eigenschaften der unbehandelten PA12-Zugstäbe [31, 66].....	89
Tabelle 5-5: Parametereinstellungen beim Gleitschleifen für die Nachbehandlung von PA12- Proben	93
Tabelle 5-6: DSC-Analyseergebnisse der unbehandelten und der nachbehandelten PA12-Proben mit TFA.....	105
Tabelle 5-7: Einstufige Masseabnahme der untersuchten PA12-Proben, Nachbehandlung im TFA-Bad zw. 10 s und 120 s Einwirkzeit, links Abbildung der Probenform	108
Tabelle A-1: Abgleich von Literatur- und Onlinequellen zur Beständigkeit bzw. Unbeständigkeit von Chemikalien für PA12 [22, 24, 72, 180 - 182, 246].....	125
Tabelle A-2: Abgleich von Literatur- und Onlinequellen zur Beständigkeit bzw. Unbeständigkeit von Chemikalien für PP [22, 66, 72, 90, 91, 246].....	126
Tabelle A-3: Prozessparameter der PA12 + GK nachbehandelten Zugproben	131

Anhang

Nr.	Bezeichnung
1	Abgleich von Literatur- und Onlinequellen zur Beständigkeit bzw. Unbeständigkeit von Chemikalien für <i>PA12</i>
2	Abgleich von Literatur- und Onlinequellen zur Beständigkeit bzw. Unbeständigkeit von Chemikalien für <i>PP</i>
3	Auswirkung der TFA-Nachbehandlung auf γ -PA12-Zugstäbe Topographischen Eigenschaften
4	Auswirkung der TFA-Nachbehandlung auf PA12-natur-Zugstäbe Topographischen Eigenschaften Mechanische Eigenschaften
5	Auswirkung der TFA-Nachbehandlung auf PA12-natur-Zugstäbe mit Glaskugeln Topographischen Eigenschaften Mechanische Eigenschaften
6	Auswirkung der 50 °C warmen Toluol - Nachbehandlung auf PP-Proben Topographischen Eigenschaften
7	Zeichnungsableitungen zu den Probegeometrien „S“, „W“ und „E“
8	Zusammenfassung der Ergebnisse der PBF-LB/P/PP und MEX/PA12 mit Bewertung für verschiedene Geometrien

1 Abgleich von Literatur- und Onlinequellen zur Beständigkeit bzw. Unbeständigkeit von Chemikalien für PA12

Tabelle A-1: Abgleich von Literatur- und Onlinequellen zur Beständigkeit bzw. Unbeständigkeit von Chemikalien für PA12 [23, 25, 75, 186 bis 188, 253]

Quelle	Hellerich Werkstoffführer Kunststoffe	Dominghaus Kunststoffe, Eigenschaften und Anwendung	Abts Kunststoffwissen für Einsteiger	Schwister Taschenbuch der Chemie	Evonik	EMS-Grivory	rct
Chemikalie							
Methansäure (Ameisensäure)	x			x	x		
Brom							
Benzylalkohol				x			
Chlor					x		
Chloroform	x						
Chlorsulfonsäure					x		
Chromsäure					x		
Chromschwefelsäure						x	
Essigsäure					x		
Fluor						x	
Flusssäure	x		x		x		
Formamid				x			
Gykol	x			x			
Jodtinktur						x	
Kaliumpermanganat						x	
Königswasser					x		
Kresol	x			x			
Oleum					x		
Phenol				x			
Phosphorsäure					x		
Resorcin						x	
Salpetersäure					x		
Salzsäure					x		
Schwefelsäure					x		
Thionylchlorid					x		
Trifluoressigsäure						x	
Mineralsäuren	x						x
oxidierende Säuren		x					
starke Laugen	x						
starke/schwache Säuren		x	x				x
oxyd. Verbindungen			x				
Carbonsäure							
Halogene		x	x				

2 Abgleich von Literatur- und Onlinequellen zur Beständigkeit bzw. Unbeständigkeit von Chemikalien für PP

Tabelle A-2: Abgleich von Literatur- und Onlinequellen zur Beständigkeit bzw. Unbeständigkeit von Chemikalien für PP [23, 69, 75, 93, 94, 253]

Quelle	Hellerich Werkstoffführer Kunststoffe	Dominginghaus Kunststoffe, Eigenschaften und Anwendung	Schwister Taschenbuch der Chemie	Schwarz/Ebeling Kunststoffkunde	Ehrenstein/ Pongratz Beständigkeiten von Kunststoffen	Reinhardt
Chemikalie						
Benzin	x			x		
Benzol	x			x		
Chlorsulfonsäure		x			x	
Salpetersäure, konzentriert		x			x	
Schwefelsäure, rauchend		x				
Toluol						x
Oleum					x	
oxidierende Säuren, stark bzw konzentriert.	x		x	x		
Halogene			x	x	x	

3 Auswirkung der TFA-Nachbehandlung auf y-PA12-Zugstäbe

Topographischen Eigenschaften

In der folgenden Abbildung A-1 ist das Diagramm mit den Rauheitswerte der nachbehandelten y-Zugstäben mit den Werten der Ober- und Unterseite zu sehen.

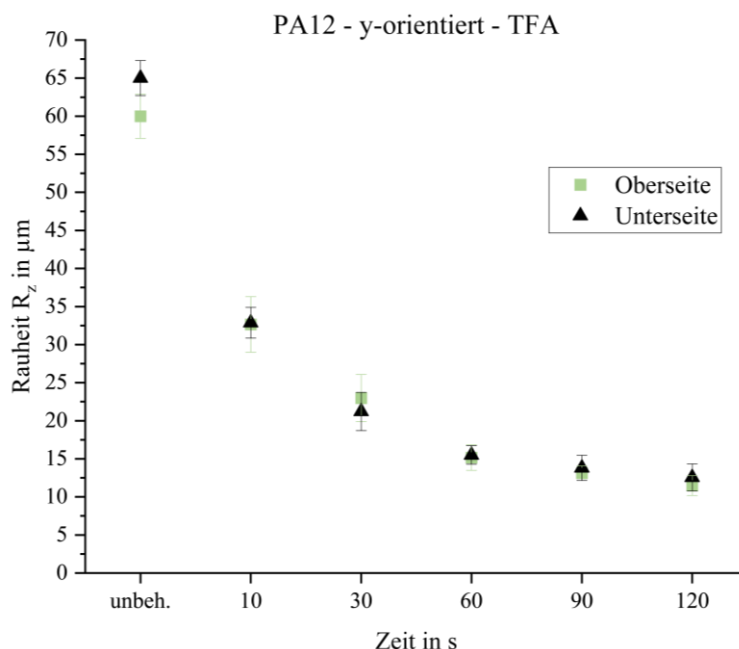


Abbildung A-1: Diagramm zu den Rauheitswerte über die Eintauchzeit der y-Zugstäbe, TFA-Nachbehandlung

Für die Oberseite der y-orientierte Probe liegt der Ausgangswert der Rauheit bei ca. 60 μm und für die Unterseite bei ca. 65 μm . Durch die Nachbehandlung liegt die Abweichung der Rauheit von Ober- zur Unterseite im Bereich der Standardabweichung. Die Entwicklung der Abnahme Oberflächenrauheit ist bei beiden Orientierungen identisch. Nach 120 s Eintauchzeit geht der Rauheitswert R_z Richtung 10 μm .

4 Auswirkung der TFA-Nachbehandlung auf PA12-natur-Zugstäbe

Topographischen Eigenschaften

In einem ersten Schritt werden die PA12-Proben, die auf der PBF-LB/P-Anlage „Vanguard“ hergestellt wurden, auf ihre Oberflächentopographie untersucht. Das verwendete PA12 Pulver ist ein PA 2201. Im Gegensatz zu dem PA 2200, wird dem Pulver kein Titandioxid als Farbpigment beigemischt. Bei den Messungen werden die in x-Richtung, also liegend, gefertigte Zugproben auf ihrer Ober- und Unterseite gemessen. Mit einem durchschnittlichen R_z -Wert von ca. 83 μm und einer Standardabweichung von 4,4 μm liegen die Werte im Falle der unbehandelten Proben im erwarteten Bereich.

Im Diagramm in Abbildung A-2 sind die Ergebnisse der nachbehandelten Proben dargestellt. Die erzielten Rauheitswerte unterschieden sich in den meisten aufgeführten Fällen signifikant zwischen Ober- und Unterseite, wobei die Rauheit der Unterseite des Probekörpers einen höheren Wert als die Oberseite aufweist. Mit zunehmender Nachbehandlungszeit von 5 min zu 6 min Verweilzeit im TFA-Dampf

nimmt die Rauheit der Proben ab. Eine weitere Abnahme der Oberflächenrauheit bei einer Nachbehandlungsdauer von 7 min ist hier nicht zu erkennen. Je nach Ausgangswert reduziert sich die Rauheit durch die chemische Nachbehandlung auf bis zu 18 μm . Für die Übersichtlichkeit werden nur die gemessenen Rauheitswerte der Oberseiten der x-Zugproben dargestellt.

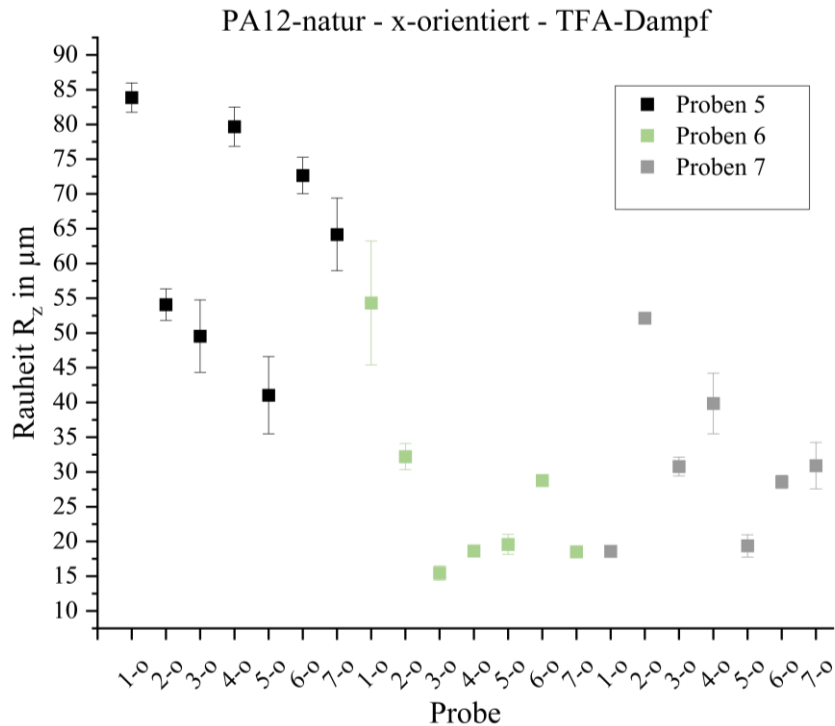


Abbildung A-2: Einfluss der Nachbehandlung mit TFA-Dampf auf die resultierende Rauheit R_z der PA12-natur Proben, x-orientiert

Es sind starke Schwankungen bei den jeweils sieben Proben pro Nachbehandlungszeit zu erkennen. Mit steigender Verweilzeit nimmt auch bei den mit TFA-Dampf nachbehandelten Proben die Standardabweichung gemittelt ab. Bei den 6 min nachbehandelten Proben ist ein Ausreißer (1-o) zu erkennen, hier liegt neben einer höheren Rauheit auch eine höhere Standardabweichung als bei den anderen Proben zur selben Verweilzeit vor. Eine mögliche Erklärung könnte die zufällig gewählte Positionierung in der Behandlungskammer sein. Proben, die näher am Randbereich aufgehängt wurden, können ggf. keine gleichmäßige Nachbehandlung durch den Dampf erfahren haben. Aus dieser Vermutung resultiert, dass beim Nachbehandeln auf die Positionierung in der Kammer geachtet werden muss, um eine gleichmäßige Nachbehandlung für alle in der Kammer befindlichen Proben zu gewährleisten.

