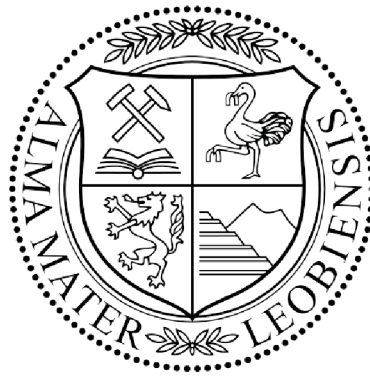


# Lehrstuhl für Umformtechnik

Department Product Engineering  
Montanuniversität Leoben



## **MASTERARBEIT**

### **Charakterisierung der Oberflächengüte und Grenzabmessungen beim Selektiven Laserschmelzen**

Lukas Preuler, BSc

Studienrichtung Metallurgie

Leoben, August 2015

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den verwendeten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

.....  
Lukas Preuler

## Danksagung

Diese Masterarbeit ist am Lehrstuhl für Umformtechnik der Montanuniversität Leoben entstanden. Ich möchte mich hiermit bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhls bedanken, welche mich tatkräftig beim Erstellen der Arbeit unterstützt haben. Besonders bedanke ich mich beim Leiter des Lehrstuhls, Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Bruno Buchmayr. Er hat mir dieses besonders interessante Thema vorgeschlagen und stand mir bei dessen Umsetzung stets zur Seite. Auch bei Dipl.-Ing. Gerhard Panzl und Dipl.-Ing. Maximilian Alexander Walzl bedanke ich mich recht herzlich für die vielen beantworteten Fragen und die großartige Hilfe.

Ein besonderer Dank gilt nicht zuletzt meiner Familie und meinen Freunden, welche mich während meiner gesamten Studienzeit bestmöglich unterstützt haben.

## Kurzfassung

Additive Fertigungsverfahren, wie etwa das selektive Lasersintern oder -schmelzen, stellen eine Revolution in der Fertigungstechnik dar. Mit dieser Technik wird die Herstellung vieler Bauteile vereinfacht oder sogar erst ermöglicht. Um geforderte Qualitätsmerkmale von Produkten zu realisieren, ist eine sorgfältige Evaluierung der Prozesse notwendig. Mit dieser Arbeit wurde die Herstellbarkeit von Bauteilen aus Maragingstahl mit dem Verfahren des „Direct Metal Laser Sintering“, kurz DMLS, untersucht. Dieses Verfahren wurde von der deutschen Firma EOS GmbH entwickelt, welche auch die für diese Arbeit verwendete Fertigungsmaschine EOSINT M280, produzierte. Um die Herstellbarkeit zu beurteilen wurde die erreichbare Feinheit von Strukturen, deren Maßhaltigkeit und die erzielte Oberflächenqualität untersucht. Dazu wurden mit Hilfe eines CAD-Programms 3D-Modelle von Probenkörpern erstellt, an welchen eine Überprüfung der genannten Eigenschaften bestmöglich erfolgen konnte. Nach der Herstellung wurden die Bauteile entsprechend präpariert um die einzelnen Qualitätsmerkmale bestimmen zu können. Das Ermitteln der tatsächlichen Probenabmessungen wurde durch mechanische Messinstrumente, sowie anhand von Schliffbildern und mit Hilfe des Mathematikprogramms Matlab durchgeführt. Die Oberflächenrauheit wurde mittels Konfokalmikroskop ermittelt. Für unzugängliche bzw. zu raue Oberflächen wurde ebenfalls Matlab eingesetzt.

## Abstract

Additive manufacturing technologies, like for example selective laser sintering or melting are representing a revolution of production technology. With these techniques the production of many parts gets simplified or even possible. To reach required quality standards the different processes have to be evaluated. In this work the production of parts out of Maraging Steel using the Direct Metal Laser Sintering (DMLS) method was examined. DMLS was invented by EOS GmbH, a German company which also built the used machine called EOSINT M280. To evaluate the ability of production the lower limits of structure dimensions, the dimensional stability and the reached surface quality were determined. Therefore a CAD-program was used to create 3D-models in a form, that these properties could be characterized as good as possible. After their production the samples were prepared to insure a good quality of measurement. The size of the manufactured structures was determined by the use of mechanical measuring devices, micrographs and the mathematics program Matlab. The surface quality was examined by a confocal microscope. For surfaces which were not reachable or too rough for the microscope, the quality was also measured by Matlab.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Eidesstattliche Erklärung .....</b>	<b>I</b>
<b>Danksagung.....</b>	<b>II</b>
<b>Kurzfassung .....</b>	<b>III</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>IV</b>
<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>1 Einführung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Prozesskette.....	1
1.2 Laser Additive Manufacturing.....	2
1.3 Laser Sintering/Melting .....	3
1.3.1 Prozessablauf.....	4
1.4 Laser Metal Deposition .....	5
1.5 Direct Metal Laser Sintering (DMLS).....	6
1.6 Prozessparameter .....	6
1.6.1 Laserstrahl .....	7
1.6.2 Lasergeschwindigkeit .....	9
1.6.3 Schichtdicke.....	9
1.6.4 Belichtungsstrategie .....	10
1.6.5 Aufbaustrategie.....	13
1.7 Benchmark-Modelle.....	14
<b>2 Versuchsdurchführung.....</b>	<b>16</b>
2.1 Fertigungsmaschine EOSINT M280.....	16
2.2 Material.....	18
2.3 Proben.....	19
2.3.1 Probe P_1.....	20
2.3.2 Probe P_2.....	21
2.3.3 Probe P_3.....	23
2.3.4 Proben P_4 und P_5 .....	24
2.4 Bestimmung der Oberflächenqualität.....	26
2.4.1 Alicona Infinite Focus G4.....	26

2.4.2	Messung der Oberflächenrauheit mit Matlab Programmen .....	28
2.4.2.1	Rauheitsmessung Probe P_1 .....	28
2.4.2.2	Rauheitsmessung Probe P_2 .....	31
2.5	Bestimmung der Kanaldurchmesser .....	36
2.6	Untersuchung mittels Computertomografie .....	38
<b>3</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion.....</b>	<b>39</b>
3.1	Probe P_1.....	39
3.1.1	Abmessungen.....	39
3.1.2	Oberflächenqualität .....	44
3.1.3	Aufnahmen der Hohl- und Vollstrukturen und der Kanäle.....	45
3.2	Probe P_2.....	51
3.2.1	Abmessungen.....	51
3.2.2	Oberflächenqualität .....	56
3.2.3	Aufnahmen der Blättchenquerschnitte .....	61
3.3	Probe P_3.....	67
3.3.1	Abmessungen.....	67
3.3.2	Oberflächenqualität .....	68
3.3.3	Abbildungen der Zylinder- und Quaderquerschnitte.....	70
3.4	Proben P_4 und P_5 .....	73
<b>4</b>	<b>Tabellarische Zusammenfassung .....</b>	<b>75</b>
	<b>Akronyme.....</b>	<b>76</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>78</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>81</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>83</b>

# 1 Einführung

Additive Manufacturing (AM) wurde in den späten 1980er entwickelt und bezeichnet Herstellungsverfahren bei welchen Bauteile nicht durch Entfernen von Material, wie etwa beim Fräsen, sondern Schicht für Schicht durch Materialzugabe aufgebaut werden. Zuerst wurden diese Verfahren nur für die Herstellung von einzelnen Prototypen verwendet. Man sprach hier vom Rapid Prototyping (RP). Später wurde in Betracht gezogen mit dem Verfahren auch tatsächliche Produkte zu produzieren und das Prototyping wurde durch Manufacturing ersetzt, wodurch der Begriff des Rapid Manufacturing (RM) entstand. Schließlich setzte sich der Begriff des Additive Manufacturing durch, da er die grundlegende Herstellstrategie besser beschrieb. Im Laufe der Zeit wurden weitere Bezeichnungen wie z.B. Layer Manufacturing, Direct Digital Manufacturing u.s.w. eingeführt [1] [2].

Die Anwendung von AM eignet sich grundsätzlich dann, wenn einer der folgenden Punkte erfüllt wird [3]:

- Konventionell schwierig zu verarbeiten
- Verbesserung des Produktes durch Nutzung der Designfreiheit
- Geringe Stückzahl / Individuelle Produkte
- Möglichkeit der Funktionsintegration
- Hohe Bauteilkomplexität
- Teure Werkstoffe für Leichtbau

## 1.1 Prozesskette

Ein jeder AM Prozess startet mit einer 3D Skizze des gewünschten Bauteils, welche anschließend von Computerprogrammen in mathematische Schichten zerlegt wird. Diese Schichten werden während des Herstellprozesses nach und nach erstellt und verbunden. Der grundlegende Ablauf des AM ist in **Abbildung 1** dargestellt [1] [2].



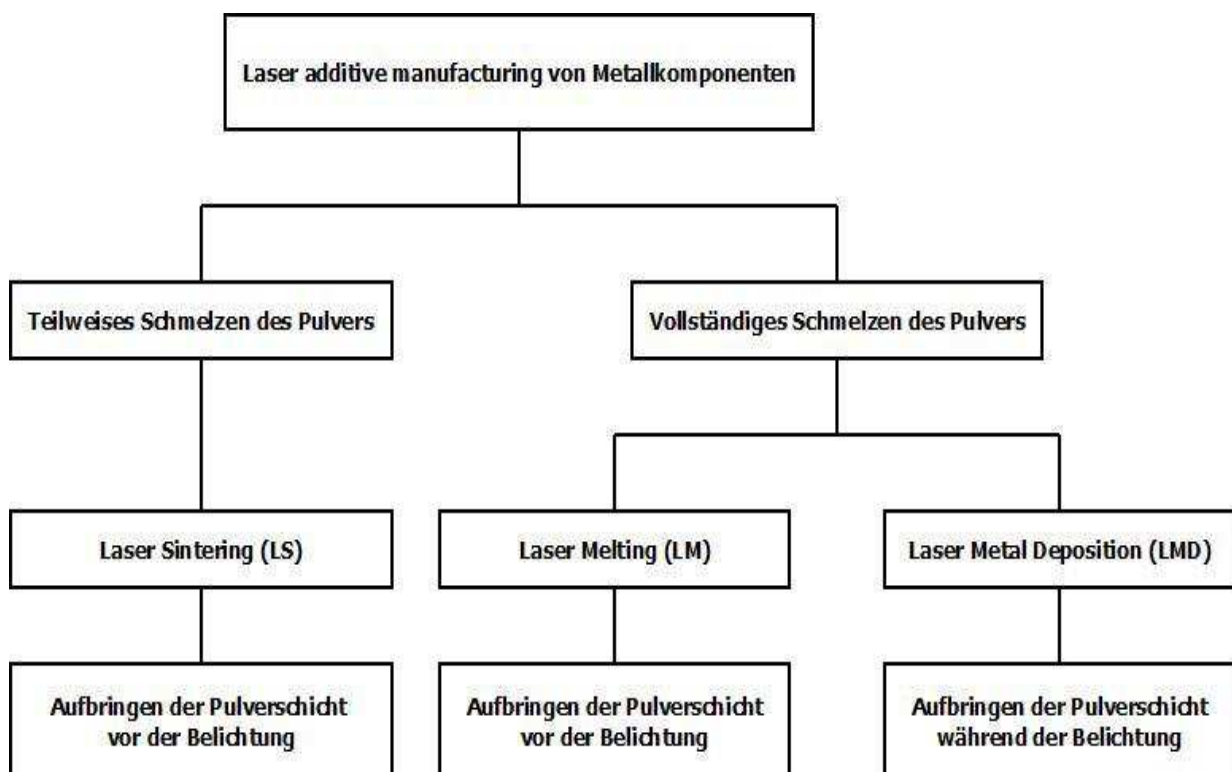
**Abbildung 1:** Grundlegender Prozessablauf beim Rapid Prototyping [1] [2]



Alle AM Verfahren laufen immer nach dem in **Abbildung 1** beschriebenen Schema ab und unterscheiden sich nur in der Ausführung voneinander [1].

## 1.2 Laser Additive Manufacturing

Zum Laser Additive Manufacturing (LAM) zählen alle AM Verfahren, welche einen Laser als Energiequelle nutzen. Wichtige Vertreter des LAM sind Laser Sintering (LS), Laser Melting (LM) und Laser Metal Deposition (LMD). Beim LS / LM / LMD wird mittels Materialzugabe ein Bauteil schichtweise aufgebaut und nicht wie bei konventionellen Verfahren durch Materialabtrag hergestellt. Die für die Prozesse notwendige Energie stammt von einem Laser, welcher einzelne Pulverteile durch Sintern oder Schmelzen verbindet. Mit LS / LM / LMD kann eine große Bandbreite an Metallen wie Stahl, Nickelbasislegierungen, Titanlegierungen und Aluminiumlegierungen verarbeitet werden, was sie momentan zu den attraktivsten AM Technologien macht [1] [2] [4].



**Abbildung 2:** Übersicht Laser Additive Manufacturing [2]

### 1.3 Laser Sintering/Melting

Häufig wird auch vom Selective Laser Sintering/Melting gesprochen, da das metallische Pulver selektiv gesintert oder geschmolzen wird. LS nützt das Prinzip des Flüssigphasensinterns, bei dem die einzelnen Pulverkörner teilweise aufgeschmolzen werden. Dieses Verfahren liefert besonders bei Verwendung von Pulvern aus mehreren Komponenten gute Ergebnisse. Üblicherweise besteht die eingesetzte Pulvermischung aus einer höher schmelzenden Komponente und einer niedrig schmelzenden. Das Metall mit dem hohen Schmelzpunkt dient als Strukturelement und das mit dem niedrigen als Bindemittel, welches die einzelnen Strukturelemente verbindet. Die Arbeitstemperatur wird durch Einstellen der Laserenergie genau zwischen den Schmelzpunkten der beiden Komponenten gewählt. Dadurch schmilzt der Binder und das Strukturelement bleibt im Kern fest. Es bildet sich eine sogenannte Mushy Zone in der feste und flüssige Bestandteile gleichzeitig existieren. In dieser Zone bildet sich um die Körner ein flüssiger Film, welcher für die Verbindung der Strukturelemente verantwortlich ist und so zu einer Dichtesteigerung führt. Prozessbedingt können beim LS Probleme wie Porenbildung, heterogene Mikrostrukturen und damit heterogen Materialeigenschaften auftreten. Abhilfe kann eine Nachbehandlung der Bauteile, wie z.B. Nachsintern im Ofen oder Hot Isostatic Pressing (HIP) liefern [2] [5].

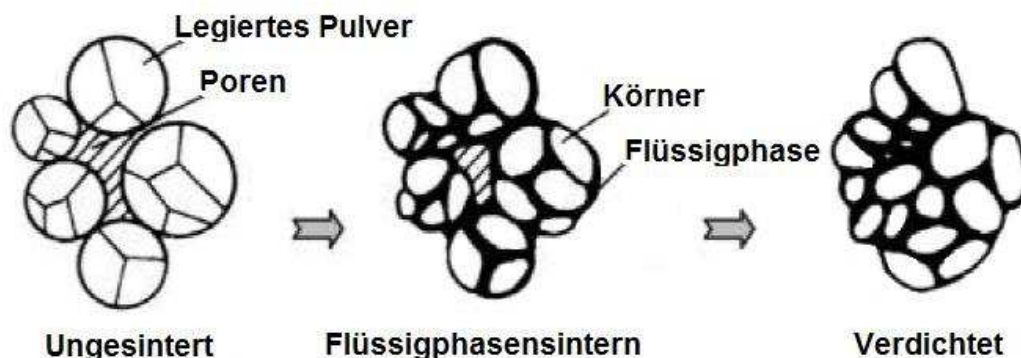
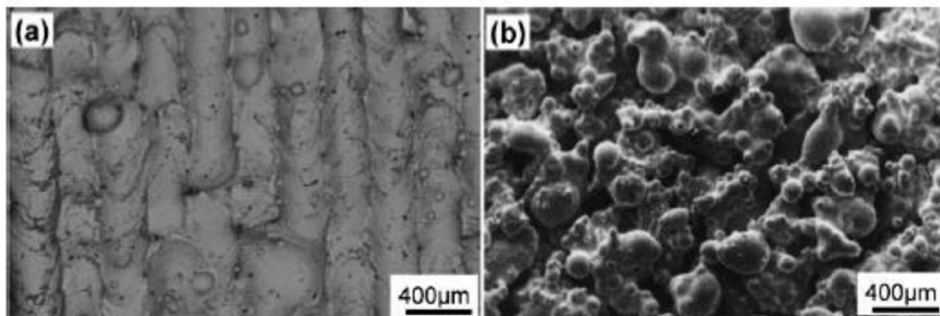


Abbildung 3: Ablauf des Lasersinterns [2]

Mit dem LM können im Gegensatz zu LS dichte Bauteile mit guten mechanischen Eigenschaften, ohne Nachbehandlung hergestellt werden. Der Prozessaufbau von LM ist weitgehend gleich wie der von LS, mit dem Unterschied des vollständigen Aufschmelzens des Metallpulvers. Durch das Aufschmelzen können Dichten von 99,9 % produziert werden

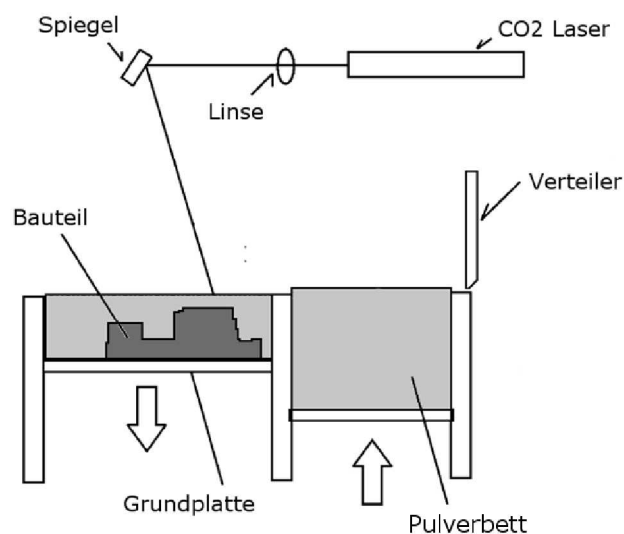
und das ohne anschließendes HIP. Da kein Binder notwendig ist, können mit LM außerdem Pulver aus nur einer Komponente, wie etwa Ti, Al oder Cu verarbeitet werden. Für dieses Verfahren sind jedoch eine höhere Laserenergie und eine hohe Qualität des Laserstrahls notwendig. Ein weiterer Nachteil ist die hohe Schrumpfung die durch das Erstarren der Schmelze entsteht [2].



