

# Bauteilcharakterisierung von PBF-LB/P gefertigten Bauteilen auf der Grundlage von unterschiedlichen Anlagekonzepten

Verfasser des Aufsatzes: Marco Skupin (M. Sc.)<sup>a</sup>, Dr. Alexander Schwarz<sup>a,b</sup>,  
Prof. Dr- Ing. Sebastian Bremen<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> GoetheLab for Additive Manufacturing / FH Aachen (Fachbereich Maschinenbau & Mechatronik),  
Goethestr. 1, 52064 Aachen, Deutschland

<sup>b</sup> IwF GmbH (Institut für werkzeuglose Fertigung), Campus Boulevard 79, 52074 Aachen, Deutschland

[https://doi.org/10.58134/fh-aachen-rte\\_2024\\_002](https://doi.org/10.58134/fh-aachen-rte_2024_002)

**Zusammenfassung** Im Bereich der additiven Fertigung von Kunststoffen stellt die sog. Laserbasierte Pulverbettfusion von Polymeren (PBF-LB/P) das vielversprechendste Verfahren hinsichtlich industrietypischer Anforderungen dar. Die Technologie, die auf dem schichtweisen Aufschmelzen eines Kunststoffpulvers mittels Laserstrahlung basiert, findet vor allem im Automobilbau, der Luft- und Raumfahrt sowie der Medizintechnik Einsatz. Seit dem Ablauf des PBF-LB/P-Patents im Jahre 2014 steigen nach und nach neue junge Technologieunternehmen in die Entwicklung von PBF-LB/P-Anlagen mit ein. Der Markt, welcher bisher von industriellen Anlagen, wie bspw. der Firmen 3D-Systems (USA) und eos (D) dominiert wurde, erfährt ein zunehmendes Angebot von günstigeren Low-Cost-Einsteigermodellen. Unternehmen aufgrund der geringeren Einstiegskosten eine geeignete Alternative dar. Ziel dieser Veröffentlichung ist eine Bauteilcharakterisierung (Geometriegenauigkeit, mechanische Eigenschaften, Oberflächengüte und Wirtschaftlichkeit) von PBF-LB/P gefertigten Bauteilen aufgrund ihrer abweichenden Anlagekonzepten.

**Abstract** In the field of additive manufacturing of plastics, laser-based powder bed fusion of plastics (PBF-LB/P) is the most promising process in terms of typical industrial requirements. The technology, which is based on the layer-by-layer melting of plastic powder by using laser radiation, is primarily used in automotive engineering, aerospace, and medical technology. Since the expiration of the PBF-LB/P patent in 2014, new technology companies are gradually entering the development of PBF-LB/P systems. The market, which was previously dominated by industrial systems, such as those from 3D-Systems (USA) and EOS (D), is increasingly being offered cheaper low-cost entry-level models (so-called benchtop systems). These represent a suitable alternative, especially for medium-sized companies, due to the lower entry costs. The aim of this publication is a part characterization of PBF-LB/P-manufactured components (geometric accuracy, mechanical properties, surface quality and cost-effectiveness) based on these different machine concepts.

## Einleitung

Im Bereich der additiven Fertigung von Kunststoffen stellt die sog. Laserbasierte Pulverbettfusion von Polymeren (PBF-LB/P) das vielversprechendste Verfahren hinsichtlich industrietypischer Anforderungen dar. [1], [2] Die Technologie, die auf dem schichtweisen Aufschmelzen eines Kunststoffpulvers mittels Laserstrahlung basiert, findet vor allem im Automobilbau, der Luft- und Raumfahrt sowie der Medizintechnik Einsatz. [1] Seit dem Ablauf des PBF-LB/P -Patents im Jahre 2014 steigen nach und nach neue junge Technologieunternehmen in die Entwicklung von PBF-LB/P-Anlagen mit ein. [3], [4] Der Markt, welcher bisher von industriellen Anlagen, wie bspw. der Firmen *3D-Systems* (USA) und *eos* (D) dominiert wurde, erfährt ein zunehmendes Angebot von günstigeren Low-Cost-Einsteigermodellen (sog. Benchtop-Anlagen). Diese stellen vor allem für mittelständige Unternehmen eine geeignete Alternative dar. [5], [6]

Die zum Teil zu einem Zehntel geringeren Anschaffungskosten solcher Anlagen resultieren bspw. aus geringeren Bauvolumen, dem Einsatz von Dioden- anstatt CO<sub>2</sub>-Lasern sowie dem Einsatz von alternativen Strahlführungssystemen. Ob und inwiefern diese Anlagen hinsichtlich der Bauteilqualität mit den industriellen Anlagen mithalten können, ist aufgrund der frühen Entwicklung noch unklar. Die Bauteilcharakterisierung solcher Anlagenkonzepte ist nach derzeitigem Stand in wissenschaftlichen Publikationen kaum bis wenig vorgenommen worden. [3] Dies ist Ziel dieser Veröffentlichung.

## Anlagentechnik & Materialien

Im Rahmen des Vergleichs werden insgesamt eine industrielle (*FORMIGA P110* der Firma *eos*) und zwei Benchtop-Anlagen (*Lisa Pro* und *Lisa X* der Firma *Sinterit*) verglichen. Die wichtigsten Unterschiede in den Anlagekonzepten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Technische Daten der verwendeten Anlagentechnik [7], [8], [9]

Anlage	<i>FORMIGA P110 (eos)</i>	<i>Lisa Pro (Sinterit)</i>	<i>Lisa X (Sinterit)</i>
<b>Bauraum [mm x mm x mm]</b>	200 x 250 x 300 (60 x 75 x 130) <sup>1</sup>	110 x 160 x 230 (PA) 110 x 160 x 245 (TPU/TPE)	130 x 180 x 330 (PA/PP) 130 x 180 x 340 (TPU)
<b>Laser</b>	CO <sub>2</sub> -Laser 30 W; λ = 10,6 μm	IR-Dioden Laser 5 W; λ = 0,808 μm	IR-Diodenlaser 30 W; λ = 0,976 μm
<b>Strahlführung</b>	Galvo-Scanner	Gantry-System	Galvo-Scanner
<b>Heizsystem</b>	4-Kanal-Heizung, Pyrometer-Messsystem	Beheizung von Boden, Wänden und Oberflächen, Pyrometer-Messsystem	Beheizung von Boden, Wänden und Oberflächen, Pyrometer-Messsystem
<b>Schichtdicke [mm]</b>	0,06 – 0,10 – 0,12	0,075 – 0,200	0,075 – 0,175
<b>Beschichter</b>	Einzelklinge	Rollenbeschichtung	Rollenbeschichtung
<b>Material</b>	Alumide®, PA 1101, PA 1102 black, PA 2200®, PA 2201, PA 3200 GF, PrimeCast® 101, PrimePart®ST, PA 2105	PA12 Smooth, PA11 Onyx, PA11 CF, PA11 ESD, PP, Flexa Bright, Flexa Soft, Flexa Grey, Open Parameters	PA12 Industrial, PA11 Onyx, PA11 CF, PA11 ESD, PP, Flexa Performance, Open Parameters

<sup>1</sup> Bedingt durch Umbauarbeiten hat die verwendete Anlage zur Materialersparnis einen verkleinerten Bauraum von 60 mm x 75 mm x 130 mm.

## Methodik

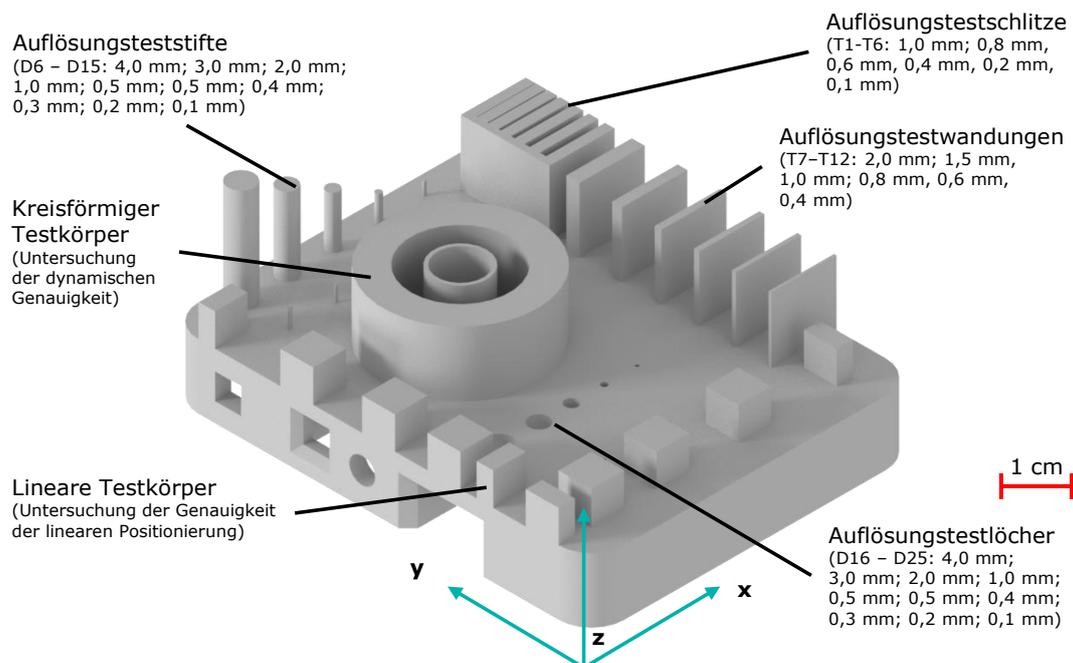
Die Bewertung der Bauteile erfolgt unter Berücksichtigung von insgesamt vier Eigenschaften (Geometriegenauigkeit, mechanische Eigenschaften, Oberflächengüte und Wirtschaftlichkeit) welche nachfolgend näher erläutert werden. Alle Probekörper werden mit dem jeweiligen Standard PA12-Pulver vom Hersteller, dem entsprechenden Pulvermischverhältnis sowie den jeweiligen Prozessparametern des Herstellers gedruckt (siehe Tabelle 2).