Mechanischen Eigenschaften

In Abbildung A-3 ist der E-Modul und die Zugfestigkeit von PA12-Proben in ihrer Abhängigkeit der verschiedenen Nachbehandlungszeiten zu erkennen. Der E-Modul der nachbehandelten PA12-Proben verringert sich bei einer Nachbehandlungszeit von 5 min um 5 % im Vergleich zu den unbehandelten Probekörpern. Längere Nachbehandlungszeiten von 6 min und 7 min führen zu einem leichten, kaum relevanten Anstieg (um ca. 1 % bis 2 %) des Elastizitätsmoduls. Diese Werte sind niedriger als der E-

Modul von 1620 MPa der unbehandelten PA12-Zugprobe. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die TFA-Nachbehandlung den Elastizitätsmodul der PBF-LB/P-gefertigten PA12-Proben nur unwesentlich reduziert hat. Gleichzeitig bleibt die Zugfestigkeit zwischen 44 N/mm² und 45 N/mm² nahezu konstant. Dies zeigt, dass die Nachbehandlung keinen negativen Einfluss auf die Zugfestigkeit der PBF-LB/P/PA12 natur-Proben besitzt.

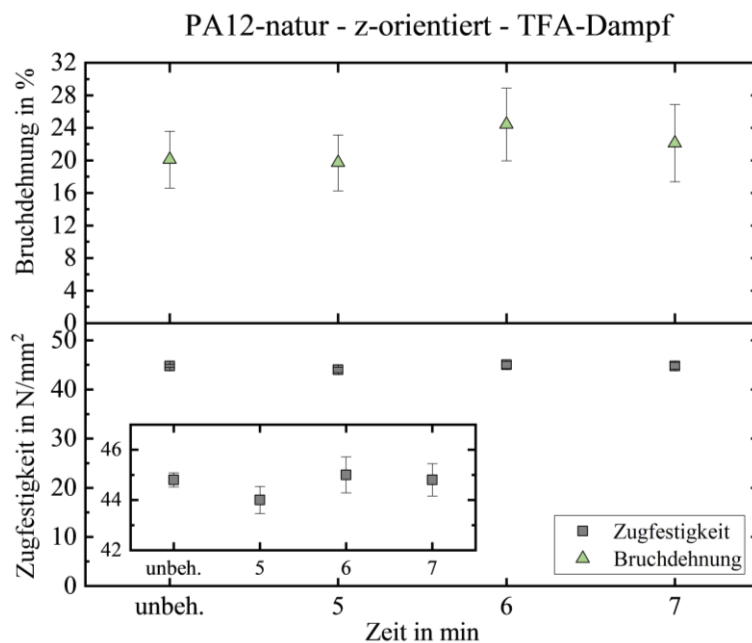


Abbildung A-3: Diagramm TFA-Dampf von z-orientierten PA12-natur-Zugproben, Zugfestigkeit und Bruchdehnung

Nachbehandelte Proben zeigen einen leichten Anstieg des E-Moduls (s. Abbildung A-4), die jedoch unterhalb des Ausgangswertes der unbehandelten Probe ($E = 1620 \text{ N/mm}^2$) liegen.

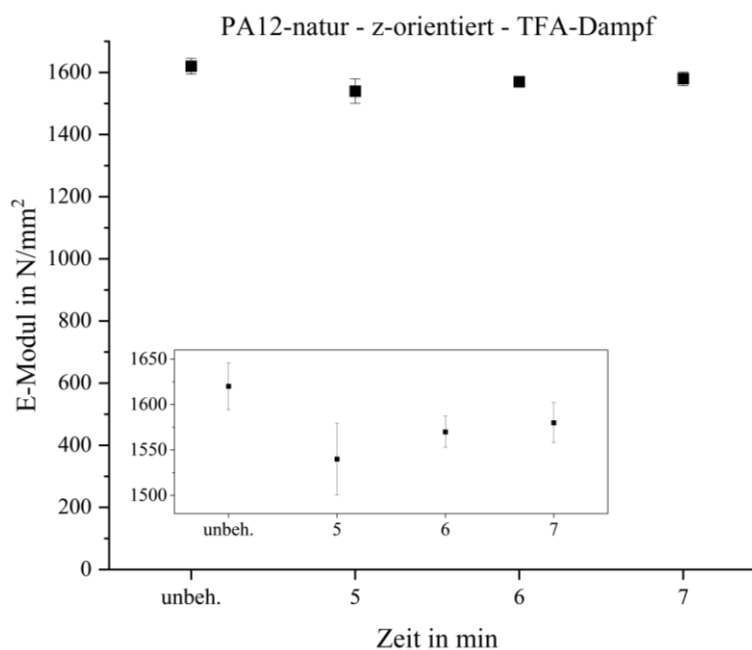


Abbildung A-4: Diagramm TFA-Dampf von z-orientierten PA12-natur-Zugproben, E-Modul

Im Gegensatz zu PA12 Zugproben, die im Tauchätzbad nachbehandelt werden, zeigen die dampfnachbehandelten Proben geringere Abweichungen bei den mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu den unbehandelten Proben.

5 Auswirkung der TFA-Nachbehandlung auf PA12-natur-Zugstäbe mit Glaskugeln

Topographischen Eigenschaften

In einer weiteren Versuchsreihe wird PA2201 mit 30 vol% Glaskugeln gemischt und auf einer Vanguard verarbeiten.

Ausgehend von den Nachbehandlungsergebnissen der PA2201-Proben mit TFA-Dampf, werden die liegenden PA2201 + 30 vol% GK-Zugproben für 6 min im gleichen Versuchsaufbau nachbehandelt. In dem Diagramm ist eine Abweichung der Rauheit von Ober- zur Unterseite basierend auf den Ausgangswerten zu erkennen. Nach der TFA-Dampf-Nachbehandlung von sechs Minuten reduziert sich der R_z -Wert nahezu um die Hälfte zu dem Ausgangswert, Abbildung A-5. Aus Tabelle 4-1 sind die Prozessparameter für die Proben V1-V3 zu entnehmen.

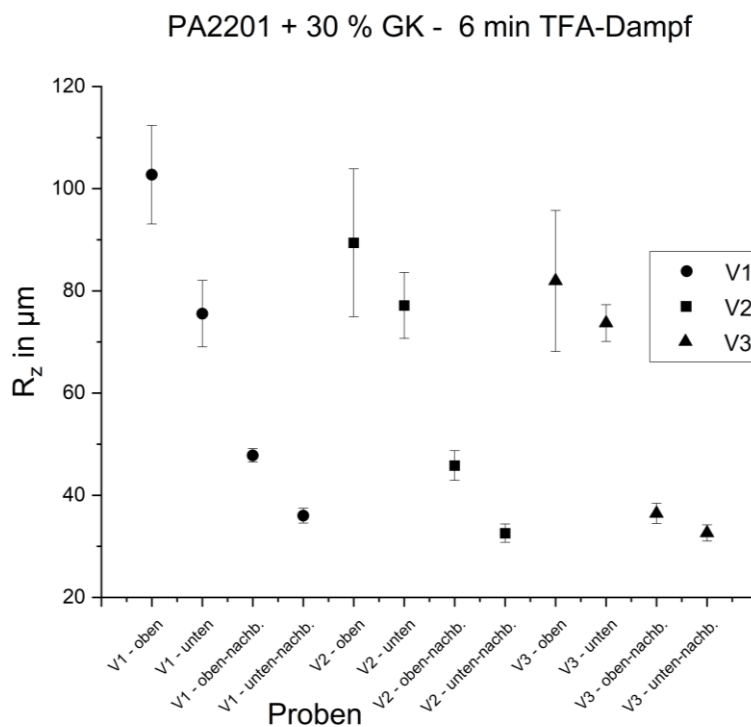


Abbildung A-5: Einfluss der TFA-Dampf-Nachbehandlung auf PA2201 + 30 % GK [247]

Bei allen Proben ist neben einer Abnahme der Rauheit auch eine Reduzierung der Standardabweichung zuerkennen. Wie bei den PA2201 liegenden Zugproben ist ebenfalls hier die prozesstypische charakteristische Abweichung von Ober- zur Unterseite zu messen.

Mechanische Eigenschaften

In dieser Versuchsreihe wird der Einfluss der TFA-Dampf-Nachbehandlungsmethode auf y-orientierten Zugproben untersucht, die aus PA12-natur mit Glaskugeln vermischt gefertigt wurden. Es zeigt sich gegenüber den PA12-Zugproben ohne Glaskugeln, dass die Zugfestigkeit um ca. 4,5 % zunimmt, vgl. Abbildung A-6. Hier liegt eine Abnahme um ca. 3 % vor. Bei der Untersuchung der Bruchdehnung wurde ein leichter Rückgang der Werte mit zunehmender Energiedichte festgestellt. Bei den Proben, die mit den Prozessparametern V1 (vgl. Tabelle A-3) hergestellt wurden, sank die Bruchdehnung nach der Nachbehandlung von 1,48 % auf 1,42 %. Gleichzeitig wurde bei den V2-Proben vor und nach der TFA-Dampf-Nachbehandlung nahezu kein Unterschied bei den Werten festgestellt. Dagegen steigt die Bruchdehnung der V3-Proben nach der Nachbehandlung um 6,5 % an.

Tabelle A-3: Prozessparameter der PA12 + GK nachbehandelten Zugproben

Experimentnr.	Oberflächenenergiedichte Es in J/mm ²	Laserleistung P in W	Prozesstemperatur T in °C
V 1	0,018	36,6	175
V 2	0,021	42,7	175
V 3	0,024	48,8	175

Insgesamt zeigt sich ein marginaler Einfluss der Laserleistung und der Oberflächenenergiedichte, dessen Untersuchung für das "LS-Prop"-Projekt von Interesse sind und hier nur als unterschiedliche Ausgangswerte betrachtet werden.

Alle erfassten Werte der Bruchdehnung sind jedoch mit ca. 1,43 % nahezu konstant und liegen innerhalb der Standardabweichung, s. Abbildung A-6.

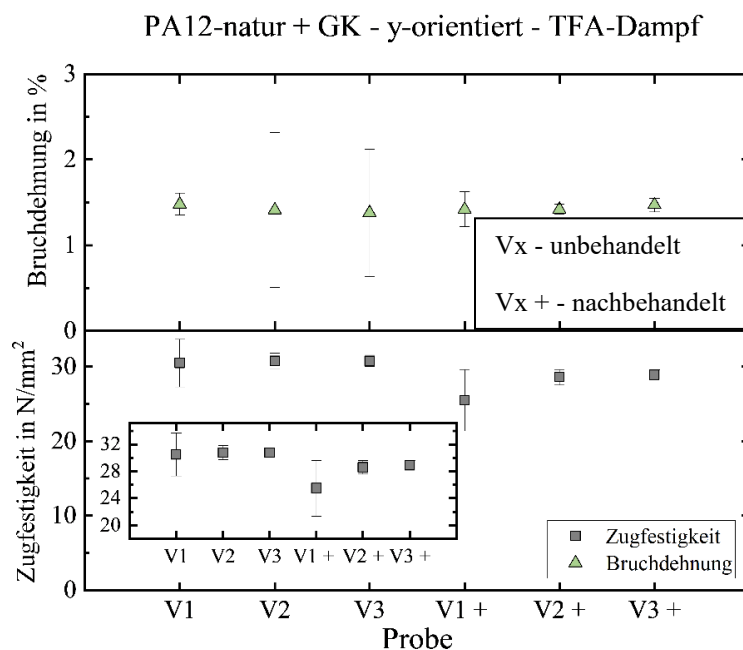


Abbildung A-6: Diagramm TFA-Dampf-Nachbehandlung von y-orientierten PA12-Zugproben mit GK, Zugfestigkeit und Bruchdehnung [30]

In Abbildung A-7 ist die E-Modul Zunahme für die PA12 y-orientierten Zugproben mit GK zu sehen. Die Prozessparameter zeigen einen signifikanten Einfluss auf den E-Modul der glasgefüllten Zugproben im unbehandelten Zustand. Der E-Modul steigt mit zunehmender Energiedichte von 3650 N/mm² auf 3900 N/mm². Die Zugfestigkeit bleibt für alle untersuchten PBF-LB/P-Prozessparameter bei ca. 30,6 N/mm². Nach einer 6-minütigen Nachbehandlung mit TFA-Dampf zeigen die glasgefüllten PA12-Proben die gleiche Tendenz wie die unvermischten PA12-Proben: Der E-Modul nimmt durch die Nachbehandlung leicht ab. So sinkt beispielsweise der E-Modul der V1-Proben nach der TFA-Dampf-Nachbehandlung von 3650 N/mm² auf 3320 N/mm². Hier ist die Standardabweichung auffällig, die bei den nachbehandelten Proben (V1 +), wie bei den unbehandelten Zugproben (V1) ebenfalls höher ist.