**Abbildung 4:** Oberflächen beim (a) LM und (b) LS [2]

### 1.3.1 Prozessablauf

**Abbildung 5** zeigt den schematischen Aufbau des Prozesses. Die Grundplatte wird um eine Schichtdicke gesenkt und das Pulverbett um eine Schichtdicke erhöht. Üblicherweise handelt es sich dabei um rund 20 µm. Danach bringt der Verteiler durch eine Bewegung von einer Seite zur anderen eine neue Pulverschicht auf der Grundplatte auf. Anschließend wird der Laserstrahl durch Spiegel an die gewünschten Stellen gelenkt. Die Absorption der Laserenergie hat zur Folge, dass sich die Körner an diesen Stellen verbinden und eine Schicht des Bauteils entsteht [6].

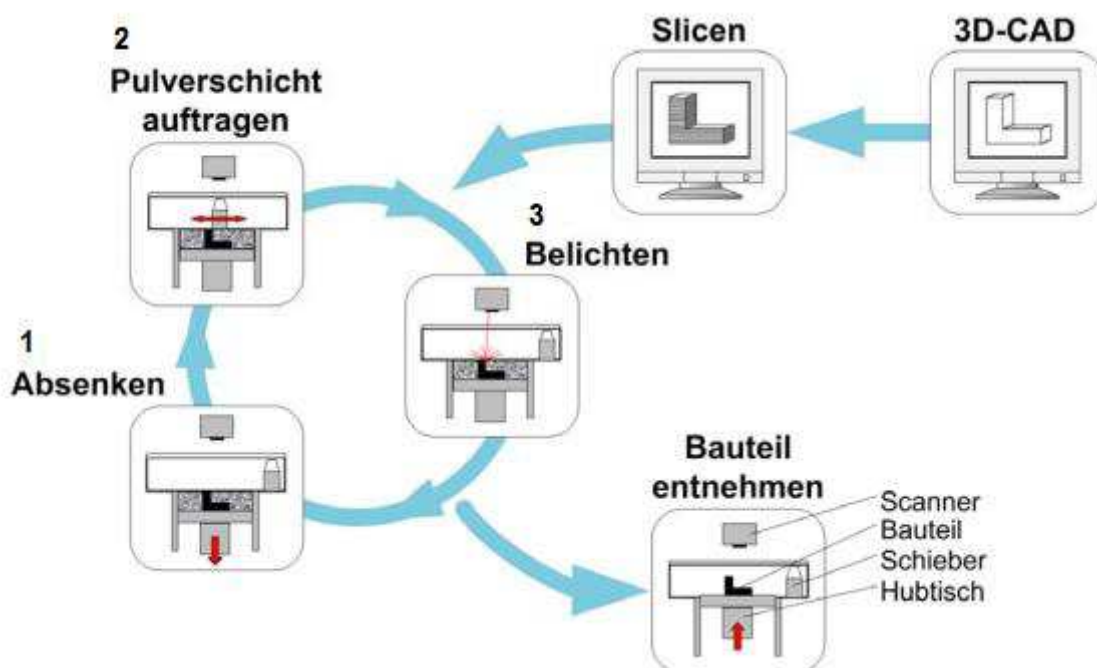


**Abbildung 5:** Aufbau des LS//LM bzw. DMLS Prozesses [7]

Zusammenfassend besteht der Prozess aus folgenden drei Schritten [1]:

- 1) **Absenken:** Grundplatte wird um eine Schichtdicke gesenkt; Pulverbett um eine Schichtdicke erhöht
- 2) **Pulverschicht auftragen:** Metallpulver wird aufgebracht
- 3) **Belichten:** Lasterstrahl sintert Pulver an gewünschten Stellen

**Abbildung 6** zeigt die Schritte 1-3, welche sich so lange wiederholen, bis das Bauteil fertiggestellt ist. Durch diesen Ablauf lassen sich komplizierte Bauteile in wenigen Stunden herstellen [6].



**Abbildung 6:** Prozessschritte des Laser Additive Manufacturing [3]

## 1.4 Laser Metal Deposition

Im Unterschied zum LM/LS wird beim LMD das Pulver nicht vor der Belichtung sondern während der Belichtung zugeführt. Das Pulver wird über ein Trägergas durch Leitung genau an den Auftreffpunkt des Laserstrahls gebracht. **Abbildung 7** zeigt schematisch den Prozess des LMD [2].

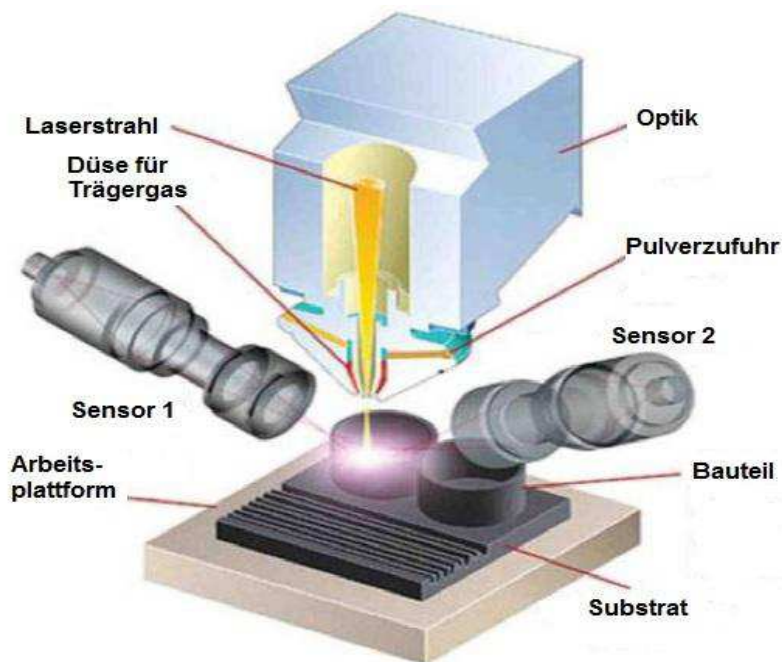


Abbildung 7: LMD Prozess [2]

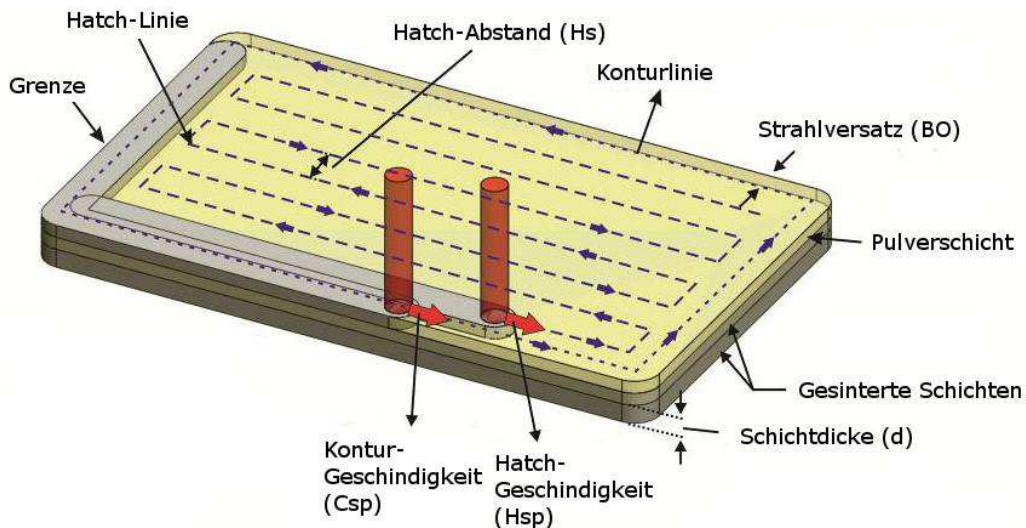
## 1.5 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Direct Metal Laser Sintering, kurz DMLS, ist eine LAM Technologie, welche von der deutschen Firma EOS GmbH entwickelt wurde und seit 1995 am Markt angeboten wird. Es liegt nahe, den Prozess auf Grund seiner Bezeichnung zum Lasersintern zu zählen, tatsächlich handelt es sich jedoch um Laserschmelzen. DMLS ermöglicht die Produktion von Bauteilen direkt im Pulverbett ohne anschließende Nachbehandlung wie z.B. eine Wärmebehandlung. Der Prozess benutzt einen Laser um die einzelnen Pulverkörner in der Flüssigphase zu verbinden. **Abbildung 5** zeigt den Aufbau des DMLS Prozesses mit wichtigsten Baugruppen wie etwa dem Laser, Linse und Spiegel und der Arbeitsplattform mit Pulverbett und Verteiler [2] [6].

## 1.6 Prozessparameter

Zahlreiche Prozessparameter machen den Prozess des Lasersinterns zu einem komplizierten Verfahren. Besonders wichtig sind Laserleistung, Lasergeschwindigkeit, Hatch-Abstand und Schichtdicke. Zusätzlich haben die Bauteilgeometrie, Arbeitsatmosphäre und Pulvertemperatur einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der produzierten

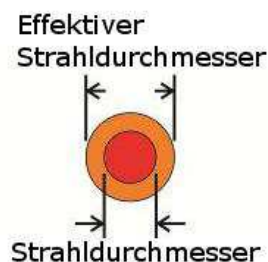
Produkte. Auch die Eigenschaften des eingesetzten Pulvers, wie Korngröße und Korngrößenverteilung, wirken sich stark auf die Qualität aus. **Abbildung 8** zeigt die wichtigsten Prozessbestandteile beim Erstellen einer Bauteilschicht. Die Kontur eines Bauteils wird mit der Laserleistung  $L_{pw}$  und der Geschwindigkeit  $C_{sp}$  erstellt [8].



**Abbildung 8:** Die wichtigsten Prozessparameter des DMLS [6]

### 1.6.1 Laserstrahl

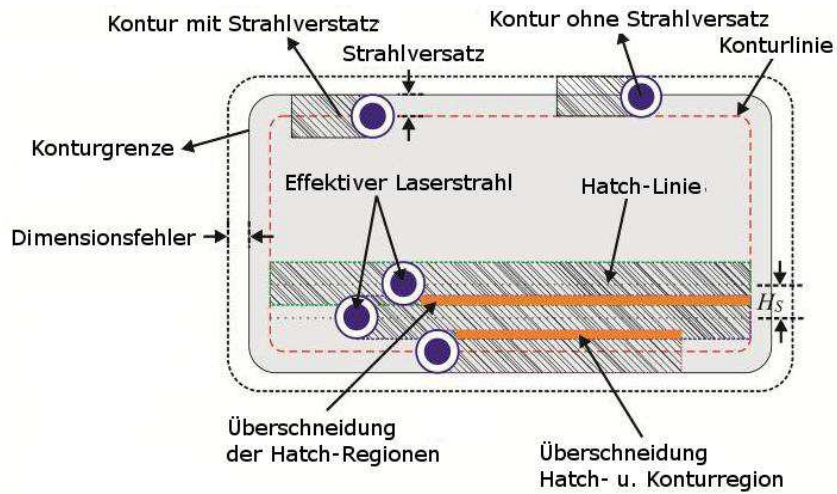
Die Zone in der gesintert wird ist meist größer als der Laserfokus, was in **Abbildung 9** gezeigt wird. Um Fehler in der Enddimension zu vermeiden ist es deshalb notwendig diese Differenz zu berücksichtigen [6].



**Abbildung 9:** Strahldurchmesser [6]

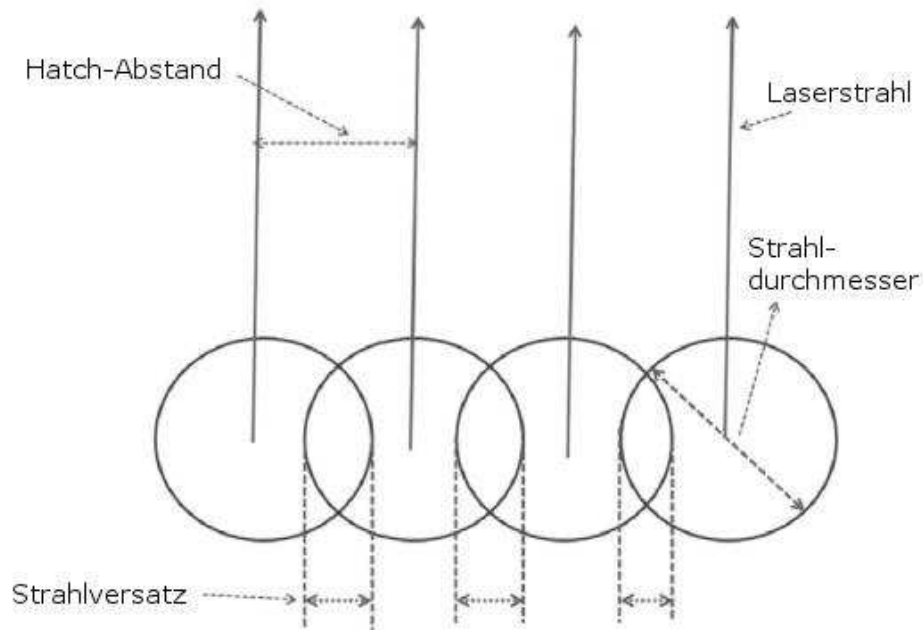
Wesentlich für das exakte Abbilden der Maße aus den CAD-Dateien ist es, das Zentrum des Laserstrahls beim Erstellen der Außenkontur um einen Radius nach innen zu versetzen. Würde die Maschine die Außenkontur exakt mit dem Strahlzentrum abfahren, wären die

Abmessungen des Bauteils um einen Strahlradius zu groß, was durch **Abbildung 10** verdeutlicht wird [6].



**Abbildung 10:** Verfahrenswege des Laserstrahls [6]

Auch die Wege im Bauteil werden etwas versetzt abgefahren um durch Überlappen der Strahlen eine möglichst optimale Verbindung zwischen den einzelnen, gesinterten Linien zu erhalten. Der Strahlversatz (Beam overlap, BO) wird in **Abbildung 11** erläutert [1] [6].



**Abbildung 11:** Strahlversatz beim Sintern [1]

### 1.6.2 Lasergeschwindigkeit

Die Lasergeschwindigkeit ist jene Geschwindigkeit, mit der sich der Laserstrahl über das Pulver bewegt um eine Bauteilschicht zu erzeugen. **Formel 1** zeigt die Relation zwischen Laserenergiedichte, Laserleistung, Laserfokus und Lasergeschwindigkeit [1].

$$\text{Laserenergiedichte} = \frac{\text{Laserleistung}}{\text{Laserfokus} \times \text{Lasergeschwindigkeit}} \quad (1)$$

Mit steigender Lasergeschwindigkeit erhöht sich auch die Produktionsgeschwindigkeit. In **Formel 1** ist jedoch auch zu erkennen, dass mit steigender Geschwindigkeit die Laserleistung erhöht werden muss, da sonst die Energiedichte für einen erfolgreichen Sintervorgang unzureichend wäre. Das Erhöhen der Leistung ist jedoch nur begrenzt sinnvoll, da die Wärmediffusion im Pulverbett begrenzt ist. Daher werden je nach Maschinentyp und Pulvermaterial Grenzwerte für die einzelnen Parameter definiert [1].

### 1.6.3 Schichtdicke

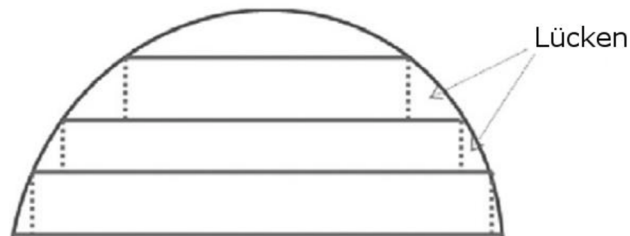
Die Schichtdicke ist die Dicke der einzelnen Ebenen in welche das 3D-CAD-Modell mathematisch geteilt wurde. Diese Schichten werden mit Hilfe eines Laserstrahls physikalisch aus dem losen Metallpulver hergestellt. Die Schichtdicke ist wie die Lasergeschwindigkeit ein wichtiger Faktor beim LS/LM. Mit einer Erhöhung der Dicke kann die Produktionsgeschwindigkeit erhöht werden, was **Formel 2** zu entnehmen ist [1].

$$\text{Laserenergiedichte} = \frac{\text{Laserleistung}}{\text{Hatchabstand} \times \text{Lasergeschwindigkeit} \times \text{Schichtdicke}} \quad (2)$$

**Formel 2** zeigt außerdem den Zusammenhang zwischen Laserenergiedichte, Laserleistung, Hatch-Abstand, Lasergeschwindigkeit und Schichtdicke. Es ist nicht sinnvoll die Schichtdicke zu weit zu erhöhen, da damit ungenaue Oberflächen entstehen können. Dünnere Schichten erhöhen die Produktionszeit und somit auch die Kosten. Eine kleine Schichtdicke reduziert jedoch die Bauteilschrumpfung und erhöht somit die Genauigkeit. Generell ist der Schichtdicke durch die Korngröße des Pulvers nach unten ein Limit gesetzt [1].