**Tabelle 2: Gegenüberstellung der verwendeten Parameter und des verwendeten Pulvers**

Anlage	FORMIGA P110	Lisa Pro	Lisa X
Material	PA 2200	PA12 Smooth	PA12 Industrial
Mischverhältnis Pulver (alt:neu)	50:50	70:30	70:30
Schichtdicke [mm]	0,100	0,100	0,100
Oberflächentemperatur Baufeld [°C]	165	179	179
Laserleistung [W]	Parametersatz „EOS- Performance“	Laser-Power-Ratio: 1	Laser-Power-Ratio: 1
Scangeschwindigkeit [mm/s]		k. A.	k. A.

## Geometriegenauigkeit

Die Untersuchung der Geometriegenauigkeit dient zur Bewertung der geometrischen Leistungsfähigkeit des jeweiligen PBF-LB/P-Systems. Hierfür wird der Benchmark-Probekörper, dargestellt in Abbildung 1, gefertigt. Dieser enthält unterschiedliche Geometrien und Formen, welche aus der *DIN EN ISO / ATSM 520902* und der Ausarbeitung nach *Olejarczyk, Gruber, et al.* stammen. Alle Testobjekte befinden sich auf einer Baufläche von 50 mm x 65 mm und sind so ausgewählt, dass sie Aufschluss über lineare und dynamische Genauigkeiten sowie Grenzen über die jeweiligen Auflösungen geben sollen. [3], [10]



**Abbildung 1: Benchmark-Probekörper zur Untersuchung der Geometriegenauigkeit**

Die Untersuchungen erfolgen nach dem Sandstrahlen<sup>2</sup> mithilfe des 3D-Scanners *Comet 6* (Fa. ZEISS) und einem anschließenden Soll-Ist-Vergleich in *Zeiss Inspect Optical 3D*. Für die Messungen wird eine Kamera mit einer Auflösung von 16 MP verwendet. Bei dem verwendeten Messfeld (145 x 97 x 80 mm<sup>3</sup>) beträgt die maximale Längenmessabweichung laut Hersteller 0,020 mm. [11], [12]

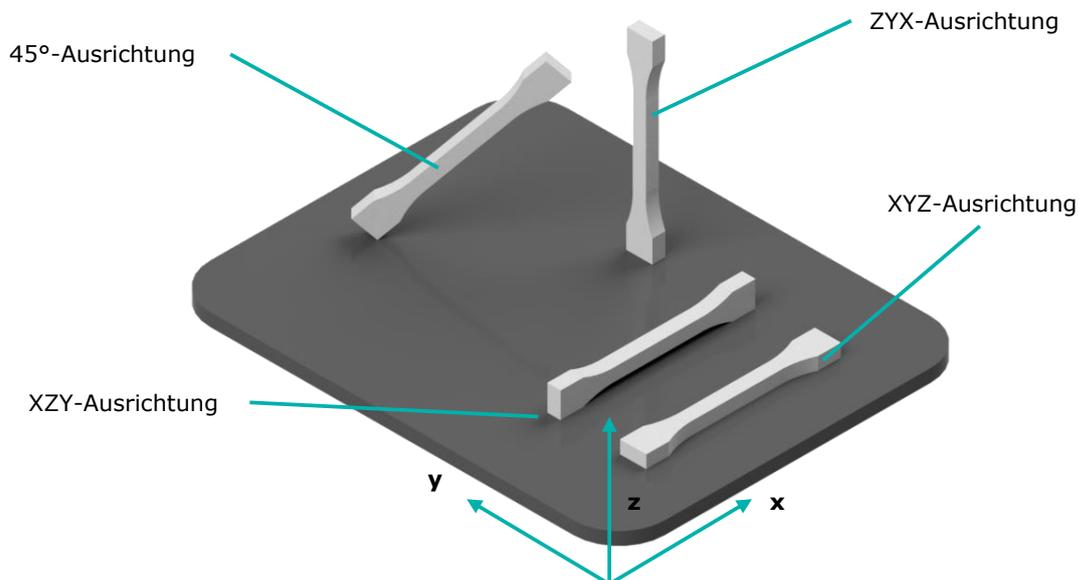
## Mechanische Eigenschaften

Die Untersuchung der mechanischen Eigenschaften erfolgen im Rahmen der Kurzzeitbelastung mithilfe des Zugversuchs aus der *DIN EN ISO 527-1/2*. [13], [14]

Aufgrund der Anisotropie der Bauteileigenschaften werden die Zugproben in Abhängigkeit der Bauraumrichtung untersucht. Angelehnt an die *DIN EN ISO/ASTM 52921*, nach der die Bauteilbezeichnung aufgrund der Lage bezüglich ihrer Gewichtung der Achsen X, Y, Z erfolgt, werden insgesamt vier Bauraumrichtungen untersucht: XYZ, XZY, ZYX und eine 45°-Ausrichtung (siehe Abbildung 2). [1], [15]

Für den Vergleich werden fünf Zugproben je Ausrichtung des Typs 1BB<sup>3</sup> hergestellt. [14]

Die Untersuchungen der maximalen Zugfestigkeit ( $\sigma_m$ ) sowie der Bruchdehnung ( $\epsilon_m$ ) erfolgen mithilfe der Universalprüfmaschine des Typs *BZ1-MM14450.ZW02* (*ZwickRoell*). Die maximale Last dieser Prüfmaschine beträgt 10 kN. Alle Prüfungen erfolgen mit einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min.



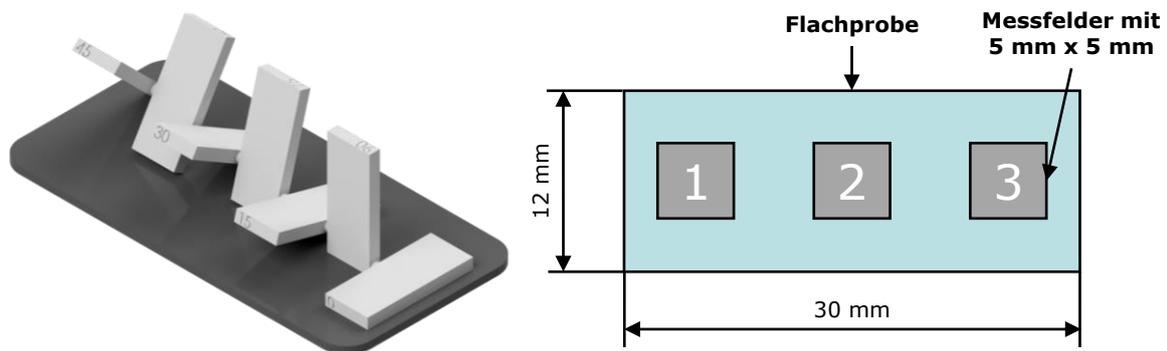
**Abbildung 2: Bauraumausrichtung der Zugproben**

<sup>2</sup> Das Sandstrahlen, dient der vollständigen Entfernung von anhaftendem Pulver und wird als Standard-Nachbearbeitungsverfahren im PBF-LB/P-Verfahren betrachtet.

<sup>3</sup> Bedingt durch den verkleinerten Bauraum der *FORMIGA P110* werden zur verbesserten Vergleichbarkeit diese Zugproben hergestellt. Diese sind heranzuziehen, wenn es aus bestimmten Gründen nicht möglich ist, den Zugprobentyp 1 zu verwenden.