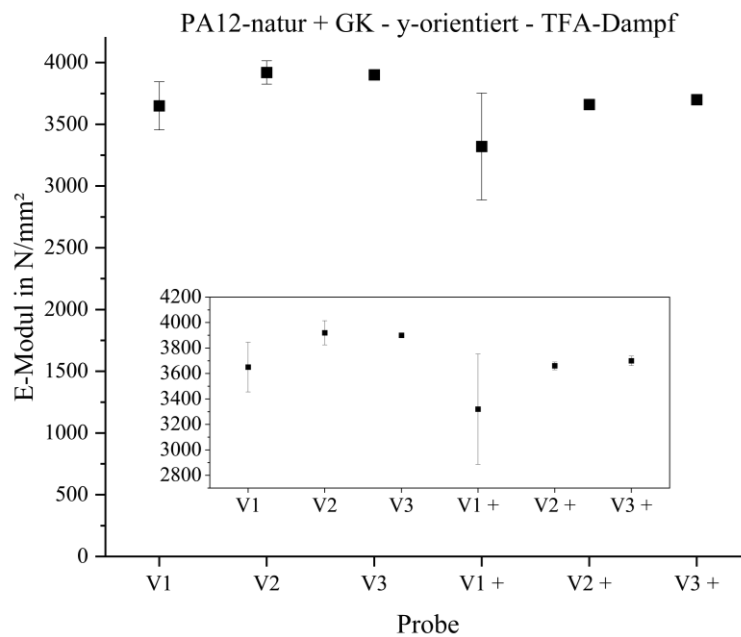


Abbildung A-7: Diagramm TFA-Dampf Nachbehandlung von y-orientierten PA12-Zugproben mit GK, E-Modul [30]

7 Auswirkung der 50 °C warmen Toluol - Nachbehandlung auf PP-Proben

Topographischen Eigenschaften

Zum Vergleich wurden PP-Proben neben einer Nachbehandlung bei 100 °C warmen Toluol auch bei 50 °C warmen Toluol für verschiedene Nachbehandlungszeiten, zwischen 5 min und 30 min, eingetaucht. Auch hier ist eine Abnahme der Oberflächenrauheit zu messen, diese liegt nach 10 min bei ca.

$R_z = 110 \mu\text{m}$. Mit zunehmender Interaktionszeit ab 10 min mit dem auf 50°C erwärmten Toluol nimmt der R_z -Wert weniger ab, s. Abbildung A-8.

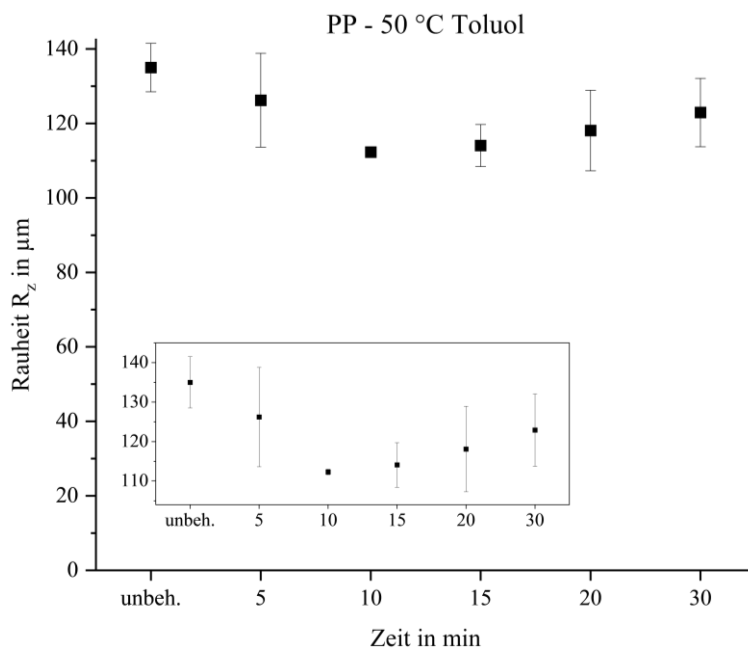
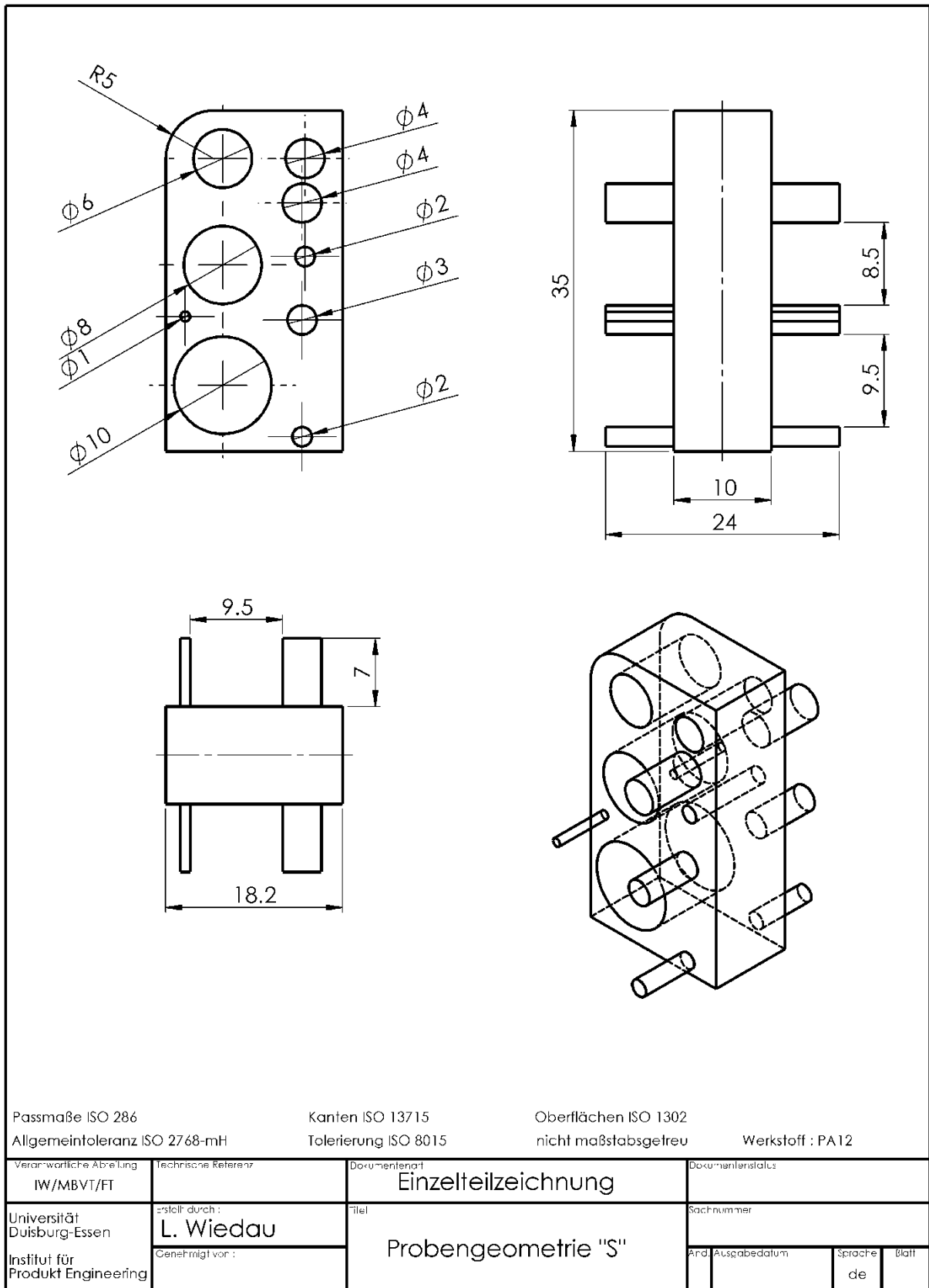