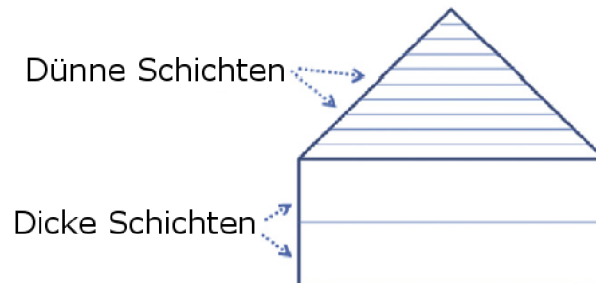


Die Auswahl der richtigen Schichtdicken wird auch durch die Bauteilgeometrie beeinflusst. Der Querschnitt einer Schicht ist immer rechteckig und somit ergeben sich beim Aufbau runder Geometrien immer Lücken was **Abbildung 12** zeigt [1].



**Abbildung 12:** Herstellung von runden Geometrien [1]

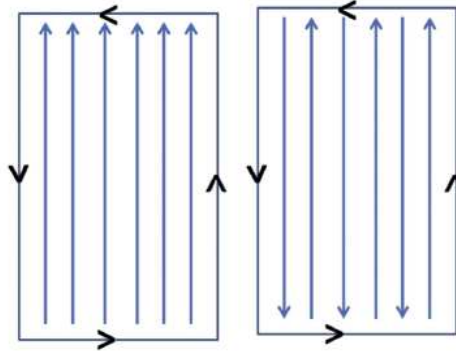
Diese Lücken werden mit sinkender Schichtdicke kleiner sind jedoch nicht komplett vermeidbar. Um die Produktionsgeschwindigkeit und die Produktionskosten zu minimieren können die Schichtdicken innerhalb eines Bauteils variiert werden. So können quadratische Geometrien mit größeren Dicken und runde mit kleineren erstellt werden. **Abbildung 13** zeigt die vereinfachte Anwendung unterschiedlicher Schichtdicken [1].



**Abbildung 13:** Unterschiedliche Schichtdicken [1]

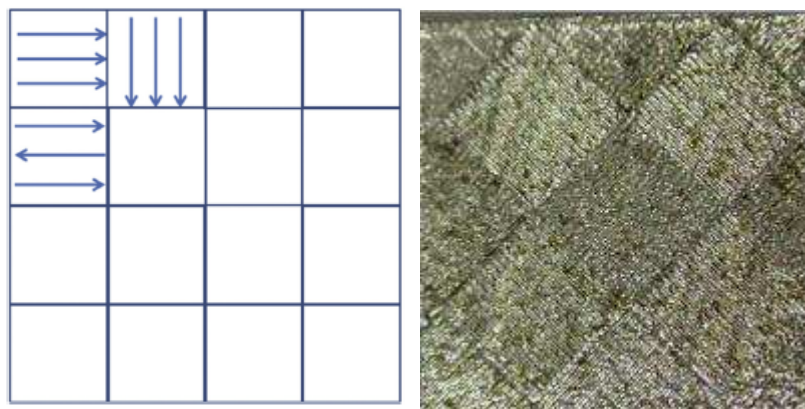
#### 1.6.4 Belichtungsstrategie

Unter Belichtungsstrategie versteht man die richtige Wahl des Belichtungswegs, welcher vom Laser abgefahren wird. Dadurch kann ein Maximum an Produktionsgeschwindigkeit sowie an Produktqualität erreicht werden. Grundlegend existieren zwei Arten von Wegen, die Bauteilkontur und die Füllwege. Unter Kontur versteht man ausschließlich die Außengrenze eines Bauteils. Die Füllwege befinden sich auf den Flächen zwischen der Kontur. **Abbildung 14** zeigt zwei typische Arten von Belichtungsstrategien [1].



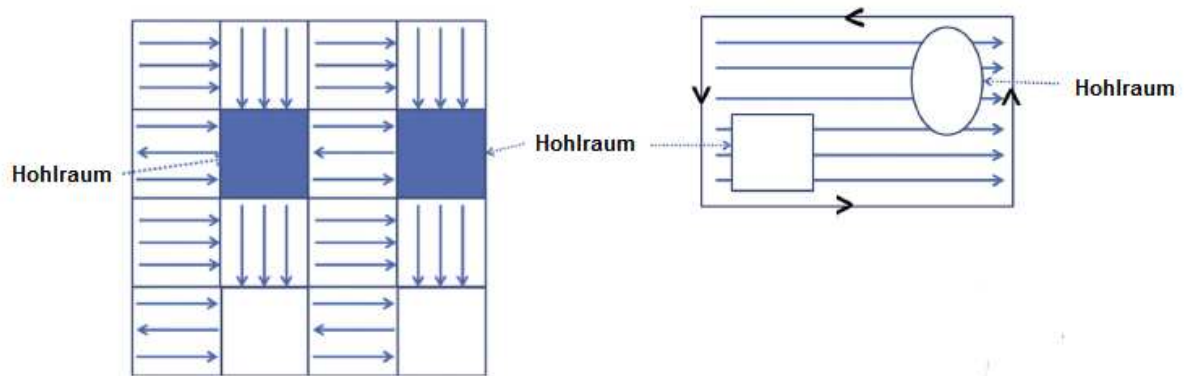
**Abbildung 14:** Belichtungsstrategien; links: gleiche Richtung; rechts: wechselnde Richtung [1]

Bei beiden wird zuerst die Kontur abgefahren und danach die Füllwege. Links ist die Richtung der Wege gleich und im rechten Beispiel alternierend, was zu einer starken Reduzierung der Produktionszeit führt. Der einfachste Fall die Füllwege untereinander anzuordnen ist parallel. Um die Spannungen, welche durch die Schrumpfung entstehen, zu reduzieren kann die Inselstrategie angewendet werden. Dabei wird die Schicht in kleinere Abschnitte, sogenannte Inseln, unterteilt und jeweils mit einer unterschiedlichen Neigung der Füllwege zur x-Achse belichtet. **Abbildung 15** zeigt ein einfaches Beispiel für die Anwendung der Inselstrategie [1] [9].



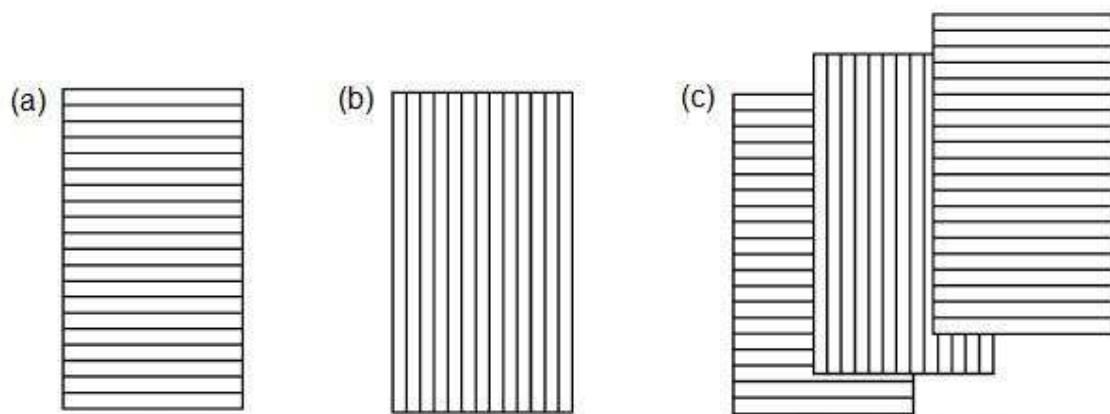
**Abbildung 15:** Links: Erläuterung der Inselstrategie [1]; Rechts: Beispiel für Anwendung [10]

Besonders beim Herstellen von Hohlräumen kann die Inselstrategie zu einer Reduzierung der Produktionszeit führen. Außerdem muss der Laserstrahl bei gewöhnlicher Belichtungsstrategie häufig ein- und ausgeschaltet werden, was seine Standzeit minimieren kann. In **Abbildung 16** wird gezeigt, wie durch Bildung von Inseln rund um Hohlräume der Verfahrensweg verkürzt wird und Ein- und Ausschaltpunkte reduziert werden. [1]



**Abbildung 16:** Ausbildung von Hohlräumen; links: mittels Inselstrategie; rechts: mittels einfacher Parallelstrategie [1]

Bei nicht quadratischen Hohlräumen müsste die Inselgröße drastisch vermindert werden um ausreichend genau zu arbeiten. Um die Dichte der gefertigten Bauteile zu erhöhen und den Einfluss der Schrumpfung weiter zu reduzieren, kann die Richtung, in welcher der Laserstrahl die Schichten erstellt, variiert werden. In **Abbildung 17** wird gezeigt, dass die Bauteile entweder in x-Richtung, y-Richtung oder alternierend aufgebaut werden können. So kann eine Schicht parallel zur x-Richtung hergestellt werden und die folgende in einem Winkel von beispielsweise  $90^\circ$  zur Achse [1] [11].



**Abbildung 17:** (a) In x-Richtung; (b) In y-Richtung; (c) Alternierend [8]

Des Weiteren kann der Winkel um welchen die Richtung des Laserstrahls rotiert wird auch ungleich  $90^\circ$  sein. Das bedeutet eine weitere Erhöhung der Dichte. Die Rotation und der sogenannte Hatch-Winkel um welchen rotiert wird, werden in **Abbildung 18** erläutert.

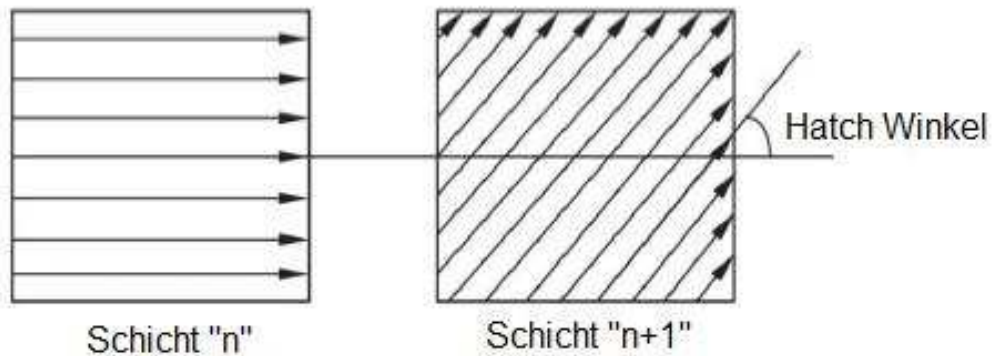


Abbildung 18: Hatch Winkel [5]

### 1.6.5 Aufbaustrategie

Grundsätzlich sollten in der Arbeitskammer einer LAM-Maschine komplizierte Teile eines Bauteils bevorzugt orientiert werden. Dadurch können Qualität und Effizienz auf ein Optimum erhöht werden. **Abbildung 19** zeigt ein Beispiel für die richtige Anordnung von Bauteilen. Es sollte darauf geachtet werden, so wenig Schichten als möglich zu erstellen. Das verringert zum Einen die Produktionszeit und führt zum Anderen zu einem gleichmäßigeren Temperatureinfluss. Besonders beim Einsatz einer beheizten Arbeitsplatte sollten möglichst viele Schichten möglichst nahe an der Arbeitsplatte liegen, da Bereiche die weiter entfernt liegen weniger erwärmt werden [1].

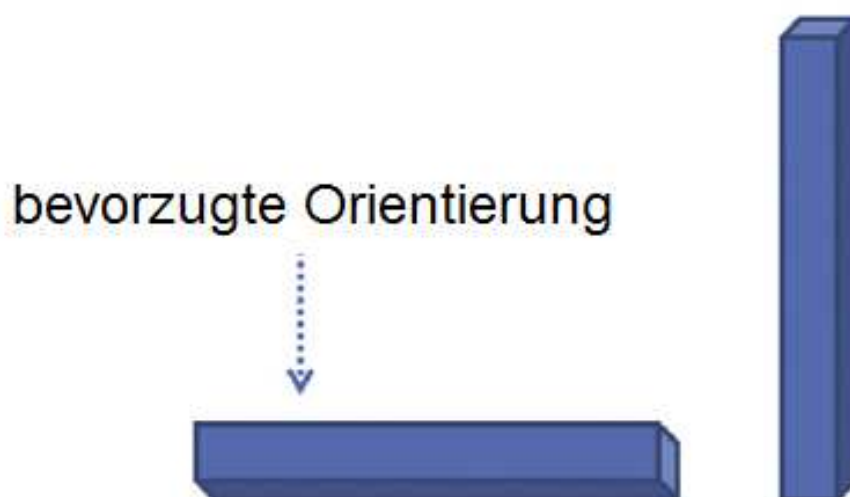
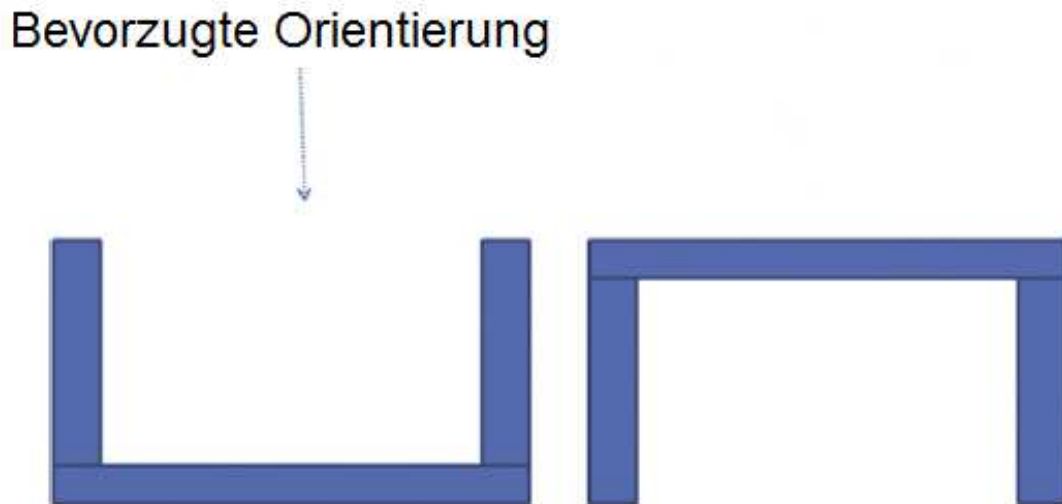


Abbildung 19: Richtige Anordnung von Bauteilen [1]

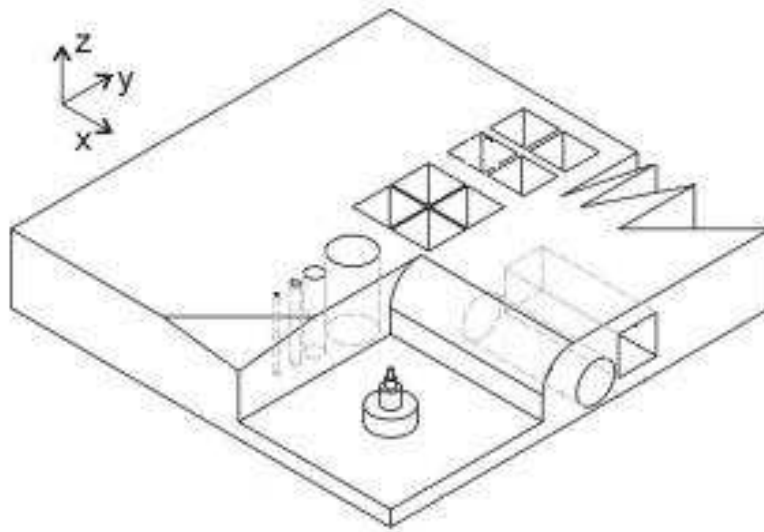
Enthalten Bauteile Überhänge, so sind Schichten bevorzugt auf bereits bestehende Schichten aufzutragen und nicht auf losen Pulveruntergrund. Werden Schichten auf Pulveruntergrund gefertigt kann das durch unterschiedliche Wärmeübertragung zu einer erhöhten Rauheit führen. **Abbildung 20** zeigt ein Beispiel für die bevorzugte Orientierung von Überhängen [1].



**Abbildung 20:** Bevorzugte Orientierung von überhängenden Strukturen [1]

## 1.7 Benchmark-Modelle

Benchmark-Modelle werden genutzt um die Grenzen von Prozessen zu bestimmen. Im Fall dieser Arbeit sind es Herstellungsgrenzen von Bauteilen, welche mit dem Verfahren des DMLS gefertigt werden. Ein besonderes Augenmerk wird auf die Feinheit von Strukturen, deren Maßhaltigkeit und Oberflächenqualität gelegt. In **Abbildung 21** wird ein Beispiel für ein solches Benchmark-Modell gezeigt. In Anlehnung an dieses Modell wurden auch die Probenkörper für diese Arbeit hergestellt [12].



**Abbildung 21:** Benchmark-Modell zum Überprüfen der Prozessqualität [12]

Andere Benchmark-Modelle beinhalten zusätzlich Kegel zur Überprüfung der erreichbaren Oberflächenqualität, sowie unterschiedlich, im Raum geneigte, Strukturen. Diese werden zur Überprüfung der Oberflächenqualität der Strukturunterseiten als auch zur Feststellung der allgemeinen Herstellbarkeit herangezogen.

## 2 Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel werden die Abläufe des praktischen Teils dieser Arbeit behandelt. Zur Bestimmung der Prozessgrenzen wurden verschiedenste Proben hergestellt. Gefertigt wurden sie durch eine Maschine vom Typ EOSINT M280 der Firma EOS GmbH. Anschließend wurden die Proben präpariert und deren Qualitätsmerkmale mit unterschiedlichen Messverfahren bestimmt.

### 2.1 Fertigungsmaschine EOSINT M280

Zum Herstellen der Bauteile wurde eine EOSINT M280 der Firma EOS GmbH, welche das Verfahren des DMLS nutzt, verwendet. Die Maschine wird in **Abbildung 22** gezeigt. Die technischen Daten der EOSINT M280 sind in **Tabelle 1** zusammengefasst.