## Oberflächengüte

Für die Untersuchung der Oberflächengüte werden Probekörper aus der Norm *DIN EN ISO / ATSM 520902* verwendet. Der verwendete Probekörper (Abbildung 3), besteht aus insgesamt sieben Flachkörpern der Maße 12 mm x 30 mm x 3 mm mit unterschiedlichen Neigungswinkeln (0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) zur Bauplattform. Die Messungen erfolgen nach dem Sandstrahlen<sup>4</sup> mithilfe der Weißlichtinterferometrie (WLI). In dieser Veröffentlichung wird die Rauheit mithilfe des Weißlichtinterferometers *Nexview NX2 (Zygo Corporation)* bestimmt. Jede Probe wird mit 5,5-facher Vergrößerung und einem Zoom von 0,5 vermessen. Die laterale Auflösung beträgt 3,143 µm. Für die Messung der Rauheit werden insgesamt drei Messfelder der Größe 5 mm x 5 mm nach der in Abbildung 3 (rechts) dargestellten Positionierung herangezogen. [10]



**Abbildung 3:** links: Probekörper „ST\_M.STEP“ zur Untersuchung der Obreflächengüte; rechts: Schematische Darstellung für die Auswertung der Oberflächengüte

Die Auswertung der Rauheit erfolgt mit der Software *Mx™*. Hierbei werden verschiedene Frequenzfilter für die Oberflächendaten angewendet. Diese dienen der Trennung von lang- und kurzskaligen Komponenten und können der kurz- (kw), mittel- (mw) und langwelligen (lw) Rauheit zugeordnet werden. Die verwendeten Frequenzfilter sind in Tabelle 3 dargestellt. Als Rauheitskennwert wird die mittlere arithmetische Höhe (*S<sub>a</sub>*) aus der Norm *DIN EN ISO 25178* verwendet. [16], [17], [18]

**Tabelle 3: Verwendete Frequenzfilter für die Auswertung der Rauheit**

Rauheit	Filtertyp	Filter
Kurzwellige Rauheit (kw)	FFT	Hochpassfilter mit Grenzwellenlänge von 100 µm
Mittelwellige Rauheit (mw)	FFT	Bandpassfilter 100 µm – 1.000 µm
Langwellige Rauheit (lw)	FFT	Tiefpassfilter mit Grenzwellenlänge von 1.000 µm

## Wirtschaftlicher Vergleich

Neben den technischen Aspekten dient eine weitere Untersuchung einem wirtschaftlichen Vergleich. Aufgrund der unterschiedlichen Investitionskosten und Maschinenkonfigurationen weisen alle Anlagen unterschiedliche Druckgeschwindigkeiten auf. Hierfür sollen in einem theoretischen Fallbeispiel mithilfe der Maschinenstundensätze die Herstellkosten berechnet und gegenübergestellt

<sup>4</sup> Da das Sandstrahlen als Standardverfahren nach dem PBF-LB/P angesehen wird, werden auch für die Untersuchung der Oberflächengüte alle Proben gesandstrahlt (siehe <sup>2</sup>).

werden. Als Fallbeispiel dient der Aachener Dom in einer Kleinstserie von 1 Stk. bis 100 Stk. (Abbildung 4 rechts). Der Dom hat eine Größe von etwa 51 mm x 75 mm x 61 mm. Für den Vergleich werden die Herstellkosten aller Anlagen in ihrer Standardausführung mithilfe der Maschinenstundensatzrechnung ermittelt. Hierzu erfolgt eine vereinfachte Ermittlung der Herstellkosten nach der in Abbildung 4 links skizzierten Vorgehensweise. Weitere Kosten, die bspw. durch die Druckvorbereitung sowie - Nachbereitung anfallen, werden in dieser Betrachtung vernachlässigt. [19], [20].

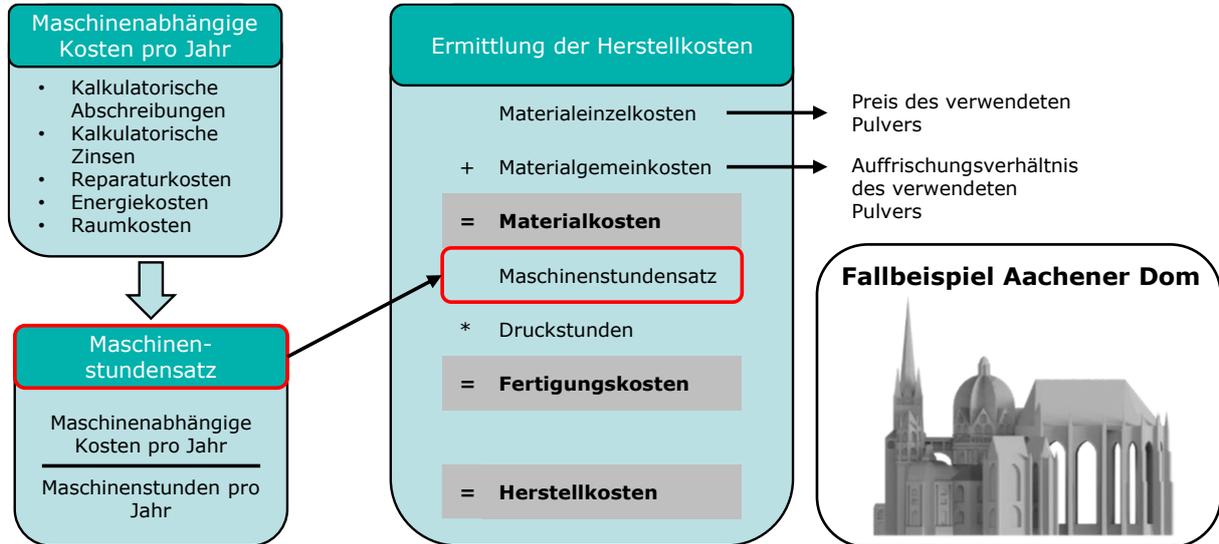


Abbildung 4: Methodik zur Bestimmung der Herstellkosten für den wirtschaftlichen Vergleich

## Ergebnisse

### Ergebnisse der Geometrieauigkeit

Für die Untersuchung der Geometrieauigkeit werden insgesamt drei Probekörper je Anlage gefertigt. Dabei werden alle Probekörper flach in den Bauraum platziert. Abbildung 5 zeigt beispielhaft den Soll-Ist-Vergleich jeweils einer Probe aus allen Anlagen.

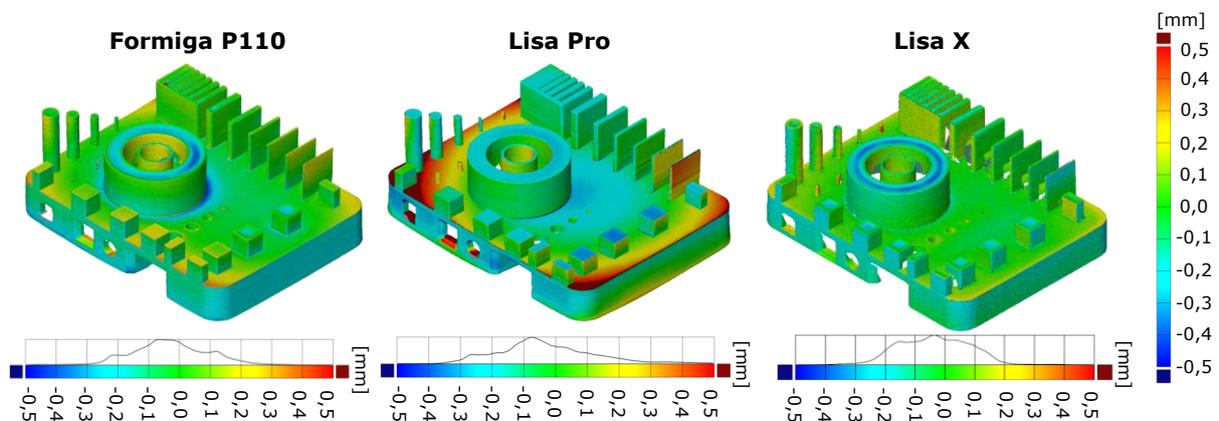


Abbildung 5: Soll-Ist-Vergleich der Geometrieauigkeit bei flacher Positionierung

Die Proben der Anlagen mit Galvo-Scanner (*FORMIGA P110*, *Lisa X*) weisen laut Verteilung im Schnitt Abweichungen von etwa  $\pm 0,30$  mm auf, während die Proben der Anlage mit Gantry-System (*Lisa Pro*) Abweichungen von etwa  $\pm 0,60$  mm aufzeigen. Hierbei neigen die Proben der *Lisa Pro* zu deutlich mehr Verzug, sodass gerade am Rand der Probe die Abweichungen erkennbar sind. Der Verzug ist auf die ungünstige flache Platzierung in Kombination mit den langsamen Verfahrensgeschwindigkeiten beim Gantry-System zurückzuführen. Hierdurch kommt es durch die lange Belichtungszeit der Fläche zur ungleichmäßigen Wärmeverteilung, sodass das Bauteil zu Verzug neigt. Die Proben aus den beiden Anlagen mit Galvoscaner sind bei gleicher Positionierung deutlich verzugsärmer. Hier ist davon auszugehen, dass mithilfe der höheren Laserleistungen sowie der schnelleren Scangeschwindigkeiten die Flächen schneller belichtet werden können, wodurch eine homogenere Temperaturverteilung erreicht wird.

### Auflösungsdetails bei flacher Positionierung

Die Untersuchung der Auflösungsdetails zeigt, dass an der *FORMIGA P110* Stifte und Wandungen bis 0,40 mm mit einer Genauigkeit von 0,10 mm gefertigt werden können. Bei den beiden Benchtop-Anlagen hingegen können die Auflösungsstifte bis max. 1,00 mm Durchmesser gefertigt werden, wobei die durchschnittlichen Abweichungen etwa 0,20 mm (*Lisa Pro*) und 0,10 mm (*Lisa X*) betragen.