Abbildung A-8: Einfluss des 50°C Toluols auf PP-Proben

Zeichnungsableitungen



Passmaße ISO 286

Kanten ISO 13715

Oberflächen ISO 1302

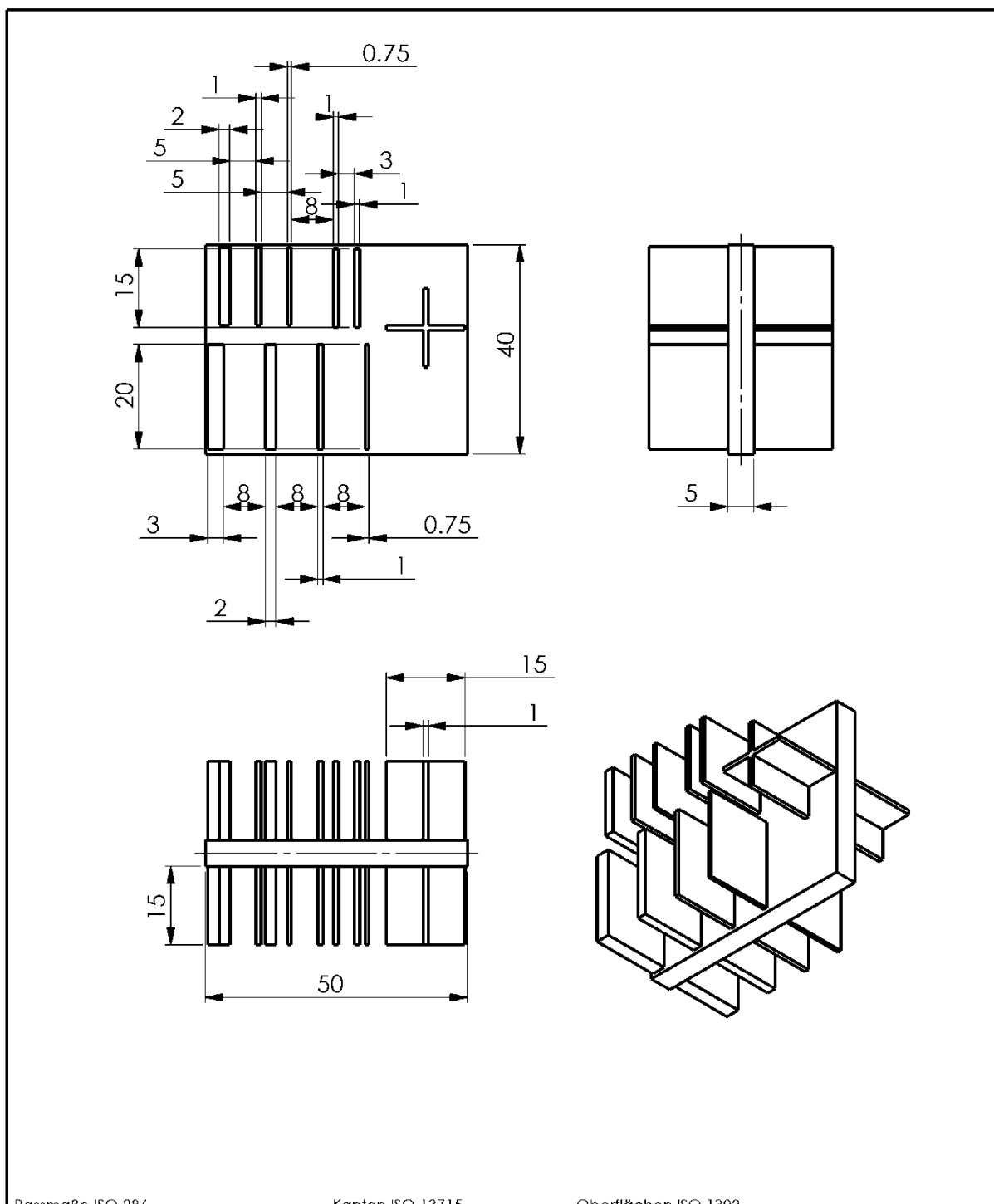
Allgemeintoleranz ISO 2768-mH

Tolerierung ISO 8015

nicht maßstabsgetreu

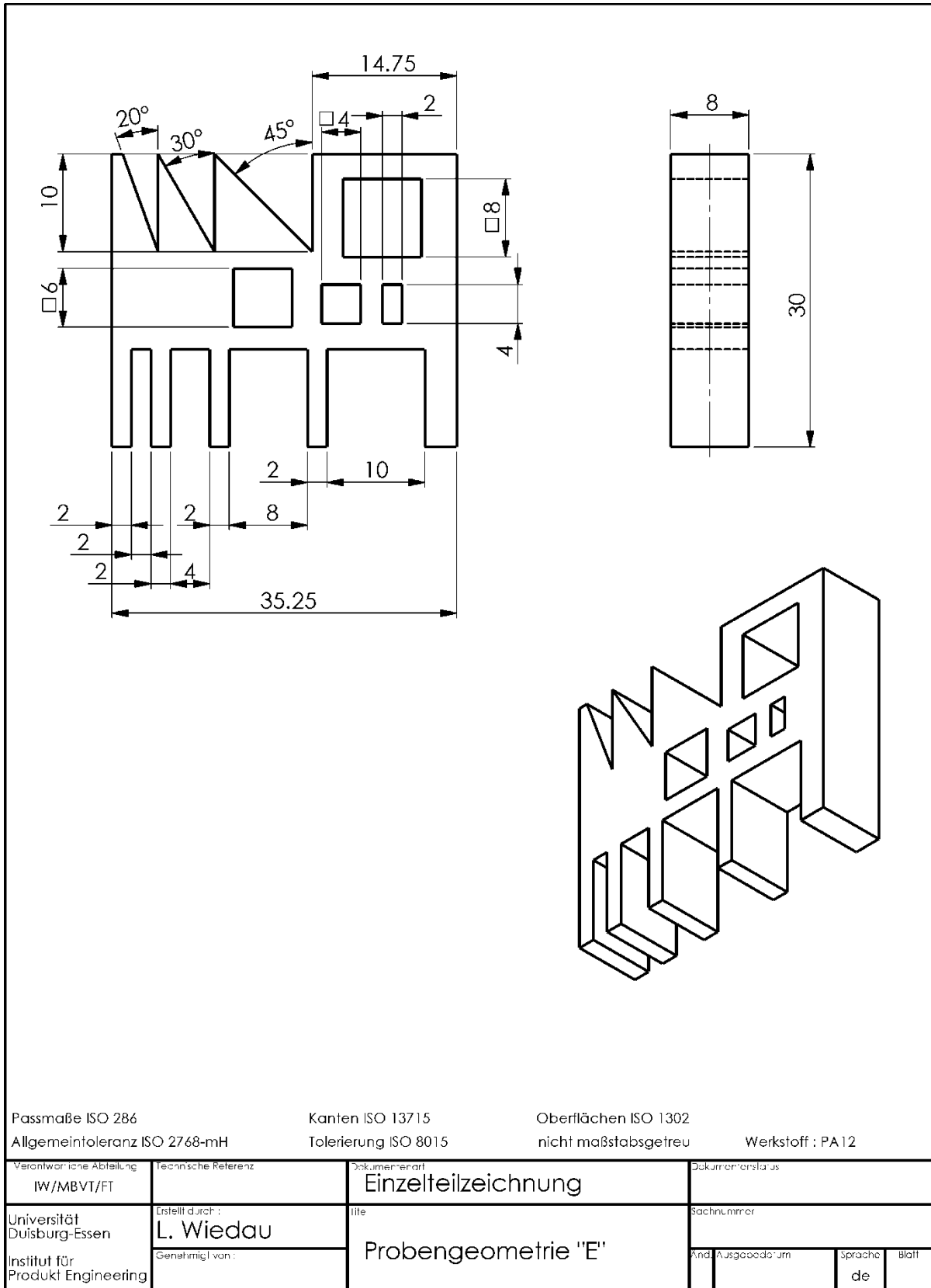
Werkstoff : PA12

Verantwortliche Abteilung IW/MBVT/FT	Technische Referenz	Dokumententyp Einzelteilzeichnung	Dokumentenzustand		
Universität Duisburg-Essen Institut für Produkt Engineering	erstellt durch: L. Wiedau	Titel Probengeometrie "S"	Sachnummer		
	Genehmigt von:		And. Ausgabedatum	Sprache de	Blatt



Passmaße ISO 286 Kanten ISO 13715 Oberflächen ISO 1302
 Allgmeintoleranz ISO 2768-mH Tolerierung ISO 8015 nicht maßstabsgetreu Werkstoff : PA12

Verantwortliche Abteilung IW/MBVT/FT	Technische Referenz	Documentart Einzelteilzeichnung	Documentenstatus	
Universität Duisburg-Essen Institut für Produkt Engineering	Erstellt durch : L. Wledau	Titel Probengeometrie "W"	Sachnummer	
	Genehmigt von :		Änd. Ausgabedatum	Sprache de



8 Zusammenfassung der Ergebnisse der PBF-LB/P/PP- und MEX/PA12-Proben mit Bewertung für verschiedene Geometriarten

Ergebnisse der z-orientierten PBF-LB/P/PP-Proben mit Empfehlung für verschiedene Geometrien				
Geometrie: <i>Simple: s / Simpel u. Massenprodukt: m / Komplex (Gitter/Hinterschneidungen): k</i>				
Bewertung: geeignet: + / bedingt geeignet ~ / nicht geeignet -				
	Ausgangswert	Toluol-Bad	Toluol-Dampf	Gleitschleifen
s		+	nicht stattgefunden	+
m		~ bis +		+
k		~ bis +		-
Rauheit R_r in μm	174,5	9,1		123,0
Bruchdehnung in %	8,1	17,4		8,3
Zugfestigkeit in N/mm^2	18,5	19,5		19,3
E-Modul in N/mm^2	802	842		812

Ergebnisse der y-orientierten MEX/PA12-Proben mit Empfehlung für verschiedene Geometrien				
Geometrie: <i>Simple: s / Simpel u. Massenprodukt: m / Komplex (Gitter/Hinterschneidungen): k</i>				
Bewertung: geeignet: + / bedingt geeignet ~ / nicht geeignet -				
	Ausgangswert	TFA-Bad	TFA-Dampf	Gleitschleifen
s		+	nicht stattgefunden	
m		~ bis +		
k		~ bis +		
Rauheit R_r in μm	74,2	20,1		
Bruchdehnung in %	2,1	2,1		
Zugfestigkeit in N/mm^2	31,3	21,8		
E-Modul in N/mm^2	975	1075		

Literaturangaben

- [1] N. N.: Globales Marktvolumen von 3D-Druck-Verfahren in ausgewählten Branchen im Jahr 2015 und eine Prognose für 2030 (in Milliarden Euro), Statista (Hrsg.), <https://de.statista.com>, zuletzt geprüft am: 26.01.2023
- [2] Radhika, C., et al.: A review on additive manufacturing for aerospace application, *Materials Research Express* 11 (2024) 2, S. 22001, doi: 10.1088/2053-1591/ad21ad
- [3] N. N.: Additive Fertigung biomechanisch personalisierter Medizintechnik, Fraunhofer IPA (Hrsg.), <https://www.ipa.fraunhofer.de>, zuletzt geprüft am: 20.03.2024
- [4] Torres, I. u. Luccia, N. de: Artificial vascular models for endovascular training (3D printing), *Innovative surgical sciences* 3 (2018) 3, S. 225–234, doi: 10.1515/iss-2018-0020
- [5] Dobischat, R., et al.: 3D Drucken in Deutschland, *Berichte aus dem Maschinenbau*, [s.l.]: Shaker 2015
- [6] Loy, J.; Novak, J. u. Diegel, O.: 3D Printing for Product Designers, London: Routledge 2023, doi: 10.4324/9781003122203
- [7] Salmi, M.: Additive Manufacturing Processes in Medical Applications, *Materials* (Basel, Switzerland) 14 (2021) 1, doi: 10.3390/ma14010191
- [8] Deckard, C. R., Method and apparatus for producing parts by selective sintering, Patent US4863538A, 1989
- [9] DIN EN ISO/ASTM 52900:2021, Additive Fertigung – Additive Fertigung Grundlagen – Terminologie, DIN-Normenausschuss Werkstofftechnologie, Luft- und Raumfahrt, Maschinenbau
- [10] Diegel, O.; Nordin, A. u. Motte, D.: A practical guide to design for additive manufacturing, Springer series in advanced manufacturing, Singapore: Springer 2020
- [11] Wohlers, T., et al.: Wohlers Report 2023, 3D printing and additive manufacturing: global state of the industry, Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates 2023
- [12] Becker, A. F. A.: Characterization and prediction of SLS processability of polymer powders with respect to powder flow and part warpage, Dissertation, ETH Zürich, 2016
- [13] N. N.: The State of 3D Printing, 2022 Edition, Sculpteo (Hrsg.), <https://www.sculpteo.com>, zuletzt geprüft am: 12.03.2024, 2022
- [14] Vasquez, G. M., et al.: A targeted material selection process for polymers in laser sintering, *Additive Manufacturing* (Hrsg.), 2014, doi: 10.1016/j.addma.2014.09.003
- [15] Schmid, M.: Laser sintering with plastics, *Technology, processes and materials*, München: Carl Hanser Verlag 2018

- [16] Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e. V. u. Lehrstuhl Fertigungstechnik/ Universität Duisburg -Essen: Einfluss der Materialzusammensetzung und Oberflächenstruktur von lasergesinterten Modellpropellern auf die Prognosegenauigkeit von Propulsionsversuchen, Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e. V. - DST (Hrsg.), 2020
- [17] Mazzoli, A., et al.: Characterization of an aluminum-filled polyamide powder for applications in selective laser sintering, *Materials and Design* (2007)
- [18] Yan, C., et al.: Preparation, characterisation and processing of carbon fibre/polyamide-12 composites for selective laser sintering, *Composites Science and Technology* 71 (2011) 16, S. 1834–1841
- [19] Wudy, K., et al.: Selective Laser Sintering of Filled Polymer Systems: Bulk Properties and Laser Beam Material Interaction, *Physics Procedia* 83 (2016), S. 991–1002
- [20] Guo, B., et al.: A detailed evaluation of surface, thermal, and flammable properties of polyamide 12/glass beads composites fabricated by multi jet fusion, *Virtual and Physical Prototyping* 16 (2021), doi: 10.1080/17452759.2021.1899463
- [21] Schmid, M.: *Selektives Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen, Technologie, Prozesse und Werkstoffe*, München: Hanser 2015,
- [22] Schwister, K. (Hrsg.): *Taschenbuch der Chemie, Mit zahlreichen Bildern und Tabellen*, München: Fachbuchverl. Leipzig: Carl Hanser Verlag 2010
- [23] Schmid, M.: *Laser Sintering with Plastics, Technology, Processes, and Materials*, München: Carl Hanser Verlag 2018
- [24] Abts, G.: *Kunststoff-Wissen für Einsteiger*, München: Carl Hanser Verlag 2016
- [25] Fischer, A.; Achten, D. u. Launhardt, M.: *Kunststoff-Wissen für die additive Fertigung, Eigenschaften, Verarbeitung und Einsatzgebiete von Thermoplasten*, München: Carl Hanser Verlag 2023
- [26] N. N.: *Senvol Database Material Trend Analysis in Wohlers Report 2020*, Senvol LLC (Hrsg.), <http://senvol.com>, zuletzt geprüft am: 03.01.2024
- [27] Gebhardt, A.: *Additive Fertigungsverfahren, Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping - Tooling - Produktion*, 2016
- [28] Bacchewar, P. B., et al.: Statistical modelling and optimization of surface roughness in the selective laser sintering process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 221 (2007) 1, S. 35–52, doi: 10.1243/09544054JEM670