**Abbildung 22:** EOSINT M280 am Institut für Umformtechnik/Leoben [13]

**Tabelle 1:** Technische Daten der EOSINT M 280 [13]

<b>Technische Daten</b>	
Bauvolumen (inkl. Bauplattform)	250 mm x 250 mm x 325 mm
Lasertyp	Yb-Faserlaser, 400 W
Präzisionsoptik	F-Theta-Linse, Hochgeschw.-Scanner
Scangeschwindigkeit	Bis zu 7,0 m/s
Variabler Fokusbereich	100 – 500 µm
Stromanschluss	32 A
Leistungsaufnahme	Maximal 8,5 kW / typisch 3,2 kW
Stickstoffgenerator	Integriert
Druckluftanschluss	7000 hPa; 20m <sup>3</sup> /h
<b>Abmessungen</b>	
System	2200 mm x 1070 mm x 2290 mm
Empfohlener Aufstellraum	Min. 4,8 m x 3,6 m x 2,9 m
Gewicht	Ca. 1250 kg
<b>Datenaufbereitung</b>	
Software	EOS RP Tools, EOSTATE Magics RP
CAD Schnittstelle	STL. Optional: Konverter
Netzwerk	Ethernet

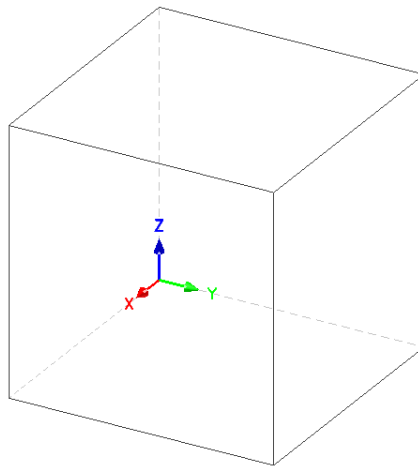
Zum Herstellen der Proben wurde eine alternierende und rotierende Belichtungsstrategie gewählt. Dabei wird die Richtung in welche die Schichten durch den Laser erzeugt werden um die z-Achse rotiert. Der Winkel, um welchen die neue Schicht im Vergleich zur alten rotiert wurde, betrug bei den erstellten Proben 67 °. Eine Übersicht über die wichtigsten Prozessparameter gibt **Tabelle 2**.



**Tabelle 2:** Verwendete Prozessparameter

<b>Prozessparameter</b>	
Laserleistung	286 W
Laserstrahlgeschwindigkeit	960 mm/s
Laserfokus	100 $\mu\text{m}$
Strahlversatz	-0,055 mm

**Abbildung 23** zeigt das verwendete Koordinatensystem. Im Folgenden werden die Lage der erstellten Proben in der Maschine aber auch die Oberflächenqualitäten an Hand dieses Koordinatensystem beschrieben. Der Schichtaufbau erfolgte bei allen erstellten Proben in Richtung der z-Achse.



**Abbildung 23:** Verwendetes Koordinatensystem

## 2.2 Material

Die Bauteile für diese Arbeit wurden aus Maraging Stahl hergestellt. Das verwendete Pulver stammt von der Firma EOS GmbH und setzt sich aus den in **Tabelle 3** gelisteten Elementen zusammen.

**Tabelle 3:** Chemische Zusammensetzung Maragingstahl [14]

<b>Fe</b>	Rest
<b>Ni</b>	17 – 19 Gew.-%
<b>Co</b>	8,5 – 9,5 Gew.-%
<b>Mo</b>	4,5 – 5,2 Gew.-%
<b>Ti</b>	0,6 – 0,8 Gew.-%
<b>Al</b>	0,05 – 0,15 Gew.-%
<b>Cr</b>	≤ 0,5 Gew.-%
<b>C</b>	≤ 0,03 Gew.-%
<b>Mn, Si</b>	je ≤ 0,1 Gew.-%
<b>P, S</b>	je ≤ 0,01 Gew.-%

## 2.3 Proben

Um die Realisierbarkeit verschiedenster Strukturen zu überprüfen, wurden unterschiedliche Bauteile hergestellt. Dabei wurde besonders auf die erreichbare Feinheit von Strukturen und Oberflächen geachtet. **Tabelle 4** zeigt eine Übersicht aller gefertigten Proben und deren Herstellzweck.

**Tabelle 4:** Probenübersicht mit Bezeichnung und Zweck der Herstellung

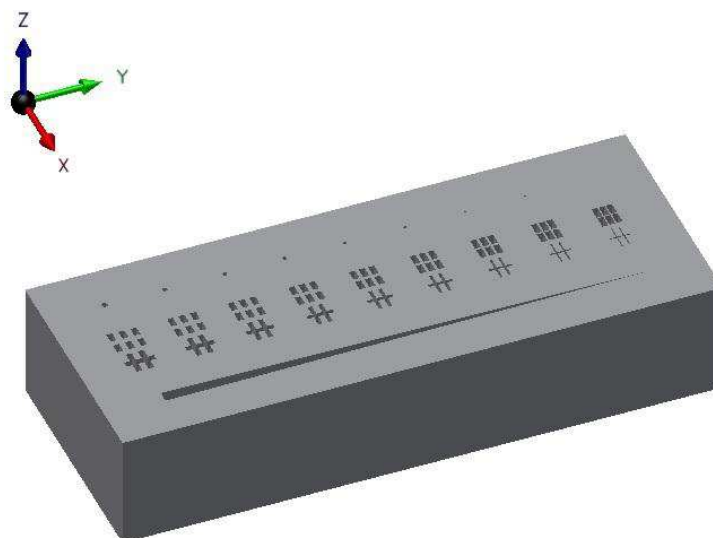
<b>Probenbezeichnung</b>	<b>Zweck</b>
<b>P_1</b>	Einfluss der Feinheit auf die Ausbildung von Rasterstrukturen und Löcher; Überprüfung der minimalen Feinheit mittels Keil.
<b>P_2</b>	Einfluss der Neigung auf Oberfläche und Querschnitt.

**Tabelle 4:** (Fortsetzung)

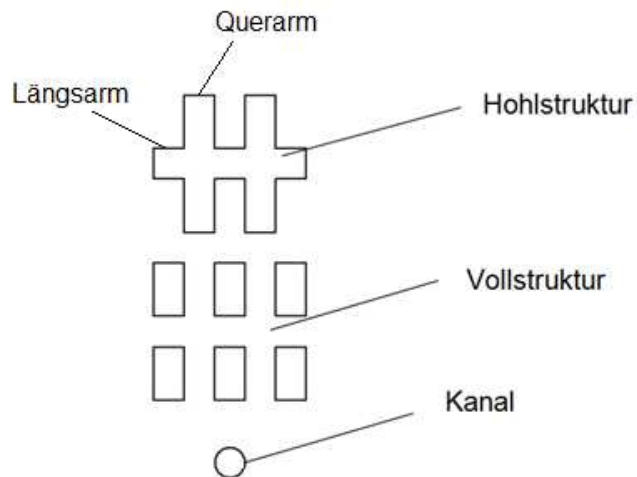
Probenbezeichnung	Zweck
P_3	Überprüfung der Herstellbarkeit von Turmstrukturen; Bestimmung der erreichbaren Oberflächenqualität.
P_4	Simulation eines Lunkers und Poren; Untersuchung mittels Computertomografie.
P_5	Simulation von Rissen; Untersuchung mittels Computertomografie.

### 2.3.1 Probe P\_1

Probe P\_1 ist in **Abbildung 24** abgebildet und diente der Untersuchung von Rasterstrukturen und Kanälen. Es wurden zwei verschiedene Rasterstrukturen ausgeführt, um zum Einen die Herstellbarkeit von Stegen und zum Anderen, die der dazwischen liegenden Hohlräume zu untersuchen. Außerdem wurden in das Bauteil Löcher eingefügt um die Ausbildung runder Hohlräume, zu analysieren. Im Weiteren werden diese Strukturen Hohlstruktur, Vollstruktur und Kanal genannt. Die Begriffe werden in **Abbildung 25** veranschaulicht. Zusätzlich zu den Rastern und Kanälen wurde die Grenze der Feinheit einer Hohlstruktur mit Hilfe eines Keils ermittelt.

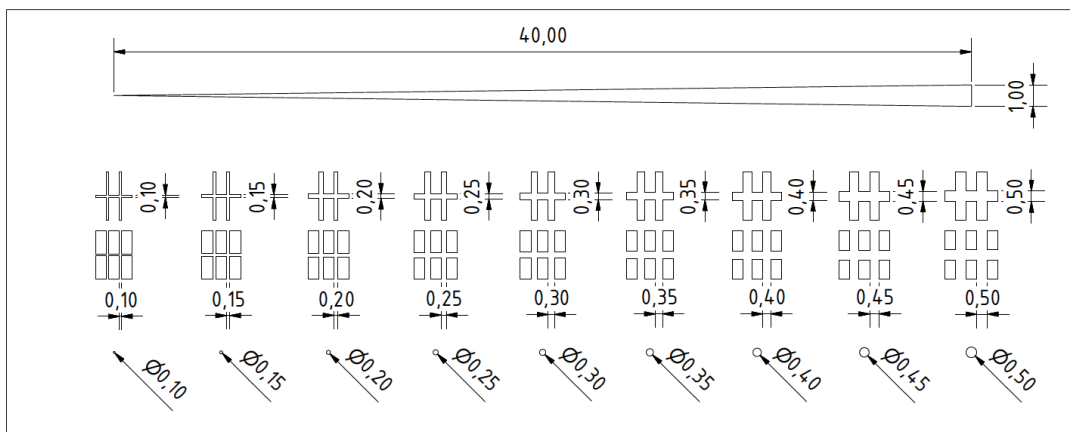


**Abbildung 24:** Probe P\_1 in 3D Ansicht



**Abbildung 25:** Definition von Hohlstruktur, Vollstruktur und Kanal

In **Abbildung 26** sind die genauen Maße von P\_1 angegeben. Die Abmessungen der Rasterstrukturen, genauer die der Voll- und Hohlstrukturen, und die Durchmesser der Kanäle wurden von 0,1 mm bis 0,5 mm in 0,05 mm Abständen variiert. Der Keil startet bei einer Breite von 1 mm und endet nach 40 mm.

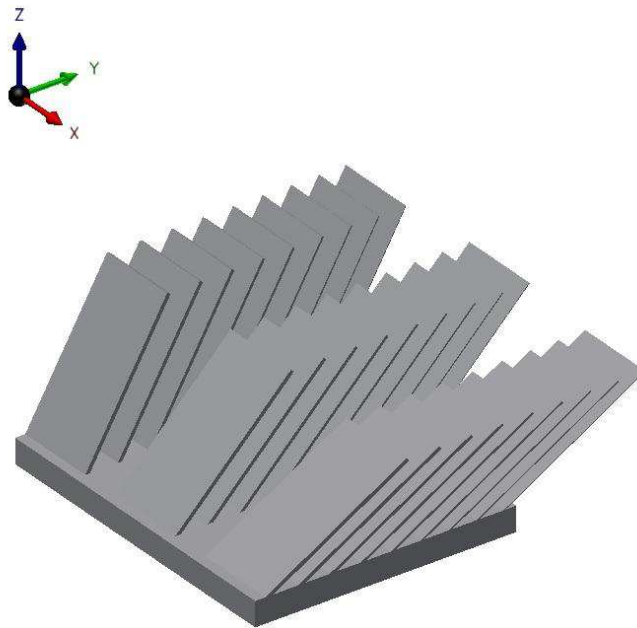


**Abbildung 26:** Abmessungen der Probe P\_1 in mm

### 2.3.2 Probe P\_2

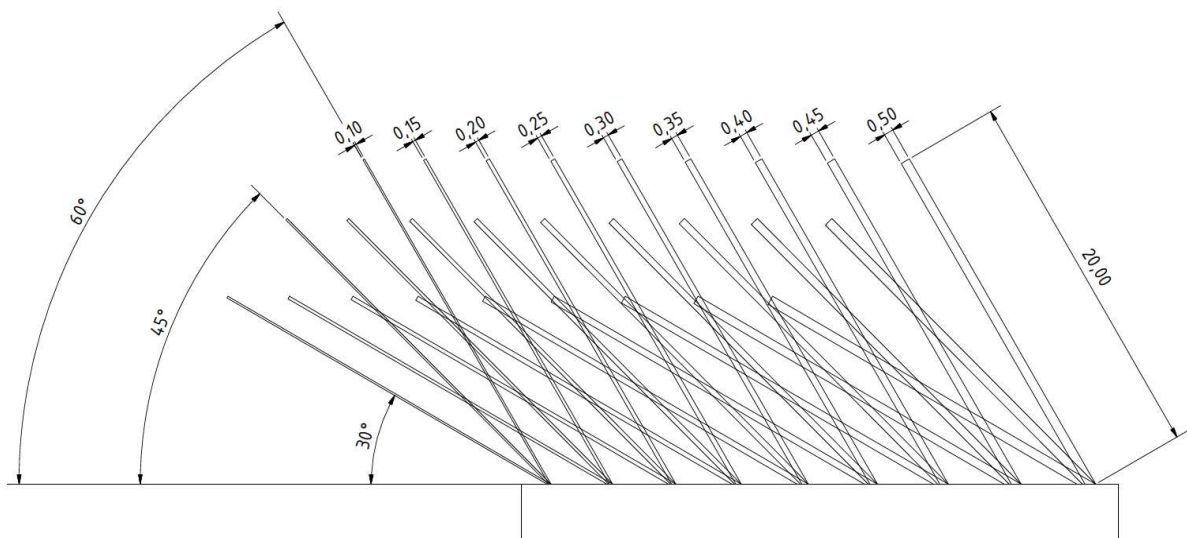
In **Abbildung 27** ist die Probe P\_2 dargestellt, welche verschieden dicke Fächer in unterschiedlichen Neigungen enthält. Ziel von P\_2 war es möglichst dünne Querschnitte zu

fertigen und dabei den Einfluss der Neigung der einzelnen Elemente auf die Oberfläche und auf die Ausprägung des Querschnitts zu untersuchen.



**Abbildung 27:** Probe P\_2 in 3D Ansicht

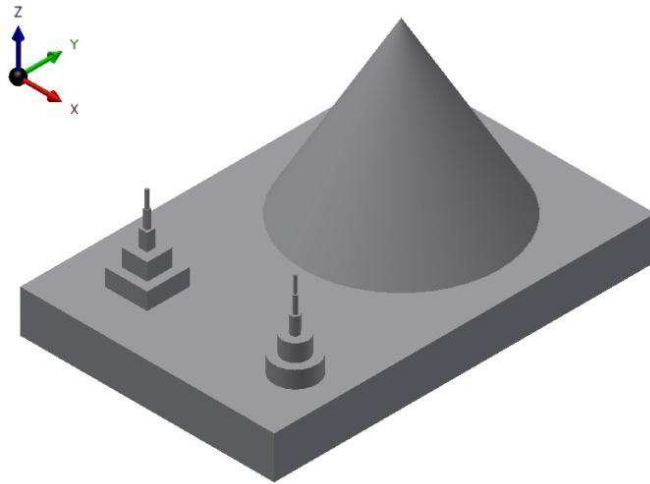
Die genauen Abmessungen der Probe sind in **Abbildung 28** abzulesen. Die Dicke der einzelnen Blättchen verläuft von 0,1 mm bis 0,5 mm in 0,05 mm Schritten. Hergestellt wurden sie in Winkeln von 30°, 45° und 60° zur Grundfläche.



**Abbildung 28:** Abmessungen der Probe P\_2 in mm

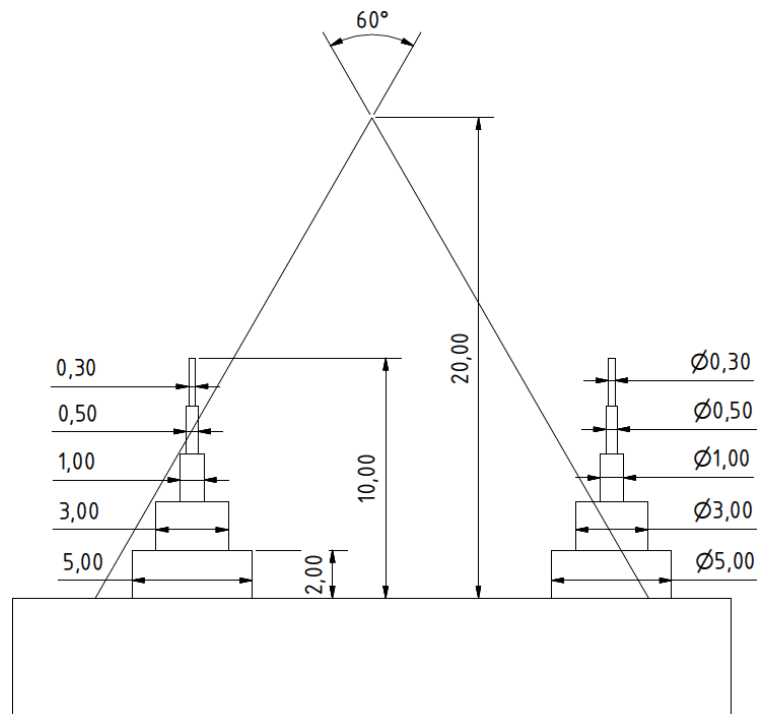
### 2.3.3 Probe P\_3

**Abbildung 29** zeigt einen Probenkörper mit Türmen aus unterschiedlich großen Quadern und Zylindern. Die Probe P\_3 diente wiederum der Feststellung ob und wie genau unterschiedlich kleine Formen gesintert werden. Der Kegel wurde angefertigt, um die grundsätzlich erreichbare Oberflächenqualität zu ermitteln.