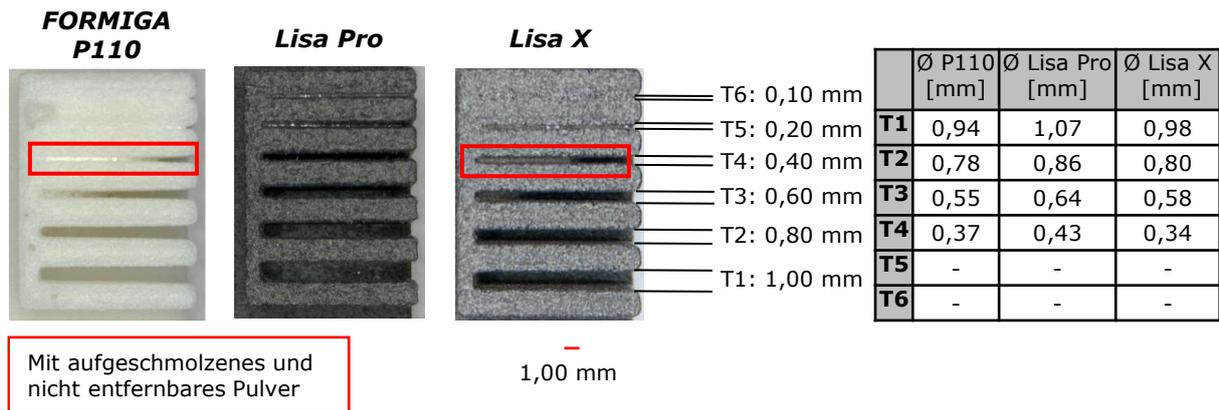
Hinsichtlich der Testwandungen lassen sich an beiden Benchtop-Anlagen Wandstärken bis etwa 0,60 mm Dicke und Abweichungen von 0,10 mm fertigen.

Bei den Auflösungstestlöchern können an der industriellen Anlage alle Merkmale bis zu einem Lochdurchmesser von 2,00 mm gefertigt werden, bei denen die Abweichungen max. 0,18 mm betragen. Die beiden Benchtop-Anlagen ermöglichen eine Realisierung von kleinstmöglichen Durchmessern von 1,00 mm und Abweichungen von 0,10 mm (*Lisa Pro*) und 0,30 mm (*Lisa X*). Die Machbarkeit von kleineren Lochdurchmessern an der *Lisa Pro* ist vermutlich durch die feinere Pulvergrößenverteilung des *PA12 Smooth* Pulvers ( $d_{50} = 41,0 \mu\text{m}$ ) gegenüber den anderen Pulvern (*Lisa X/PA12 Industrial*:  $d_{50} = 62,0 \mu\text{m}$ ; *FORMIGA P110/PA2200*  $d_{50} = 58,0 \mu\text{m}$ ) gegeben. Zusätzlich zeigten Untersuchungen durch *Olejarczyk, Gruber, et al.*, dass das Pulver der Fa. *Sinterit* eine höhere Schmelzenthalpie aufweist, wodurch das umliegende Pulver innerhalb des Loches nicht aufgeschmolzen wird. [3], [21]



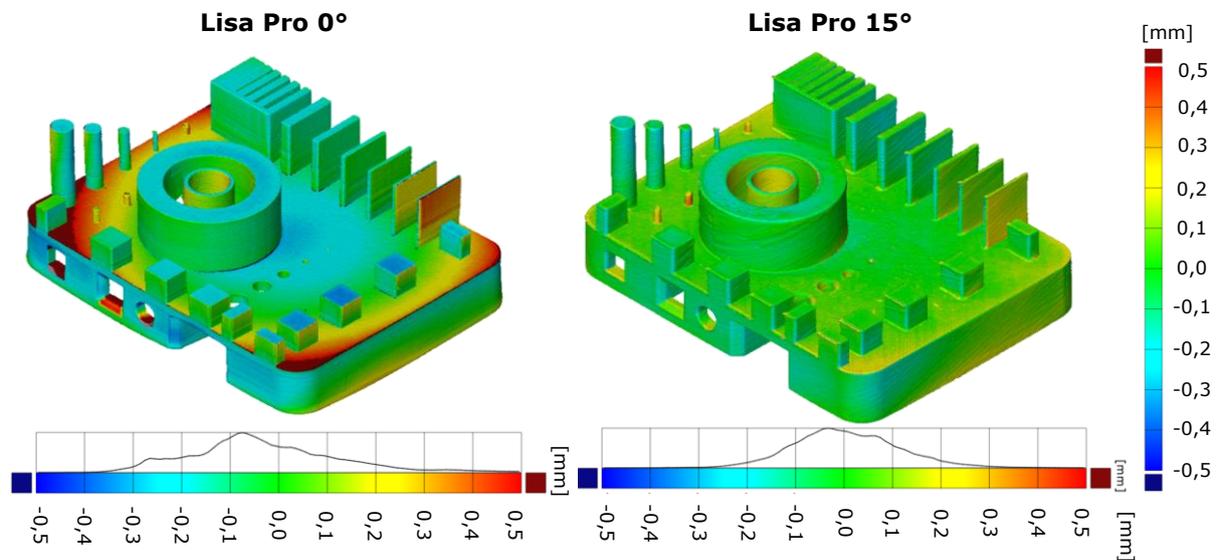
**Abbildung 6: Mikroskopieaufnahmen der Auflösungsstestlöcher von 4,00 mm bis 0,10 mm**

Auflösungstestschlitzte können an der *FORMIGA P110* bis zu 0,80 mm und einer Abweichung von ca. 0,05 mm gefertigt werden. Kleinere Abstände sind grundsätzlich realisierbar, allerdings wird das dazwischenliegende Pulver zum Teil mit aufgeschmolzen, sodass es nicht mehr vollständig entfernt werden kann. Die beiden Benchtop-Anlagen hingegen ermöglichen kleinstmögliche Abstände von 0,6 mm mit Abweichungen von 0,05 mm. Lediglich die *Lisa Pro* ermöglicht vereinzelt noch Abstände von 0,4 mm, bei denen das dazwischenliegende Pulver entfernt werden kann (Abbildung 7).



**Abbildung 7: Gegenüberstellung der Auflösungstestschlitze**

Die Ergebnisse deuten auf etwas genauere Geometriegenauigkeiten der industriellen Anlage hin, auch wenn einige Auflösungsdetails, wie bspw. Löcher, in kleinere Auflösungen an den beiden Benchtop-Systemen gefertigt werden können. Ein Teil der Geometrieabweichungen an der *Lisa Pro* sind auf den stärkeren Verzug zurückzuführen, die durch die längere Belichtungszeit bedingt durch das Gantry-System verursacht werden. Weitere Untersuchungen zeigen jedoch, dass bereits durch eine leicht geneigte Positionierung ebenfalls gute Ergebnisse am Benchtop-System mit Gantry-Antrieb (*Lisa Pro*) erreicht werden können. Bereits eine Neigung um 15° zur Bauplattform in x- und y-Richtung ermöglicht die Fertigung deutlich verzugsärmerer Proben (Abbildung 8).



**Abbildung 8: Soll-Ist-Vergleich der Lisa Pro in Abhängigkeit des Neigungswinkels**

## Ergebnisse der mechanischen Eigenschaften

Alle untersuchten Proben zeigen den für PBF-LB/P-Bauteile üblichen Verlauf an, bei dem der Sprödbruch im Bereich der maximalen Belastung bzw. knapp dahinter auftritt (Abbildung 9). [1]

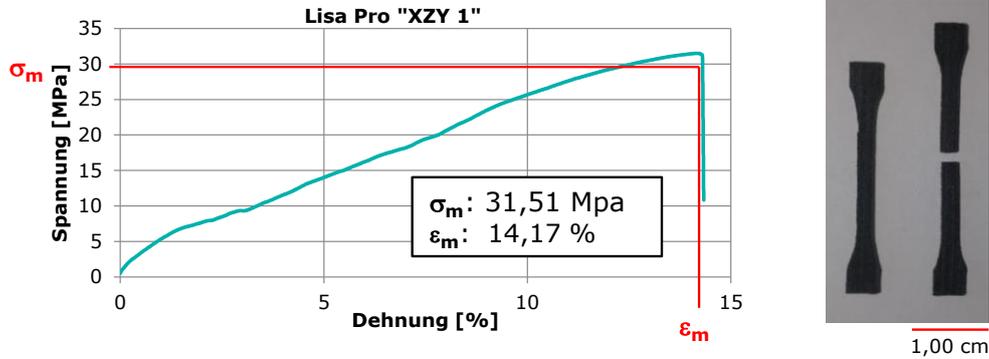


Abbildung 9: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der Zugprobe „XYZ 1“ aus der Lisa Pro

Die gemittelten Ergebnisse der Zugproben mit ihren jeweiligen Standardabweichungen sind in Abbildung 10 zusammengefasst und grafisch gegenübergestellt. Die Auswertung zeigt, dass die Proben der *FORMIGA P110* in allen Ausrichtungen höhere Festigkeiten und Bruchdehnungen aufweisen als die Proben der Benchtop-Anlagen. Auffällig dabei ist ebenfalls, dass die Proben der industriellen Anlage annähernd gleich hohe Zugfestigkeiten von ca. 50 MPa in allen Richtungen aufweisen. Dies ermöglicht einfachere Konstruktionen und Bauteilauslegungen. Die Bruchdehnungen betragen hierbei 24,00 % in XYZ-, 21,40 % in XZY-, 16,80 % in ZYX- und 21,00% in der 45°-Ausrichtung. Im Vergleich der beiden Benchtop-Anlagen weisen die Zugproben der *Lisa X* etwas höhere Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen gegenüber den Proben der *Lisa Pro* auf. Dies ist aus den Datenblättern der Fa. *Sinterit* ebenfalls zu entnehmen und ist auf die Pulverzusammensetzung vom *PA12 Industrial (Lisa X)* gegenüber dem *PA12 Smooth (Lisa Pro)* zurückzuführen. [21]