- [29] Srivastava, V., et al.: Surface Roughness Studies in Selective Laser Sintering of Glass filled Polyamide. In: Hinduja, S. (Hrsg.): Proceedings of the 36th International MATADOR Conference. SpringerLink Bücher. London: Springer London 2010
- [30] Lehrstuhl Fertigungstechnik/Universität Duisburg -Essen u. Lehrstuhl für Kunststofftechnik / Universität Erlangen-Nürnberg: Ressourcenschonende Kleinserienproduktion durch Kunststoff-Laser-Sintern-. Einfluss der Anisotropie und Oberflächenstruktur auf die statischen und dynamischen Langzeiteigenschaften von laser-gesinterten Bauteilen (LZE-LS II), Abschlussbericht - 19623 N, AiF-IGF (Hrsg.), <https://www.iuta.de>, zuletzt geprüft am: 16.02.2022, 2020
- [31] Barthel, M., et al.: Friedrich Tabellenbuch Metall- und Maschinentechnik, Köln: Bildungs-verlag EINS westermann 2017
- [32] Petzold, S., et al.: Surface roughness of polyamide 12 parts manufactured using selective laser sintering, Polymer Testing (Hrsg.), 2019, doi: 10.1016/j.polymeresting.2019.106094
- [33] Kiehl, P., et al.: Klein Einführung in die DIN-Normen, Springer eBook Collection Computer Science and Engineering, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2001, doi: 10.1007/978-3-322-92719-4
- [34] Baier, O.: Optimierung von FLM - Bauteilen durch chemische Nachbearbeitung sowie deren Einsatz in der Galvanik, Dissertation, Universität Duisburg-Essen 2016
- [35] Baier, O. u. Reinhardt, T.: Oberflächengüte additiv gefertigter Bauteile erhöhen, Maschinenmarkt (2013) 47, S. 4
- [36] Schmid, M.; Levy, G. N. u. Inspire AG: Finishing und Coating von SLS-Teilen für Additive Manufacturing (AM), 2010, <https://www.rtejournal.de>, zuletzt geprüft am: 01.02.2018
- [37] Bastian, M. u. Hochrein, T.: Einfärben von Kunststoffen, Produktanforderungen - Verfahrenstechnik - Prüfmethodik, Hanser eLibrary, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG 2018, doi: 10.3139/9783446453999
- [38] Dizon, J. R. C., et al.: Post-Processing of 3D-Printed Polymers, Technologies 9 (2021) 3, S. 61, doi: 10.3390/technologies9030061
- [39] Wohlers, T. u. Campbell, R. I.: Wohlers Report 2021 - 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Fort Collins.: Wohlers Associates 2021
- [40] Wohlers, T. u. Campbell, R. I.: Wohlers Report 2019, 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Fort Collins.: Wohlers Associates, 2019
- [41] Gebhardt, A.; Kessler, J. u. Thurn, L.: 3D-Drucken, Grundlagen und Anwendungen des Additive Manufacturing (AM), 2016
- [42] Zinniel, R. L., Vapor smoothing surface finishing system, Patent US8075300B2, 2011
- [43] Kramer, P., et al., Vorrichtung und Verfahren zur Oberflächenbehandlung von Formteilen, Patent WO2020049186A1, 2020

- [44] Singh, G., Kumar, R., Sandhu, K., Pei, E. u. Singh, S. (Hrsg.): Handbook of post-processing in additive manufacturing, Requirements, theories, and methods, Sustainable manufacturing technologies: additive, subtractive, and hybrid, Boca Raton, FL: CRC Press 2024
- [45] N. N.: LuxYours, <https://www.luxyours.com/>, zuletzt geprüft am: 25.03.2024
- [46] Bazan, A., et al.: Influence of Antibacterial Coating and Mechanical and Chemical Treatment on the Surface Properties of PA12 Parts Manufactured with SLS and MJF Techniques in the Context of Medical Applications, *Materials* 16 (2023) 6, S. 2405, doi: 10.3390/ma16062405
- [47] Rohrsen, N. C. u. Hagedorn, D.: Improving the surface quality of additive manufactured polyamide parts using conventional treatment methods, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 132 (2024) 5-6, S. 2347–2358, doi: 10.1007/s00170-024-13279-3
- [48] Witt, G. u. Dürr, H.: Taschenbuch der Fertigungstechnik, Mit zahlreichen Tabellen, München: Fachbuchverl. Leipzig: Carl Hanser Verlag 2006
- [49] DIN 8580:2022, Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung, DIN-Normenausschuss Technische Grundlagen
- [50] Ritter, S.: Additive Manufacturing AM Field Guide 2019, mesago, Messe Frankfurt Group 2019
- [51] Diegel, O., et al.: Wohlers specialty report on post-processing, Final steps of AM part production, Wohlers Specialty Reports, Washington, DC, USA: Wohlers Associates, powered by ASTM International 2023
- [52] Gebhardt, A.: Generative Fertigungsverfahren, Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping; Tooling; Produktion, s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag 2013
- [53] DIN EN ISO 17296-2:2016, Additive Fertigung - Grundlagen - Teil 2: Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe, DIN-Normenausschuss Werkstofftechnologie
- [54] Ehrenstein, G. W.: Polymer Werkstoffe, Struktur Eigenschaften Anwendung, Onleihe, München: Carl Hanser Verlag 2011
- [55] Schmid, M.: Selektives Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen, Technologie, Prozesse und Werkstoffe, München: Carl Hanser Verlag 2015
- [56] Kahraman, S.: FDM-Drucker-Arten: Welche eignet sich wofür?, Threedom (Hrsg.), <https://threedom.de>, 2023
- [57] Yadav, A., et al.: An experimental examination on surface finish of FDM 3D printed parts, *Materials Today: Proceedings*, 2023
- [58] Gebisa, A. W. u. Lemu, H. G.: Investigating Effects of Fused-Deposition Modeling (FDM) Processing Parameters on Flexural Properties of ULTEM 9085 using Designed Experiment, *Materials* (Basel, Switzerland) 11 (2018) 4, doi: 10.3390/ma11040500

Literaturangaben

- [59] Ahn, S.-H., et al.: Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS Nr. 4, 2002
- [60] Lee, B. H., et al.: Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object, *Journal of Materials Processing Technology* 169 (2005) 1, S. 54–61, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.259
- [61] Ouazzani, K., et al.: An experimental study of FDM parameter effects on ABS surface quality: roughness analysis, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 127 (2023) 1-2, S. 151–178, doi: 10.1007/s00170-023-11435-9
- [62] Hofland, E. C., et al.: Correlation of Process Parameters with Mechanical Properties of Laser Sintered PA12 Parts, *Advances in Materials Science and Engineering* 2017 (2017), doi: 10.1155/2017/4953173
- [63] Wegner, A.: Theorie über die Fortführung von Aufschmelzvorgängen als Grundvoraussetzung für eine robuste Prozessführung beim Laser-Sintern von Thermoplasten, Dissertation, Universität Duisburg-Essen 2015
- [64] Nar, K., et al.: A comprehensive characterisation of Laser Sintered Polyamide-12 surfaces, *Polymer Testing* 106 (2022), S. 107450, doi: 10.1016/j.polymertesting.2021.107450
- [65] Wiedau, L. C., et al.: Geometry-Independent Surface Finishing, Influence of Chemical Post-Treatment on Glass-Filled Polyamide 12 Samples, *Kunststoffe International* (2021), S. 46–48
- [66] Reinhardt, T.: Entwicklung einer ganzheitlichen Verfahrenssystematik bei der Qualifizierung neuer Werkstoffe für das Laser-Sintern am Beispiel Polypropylen, Dissertation, Universität Duisburg-Essen 2016
- [67] Hecht, E.: *Optik*, De Gruyter 2018, doi: 10.1515/9783110526653
- [68] Jens Thoms Törring: *Absorption, Reflexion und Brechung*, 2008, <https://www.sonntaler.net>, zuletzt geprüft am: 14.09.2023
- [69] Wohlers, T.: *Wohlers Report 2019, 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry*, Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates Inc. 2019
- [70] Wohlers, T., et al.: *Wohlers Report 2021, 3D printing and additive manufacturing: global state of the industry*, Fort Collins, Colorado: Wohlers Associates 2021
- [71] AM POLYMERS GmbH, <https://www.am-polymers.de/>, zuletzt geprüft am: 18.10.2019
- [72] Hellerich, W.; Harsch, G. u. Baur, E.: *Werkstoff-Führer Kunststoffe, Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte*, München: Hanser 2010
- [73] Ehrenstein, G. W.: *Polymer-Werkstoffe, Struktur - Eigenschaften - Anwendung. Teilw. zugl.: Karlsruhe, Univ., Habil.-Schr., 1978, Studentexte Kunststofftechnik*, München, Wien: Hanser 1999

- [74] Gebhardt, A. u. Hötter, J.-S.: Additive manufacturing, 3D printing for prototyping and manufacturing, München: Carl Hanser Verlag 2016
- [75] Da Silva, R. C., et al.: Evaluation of the mechanical properties of polyamide 12 regarding different percentages of reused material in the selective laser sintering process, *Rapid Prototyping Journal* 29 (2023) 10, S. 2134–2148, doi: 10.1108/RPJ-03-2023-0091
- [76] Weinmann, S. u. Bonten, C.: Recycling of PA12 powder for selective laser sintering. In: *AIP Conference Proceedings*
- [77] Sanders, B., et al.: Re-use of polyamide-12 in powder bed fusion and its effect on process-relevant powder characteristics and final part properties, *Additive Manufacturing* 80 (2024), doi: 10.1016/j.addma.2024.103961
- [78] Özbay, B. u. Serhatlı, İ. E.: Processing and Characterization of Hollow Glass-Filled Polyamide 12 Composites by Selective Laser Sintering Method, *Materials Technology* 37 (2022) 4, S. 213–223, doi: 10.1080/10667857.2020.1824149
- [79] Negi, S., et al.: Determining the effect of sintering conditions on mechanical properties of laser sintered glass filled polyamide parts using RSM, *Measurement* 68 (2015), S. 205–218, doi: 10.1016/j.measurement.2015.02.057
- [80] Wudy, K., et al.: Selective Laser Sintering of Filled Polymer Systems: Bulk Properties and Laser Beam Material Interaction, *Physics Procedia* 83 (2016), S. 991–1002, doi: 10.1016/j.phpro.2016.08.104
- [81] Lechner, M. D., et al.: *Makromolekulare Chemie, Ein Lehrbuch für Chemiker, Physiker, Materialwissenschaftler und Verfahrenstechniker*, Lehrbuch, Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum 2014, doi: 10.1007/978-3-642-41769-6
- [82] Kaiser, W.: *Kunststoffchemie für Ingenieure, Von der Synthese bis zur Anwendung*, München: Carl Hanser Verlag 2016
- [83] Domininghaus, H., et al.: *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*, VDI-Buch, s.l.: Springer-Verlag 2005
- [84] Peacock, A. J. u. Calhoun, A.: *Polymer chemistry, Properties and applications*, München: Carl Hanser Verlag 2006
- [85] Koltzenburg, S., Maskos, M., Nuyken, O. u. Mülhaupt, R. (Hrsg.): *Polymere: Synthese, Eigenschaften und Anwendungen*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2013
- [86] Kruth, J.-P., et al.: Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing, *CIRP Annals* 56 (2007) 2, S. 730–759, doi: 10.1016/j.cirp.2007.10.004
- [87] Gibson, I. u. Shi, D.: Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process, *Rapid Prototyping Journal* 3 (1997) 4, S. 129–136, doi: 10.1108/13552549710191836