**Abbildung 29:** Probe P\_3 in 3D Ansicht

**Abbildung 30** zeigt die Abmessungen der Türme und des Kegels der Probe P\_3.



**Abbildung 30:** Abmessungen der Probe P\_3 in mm

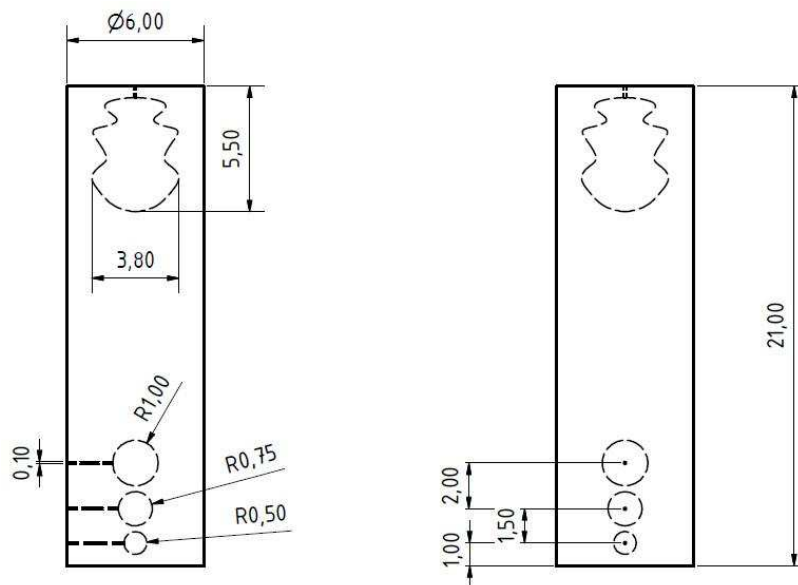
### 2.3.4 Proben P\_4 und P\_5

Neben den anderen Proben wurden auch zwei Zylinder erstellt, um eingebrachte Hohlkörper zu überprüfen. **Abbildung 31** zeigt einen Zylinder mit drei unterschiedlich großen, kugelförmigen Hohlräumen. Diese Hohlräume sollen Poren darstellen, wie sie beim Vergießen von Metallen auftreten können. Des Weiteren befindet sich in dem Bauteil eine weitere Art von Gießfehler, ein sogenannter Lunker.



**Abbildung 31:** Probe P\_4 in 3D Ansicht; Hohlstrukturen als dünne Linie

Die wichtigsten Abmessungen der Probe P\_4 werden in **Abbildung 32** dargestellt.



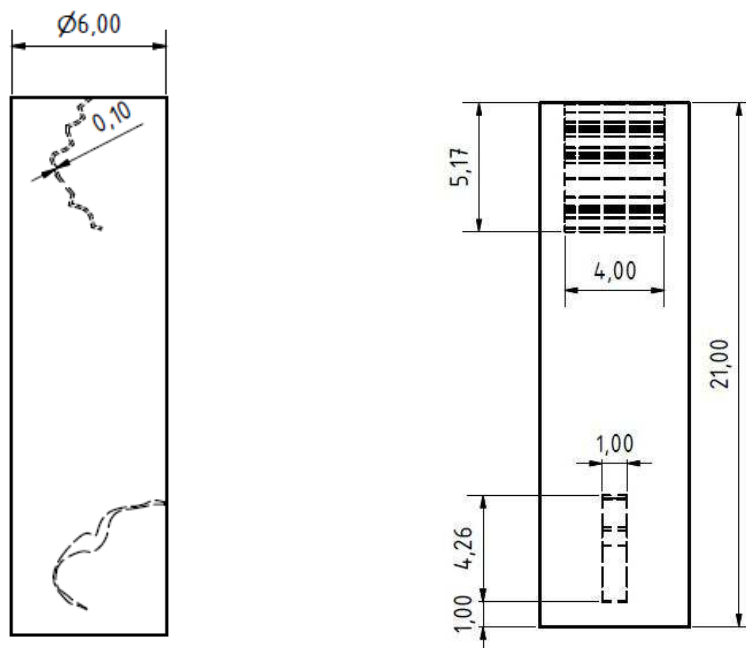
**Abbildung 32:** Skizze der Probe P\_4 mit Abmessungen in mm

Ein zweiter Zylinder wurde mit nachgebildeten Rissen versehen. In **Abbildung 33** sind ein feiner, breiter Riss und ein dicker, schmaler Riss zu erkennen.



**Abbildung 33:** Probe P\_5 in 3D Ansicht; Hohlstrukturen als dünne Linie

Eine Skizze der Probe P\_5 wird in **Abbildung 34** gezeigt. In Absprache mit dem ÖGI wurde der Durchmesser der Zylinder auf 6 mm begrenzt, da es sonst zu Problemen bei der Durchstrahlung der Probe durch den Computertomografen kommen kann.



**Abbildung 34:** Skizze der Probe P\_5 mit Abmessungen in mm



## 2.4 Bestimmung der Oberflächenqualität

Um die Oberflächenqualität der verschiedensten Bauteiloberflächen zu ermitteln wurden einerseits Messungen mit einem optischen Messgerät durchgeführt. Andererseits wurde die Qualität einiger Oberflächen mittels Schliffbildauswertungen und durch eigens geschriebene Matlab Programme bestimmt.

### 2.4.1 Alicona Infinite Focus G4

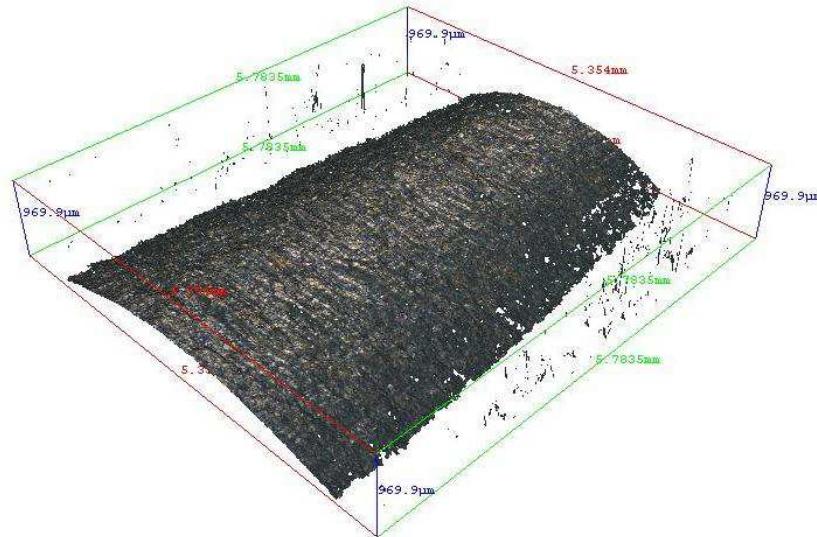
Zur Bestimmung der Oberflächenrauheit von leicht zugänglichen Flächen wurde ein optisches Messgerät der Firma Alicona verwendet. Genauer handelte es sich um eine Alicona Infinite Focus G4 Messeinrichtung, welche in **Abbildung 35** gezeigt wird. Damit wurden die Seitenflächen (x-z – Ebene und y-z – Ebene), die horizontale Bauteiloberfläche (x-y – Ebene) und die Kegeloberfläche der Probe P\_3 vermessen.



**Abbildung 35:** Alicona Infinite Focus G4 [15]

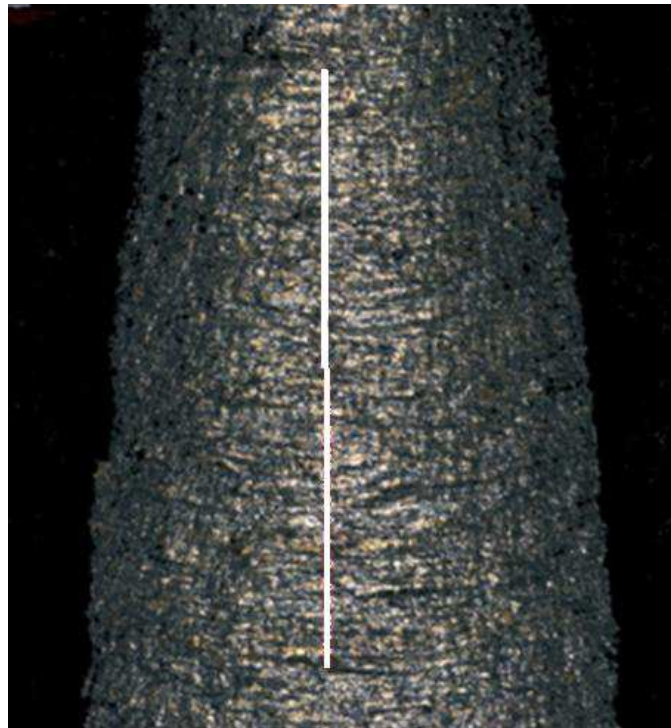
Das Messgerät erzeugt präzise Oberflächenprofile mit Hilfe der sogenannten Fokusvariation. Dazu wurde die Probe mit einer LED beleuchtet und das Licht von der Bauteiloberfläche auf einen Detektor reflektiert. Während der Messung wurde die Distanz zwischen Objektiv und Bauteil ständig verändert und die dabei einhergehende Veränderung der Schärfe registriert. Die, je nach Oberflächenrauheit entstehende Schärfeänderung wurde anschließend von einem Prozessor verarbeitet und in eine 3D-Abbildung der

Bauteiloberfläche umgewandelt. **Abbildung 36** zeigt eine solche 3D-Aufnahme der Kegeloberfläche von Probe P\_3. [15]



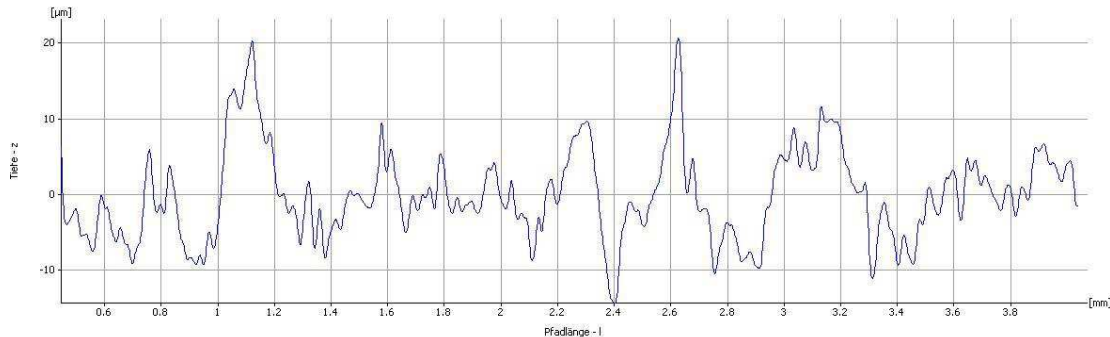
**Abbildung 36:** 3D-Abbildung der Kegeloberfläche

Anschließend wurde in der Draufsicht der Kegeloberfläche jener Verlauf ausgewählt, entlang welchen die Oberflächenqualität bestimmt werden soll. Die Draufsicht mit einem Beispiel für einen solchen Messverlauf (helle Linie) wird in **Abbildung 37** gezeigt.



**Abbildung 37:** Draufsicht der Kegeloberfläche; Messverlauf durch helle Linie gekennzeichnet

Da es sich um eine 3D-Aufnahme handelte, also auch Höhendaten gespeichert sind, konnten entlang dieses Verlaufs die Höhendaten ausgelesen werden und ein Oberflächenprofil, wie es in **Abbildung 38** dargestellt wird, erzeugt werden.



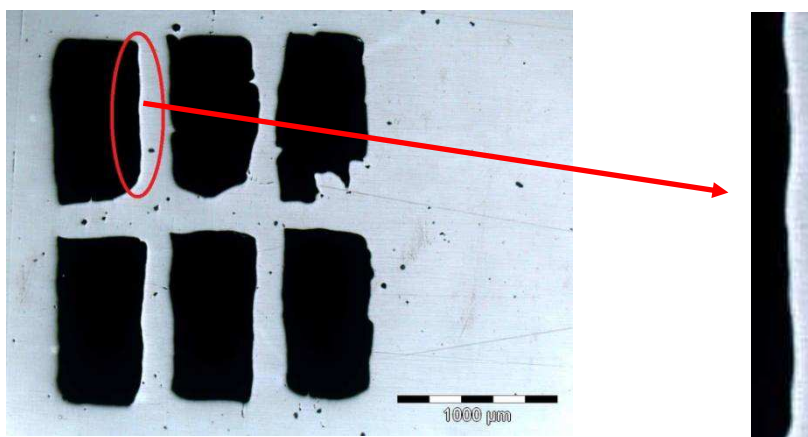
**Abbildung 38:** Oberflächenprofil der Kegeloberfläche

## 2.4.2 Messung der Oberflächenrauheit mit Matlab Programmen

Da einige Oberflächen zu rau oder unzugänglich waren, um die Rauheit mit Hilfe des optischen Messgeräts zu bestimmen, wurde deren Oberflächenqualität an Hand von Schliffbildern bestimmt. Dazu wurden mit dem Mathematikprogramm Matlab, Programme geschrieben, welche die Schliffbilder der Oberflächen einlesen und über Vermessung des Oberflächenprofils den arithmetischen Mittenrauwert und die gemittelte Rautiefe berechnen.

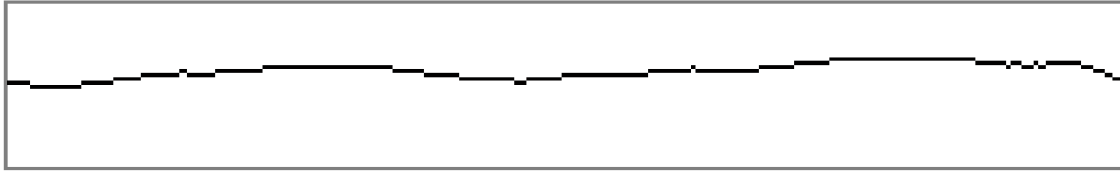
### 2.4.2.1 Rauheitsmessung Probe P\_1

Da die Rasterinnenflächen dieser Probe für die optische Messeinrichtung nicht zugänglich waren, wurde die Oberflächenqualität mit Hilfe eines Matlab Programms ermittelt. Zuerst wurden die einzelnen Flächen aus den Schliffbildern geschnitten. Ein Beispiel wird in **Abbildung 39** gezeigt.



**Abbildung 39:** Beispiel für die gemessenen Rasteroberflächen

Anschließend wurde, wie in **Abbildung 40** gezeigt, das Profil der Oberflächen extrahiert und die Rauheit in Form von Ra und Rz berechnet. Der Quellcode zu diesem Programm wird im Folgenden angeführt.



**Abbildung 40:** Oberflächenprofil einer Rasterinnenfläche

### Quellcode:

*%Berechnung der Pixelgröße aus dem Maßstab*

```
img=double(imread('Mass.jpg'))/256;
```

*%Laden des Maßstabs*

```
img=imresize(img,0.6);
```

*%Bildgröße anpassen*

```
img=rgb2gray(img);
```

*%RGB in Grauwerte umwandeln*

```
img=im2bw(img,0.3);
```

*%Grauwerte in SW umwandeln*

```
[a,b]=size(img);
```

*%Bild abtasten und Länge des Maßstabs erfassen*

```
for j=1:b;
```

```
    for i=1:a;
```

```
        if img(i,j)>0;
```

```
            x=i;
```

```
        end
```

```
    end
```

```
end
```

```
y=0;
```

```
for i=1:b
```

```
    if img(x,i)>0
```

```
        y=y+1;
```

```
    end
```

```
end
```

```
ym=1000/y;
```

*%Pixel → Mikrometer*

%Schliffbilder einlesen, bearbeiten und Informationen auslesen

```

rauheit=zeros(2,1:8); %Rauheitsmatrix erstellen
for z=1:8
    img=double(imread(['V_02_' num2str(z) '.jpg']))/256; %Einlesen des Bildes
    img=imresize(img,0.6); %Bildgröße anpassen
    img=rgb2gray(img); %RGB in Grauwerte umwandeln
    img=im2bw(img,0.6); %Grauwerte in SW umwandeln
    img=imfill(img,'holes'); %Löcher füllen
    img = imclose(img,strel('disk',2)); %Kratzer entfernen
    img=imfill(img,'holes'); %Löcher füllen
    img=imcomplement(img); %Bild komplementieren
    img=imfill(img,'holes'); %Löcher füllen
    img=imcomplement(img); %Bild komplementieren
    img=bwperim(img); %Konturen ermitteln
    img=double(img); %Kontur in double umwandeln

```

%Bildränder beschneiden

```

b=size(img,2);
img(1,1:b)=0;
img(:,1)=[];
img(:,b-1)=[];
[a,b]=size(img);

```

%Oberflächenprofil ermitteln und als Vektor speichern

```

for j=1:b;
    for i=1:a;
        if img(i,j)==1;
            profil(j)=i;
        end
    end
end
e=size(profil,2)/5; %Vektorlänge durch 5 teilen
e=floor(e); %Wert runden
profteile=zeros(5,e+1); %Matrix für Profiltteile definieren

```

%Matrix mit Maxima, Minima und Differenzen füllen

```
f=1;
g=e;
for i=1:5;
    profteile(i,1:e)=profil(f:g);
    profteile(i,e+1)=max(profteile(i,1:e))-min(profteile(i,1:e));
    f=f+e;
    g=g+e;
end
```

%Rz berechnen

```
Rz=mean(profteile(:,e+1));           %Mittelwert bilden
mw=mean(profil);                    %Mittelwert berechnen
```

%Profil um Mittelwert verschieben

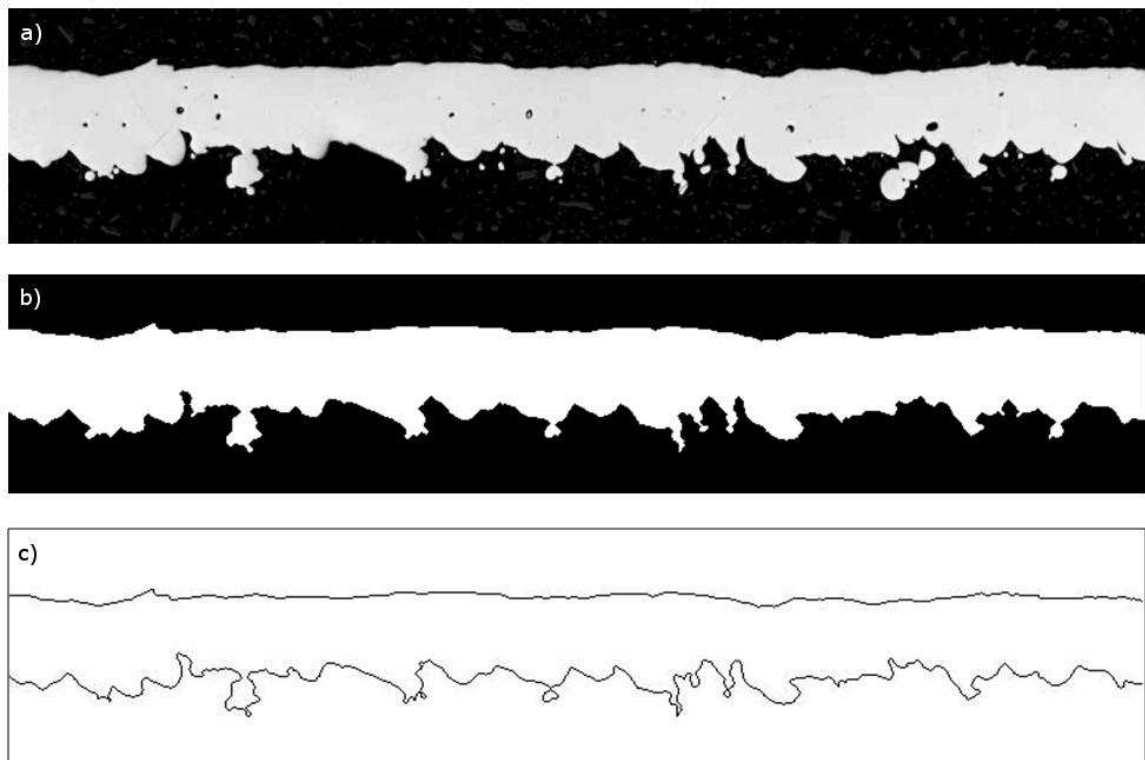
```
for i=1:b;
    profil(i)=profil(i)-mw;
end
```

%Ra berechnen

```
Ra=(trapz(abs(profil)))/b;           %Integrieren mit Trapezfunktion
rauheit(1,z)=Ra*ym;                 %Werte für Ra in Rauheitsmatrix
rauheit(2,z)=Rz*ym;                 %Werte für Ra in Rauheitsmatrix
end
```

#### 2.4.2.2 Rauheitsmessung Probe P\_2

Von den einzelnen Blättchen der Probe P\_3 wurden Schliffbilder erstellt und in ein Matlab Programm eingelesen. In dem ersten Teil wurde aus dem Schliffbild eines Blättchenquerschnitts wie es in **Abbildung 41** (a) gezeigt wird, ein Schwarz-Weiß-Bild erzeugt. Anschließend wurden Löcher im Blättchenquerschnitt aber auch Pulverteile in der Einbettmaße entfernt. Das Ergebnis dieses Schritts wird in **Abbildung 41** (b) gezeigt. Aus dem bereinigten Bild wurden die Konturen der Ober- und Unterseite des Blättchens extrahiert, was in **Abbildung 41** (c) veranschaulicht ist.