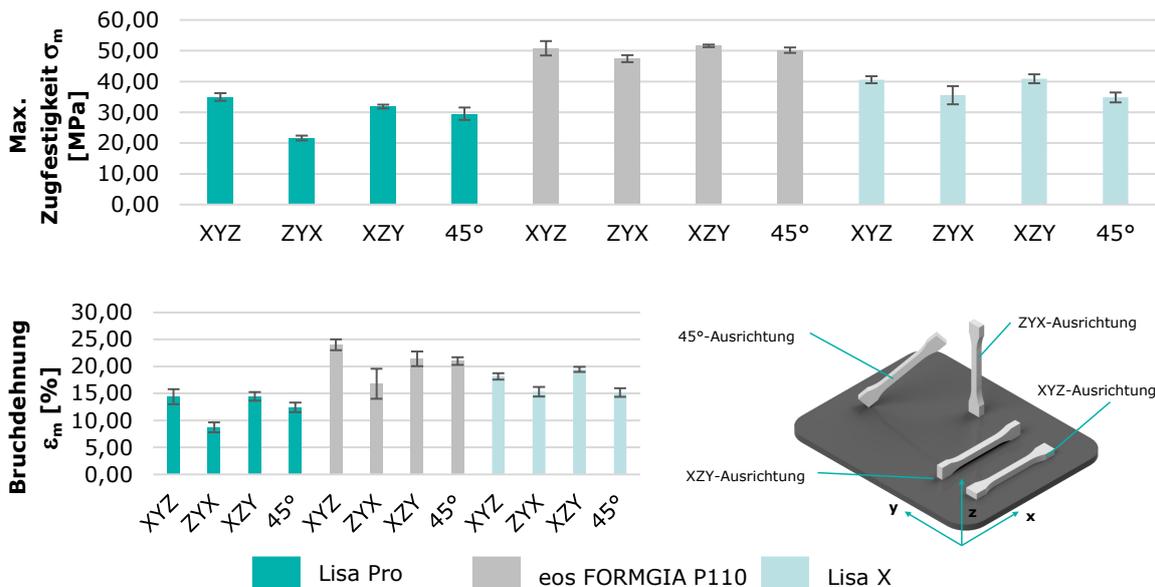
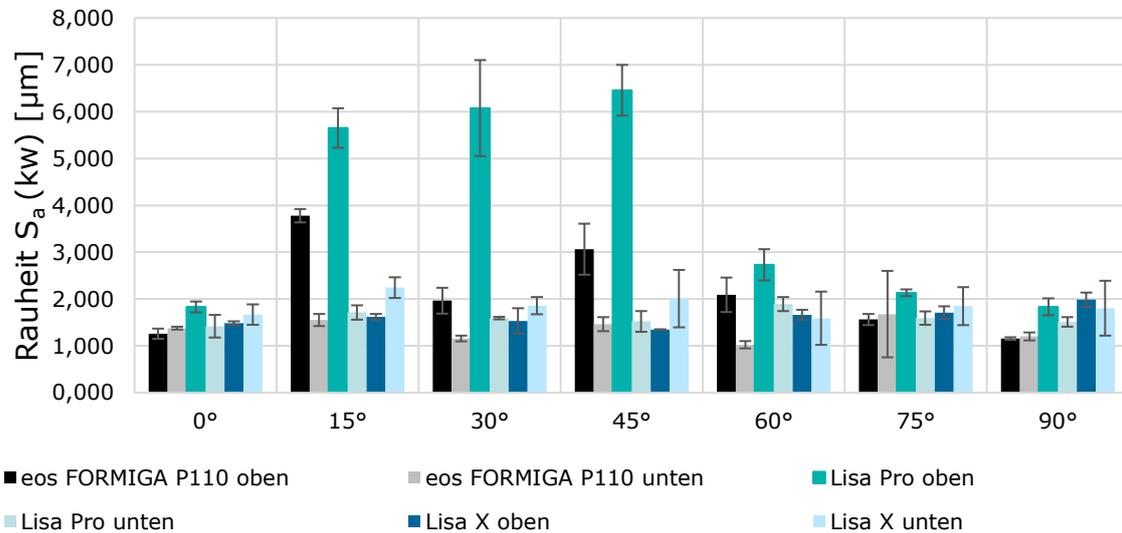


Abbildung 10: Gegenüberstellung der Zugfestigkeiten und der Bruchdehnungen

## Ergebnisse der Oberflächengüte

Die mittlere arithmetische Rauheit  $S_a$  der Proben ist für jede Ober- und Unterseite in Abhängigkeit des Neigungswinkels im Bereich kurzwelliger (kw) Rauheiten in Abbildung 11 dargestellt. Die mittelwelligen Rauheiten (mw) sind in Abbildung 12 und die langwelligen Rauheiten (lw) in Abbildung 13 dargestellt.

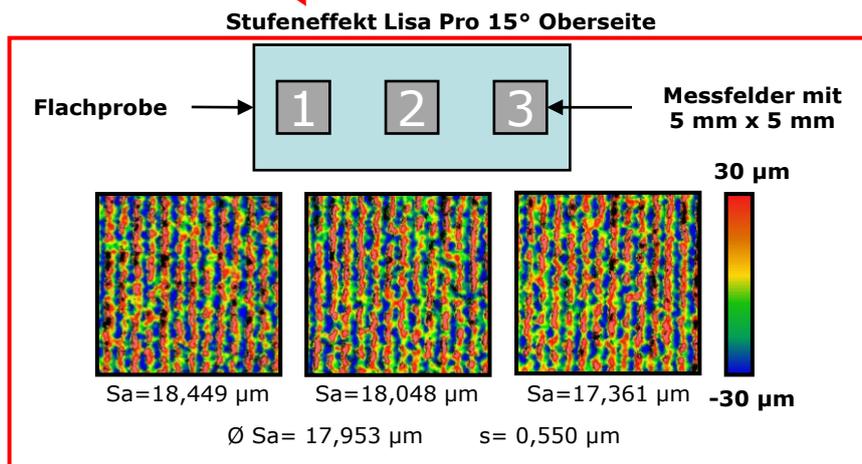
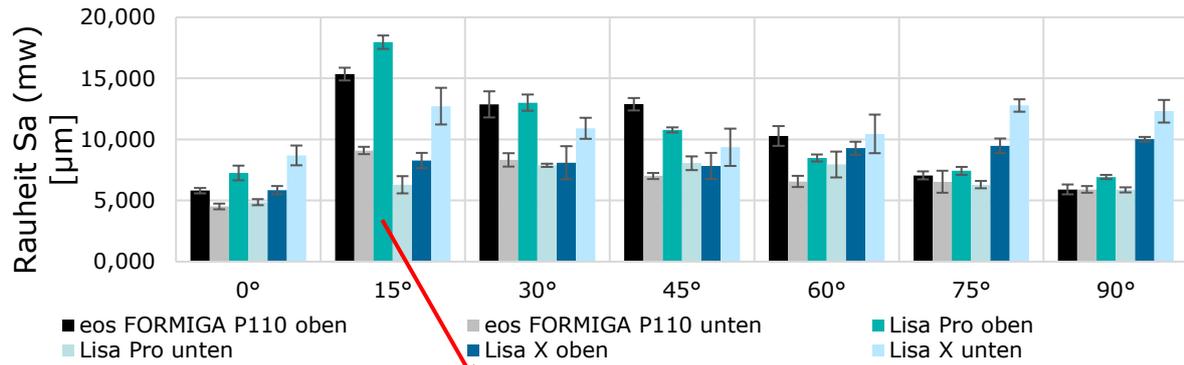


**Abbildung 11: Auswertung der kurzwelligen Rauheit in Abhängigkeit des Neigungswinkels**

Im Bereich der kurzwelligen Rauheit weisen die meisten Proben der Anlagen mit Galvoscaner (*FORMIGA P110* und *Lisa X*) geringere Rauheitswerte als die mit Gantry-System auf. Grundsätzlich ist erkennbar, dass die abwärts gerichteten Seiten (sog. *Downskin*) überwiegend geringere Rauheiten aufweisen als die aufwärts gerichteten Seiten (sog. *Upskin*). Diese Beobachtung ist bekannt und werden laut *Blattmeier* sowie *Bachhewar, Singhal, et al.* wie folgt begründet:

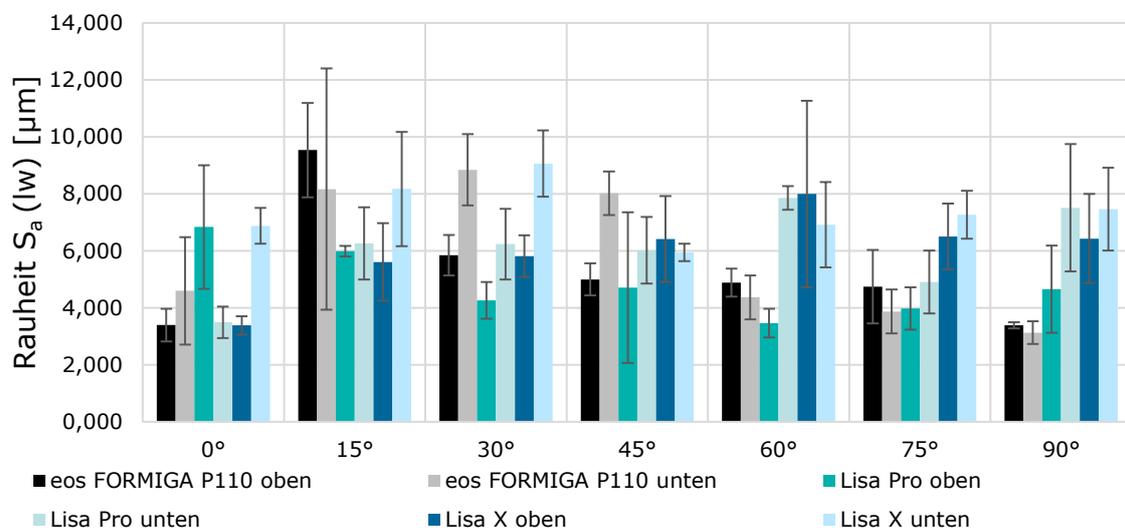
Beim Abfahren einer Laserkontur im Downskin-Bereich, trifft der Laserstrahl auf eine Pulverschicht, unter der loses Pulver vorliegt. Hierbei wird in Abhängigkeit der Schichtdicke und der Eindringtiefe des Laserstrahls ein Teil der darunterliegenden Schicht mit aufgeschmolzen, die zur Füllung der Kontur führt. Bei geeigneter Schichtdicke ( $d_z$ ) sowie Laserleistung ( $P_L$ ) führt dies zur Verbesserung der Oberflächenrauheit. [22], [23]

Im Bereich der mittelwelligen (mw) Rauheit (Bandpassfilter 100  $\mu\text{m}$  bis 1.000  $\mu\text{m}$ ) weisen alle Anlagen ähnliche Rauheitswerte auf. Die maximal gemessenen Rauheiten ( $S_a$ ) werden bei den Proben der industriellen Anlage bei einer Ausrichtung von 15° auf der Oberseite mit 15,351  $\mu\text{m}$  gemessen. Bei den beiden Benchtop-Anlagen wird die höchste Rauheit bei einer Ausrichtung von 15° auf der Oberseite mit 17,953  $\mu\text{m}$  (*Lisa Pro*) und 75° auf der Unterseite mit 12,786  $\mu\text{m}$  (*Lisa X*) gemessen. Dies ist auf den Stufeneffekt, welcher durch die schichtweise Fertigung bedingt ist, zurückzuführen (siehe Abbildung 12 unten).



**Abbildung 12: Auswertung der mittelwelligen Rauheit in Abhängigkeit des Neigungswinkels**

Die Auswertung im langwelligen (lw) Ortswellenlängenbereich mit einem Grenzwellenlängenbereich von 1.000  $\mu\text{m}$  zeigt keine eindeutige Tendenz. Hier liegen die Rauheiten der *FORMIGA P110* bei 3,129  $\mu\text{m}$  bis 9,537  $\mu\text{m}$ , die der *Lisa X* bei 3,388  $\mu\text{m}$  bis 9,064  $\mu\text{m}$  und die der *Lisa Pro* bei 3,467  $\mu\text{m}$  bis 7,855  $\mu\text{m}$ . Die starken Schwankungen lassen davon ausgehen, dass der Neigungswinkel keinen starken Einfluss auf die langwelligen Rauheiten hat.



**Abbildung 13: Auswertung der langwelligen Rauheit in Abhängigkeit des Neigungswinkels**

## Ergebnisse des wirtschaftlichen Vergleichs

Zur Auswertung des wirtschaftlichen Vergleichs bedarf es zunächst der Ermittlung der jeweiligen Maschinenstundensätze. Angenommen werden eine Laufzeit von 2.000 Maschinenstunden<sup>5</sup> pro Jahr und einer Nutzungszeit von sechs Jahren je Anlage<sup>6</sup>. [24] Als kalkulatorischer Zinssatz wird der nach aktueller Rechtslage höchst anzuwendende Satz von 3,03 % angenommen. Die Kosten pro m<sup>2</sup> im Jahr werden mit 120,00 € und der Preis pro kWh mit 0,2496 €<sup>7</sup> angesetzt. Die entsprechenden Maschinenstundensätze sind in Tabelle 4 aufgelistet. [25] , [26]

**Tabelle 4: Berechnung der Maschinenstundensätze**

	<b>FORMIGA P110</b>	<b>Lisa Pro</b>	<b>Lisa X</b>
Maschinenstunden pro Jahr	2.000	2.000	2.000
Wiederbeschaffungswert [€]	180.000,00	15.000,00	22.000,00
Nutzungsjahre	6	6	6
<b>Kalk. Abschreibungen [€/Jahr]</b>	<b>30.000,00</b>	<b>2.500,00</b>	<b>3.666,67</b>
Kalk. Zinssatz	3,03 %	3,03 %	3,03 %
<b>Kalkulatorische Zinsen [€]</b>	<b>2.724,00</b>	<b>227,00</b>	<b>332,93</b>
<b>Instandsetzung und Reparatur [€] (5% des Wiederbeschaffungswerts)</b>	<b>9.000,00</b>	<b>750,00</b>	<b>1.100,00</b>
Platzbedarf in m <sup>2</sup>	1,40844	0,345	0,3965
Kosten pro m <sup>2</sup> pro im Jahr [€]	120,00	120,00	120,00
<b>Platzkosten [€]</b>	<b>169,01</b>	<b>41,40</b>	<b>47,58</b>
Ø Leistungsaufnahme [kW]	1,4	1,1	0,85
Preis je kWh [€]	0,2496	0,2496	0,2496
<b>Energiekosten [€]</b>	<b>698,88</b>	<b>549,12</b>	<b>424,32</b>
<b>Maschinenkosten pro Jahr</b>	<b>42.591,89</b>	<b>4.067,52</b>	<b>5.571,50</b>
<b>Maschinenstundensatz [€/Std.]</b>	<b>21,30</b>	<b>2,03</b>	<b>2,79</b>

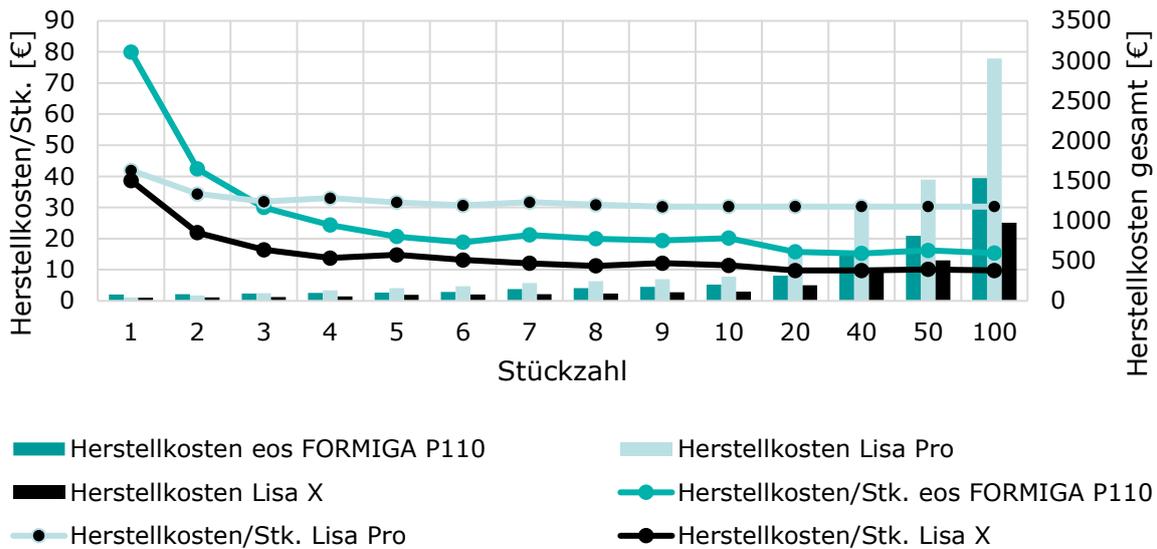
Mithilfe des Maschinenstundensatzes können im nächsten Schritt die Herstellkosten nach dem in Abbildung 4 dargestelltem Schema berechnet werden (siehe Anhang A1). Zur Berechnung der Stückzahlen von 1 Stk. bis 100 Stk. müssen darüber hinaus die maximal zu platzierenden Bauteile in der jeweiligen Baukammer ermittelt werden. Eine geeignete Software bietet bspw. *Autodesk Netfabb*, bei der mithilfe von zwei- oder dreidimensionalen Anordnungsalgorithmen die herzustellenden Bauteile optimal im Raum angeordnet werden. Bei vollständiger Ausnutzung des Bauraums lassen sich somit bei gleichbleibender Bauteilausrichtung maximal 40 Stk. an in der *FORMIGA P110*, 10 Stk. in der *Lisa Pro* und 20 Stk. in der *Lisa X* fertigen (siehe Anhang A2). [27]

Abbildung 14 stellt die Herstellkosten sowie die Herstellkosten Stk. in Abhängigkeit der Stückzahlen grafisch gegenüber.