Literaturangaben

- [88] Kruth, J.-P., et al.: Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting, *Rapid Prototyping Journal* 11 (2005) 1, S. 26–36, doi: 10.1108/13552540510573365
- [89] N.N.: Polypropylen (PP), *Kunststoffe.de* (Hrsg.), <https://www.kunststoffe.de>, zuletzt geprüft am: 27.07.2023
- [90] Schwarz, O., et al.: *Kunststoffkunde, Aufbau, Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendungen der Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere*, Vogel-Fachbuch, Würzburg: Vogel 2005
- [91] Ehrenstein, G. W. u. Pongratz, S.: *Beständigkeit von Kunststoffen*, München: Hanser 2007
- [92] Bellón, J. M., et al.: Use of nonporous polytetrafluoroethylene prosthesis in combination with polypropylene prosthetic abdominal wall implants in prevention of peritoneal adhesions Nr. 3, doi: 10.1002/(sici)1097-4636(199723)38:3<197::aid-jbm3>3.0.co;2-k
- [93] Wolf, R. A.: *Plastic surface modification, Surface treatment and adhesion*, München: Carl Hanser Verlag 2016
- [94] N.N.: Dyeformer – 3DChimera präsentiert Lösung zur Färbung von SLS-Teilen, *3Druck.com* (Hrsg.), <https://3druck.com>, zuletzt geprüft am: 27.07.2023, 2022
- [95] Wörz, A., et al.: Influence of chemical postprocessing on mechanical properties of laser-sintered polyamide 12 parts, *Journal of Polymer Engineering* 39 (2019) 9, S. 830–837, doi: 10.1515/polyeng-2019-0110
- [96] Wiedau, L. C., et al.: Untersuchung des Einflusses verschiedener Nachbehandlungsmethoden auf die Eigenschaften additiv gefertigter FDM Nylon 12 Proben, *Kunststofftechnik* 02 (2020) 16, S. 63–80
- [97] Bohnet, J.: *Oberflächenveredelung von generativen Werkstücken*, 13. Anwenderforum, Stuttgart 2008
- [98] N.N.: Post-Processing for FFF Prints, Lead your market by enhancing the functional and aesthetic properties of your 3D prints, BigRep GmbH (Hrsg.), <https://bigrep.com/de/>, zuletzt geprüft am: 27.07.2023
- [99] Wiedau, L. C., et al.: Einflussuntersuchung von verschiedenen Nachbehandlungsmethoden auf die Oberflächentopologie von laser-gesinterten Polyamid 12 Proben. In: Kynast, M., Eichmann, M. u. Witt, G. (Hrsg.): *RapidTech + FabCon 3.D*. München: Carl Hanser Verlag 2019
- [100] Johansson, I.: Post-processing for roughness reduction of additive manufactured poly-amide 12 using a fully automated chemical vapor technique - The effect on micro and macrolevel, *School of Engineering Sciences in Chemistry, Biotechnology and Health*, 2020
- [101] Kim, G. D. u. Oh, Y. T.: A benchmark study on rapid prototyping processes and machines: Quantitative comparisons of mechanical properties, accuracy, roughness, speed, and material cost, *Bd. 222*, doi: 10.1243/09544054JEM724

- [102] Drexler, M., et al.: Selective Laser Melting of Polymer Powder – Part Mechanics as Function of Exposure Speed, *Physics Procedia* 78 (2015), S. 328–336, doi: 10.1016/j.phpro.2015.11.047
- [103] Beal, V. E., et al.: Statistical evaluation of laser energy density effect on mechanical properties of polyamide parts manufactured by selective laser sintering, *Bd. 113*, doi: 10.1002/app.30329
- [104] Miron-Borzan, C. S., et al.: Analysis of Mechanical Properties of Selective Laser Sintered Polyamide Parts Obtained on Different Equipment, *MATERIALE PLASTICE* (2015)
- [105] Oliveira Setti, G. de, et al.: Correlation between mechanical and surface properties of SLS parts, *Rapid Prototyping Journal* 20 (2014) 4, S. 285–290, doi: 10.1108/RPJ-08-2012-0070
- [106] El Magri, A., et al.: Effects of Laser Power and Hatch Orientation on Final Properties of PA12 Parts Produced by Selective Laser Sintering, *Polymers* 14 (2022) 17, doi: 10.3390/polym14173674
- [107] Altan, M., et al.: Effects of process parameters on the quality of PLA products fabricated by fused deposition modeling (FDM): surface roughness and tensile strength, *Materials Testing* 60 (2018) 5, S. 471–477, doi: 10.3139/120.111178
- [108] Rodríguez-Panes, A., et al.: The Influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis, *Materials* 11 (2018) 8, doi: 10.3390/ma11081333
- [109] Jasim, M. F., et al.: Investigation of the Effect of Surface Roughness and Dimensional Accuracy on the Layer Thickness of PLA Parts Produced by the FDM Process. In: Abu Bakar, M. H., Razak, T. A. b. A. u. Öchsner, A. (Hrsg.): *Progress in Engineering Technology V. Advanced Structured Materials*, Bd. 183. Cham: Springer Nature Switzerland; Imprint Springer 2023, S. 19–29
- [110] Dizon, J. R. C., et al.: Mechanical characterization of 3D-printed polymers, *Additive Manufacturing* 20 (2018), S. 44–67, doi: 10.1016/j.addma.2017.12.002
- [111] Wiedau, L. C., et al.: Chemisches Nachbehandeln von Laser-Sinter-Proben – Einflussuntersuchung von verschiedenen Säuren auf die Oberflächentopologie. In: Kynast, M., Eichmann, M. u. Witt, G. (Hrsg.): *Rapid.Tech + FabCon 3.D*. München: Carl Hanser Verlag 2018, 267-282
- [112] Wiedau, L. C., et al.: Untersuchung der Auswirkung von Nachbehandlungsmethoden auf die mechanischen und topologischen Eigenschaften von Polypropylen Proben. In: Kynast, M., Eichmann, M. u. Witt, G. (Hrsg.): *Rapid.Tech + FabCon 3.D*. München: Carl Hanser Verlag 2020
- [113] Anitha, R., et al.: Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling, *Journal of Materials Processing Technology* 118 (2001) 1-3, S. 385–388, doi: 10.1016/S0924-0136(01)00980-3

- [114] Bernasconi, R., et al.: Electroless Plating of NiP and Cu on Polylactic Acid and Polyethylene Terephthalate Glycol-Modified for 3D Printed Flexible Substrates, *Journal of The Electrochemical Society* 163 (2016) 9, D526-D531, doi: 10.1149/2.1201609jes
- [115] Nasser Kanani: *Galvanotechnik, Grundlagen, Verfahren und Praxis einer Schlüsseltechnologie*, München: Carl Hanser Verlag 2009
- [116] Saleh, N., et al.: Effects of electroplating on the mechanical properties of stereolithography and laser sintered parts, *Rapid Prototyping Journal* 10 (2004) 5, S. 305–315, doi: 10.1108/13552540410562340
- [117] Sathishkumar, N., et al.: Investigation of Mechanical Behaviour and Surface Roughness Properties on Copper Electroplated FDM High Impact Polystyrene Parts. In: Shunmugam, M. S. u. Kanthababu, M. (Hrsg.): *Advances in additive manufacturing and joining. Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering*, volume 1. Singapore: Springer 2020, S. 287–300
- [118] N. N.: How to Improve Aesthetic and Mechanical Properties of FDM 3D Printed Parts, *Javelin Technologies Inc.* (Hrsg.), <https://www.javelin-tech.com>, zuletzt geprüft am: 05.04.2024
- [119] Sepeur, S., et al.: *Nanotechnologie, Grundlagen und Anwendungen, Farbe und Lack Edition*, Hannover: Vincentz Network 2008
- [120] Bandeira, L. C., et al.: TG/DTG/DTA/DSC as a tool for studying deposition by the sol-gel process on materials obtained by rapid prototyping, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 97 (2009) 1, S. 67–70, doi: 10.1007/s10973-008-9689-4
- [121] Campos, B. M. de, et al.: Protective coating materials on nylon substrate by sol-gel, *Virtual and Physical Prototyping* 6 (2011) 1, S. 33–39, doi: 10.1080/17452759.2010.491938
- [122] Campos, B. M. de, et al.: Coating of polyamide 12 by sol-gel methodology, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 115 (2014) 2, S. 1029–1035, doi: 10.1007/s10973-013-3384-9
- [123] Hofmann, H. u. Spindler, J.: *Verfahren in der Beschichtungs- und Oberflächentechnik, Mit 69 Tabellen und zahlreichen Beispielen*, Hanser eLibrary, München: Hanser 2014
- [124] Holländer, A. u. Cosemans, P.: *Oberflächentechnik für die additive Fertigung, Glätten durch Lackieren*, <https://www.plastverarbeiter.de>, zuletzt geprüft am: 16.04.2024, 2019
- [125] Korycki, A.: *Study of the selective laser sintering process: materials properties and effect of process parameters*, Toulouse 2020
- [126] N. N.: *Die führende Färbelösung Die führende Färbelösung für industriellen 3D-Druck.*, Dyemansion GmbH (Hrsg.), <https://dyemansion.com/>, zuletzt geprüft am: 15.09.2023
- [127] 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, Universität Duisburg-Essen 2010

- [128] Lake, M.: Oberflächentechnik in der Kunststoffverarbeitung, Vorbehandeln, beschichten, bedrucken, funktionalisieren, prüfen, München: Hanser 2016
- [129] Tamburrino, F., et al.: Post-processing treatments to enhance additively manufactured polymeric parts: a review, *Virtual and Physical Prototyping* 16 (2021) 2, S. 221–254, doi: 10.1080/17452759.2021.1917039
- [130] Prüller, H.: Praxiswissen Gleitschleifen, Leitfaden für die Produktionsplanung und Prozessoptimierung, Wiesbaden: Springer Vieweg 2015, doi: 10.1007/978-3-658-20927-8
- [131] N. N.: Betriebsanleitung für die Tellerfliehkraftmaschine CF 1x18, OTEC Präzisionsfinish GmbH (Hrsg.)
- [132] Schmid, M.; Simon, C. u. Levy, G. N.: Finishing of SLS-Parts for Rapid Manufacturing (RM) – A Comprehensive Approach, Schweiz 2009, <https://pdfs.semanticscholar.org/2bb5/baccb3a8aec219854ce581c30074e1ba573e.pdf>, zuletzt geprüft am: 01.02.2018
- [133] Kumbhar, N. N. u. Mulay, A. V.: Post Processing Methods used to Improve Surface Finish of Products which are Manufactured by Additive Manufacturing Technologies: A Re-view, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C* 99 (2018) 4, S. 481–487, doi: 10.1007/s40032-016-0340-z
- [134] Khan, H. M., et al.: Improving the surface quality and mechanical properties of selective laser sintered PA2200 components by the vibratory surface finishing process, *SN Applied Sciences* 3 (2021) 3, doi: 10.1007/s42452-021-04371-4
- [135] Boschetto, A. u. Bottini, L.: Surface improvement of fused deposition modeling parts by barrel finishing, *Rapid Prototyping Journal* 21 (2015) 6, S. 686–696, doi: 10.1108/RPJ-10-2013-0105
- [136] Guo, J., et al.: Surface quality improvement of selective laser sintered polyamide 12 by precision grinding and magnetic field-assisted finishing, *Materials & Design* 138 (2018), S. 39–45, doi: 10.1016/j.matdes.2017.10.048
- [137] N. N.: Zortrax Apoller Smart Vapor Smoothing-Gerät (SVS), Zortrax (Hrsg.), <https://store.zortrax.com>, zuletzt geprüft am: 10.04.2019, 2019
- [138] Boissonneault, T.: Dissolving PLA: How to Melt PLA and Smooth 3D Prints, Wevolver (Hrsg.), <https://www.wevolver.com/article/dissolving-pla-how-to-melt-pla-and-smooth-3d-prints>, zuletzt geprüft am: 27.06.2023, 2022
- [139] N. N.: Postpro3D, Additive Manufacturing Technologies (Hrsg.), <https://amtechnologies.co.uk/>, zuletzt geprüft am: 26.09.2019
- [140] Joseph Gwilliam Crabtree, Konstantin Rybalcenko, Andre Gaio, Improvements to additive manufacturing, Patent WO2018127683A1, 2018
- [141] N. N.: Whitepaper "State-of-the-Art Surfacing", DyeMansion GmbH (Hrsg.) 2019