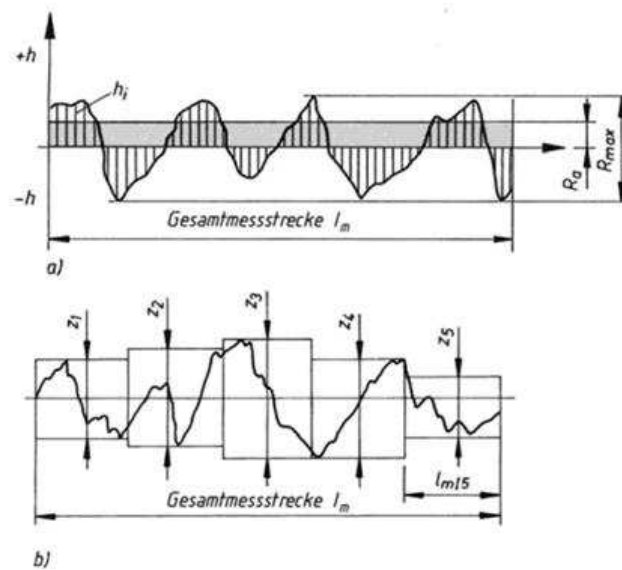


**Abbildung 41:** Bearbeitung eines Schlibbildes zum Messen der Oberflächenqualität

Aus diesen Oberflächenprofilen wurden anschließend  $R_a$  laut **Formel 3** und  $R_z$  laut **Formel 4** berechnet. **Abbildung 42** zeigt die Anwendung der Formeln anhand eines Beispiels [16].

$$R_a = \frac{1}{l_m} \cdot \int_0^{l_m} |y| dx \quad (3)$$

$$R_z = \frac{1}{5} \cdot (z_1 + z_2 + \dots + z_5) \quad (4)$$



**Abbildung 42:** a) Berechnung von arithmetischem Mittenrauwert  $R_a$ ; b) Berechnung von gemittelter Rautiefe  $R_z$  [16]

Im Folgenden wird der Quellcode dieses Programms angeführt und mit Kommentaren erläutert.

### Quellcode:

```
%Berechnung der Pixelgröße aus dem Maßstab
img=double(imread('Mass.jpg'))/256;           %Laden des Maßstabs
img=imresize(img,0.6);                         %Bildgröße anpassen
img=rgb2gray(img);                             %RGB in Grauwerte umwandeln
img=im2bw(img,0.3);                            %Grauwerte in SW umwandeln
[a,b]=size(img);

%Bild abtasten und Länge des Maßstabs erfassen
for j=1:b;
    for i=1:a;
        if img(i,j)>0;
            x=i;
        end
    end
end
y=0;
for i=1:b
```



```

    if img(x,i)>0
        y=y+1;

    end
end
ym=1000/y; %Pixel → Mikrometer

%Schliffbilder einlesen, bearbeiten und Informationen auslesen
rauheit=zeros(4,1);
for x=1:5
    img=double(imread(['60_025_5x_' num2str(x) '.jpg']))/256; %Einlesen des Bildes
    img=imresize(img,0.6); %Bildgröße anpassen
    img=rgb2gray(img); %RGB in Grauwerte umwandeln
    img=im2bw(img,0.5); %Grauwerte in SW umwandeln
    img=imfill(img,'holes'); %Löcher füllen
    img = imclose(img,strel('disk',3)); %Kratzer entfernen
    img=imfill(img,'holes'); %Löcher füllen
    img=imcomplement(img); %Bild komplementieren
    img=imfill(img,'holes'); %Löcher füllen
    img=imcomplement(img); %Bild komplementieren
    img=bwperim(img); %Konturen ermitteln
    img=double(img); %Kontur in double umwandeln

%Bildränder beschneiden
b=size(img,2);
img(:,1)=[];
img(:,b-1)=[];
[a,b]=size(img);

%Kontur von Matrix in Vektor umschreiben
for i=1:b
    k=a;
    l=1;
    while img(k,i)==0;
        profil_u(i)=k;
        k=k-1;
    end
end

```

```

while img(l,i)==0;
    profil_o(i)=l;
    l=l+1;
end
end
e=size(profil_u,2)/5;           %Vektorlänge durch 5 teilen
e=int32(e);                    %Wert runden
profteile_u=zeros(1:5,1:e+1); %Matrix für oberes Profil erstellen
profteile_o=zeros(1:5,1:e+1); %Matrix für unteres Profil erstellen

%Matrix mit Maxima, Minima und Differenz erstellen
f=1;
g=e;
for i=1:5;
    profteile_u(i,1:e)=profil_u(f:g);
    profteile_o(i,1:e)=profil_o(f:g);
    profteile_u(i,e+1)=max(profil_u(f:g))-min(profil_u(f:g));
    profteile_o(i,e+1)=max(profil_o(f:g))-min(profil_o(f:g));
    f=f+e;
    g=g+e;
end

%Rz berechnen
Rz_u=mean(profteile_u(:,e+1));
Rz_o=mean(profteile_o(:,e+1));

mw_u=mean(profil_u);          %Mittelwert berechnen
mw_o=mean(profil_o);          %Mittelwert berechnen

%Mittelwert Null setzen
for i=1:length(profil_u)
    profil_u(i)=profil_u(i)-mw_u;
    profil_o(i)=profil_o(i)-mw_o;
end

%Ra berechnen

```

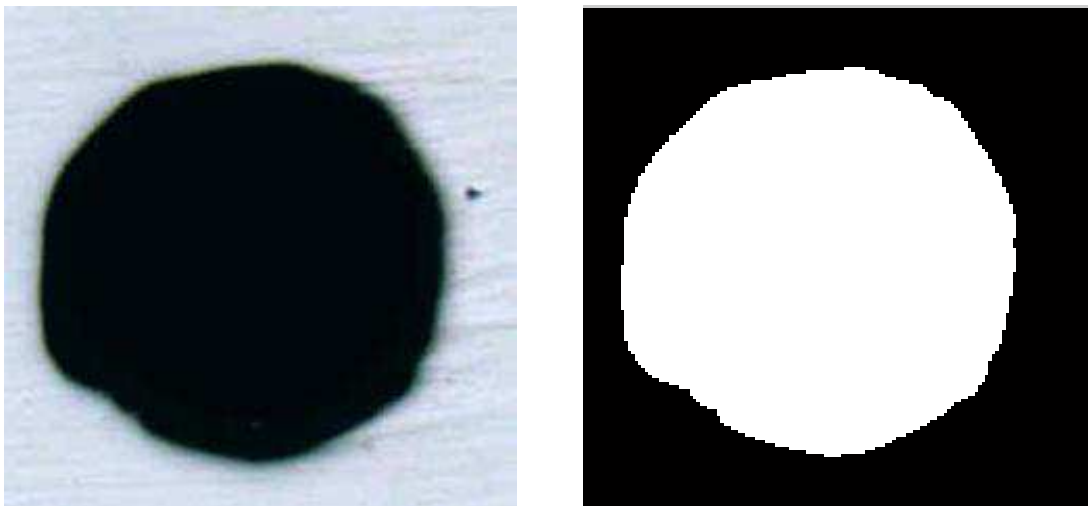
```

Ra_u=(trapz(abs(profil_u)))/b;           %Ra mit Trapezfunktion berechnen
Ra_o=(trapz(abs(profil_o)))/b;
%Matrix mit Werten für Ra und Rz füllen
rauheit(1,1)= Ra_u*ym;
rauheit(2,1)=Ra_o*ym;
rauheit(3,1)=Rz_u*ym;
rauheit(4,1)=Rz_o*ym;
end

```

## 2.5 Bestimmung der Kanaldurchmesser

Um die Durchmesser der in Probe P\_1 realisierten Kanäle zu ermitteln, wurde ein Matlab-Programm verfasst. Dieses Programm bereitet zuerst das Schlibbild auf, in dem es Löcher und Pulverteile in der Einbettmasse entfernt. Anschließend wurde der Kanalquerschnitt in Weiß und die umgebende Einbettmasse in Schwarz dargestellt was in **Abbildung 43** gezeigt wird. Dadurch konnte das Programm die Anzahl an weißen Pixel bestimmen und somit die Fläche des Querschnittes berechnen. Um die Ergebnisse vergleichbar darzustellen, wurde abschließend aus dieser Querschnittsfläche der äquivalente Durchmesser eines Kreises mit derselben Fläche ermittelt.



**Abbildung 43:** Links: Schlibbild des Kanalquerschnitts; Rechts: Umwandlung in SW und Entfernen der Löcher

Der im Folgenden angeführte Quellcode des erstellten Programms wird durch nebenstehende Kommentare erklärt.

## Quellcode:

**%Umrechnung der Maßstablänge von Pixel in Mikrometer siehe Kapitel 2.4.2.2**

```
fl=ym*ym; %Fläche eines Pixels berechnen
```

**%Schliffbilder einlesen, bearbeiten und Informationen auslesen**

```
img=double(imread('L05.jpg'))/256; %Einlesen des Bildes
img=imresize(img,0.6); %Bildgröße anpassen
img=rgb2gray(img); %RGB in Grauwerte umwandeln
img=imcomplement(img); %Bild komplementieren
img=im2bw(img,0.9); %Grauwerte in SW umwandeln
[a,b]=size(img);
img=imfill(img,'holes'); %Löcher füllen
img=double(img); %Kontur in Typ double umwandeln
```

**%Weiße Pixel zählen und somit Pixelanzahl des Hohlraums bestimmen.**

```
p=0;
for i=1:a;
    for j=1:b;
        if img(i,j)==1;
            p=p+1;
        end
    end
end
```

```
gfl=fl*p; %Gesamtfläche des Hohlraums in...
          %...Mikrometer
d=sqrt(gfl*4/pi)*10^-3 %Durchmesser eines Kreises mit ...
                      %...der gleichen Fläche ermitteln.
```

## 2.6 Untersuchung mittels Computertomografie

Die Proben P\_4 und P\_5 stellen Zylinder mit kleinen Hohlräumen dar. Diese sollen Gießfehler simulieren, wie sie in realen Bauteilen auftreten können. Um die Ausbildung der Hohlräume zu überprüfen, wurde der Computertomograf des ÖGI vom Typ „General Electrics v|tome|x c“ eingesetzt. Dabei wurden die Zylinder mit Hilfe einer Röntgenquelle durchstrahlt, wodurch 360 °C Aufnahmen der Proben entstanden. Diese Aufnahmen konnten anschließend Schicht für Schicht betrachtet werden. In **Tabelle 5** sind die Daten des verwendeten Computertomografen zusammengefasst.

**Tabelle 5:** Technische Daten des verwendeten Computertomografen

Röntgenröhre	240 kV Mikrofokus
Brennfleck	4 – 200 $\mu\text{m}$
Detailerkennbarkeit	> 5 $\mu\text{m}$
Detektortyp	Zeilendetektor
Max. Probendurchmesser	335 mm
Max. Probenhöhe	550 mm
Max. Probengewicht	50 kg

## 3 Ergebnisse und Diskussion

Alle Proben wurden nach der Herstellung durch eine Bandsäge von der Grundplatte abgetrennt. Einige der Proben bzw. Teile von Proben wurden zusätzlich geschliffen und poliert, um wesentliche Strukturen freizulegen. Anschließend wurden mit einem Lichtmikroskop Aufnahmen erstellt. Die Abmessungen der Proben wurden mit mechanischen Messgeräten, optisch am Schliffbild und mit Hilfe von Matlab-Programmen ermittelt. Die Oberflächengüte relevanter Flächen wurde mittels optischen Messgeräts oder mit Matlab-Programmen ermittelt. Dieses Kapitel enthält die dabei erhaltenen Ergebnisse. Details zu der Durchführung der unterschiedlichen Messungen finden sich in **Kapitel 2**.

### 3.1 Probe P\_1

Bei dieser Probe wurde besonders auf die Grenzen der Herstellbarkeit von Vollstrukturen und Hohlstrukturen geachtet. Einzelheiten über die Probengeometrie sind **Kapitel 2.3.1** zu entnehmen.

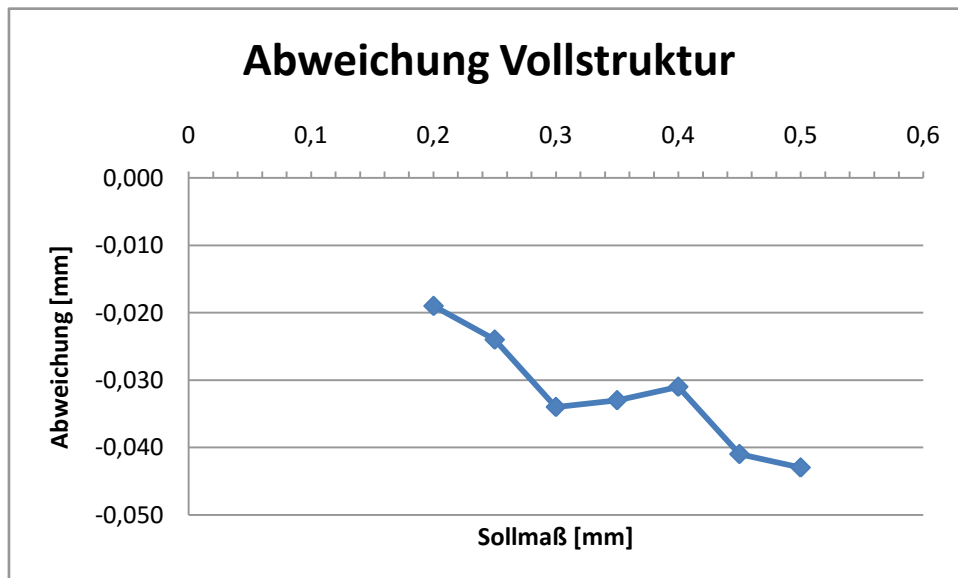
#### 3.1.1 Abmessungen

Die Soll-Abmessungen laut CAD-Datei und die tatsächlichen Abmessungen der Vollstruktur sind in **Tabelle 6** gelistet, die der Hohlstruktur in **Tabelle 7** und jene der Kanäle in **Tabelle 8**. Die tatsächlichen Abmessungen der Raster wurden mit Hilfe des Lichtmikroskops ermittelt. An dem Längsarm und an jedem der Querarme wurden Messungen durchgeführt, aus welchen der Mittelwert (MW) und dessen Abweichung (A) zum Sollmaß bestimmt wurden.

**Tabelle 6:** Abmessungen der Vollstruktur

Soll [mm]	Maße Vollstruktur [mm]							MW	A
	Längsarme			Querarme					
	1	2	3	4	5	6	7		
0,1	/	/	/	/	/	/	/	/	/
0,15	/	/	/	/	/	/	/	/	/
0,2	0,21	0,21	0,16	0,19	0,1	0,19	0,21	0,181	-0,019
0,25	0,22	0,23	0,21	0,22	0,24	0,21	0,25	0,226	-0,024
0,3	0,27	0,27	0,26	0,26	0,27	0,26	0,27	0,266	-0,034
0,35	0,32	0,31	0,32	0,32	0,32	0,33	0,3	0,317	-0,033
0,4	0,36	0,4	0,37	0,37	0,37	0,36	0,35	0,369	-0,031
0,45	0,41	0,42	0,41	0,39	0,41	0,41	0,41	0,409	-0,041
0,5	0,46	0,47	0,45	0,47	0,45	0,44	0,46	0,457	-0,043
								<b>MWA</b>	-0,032

Wie **Tabelle 6** zeigt, wurde die Vollstruktur mit einem leichten Untermaß von durchschnittlich 0,032 mm hergestellt. Zur besseren Anschauung wurden in **Abbildung 44** diese Abweichungen über dem Sollmaß aufgetragen. In dem Diagramm ist zu erkennen, dass die Abweichung mit dem Sollmaß ansteigt. Bei 0,2 mm Sollmaß beträgt die Abweichung noch -0,019 mm, bei einem Sollmaß von 0,5 mm hingegen schon -0,043 mm.