<sup>5</sup> Der Maschinenstundensatz von 2.000 Maschinenstunden pro Jahr entspricht einer vereinfachten Annahme und wurde zur besseren Vergleichbarkeit für alle Anlagen gleich gewählt.

<sup>6</sup> Die Nutzungszeit von sechs Jahren entsprechen laut Bundesministerium der Finanzen einer gewöhnlichen Nutzungsdauer für „Umformende Sondermaschinen mit einer starken kunden- oder bauteilspezifischen Auslegung“ für den Wirtschaftszweig Maschinenbau.

<sup>7</sup> Entspricht dem durchschnittlichen Strompreis für die Industrie laut BDEW-Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.



**Abbildung 14: Gegenüberstellung der Herstellkosten und der Herstellkosten/Stk.**

Die niedrigsten Herstellkosten je Stück werden bei der *Lisa X* in allen Stückzahlen erreicht. Bemerkenswert hierbei ist, dass bereits bei einer Stückzahl von drei die Herstellkosten der *FORMIGA P110* niedriger sind als die der *Lisa Pro*. Dies hängt neben den geringeren Materialkosten vom *PA 2200* Pulver vor allem von der deutliche längeren Fertigungszeit der *Lisa Pro* ab. Grund hierfür sind die deutlich langsameren Scangeschwindigkeiten durch das Gantry-System an. Durch die Kombination von geringen Investitionskosten und der Verwendung eines Galvo-Scanners ergeben sich hierbei aufgrund der schnelleren Scangeschwindigkeiten die geringsten Herstellkosten je Stück bei der *Lisa X*. Ausgedrückt in Baufortschritten, also der zu fertigenden Schichten pro Stunde, ergeben sich bei der industriellen Anlage bei voller Auslastung (40 Stk.) ein Baufortschritt von 16 mm/h. Bei der *Lisa Pro* hingegen sind es (bei 10 Stk.) 1,7 mm/h, sodass der um Faktor zehn geringere Maschinenstundensatz durch die längere Fertigungszeit kompensiert wird. Bei der *Lisa X* beträgt der Baufortschritt (bei 20 Stk.) 9,1 mm/h.

## Zusammenfassung & Ausblick

Ziel dieser Veröffentlichung ist die Bauteilcharakterisierung von PBF-LB/P-gefertigten Bauteilen auf der Grundlage von unterschiedlichen Anlagekonzepten. Durch das zunehmende Angebot von sog. Benchtop-Anlagen und der geringen Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen in diesem Gebiet kann die Notwendigkeit eines Anlagenvergleichs begründet werden.

Im Rahmen dieser Untersuchung konnte ein Vergleich zwischen einem Industriesystem und zwei Benchtop-Systemen durchgeführt werden, dessen wichtigsten Ergebnisse in Tabelle 5 dargestellt sind.

**Tabelle 5: Gegenüberstellung des Anlagenvergleichs**

Anlage	<i>FORMIGA P110</i>	<i>Lisa Pro</i>	<i>Lisa X</i>
<b>Geometriegenauigkeit</b>			
<b>Allgemein</b>	± 0,30 mm Verzugsärmer aufgrund des Galvo-Scanners	± 0,30 mm Durch Anpassung der Bauteilausrichtung vergleichbare Ergebnisse erzielbar	± 0,30 mm Verzugsärmer aufgrund des Galvo-Scanners
<b>Auflösungsdetails</b>			
<b>Stifte</b>	bis 0,4 mm (±0,10 mm)	bis 1,00 mm (± 0,20 mm)	bis 1,00 mm (± 0,10 mm)
<b>Wandungen</b>	bis 0,4 mm (±0,10 mm)	bis 0,6 mm (± 0,10 mm)	bis 0,6 mm (± 0,10 mm)
<b>Löcher</b>	bis 2,0 mm (± 0,18 mm)	bis 1,0 mm (± 0,10 mm)	bis 1,0 mm (± 0,30 mm)
<b>Schlitze</b>	bis 0,8 mm (± 0,05 mm)	bis 0,6 mm (± 0,05 mm)	bis 0,6 mm (± 0,05 mm)
<b>Mechanische Eigenschaften [<math>\sigma_m / \epsilon_m</math>]</b>			
<b>XYZ</b>	50,76 MPa / 24,00 %	34,97 MPa / 14,39 %	40,59 MPa / 18,14 %
<b>ZYX</b>	47,44 MPa / 16,80 %	21,62 MPa / 8,70 %	35,55 MPa / 15,30 %
<b>XZY</b>	51,60 MPa / 21,40 %	31,84 MPa / 14,47 %	40,88 MPa / 19,45 %
<b>45°</b>	50,18 MPa / 21,40 %	29,50 MPa / 12,43 %	34,84 MPa & 15,16 %
<b>Oberflächengüte (Sa)</b>			
<b>kw-Rauheit</b>	1,000 $\mu\text{m}$ bis 3,800 $\mu\text{m}$	1,400 $\mu\text{m}$ bis 6,500 $\mu\text{m}$	1,300 $\mu\text{m}$ bis 2,200 $\mu\text{m}$
<b>mw-Rauheit</b>	4,500 $\mu\text{m}$ bis 15,400 $\mu\text{m}$	4,900 $\mu\text{m}$ bis 18,000 $\mu\text{m}$	5,900 $\mu\text{m}$ bis 12,800 $\mu\text{m}$
<b>lw-Rauheit</b>	3,100 $\mu\text{m}$ bis 9,500 $\mu\text{m}$	3,500 $\mu\text{m}$ bis 7,900 $\mu\text{m}$	3,300 $\mu\text{m}$ bis 9,000 $\mu\text{m}$
<b>Wirtschaftlicher Vergleich</b>			
<b>Maschinenstundensatz</b>	21,30 €/h	2,03€/h	2,79 €/h
<b>Baufortschritt</b>	16 mm/h	1,7 mm/h	9,1 mm/h

Benchtop-Systeme stellen aufgrund der niedrigeren Investitionskosten durchaus eine attraktive Alternative in den Einstieg der laserbasierten Pulverbettfusion von Polymeren dar. Gerade Benchtop-Systeme mit einem Galvoscaner erweisen sich aufgrund der deutlich höheren Wirtschaftlichkeit als durchaus konkurrenzfähig gegenüber Industrieanlagen. Diese Veröffentlichung untersucht die *FORMIGA P110 (eos)* mit der *Lisa Pro* und *Lisa X (Sinterit)*. In weiteren Untersuchungen sollten weitere Anlagenhersteller mit einbezogen werden.

## Literatur

- [1] Schmid, Manfred: Selektives Lasersintern (SLS) mit Kunststoffen. Technologie, Prozesse und Werkstoffe, München: Hanser, 2015.
- [2] DIN EN ISO / ATSM 52936-1: Additive Fertigung von Polymeren – Qualifizierungsgrundsätze, Januar 2023.
- [3] Olejarczyk, Michał; Gruber, Piotr; Ziółkowski, Grzegorz, 2020: Capabilities and Limitations of Using Desktop 3-D Printers in the Laser Sintering Process. In: *Applied Sciences* (10(18)), S. 6184. DOI: 10.3390/app10186184.
- [4] 3Druck.com, Sowka, David: Selective Laser Sintering: Wichtiges 3D-Druck-Patent läuft heute aus, Internet: 27.04.2021, Wien (Österreich) (<https://3druck.com/drucker-und-produkte/selective-laser-sintering-wichtiges-3d-druck-patent-laeuft-heute-aus-1114408/>).
- [5] 3Dnatives SAS, H., Alexander: Die wichtigsten SLS-Drucker auf dem 3D-Druck-Markt - 3Dnatives, Internet: 29.07.2023, Paris (Frankreich) (<https://www.3dnatives.com/de/sls-drucker-220320181/#!>).
- [6] Statista GmbH, N. N.: Additive Fertigung, Internet: 29.07.2023, Hamburg (<https://de.statista.com/statistik/studie/id/29177/dokument/additive-fertigung-statista-dossier/>).
- [7] Sinterit, N. N.: Lisa Pro SLS 3D Printer - Sinterit. Lisa PRO SLS 3D-Drucker, Internet: 12.08.2023, Krakau (Polen) (<https://sinterit.com/de/3ddrucker/lisa-pro/>).
- [8] Kuhn-Stoff GmbH & Co. KG, N. N.: Lasersintering in der additven Fertigung mit Hilfe der EOS FORMIGA P 100 / P 110, Internet: 12.08.2023, Weingarten (<https://www.kuhn-stoff.de/de/maschinen.html>).
- [9] Sinterit, N. N.: Sinterit – Manufacturer of compact and industrial SLS 3D printers- Lisa X, 12.08.2023, Krakau (Polen) (<https://sinterit.com/de/3ddrucker/lisa-x-2/>).
- [10] DIN EN ISO / ATSM 52902:2019: Additive Fertigung - Testkörper, Mai 2020.
- [11] GOM GmbH, N. N.: GOM Inspect Suite: Qualität einfach sichtbar machen. Software für 3D-Inspektion, Internet: 31.07.2023, Braunschweig (<https://www.gom.com/de-de/produkte/gom-inspect-suite>).
- [12] Hasenauer & Hesser, N. N.: 3D-Digitalisierung - Hasenauer & Hesser, 27.08.2023, Mühlacker (<https://hasenauer-hesser.de/3d-digitalisierung>).
- [13] DIN EN ISO 527-1: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften, Dezember 2019.
- [14] DIN EN ISO 527-2: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften, Juni 2012.
- [15] DIN EN ISO/ASTM 52921:2017-01: Normbegrifflichkeiten für die Additive Fertigung.
- [16] Digital Surf, Blateyron, François: Filter-Techniken - Oberflächen-Messtechnik-Leitfaden, Internet: 31.07.2023, Besançon (Frankreich) (<https://guide.digitalsurf.com/de/leitfaden-filtertechniken.html>).