- [142] N. N.: Industrielle Finishing Lösungen für additiv gefertigte Kunststoffteile, DyeMansion GmbH (Hrsg.), <https://dyemansion.com/>, zuletzt geprüft am: 03.09.2019
- [143] Jin, Y., et al.: Modeling of the chemical finishing process for polylactic acid parts in fused deposition modeling and investigation of its tensile properties, *Journal of Materials Processing Technology* 240 (2017), S. 233–239, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.10.003
- [144] N. N.: State of the Art Surfacing, What current technologies can achieve on powder bed fusion parts, DyeMansion GmbH (Hrsg.), 2022
- [145] Oehlmann, P., et al.: Einfluss des chemischen Glätteverfahrens auf mechanische Eigenschaften und Oberflächenrauheit von Einfluss des chemischen Glätteverfahrens auf mechanische Eigenschaften und Oberflächenrauheit von lasergesinterten Polyamid 12 Bauteilen, Rapid.Tech Fachkongress 2023
- [146] Crane, N. B., et al.: Impact of chemical finishing on laser-sintered nylon 12 materials, *Additive Manufacturing* 13 (2017), S. 149–155, doi: 10.1016/j.addma.2016.10.001
- [147] Mazlan, S. N. H., et al.: Surface Finish And Mechanical Properties Of Fdm Part After Blow Cold Vapor Treatment, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* (2018) 2
- [148] Hornbogen, E.; Eggeler, G. u. Werner, E.: Werkstoffe, Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen, Springer-Lehrbuch, Berlin, Heidelberg: Springer 2012
- [149] Chohan, J. S. u. Singh, R.: Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: a state of art review and future applications, *Rapid Prototyping Journal* 23 (2017) 3, S. 495–513, doi: 10.1108/RPJ-05-2015-0059
- [150] Redwood, B.: Post-processes & finishes, Protolabs Network (Hrsg.), <https://www.hubs.com>, zuletzt geprüft am: 05.04.2024
- [151] Ishikawa, K.: What is total quality control?, The Japanese way, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall 1987
- [152] Sugavaneswaran, M., et al.: Effect of electroplating on surface roughness and dimension of FDM parts at various build orientations, *FME Transactions* 47 (2019) 4, S. 880–886, doi: 10.5937/fmet1904880S
- [153] Campbell, R. I., et al.: Surface roughness visualization for rapid prototyping models, *Computer-Aided Design* 34 (2002) 10, S. 717–725, doi: 10.1016/S0010-4485(01)00201-9
- [154] Lalehpour, A., et al.: Surface roughness of FDM parts after post-processing with acetone vapor bath smoothing process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 95 (2018) 1-4, S. 1505–1520, doi: 10.1007/s00170-017-1165-5

- [155] ISO:1997, Thermoplastics pipes - Resistance to liquid chemicals - Classification -. Part 1: Immersion test method, International Organization of Standardization
- [156] Menges, G., et al.: Menges Werkstoffkunde Kunststoffe, München: Carl Hanser Verlag 2011, doi: 10.3139/9783446443532
- [157] Thierfeld, H.: Herstellung poröser Polymer und Kohlenstoff basierter Hybridmaterialien zur Adsorption und Photokatalyse, Dissertation, Universität Duisburg-Essen 2018
- [158] Hansen, C. M.: Hansen solubility parameters, A user's handbook, Boca Raton: CRC Press 2007, doi: 10.1201/9781420006834
- [159] Hansen, C. M.: The Universality of the Solubility Parameter, Product R&D 8 (1969) 1, S. 2–11, doi: 10.1021/i360029a002
- [160] Burke, J.: Solubility Parameters: Theory and Application, 1984
- [161] Charles M. Hansen: The Three Dimensional Solubility Parameter And Solvent Diffusion Coefficient, Their Importance In Surface Coating Formulation, Copenhagen: Danish Technical Press 1967
- [162] Jarsen, L. M.: Charakterisierung der Alterung von thermoplastischen Kunststoffen beim Einsatz im Antriebsstrang von Elektro- und Verbrennungsmotoren, Dissertation, Leipzig Universität Hannover 2022
- [163] Wypych, G.: Handbook of polymers, Toronto: CP ChemTec Publishing 2016
- [164] Mischke, P.: Filmbildung in modernen Lacksystemen, Farbe und Lack Edition, Hannover: Vincentz 2007
- [165] Mollet, H. u. Grubenmann, A.: Formulierungstechnik, Emulsionen, Suspensionen, Feste Formen, Weinheim: Wiley-VCH 2009
- [166] Hansen, C. M.: Hansen solubility parameters, A user's handbook, Boca Raton: CRC Press 2007
- [167] Abbott, St.: HSP Basic, Steven Abbott (Hrsg.), <https://www.stevenabbott.co.uk>, zuletzt geprüft am: 11.09.2023
- [168] DIN 8589-17:2003, Fertigungsverfahren Spanen, Teil 17: Gleitspanen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Normenausschuss Technische Grundlagen (NATG) — Geometrische Produktspezifikation und -prüfung
- [169] Prüller, H.: Praxiswissen Gleitschleifen, Leitfaden Für Die Produktionsplanung und Prozessoptimierung, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2018
- [170] N. N.: Gleitschleifen, Fachwissen Technik (Hrsg.), <https://www.fachwissen-technik.de>, zuletzt geprüft am: 11.10.2021

Literaturangaben

- [171] Funk, A.: Wohin mit dem Prozesswasser?, Walther Trowal GmbH & Co. KG (Hrsg.), <https://blog.walther-trowal.com>, zuletzt geprüft am: 01.07.2024
- [172] N. N.: 3D-Druck mit Polyamid 12, EOS GmbH (Hrsg.), <https://de.eos.info>, zuletzt geprüft am: 26.02.2024
- [173] Mielicki, C.: Prozessnahes Qualitätsmanagement beim Lasersintern von Polyamid 12, Dissertation, Universität Duisburg-Essen (2014)
- [174] EOS GmbH, <https://www.eos.info>, zuletzt geprüft am: 25.01.2019
- [175] N. N.: PA-GF, <https://www.materialise.com>, zuletzt geprüft am: 17.11.2023
- [176] Grellmann, S.: Kunststoffprüfung, München: Carl Hanser Verlag 2015
- [177] DIN EN ISO 527-2:2012, Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen, DIN-Normenausschuss Kunststoffe
- [178] Kleppmann, W.: Versuchsplanung, Produkte und Prozesse optimieren, Praxisreihe Qualitätswissen, München: Carl Hanser Verlag 2016
- [179] Siebertz, K.; van Bebber, D. u. Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2017, doi: 10.1007/978-3-662-55743-3
- [180] N. N.: VESTAMID Polyamid 12 Innovativ und bewährt, <http://www.vestamid.com>, zuletzt geprüft am: 22.01.2018
- [181] EMS-Grivory: Technisches Merkblatt, Chemikalienbeständigkeit von Grilon, Grilamid und Grivory, <https://www.emsgrivory.com>, zuletzt geprüft am: 08.03.2019
- [182] N. N.: Chemische Beständigkeit, <https://www.rct-online.de/>, zuletzt geprüft am: 09.02.2022
- [183] Mortimer, C. E. u. Müller, U.: Chemie, Das Basiswissen der Chemie; 128 Tabellen, Stuttgart: Thieme 2010
- [184] Sturm, S., et al.: Trifluoracetat (TFA): Grundlagen für eine effektive Minimierung Trifluoracetat (TFA): Grundlagen für eine effektive Minimierung schaffen - Räumliche Analyse der Eintragspfade in den Wasserkreislauf, Abschlussbericht, Umweltbundesamt (Hrsg.), 2023
- [185] Herrmann, A.: The Chemistry and Biology of Volatiles, Wiley 2010, doi: 10.1002/9780470669532
- [186] N. N.: Eigenschaften von Edelstahl V2A und V4A – Kleine Werkstoffkunde, <https://www.va24.de>, zuletzt geprüft am: 17.06.2019
- [187] DIN EN ISO 4288:1998, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit, DIN-Normenausschuss Technische Grundlagen
- [188] Volk, R.: Rauheitsmessung, Theorie und Praxis, Beuth Praxis, Berlin: Beuth 2013

- [189] DIN EN ISO 21920-3:2022, Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Profile - Teil 3: Spezifikationsoperatoren, DIN-Normenausschuss Technische Grundlagen
- [190] Ehrenstein, G. W.: Mikroskopie, Lichtmikroskopie, Polarisation, Rasterkraftmikroskopie, Fluoreszenzmikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG 2019, doi: 10.3139/9783446462014
- [191] Johansson, S., et al.: Recent Applications of Scanning Electron Microscopy, Neueste Anwendungen der Rasterelektronenmikroskopie, Practical Metallography (2013) 12, S. 810–820, doi: 10.3139/147.110272
- [192] Goldstein, J., et al.: Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis, New York, NY, U.S.A.: Springer 2018, doi: 10.1007/978-1-4939-6676-9
- [193] Schiebold, K.: Zerstörende Werkstoffprüfung, Mechanisch-Technologische Verfahren, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg 2018
- [194] Frick, A. u. Stern, C.: Praktische Kunststoffprüfung, München: Hanser 2011
- [195] Weißbach, W.; Dahms, M. u. Jaroschek, C.: Werkstoffe und ihre Anwendungen, Metalle, Kunststoffe und mehr, SpringerLink Bücher, Wiesbaden: Springer Vieweg 2018, doi: 10.1007/978-3-658-19892-3
- [196] DIN EN ISO 527-1:2019, Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze, DIN-Normenausschuss Kunststoffe
- [197] Schleper, B.: Zugversuche an Kunststoffen nach ISO 527-2, Wie sich Kunststoffe reproduzierbar prüfen lassen, Qualitätssicherung, Hüthig Medien GmbH (Hrsg.), <https://www.plastverarbeiter.de>, zuletzt geprüft am: 06.05.2024, 2023
- [198] Fahrenholz, H.: Prüfung von Kunststoffen - Der Zugversuch, Zwick Materialprüfung (Hrsg.), 2004
- [199] Läßle, V.: Einführung in die Festigkeitslehre, Lehr- und Übungsbuch, SpringerLink Bücher, Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2006, doi: 10.1007/978-3-8348-9119-8
- [200] Hornbogen, E.: Werkstoffe, Aufbau und Eigenschaften von Keramik-, Metall-, Polymer- und Verbundwerkstoffen; mit 102 Tabellen, Springer-Lehrbuch, Berlin, Heidelberg: Springer 1994
- [201] Radaj, D. u. Vormwald, M.: Ermüdungsfestigkeit, Grundlagen für Ingenieure, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007, doi: 10.1007/978-3-540-71459-0
- [202] Hochschule RheinMain: Kerbwirkung, <https://www.hs-rm.de>, zuletzt geprüft am: 17.08.2023
- [203] Norm DIN EN ISO 527-2 (ISO 527-2:2012):2012, Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Literaturangaben