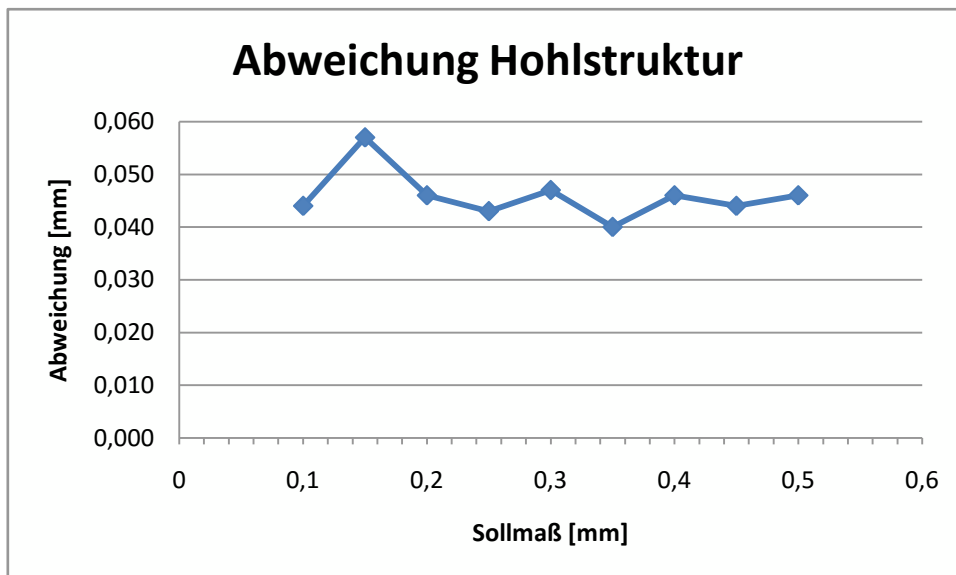
**Abbildung 44:** Abweichung der Vollstruktur über dem Sollmaß

Die Hohlstruktur wurde laut **Tabelle 7** mit einem Übermaß durchschnittlich 0,046 mm gefertigt. In **Abbildung 45** wurde die Abweichung der hohlen Rasterarme über dem Sollmaß

aufgetragen. Im Falle der Hohlstrukturen weist die Abweichung einen annähernd konstanten Verlauf auf. Die Abweichung bei einem Sollmaß von 0,1 mm beträgt 0,044 mm, bei einem Sollmaß von 0,5 mm beträgt sie 0,046 mm.

**Tabelle 7:** Abmessungen der Hohlstruktur

Soll [mm]	Maße Hohlstruktur [mm]							MW	A
	Längsarme			Querarme					
	1	2	3	4	5	6	7		
0,1	0,11	0,11	0,11	0,17	0,15	0,17	0,19	0,144	0,044
0,15	0,2	0,23	0,16	0,23	0,2	0,22	0,21	0,207	0,057
0,2	0,22	0,27	0,24	0,25	0,27	0,24	0,23	0,246	0,046
0,25	0,31	0,3	0,3	0,31	0,27	0,27	0,29	0,293	0,043
0,3	0,33	0,36	0,33	0,34	0,35	0,37	0,35	0,347	0,047
0,35	0,37	0,41	0,38	0,38	0,41	0,39	0,39	0,390	0,040
0,4	0,43	0,43	0,45	0,44	0,46	0,46	0,45	0,446	0,046
0,45	0,49	0,5	0,49	0,51	0,49	0,5	0,48	0,494	0,044
0,5	0,52	0,55	0,53	0,55	0,56	0,56	0,55	0,546	0,046
								<b>MWA</b>	0,046



**Abbildung 45:** Abweichung der Hohlstruktur über dem Sollmaß

Des Weiteren wurden in **Tabelle 8** die tatsächlichen Durchmesser der Kanäle mit dem Sollmaß verglichen.



**Tabelle 8:** Gemessene Kanaldurchmesser und Abweichung vom Sollmaß

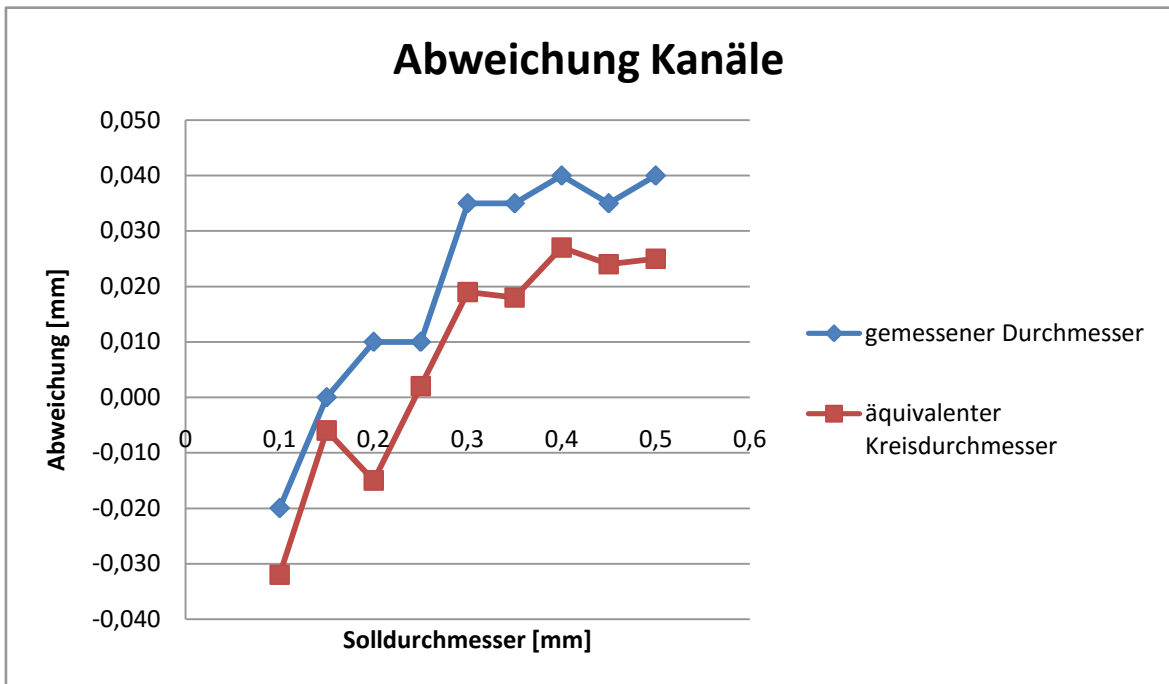
Soll [mm]	Maße Kanäle [mm]				
	Messung 1	Messung 2	MW	A	A absolut
0,1	0,08	0,08	0,080	0,020	0,02
0,15	0,14	0,16	0,150	0,000	0
0,2	0,22	0,2	0,210	0,010	0,01
0,25	0,27	0,25	0,260	0,010	0,01
0,3	0,31	0,36	0,335	0,035	0,035
0,35	0,39	0,38	0,385	0,035	0,035
0,4	0,45	0,43	0,440	0,040	0,04
0,45	0,48	0,49	0,485	0,035	0,035
0,5	0,54	0,54	0,540	0,040	0,04
				<b>MWA</b>	<b>0,025</b>

Neben den gemessenen Kanaldurchmessern wurden mit Hilfe von Matlab äquivalente Kreisdurchmesser berechnet. Das heißt, es wurden die Durchmesser von Kreisen ermittelt, welche die gleiche Fläche wie die tatsächlichen Kanalquerschnitte aufweisen. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in **Tabelle 9** aufgelistet.

**Tabelle 9:** Berechnete äquivalente Kreisdurchmesser

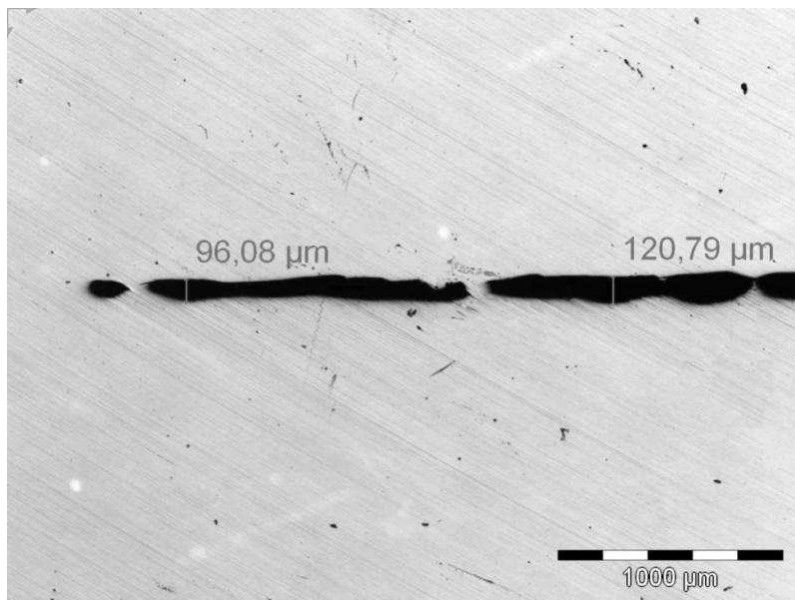
Soll [mm]	Berechnet [mm]	A [mm]	A absolut [mm]
0,1	0,068	-0,032	0,032
0,15	0,144	-0,006	0,006
0,2	0,185	-0,015	0,015
0,25	0,252	0,002	0,002
0,3	0,319	0,019	0,019
0,35	0,368	0,018	0,018
0,4	0,427	0,027	0,027
0,45	0,474	0,024	0,024
0,5	0,525	0,025	0,025
		<b>MWA</b>	<b>0,0187</b>

**Abbildung 46** zeigt neben dem Verlauf der Abweichung von dem gemessenen Durchmesser auch jenen der Abweichung vom berechneten äquivalenten Kreisdurchmesser. Dabei wird deutlich, dass die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Durchmesser mit dem Soll-Durchmesser zunimmt. Zwischen den Messwerten beider Verfahren bestehen kleine Unterschiede, der Trend ist jedoch identisch.



**Abbildung 46:** Abweichung der Kanaldurchmesser von dem Soll-Maß

**Abbildung 47** zeigt ein Schliffbild des eingebrachten Keils. An der Spitze erreicht er eine Breite von ca. 96  $\mu\text{m}$ . Damit ist der kleinste herstellbare Hohlraum auf eine Abmessung von etwa 0,1 mm begrenzt.



**Abbildung 47:** Schliffbild der Spitze des eingebrachten Keils

### 3.1.2 Oberflächenqualität

Im Folgenden wird die Oberflächenbeschaffenheit der Innenflächen der Hohl- und Vollstrukturen behandelt. Die arithmetischen Mittenrauwerte wurden durch das in **Kapitel 2.4.2.1** beschriebene Matlab-Programm ermittelt. **Tabelle 10** listet die berechneten Werte der Hohlstruktur.

**Tabelle 10:** Arithmetischer Mittenrauwert der Flächen der Hohlstrukturen

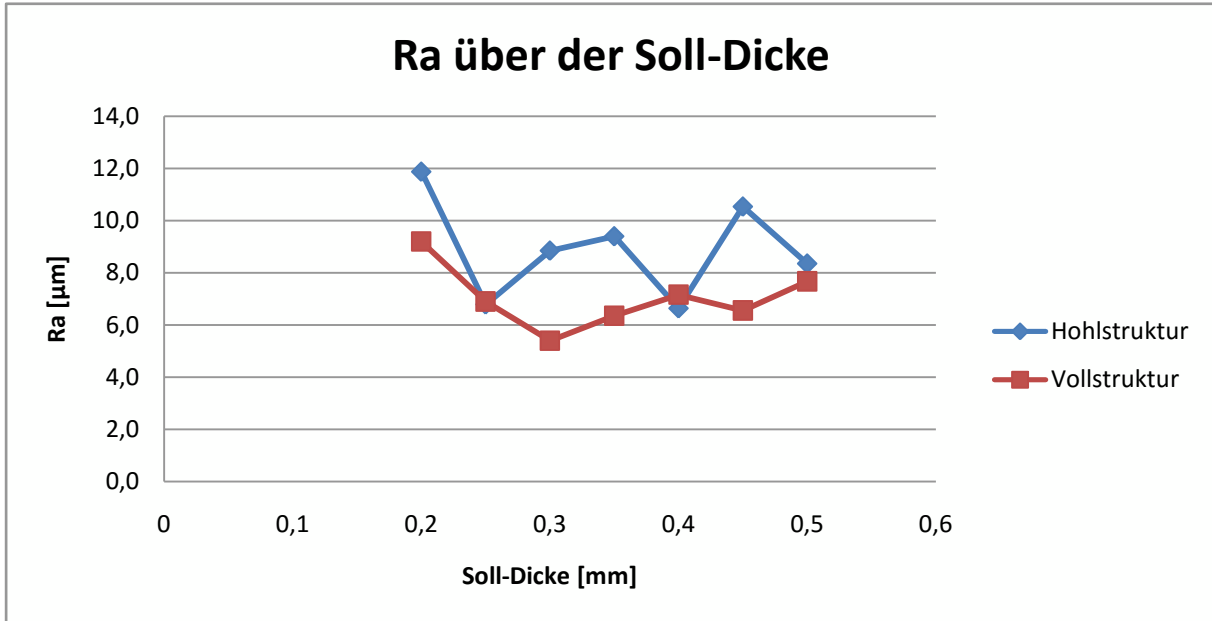
Dicke [mm]	Arithmetischer Mittenrauwert Hohlstruktur [ $\mu\text{m}$ ]								MW
	Fläche								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
<b>0,2</b>	11,3	15,7	16,1	11,7	11,7	9,1	12,2	7,3	<b>11,9</b>
<b>0,25</b>	12,4	4,5	11,3	4,5	7,9	3,2	5,9	4,5	<b>6,8</b>
<b>0,3</b>	4,1	5,2	4,4	11,0	22,1	5,1	9,4	9,3	<b>8,8</b>
<b>0,35</b>	7,7	8,5	13,9	7,9	9,3	6,8	9,3	11,8	<b>9,4</b>
<b>0,4</b>	4,5	1,4	8,4	5,9	6,2	4,8	10,8	11,0	<b>6,6</b>
<b>0,45</b>	8,1	10,6	7,7	4,8	12,3	12,1	13,2	15,4	<b>10,5</b>
<b>0,5</b>	6,4	5,0	8,0	6,2	7,6	8,1	12,7	12,8	<b>8,3</b>
								<b>MW</b>	<b>8,9</b>

In **Tabelle 11** sind die berechneten arithmetischen Mittenrauwerte der Innenflächen der Vollstruktur zusammengefasst.

**Tabelle 11:** Arithmetischer Mittenrauwert der Flächen der Vollstrukturen

Dicke [mm]	Arithmetischer Mittenrauwert Vollstruktur [ $\mu\text{m}$ ]								MW
	Fläche								
	1	2	3	4	5	6	7	8	
<b>0,2</b>	10,3	5,5	10,5	15,9	9,0	9,2	9,2	3,9	<b>9,2</b>
<b>0,25</b>	5,7	8,3	7,5	6,4	9,1	8,6	3,6	6,0	<b>6,9</b>
<b>0,3</b>	7,5	5,2	5,9	4,0	5,0	8,2	3,9	3,6	<b>5,4</b>
<b>0,35</b>	7,0	5,0	7,4	3,9	6,9	6,8	7,5	6,3	<b>6,4</b>
<b>0,4</b>	11,2	7,8	7,3	4,8	8,9	8,1	2,7	6,5	<b>7,2</b>
<b>0,45</b>	10,2	7,5	4,8	4,0	7,9	2,7	6,0	9,4	<b>6,6</b>
<b>0,5</b>	9,3	4,0	8,9	5,3	6,9	10,4	7,3	9,2	<b>7,7</b>
								<b>MW</b>	<b>7,0</b>

Der mittlere arithmetische Mittenrauwert der Innenfläche der Hohlstruktur beträgt  $8,9 \mu\text{m}$ , jener der Innenfläche der Vollstruktur  $7,0 \mu\text{m}$ . Die Verläufe der Oberflächenrauheit sind in **Abbildung 48** dargestellt.