- [17] Lehrstuhl für Messtechnik & Sensorik, Seewig, Jörg; Wiehr, Christian; Gröger, Sophie: Charakterisierung technischer Bauteiloberflächen. Stand der Oberflächenmesstechnik heute, Internet: 31.07.2023, Kaiserslautern (<https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=Charakterisierung+technischer+Bauteiloberfl%C3%A4chen>).
- [18] DIN EN ISO 25178-2:2012-09: Geometrische Produktspezifikation (GPS)Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft, September 2012.
- [19] Wöltje, Jörg: Kosten- und Leistungsrechnung. Inkl. Arbeitshilfen online ; Alle Verfahren und Systeme auf einen Blick, s.l.: Haufe Verlag, 2016.
- [20] reimus.NET GmbH, Denzin, Sarah: Maschinenstundensatzrechnung - Maschinenstundensatz berechnen, Kostenrechnung, Fertigungsgemeinkosten, Internet: 12.08.2023, Brandenburg (<https://www.controllingportal.de/Fachinfo/Kostenrechnung/Maschinenstundensatzrechnung.html>).
- [21] N. N.: Sinterit – Manufacturer of compact and industrial SLS 3D printers - PA12 Industrial, 14.08.2023, Krakau (Polen) (<https://sinterit.com/de/materialien/pa12-industrial/>).
- [22] Bacchewar, P. B.; Singhal, S. K.; Pandey, P. M., 2007: Statistical modelling and optimization of surface roughness in the selective laser sintering process. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 221 (1), S. 35–52. DOI: 10.1243/09544054JEM670.
- [23] Blattmeier, Monika: Strukturanalyse von lasergesinterten Schichtverbunden mit werkstoffmechanischen Methoden. Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2011, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012.
- [24] Bundesministerium der Finanzen, N. N.: AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig "Maschinenbau", Internet: 14.08.2023, Berlin ([https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Waetere\\_Steuertemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/AfA-Tabelle\\_Maschinenbau.html](https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Waetere_Steuertemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_Maschinenbau.html)).
- [25] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., Bdew: BDEW-Strompreisanalyse Juli 2023, 14.08.2023, Berlin (<https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>).
- [26] gpa NRW, N. N.: Kalkulatorischer Zinssatz 2024 | gpaNRW, 14.08.2023, Herne (<https://gpanrw.de/aktuelles/aktuelle-meldungen/kalkulatorischer-zinssatz-2024>).
- [27] DREICAD GmbH, N. N.: Netfabb, Internet: 22.08.2023, Ulm (<https://www.dreicad.de/produkte/additiv/netfabb>).

## Kontaktangaben

Marco Skupin, M.Sc.  
GoetheLab for Additive Manufacturing  
FH Aachen (Fachbereich Maschinenbau & Mechatronik)  
Goethestr. 1,  
52064 Aachen  
E-Mail: [Skupin@fh-aachen.de](mailto:Skupin@fh-aachen.de)  
WEB: [www.goethelab.fh-aachen.de](http://www.goethelab.fh-aachen.de)

## Anhang

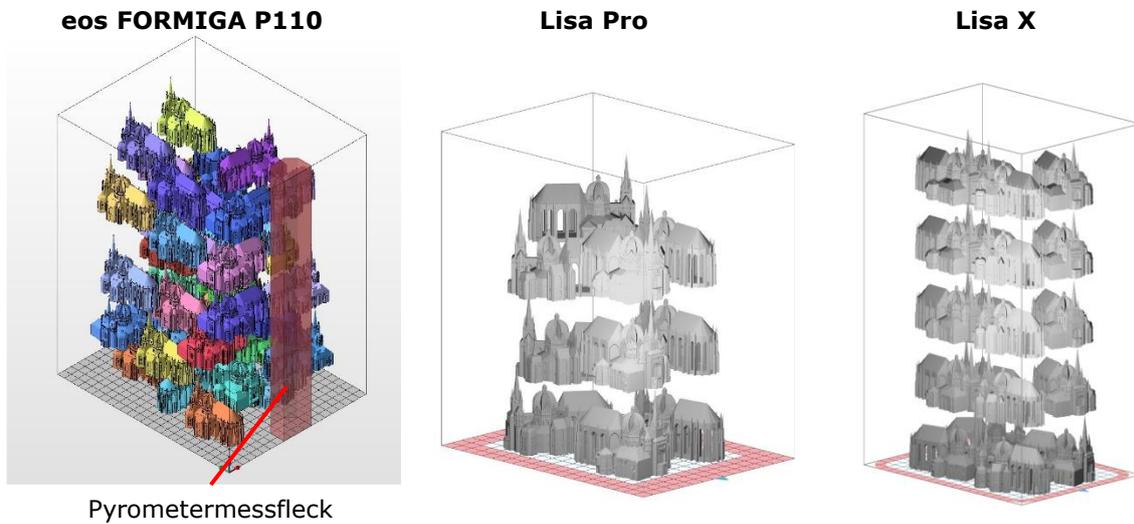
### Anhang A1 – Beispielhafte Ermittlung der Herstellkosten

Die Materialeinzelkosten ergeben sich aus dem Gewicht eines herzustellenden Bauteils multipliziert mit dem jeweiligen Preis des verwendeten Pulvers. Hierdurch wird das tatsächlich verwendete Pulver, welches in das Bauteil eingeht, berücksichtigt. Als Gemeinkosten wird der prozentuale Anteil des aufzufrischenden Pulvers, welches in das Bauteil eingeht, verrechnet. Hierbei handelt es sich um eine vereinfachte Annahme, da streng genommen das komplette Pulver des Bauraums aufgefrischt werden muss. Die dabei entstehenden Mehrkosten werden hierbei nicht berücksichtigt. Für die Ermittlung der Fertigungskosten werden die Maschinenstundensätze mit der voraussichtlichen Druckdauer verrechnet. Diese kann aus der entsprechenden Software zur Datenvorbereitung (*eos PSW* für *FORMIGA P110*; *Sinterit Studio 2019* für *Lisa Pro/Lisa X*) entnommen werden. Durch Addition der Materialkosten und Fertigungskosten ergeben sich die Herstellkosten. Die Berechnung der Herstellkosten bei einer Stückzahl von eins ist beispielhaft in Tabelle 6 dargestellt.

**Tabelle 6: Berechnung der Herstellkosten des Aachener Doms bei Stückzahl eins**

	<i>FORMIGA P110 / PA 2200</i>	<i>Lisa Pro / PA12 Smooth</i>	<i>Lisa X / PA12 Industrial</i>
Volumen Aachener Dom	30,14 cm <sup>3</sup>	30,14 cm <sup>3</sup>	30,14 cm <sup>3</sup>
* Dichte des PA12 Pulvers	0,93 g/cm <sup>3</sup>	0,99 g/cm <sup>3</sup>	1,03 g/cm <sup>3</sup>
= Gewicht/Stk.	28,0302 g	29,8386 g	31,0422 g
* Pulverpreis	63,00 €/kg	120,00 €/kg	120,00€/kg
= Materialeinzelkosten	1,77 €/Stk.	3,58 €/Stk.	3,73€/Stk.
+ Materialgemeinkosten	0,88 €/Stk.	1,07 €/Stk.	1,12 €/Stk.
= Materialkosten	2,65 €/Stk.	4,65 €/Stk.	4,84 €/Stk.
Maschinenstundensatz	21,30 €/h	2,03 €/h	2,79 €/h
* Druckdauer	3,63 h	18,37 h	12,12 h
= Fertigungskosten	77,32 €	37,29 €	33,81 €
= Herstellkosten	79,97 €	41,95 €	38,66 €

## Anhang A2 – Darstellung der maximalen Bauteilauslegung pro Baujob



### **Annahme zur maximalen Anzahl an Bauteilen pro Baujob:**

- Abstand zum Rand in XY-Richtung 20 mm aufgrund der „Cold-Spots“
- Abstand zwischen den Bauteilen mindestens 1 mm
- Abstand zur Bodenplatte mindestens 1 mm
- Bauteile dürfen lediglich um die z-Achse gedreht werden, um möglichst ähnliche Bauteile herzustellen

Abbildung 15: Maximale Bauteile je Baujob (links: Autodesk Netfabb; mitte und rechts: Sinterit Studio 2019)