- [204] Josupeit, S. u. 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* 134 (2017) 42, doi: 10.1002/app.45435
- [205] VDI 3405 Blatt 1.1:2018, Additive Fertigungsverfahren - Laser-Sintern von Kunststoffbauteilen - Materialqualifizierung, VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.
- [206] DIN EN ISO 1133-1:2022, Kunststoffe - Bestimmung der Schmelze-Massefließrate (MFR) und der Schmelze-Volumenfließrate (MVR) von Thermoplasten -. Teil 1: Allgemeines Prüfverfahren, DIN-Normenausschuss Kunststoffe
- [207] DIN EN ISO 11357-3:2017, Kunststoffe - Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) -. Teil 3: Bestimmung der Schmelz- und Kristallisationstemperatur und der Schmelz- und Kristallisationsenthalpie, DIN-Normenausschuss Kunststoffe
- [208] Frick, A. u. Stern, C.: DSC-Prüfung in der Anwendung, München: Carl Hanser Verlag 2013
- [209] DIN EN ISO 11357-1:2016, Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 1: Allgemeine Grundlagen, DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- [210] N. N.: Differential Scanning Calorimetry, Polymer Service GmbH Merseburg (Hrsg.), https://wiki.polymerservice-merseburg.de/index.php/Differential_Scanning_Calorimetry, zuletzt geprüft am: 28.08.2023
- [211] Höhne, G.; Hemminger, W. u. Flammersheim, H.-J.: Differential scanning calorimetry, An introduction for practitioners; with 13 tables, Berlin, Heidelberg: Springer 1996
- [212] Evenson, Z.; Gallino, I. u. Busch, R.: The effect of cooling rates on the apparent fragility of Zr-based bulk metallic glasses Nr. 12, 2010
- [213] Ferreira, E. B.; Lima, M. L. u. Zanutto, E. D.: DSC Method for Determining the Liquidus Temperature of Glass-Forming Systems Nr. 11, 2010
- [214] N. N.: Thermische Analyse in der Praxis, Tipps und Hinweise, Mettler Toledo GmbH (Hrsg.), 2016
- [215] Vidakis, N., et al.: Mechanical response assessment of antibacterial PA12/TiO₂ 3D printed parts: parameters optimization through artificial neural networks modeling, *The International journal, advanced manufacturing technology* 121 (2022) 1-2, S. 785–803, doi: 10.1007/s00170-022-09376-w
- [216] Damanhuri, A. A. M., et al.: The Effects of Virgin and Recycled PA12 Powders in SLS Processes on Occupational Exposures, *International Journal of Environmental Science and Development* 12 (2021) 11, S. 339–345, doi: 10.18178/ijesd.2021.12.11.1359
- [217] Ehrenstein, G. W.; Riedel, G. u. Trawiel, P.: Thermal Analysis of Plastics, Theory and Practice, München: Carl Hanser Verlag 2004

- [218] Ehrenstein, G. W.; Riedel, G. u. Trawiel, P.: Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen, München: Carl Hanser Verlag 2003
- [219] DIN EN ISO 11358-1:2022, Kunststoffe – Thermogravimetrie (TG) von Polymeren – Teil 1: Allgemeine Grundsätze, DIN-Normenausschuss Kunststoffe
- [220] Vidakis, N., et al.: Sustainable Additive Manufacturing: Mechanical Response of Polyamide 12 over Multiple Recycling Processes, *Materials* 14 (2021) 2, doi: 10.3390/ma14020466
- [221] Figura, L. O.: Lebensmittelphysik, Physikalische Kenngrößen - Messung und Anwendung, Lehrbuch, Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum 2021
- [222] Kunststoff-Zentrum Leipzig: Thermische Prüfungen, <https://www.kuz-leipzig.de>, zuletzt geprüft am: 13.12.2023
- [223] DIN 51006:2024, Thermische Analyse (TA) - Thermogravimetrie (TG) - Grundlagen, DIN-Normenausschuss Materialprüfung
- [224] Wiberg, E.; Wiberg, N. u. Fischer, G.: Lehrbuch der anorganischen Chemie, Berlin, New York: Walter de Gruyter 2007
- [225] Turek, P., et al.: Influence of post-processing treatment on the surface roughness of polyamide PA12 samples manufactured using additive methods in the context of the production of orthoses, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* (2023), doi: 10.1177/09544054231202423
- [226] N. N.: CAMPUS® - a material information system for the plastics industry, CWFG mbH (Hrsg.), <https://www.campusplastics.com/>, zuletzt geprüft am: 30.03.2023
- [227] Lehrstuhl für Kunststofftechnik / Prof. Dr.-Ing. Drummer: Prüfprotokoll, 2018-2020
- [228] N. N.: 3D-Druck mit FDM und Nylon 12, Stratasys Ltd (Hrsg.), <http://www.stratasys.com>, zuletzt geprüft am: 23.08.2018
- [229] N. N.: Stratasys, Materials Testing Procedure, Stratasys Ltd (Hrsg.), <https://www.stratasys.com>, zuletzt geprüft am: 07.05.2024
- [230] Linul, E., et al.: Mode I and II fracture toughness investigation of Laser-Sintered Polyamide, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 106 (2020), S. 102497, doi: 10.1016/j.tafmec.2020.102497
- [231] Tomanik, M., et al.: Mechanical and Structural Evaluation of the PA12 Desktop Selective Laser Sintering Printed Parts Regarding Printing Strategy, *3D Printing and Additive Manufacturing* 8 (2021) 4, S. 271–279, doi: 10.1089/3dp.2020.0111
- [232] Cronau, J., et al.: Fracture mechanisms of selective laser sintered parts manufactured in build direction, *Progress in Additive Manufacturing* (2024), doi: 10.1007/s40964-024-00677-y

Literaturangaben

- [233] Song, Y., et al.: Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA, *Materials & Design* 123 (2017), S. 154–164, doi: 10.1016/j.matdes.2017.03.051
- [234] Khosravani, M. R., et al.: Fracture behavior of additively manufactured components: A review, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 109 (2020), S. 102763, doi: 10.1016/j.tafmec.2020.102763
- [235] Rösenberg, S., et al.: *Controlling the Quality of Laser Sintered Parts Along the Process Chain*, University of Texas at Austin (Hrsg.), 2012
- [236] Schultheis, C.: *Recycling von halogenfrei flammgeschützten Kunststoffen*, Darmstadt 2021
- [237] Drummer, D., et al.: Untersuchung der Untersuchung der Materialalterung bei pulverbasierten Schichtbauverfahren, In: *RTEjournal*, 2010
- [238] Gornet, T. J., et al.: *Characterization of Selective Laser Sintering materials to Determine Process Stability*, Rapid Prototyping Center, J.B. Speed Engineering School (Hrsg.), 2002
- [239] N. N.: Sicherheitsdatenblatt, Trifluoressigsäure $\geq 99,9\%$, zur (Peptid-)Synthese, 2015, <https://www.carlroth.com>, zuletzt geprüft am: 18.01.2018
- [240] Schmölzer, St. u. Knappe, St.: Einfluss der Atmosphäre und Probenform auf das TG-Messergebnis, *Netzsch-Gerätebau GmbH* (Hrsg.), www.netzsch.com, zuletzt geprüft am: 10.05.2024
- [241] N. N.: *Passung und Toleranz: Designoptimierung für funktionale 3D-gedruckte Bauteile*, Formlabs GmbH (Hrsg.), <https://3d.formlabs.com>, zuletzt geprüft am: 2020
- [242] Lieneke, T., et al.: Dimensional Tolerances for Additive Manufacturing: Experimental Investigation for Fused Deposition Modeling, *Procedia CIRP* 43 (2016), S. 286–291, doi: 10.1016/j.procir.2016.02.361
- [243] Winkelmann, A., Flath, C. u. Thiesse, F. (Hrsg.): *Sharing Economy in der Industrie, Unternehmensübergreifende Auslastung von Produktionskapazitäten am Beispiel der additiven Fertigung*, Wiesbaden, Heidelberg: Springer Gabler 2021
- [244] Abbas, A. A., et al.: Envisioned-Empowered Wind-Dispersion Coded Flier System With Passive RFID Infrastructure: Experimental Evaluation, 2024, in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, doi: 10.1109/TMECH.2024.3499333
- [245] Michelle, J.: *PolySmoother: Das Gerät zur Nachpolierung ab 100 Euro auf Kickstarter*, <https://www.3dnatives.com>, zuletzt geprüft am: 28.09.2023
- [246] Wiedau, L. C., et al.: Geometry-Independent Surface Finishing, Influence of Chemical Post-Treatment on Glass-Filled Polyamide 12 Samples, *Kunststoffe International* (2021)

Publikationsverzeichnis

1. Wiedau, L. C.; Meyer, L.; Wegner, A.; Witt, G. (2018): Chemisches Nachbehandeln von Laser-Sinter-Proben - Einflussuntersuchung von verschiedenen Säuren auf die Oberflächentopologie
In: Kynast, M., Eichmann, M. und Witt, G. (Hrsg.): Rapid.Tech + FabCon 3.D. München: Carl Hanser Verlag
2. Meyer, L.; Livia C. Wiedau, L. C.; Wegner, A.; Witt, G. (2018): Innovative Pulver-Auftragsstrategien im Laser-Sinter-Prozess - Einflussuntersuchung der Packungsdichte in Korrelation zur Oberflächenrauheit; In: Kynast, M., Eichmann, M. und Witt, G. (Hrsg.): Rapid.Tech + FabCon 3.D. München: Carl Hanser Verlag
3. Wiedau, L. C.; Meyer, L.; Wegner, A.; Witt, G. (2019): Einflussuntersuchung von verschiedenen Nachbehandlungsmethoden auf die Oberflächentopologie von laser-gesinterten Polyamid 12 Proben. In: Kynast, M., Eichmann, M. und Witt, G. (Hrsg.): Rapid.Tech + FabCon 3.D. München: Carl Hanser Verlag
4. Tarasova, A.; Wegner, A.; Wiedau, L. C.; Witt, G. (2019); Charakterisierung lasergesinterner Bauteile aus aluminiumverstärktem Polyamid 12 am Beispiel von Schiffsmodellpropellern; In: Kynast, M., Eichmann, M. und Witt, G. (Hrsg.): Rapid.Tech + FabCon 3.D. München: Carl Hanser Verlag
5. Wörz, A.; Wiedau, L. C.; Wudy, K.; Wegner, A.; Witt, G.; Drummer, D. (2019): Influence of chemical postprocessing on mechanical properties of laser-sintered polyamide 12 parts. In: Journal of Polymer Engineering 39 (9), S. 830-837. doi: 10.1515/polyeng-2019-0110.
6. Wiedau, L. C.; Oberflächentopologie von laser-gesinterten Polyamid 12 Proben - Eine Einflussuntersuchung von verschiedenen Nachbehandlungsmethoden, In Gehde, M.; Wagenknecht, U.; Bloß, P. (Hrsg.): Technomer 2019, 26. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendung von Polymeren
7. Wiedau, L. C.; Hesse, D.; Baumann, J.; Witt, G.; Stommel, M. et al. (2020): Untersuchung des Einflusses verschiedener Nachbehandlungsmethoden auf die Eigenschaften additiv gefertigter FDM Nylon 12 Proben. In: Kunststofftechnik 02 (16), S. 63-80. Online verfügbar unter <https://www.kunststoffe.de>

8. Wiedau, L. C.; Tarasova, A.; Witt, G. (2021): Geometry-Independent Surface Finishing Influence of Chemical Post-Treatment on Glass-Filled Polyamide 12 Samples, In: Kunststoffe International
9. Wiedau, L. C.; Wörz, A. Wegner, A.; Witt, G.; Drummer, D. (2021); Untersuchung der Auswirkung von Nachbehandlungsmethoden auf die mechanischen und topologischen Eigenschaften von laser-gesinterten Polypropylen Proben In: Kynast, M., Eichmann, M. und Witt, G. (Hrsg.): Rapid.Tech + FabCon 3.D. München: Carl Hanser Verlag
10. Wiedau, L. C.; Dander, H. et al. (2023), Additive Fertigung aus der Perspektive der Wissenschaft, Anbieter und Anwender, In: Leistung & Entgelt vom Ifaa – Institut für angewandte Arbeitswissenschaft, Nr.1, März 2023
11. Abbas, A. A.; Abdelhalim, A.; Zarifeh, N.; Ahmed, M.; Abuelhaija, A.; Wiedau, L. C. et al. (2024): Envisioned-Empowered Wind-Dispersal Coded Flier System With Passive RFID Infrastructure: Experimental Evaluation. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, doi: 10.1109/TMECH.2024.3499333
12. Prokscha, A.; [...], Wiedau, L. C.; et al. (2024); Sensing, Fingerprints and Electromagnetic Exposure of Western Honey Bees in the THz Spectrum, In: Nature Scientific Reports im Special Issue „Terahertz technology and its applications“
13. Schredelseker, T.; Lutter, B.; Kucklick, L.; Wiedau, L.; et al. (2024), The Open Fuel Cell as an Open Hardware Initiative for Research, Development and Teaching in Hydrogen Fuel Cell Technologies, In: Open Source Hardware Konferenz 2024