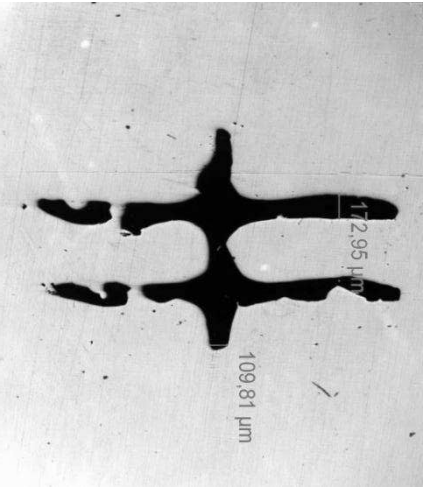
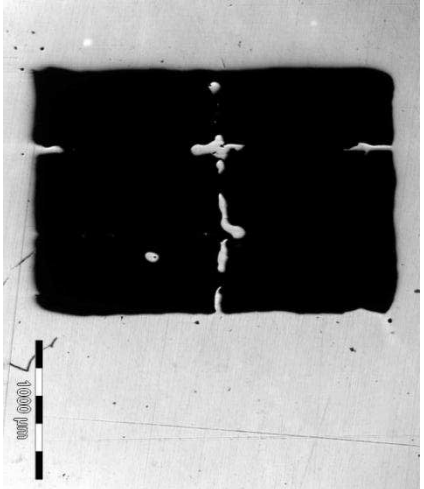
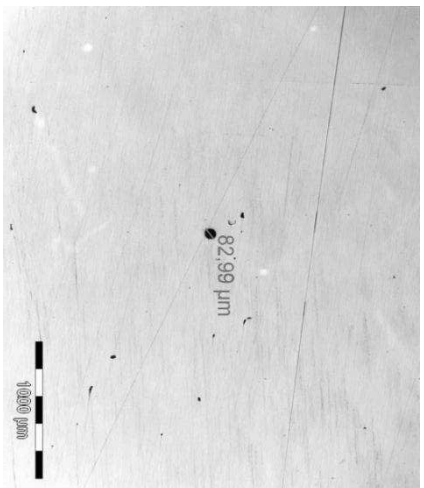
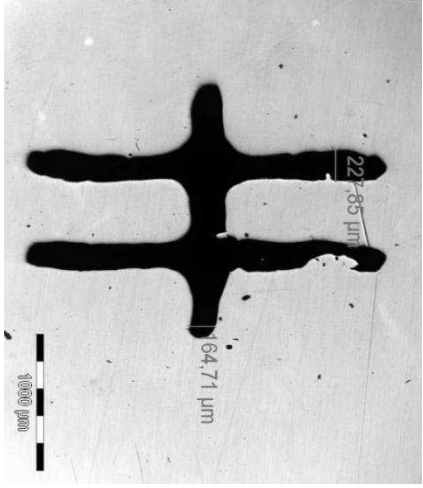
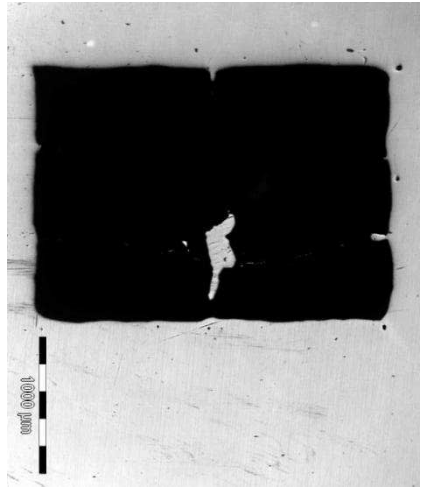
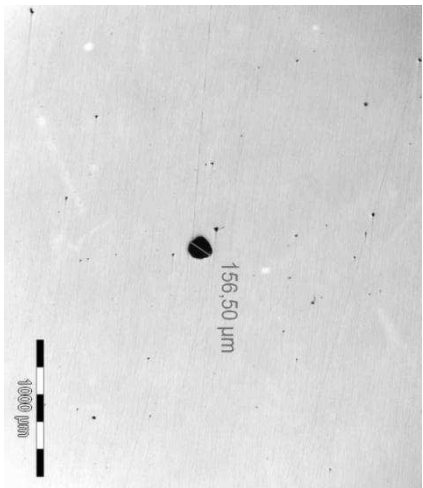


**Abbildung 48:** Ra [ $\mu\text{m}$ ] über dem Soll-Maß [mm] der Hohl- und Vollstrukturen

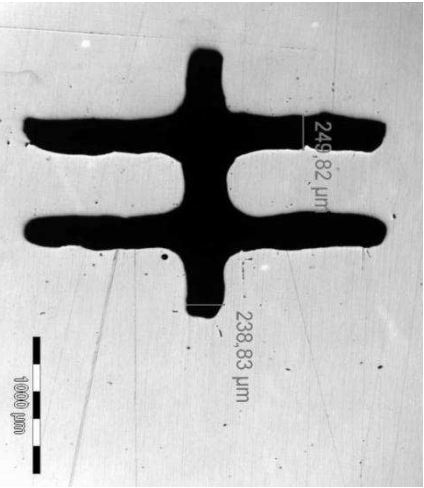
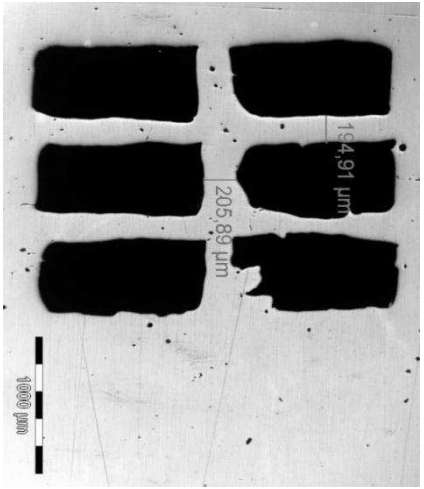
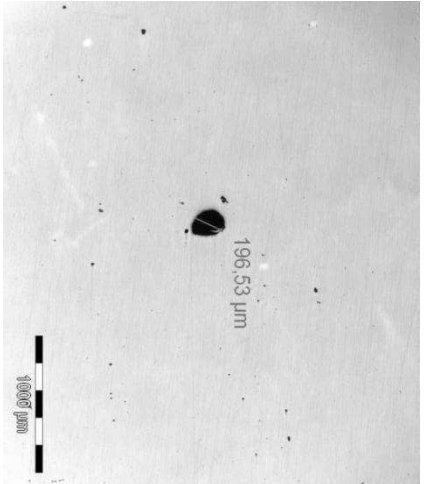
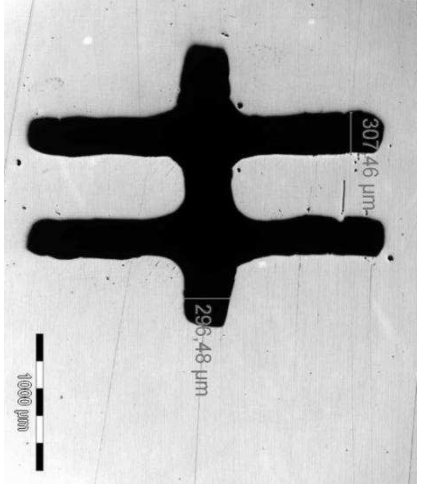
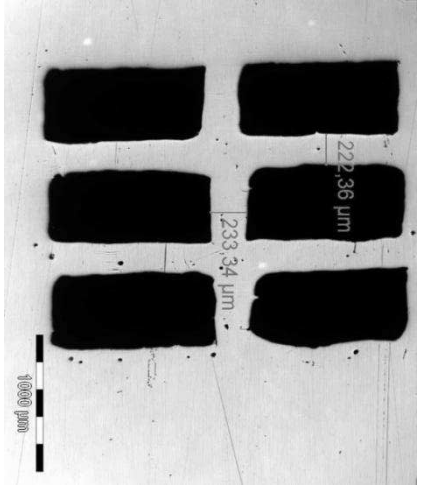
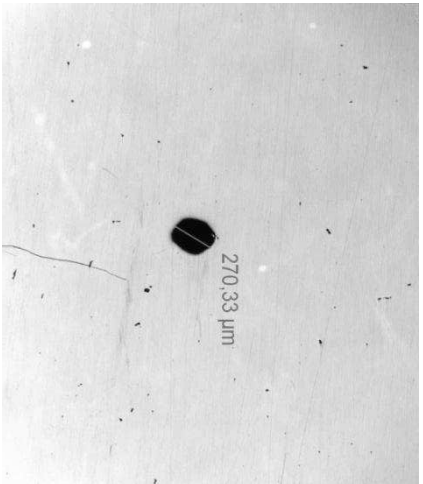
### 3.1.3 Aufnahmen der Hohl- und Vollstrukturen und der Kanäle

**Tabelle 12** bis **Tabelle 16** zeigen Schlibfbilder der verschiedenen Strukturen von der kleinsten Abmessung von  $0,1 \text{ mm}$  bis zur größten von  $0,5 \text{ mm}$ .

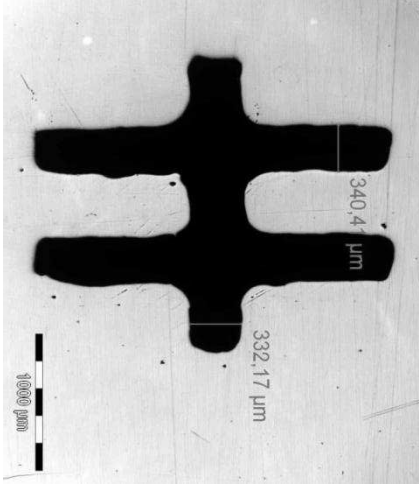
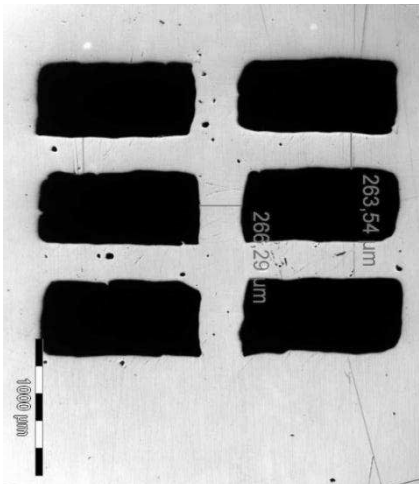

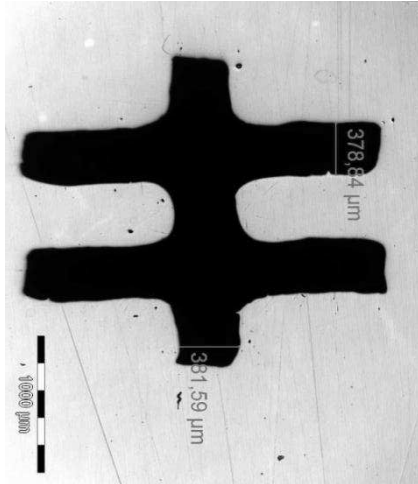
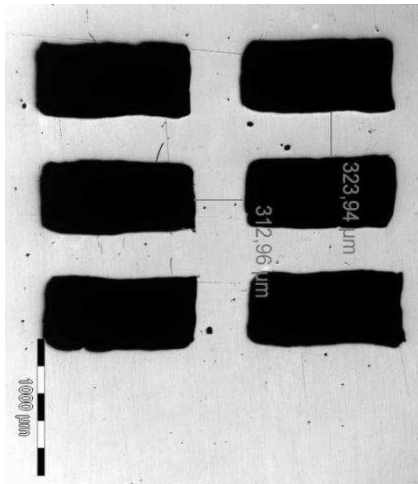
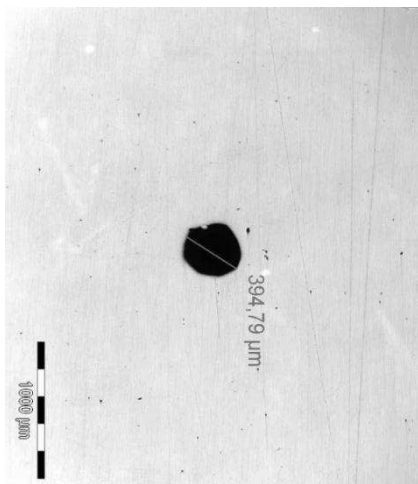
**Tabelle 12:** Raster und Kanäle mit den Sollabmessungen 0,1 mm und 0,15 mm

	<b>Hohlstruktur</b>	<b>Vollstruktur</b>	<b>Kanal</b>
0,1 mm			
0,15 mm			

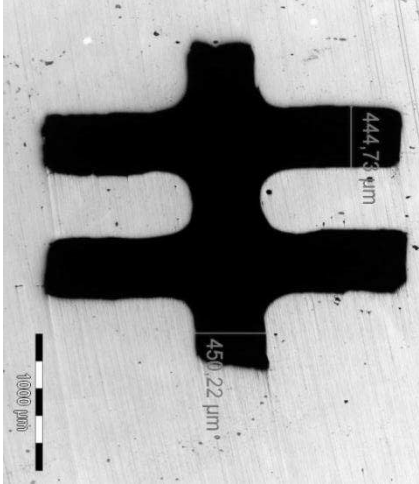
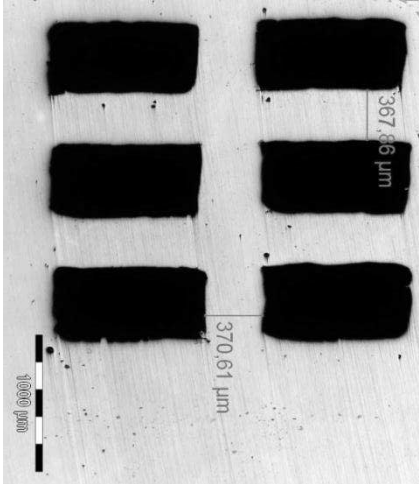
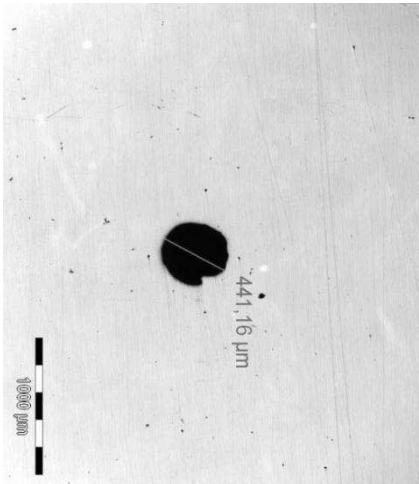
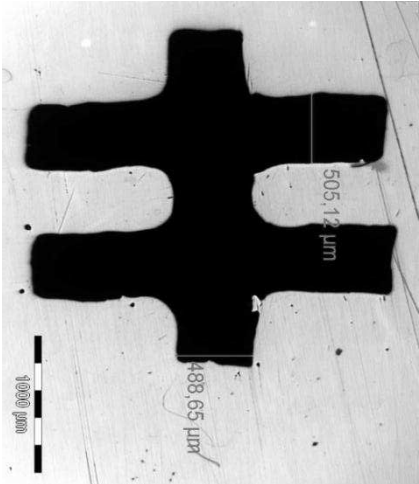
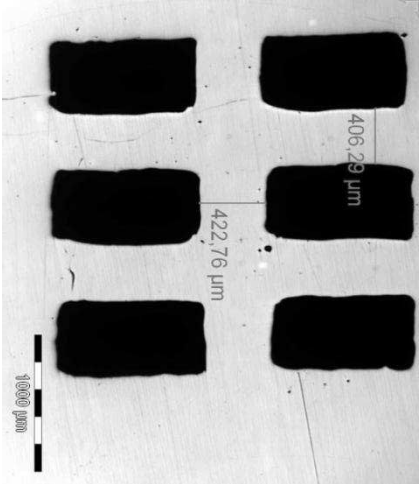
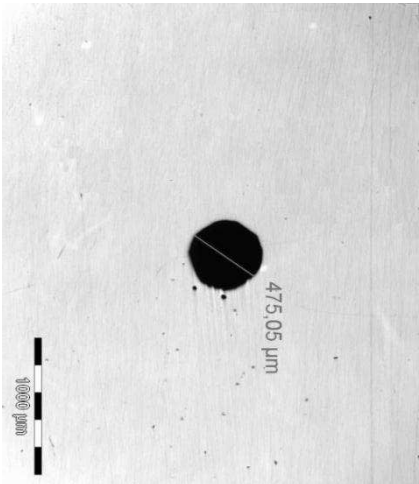
**Tabelle 13:** Raster und Kanäle mit den Sollabmessungen 0,2 mm und 0,25 mm

	<b>Hohlstruktur</b>	<b>Vollstruktur</b>	<b>Kanal</b>
0,2 mm			
0,25 mm			

**Tabelle 14:** Raster und Kanäle mit den Sollabmessungen 0,3 mm und 0,35 mm

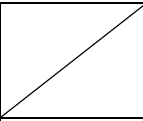
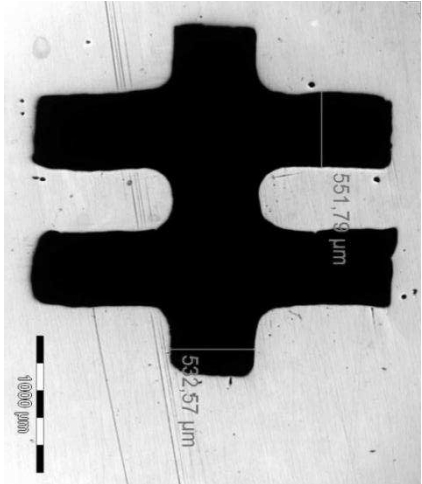
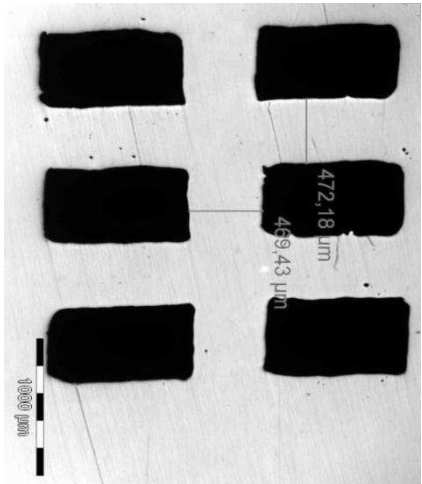
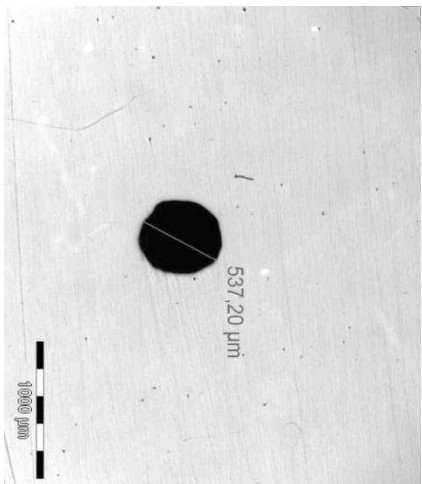
	<b>Hohlstruktur</b>	<b>Vollstruktur</b>	<b>Kanal</b>
0,3 mm			
0,35 mm			

**Tabelle 15:** Raster und Kanäle mit den Sollabmessungen 0,4 mm und 0,45 mm

	<b>Hohlstruktur</b>	<b>Vollstruktur</b>	<b>Kanal</b>
0,4 mm			
0,45 mm			

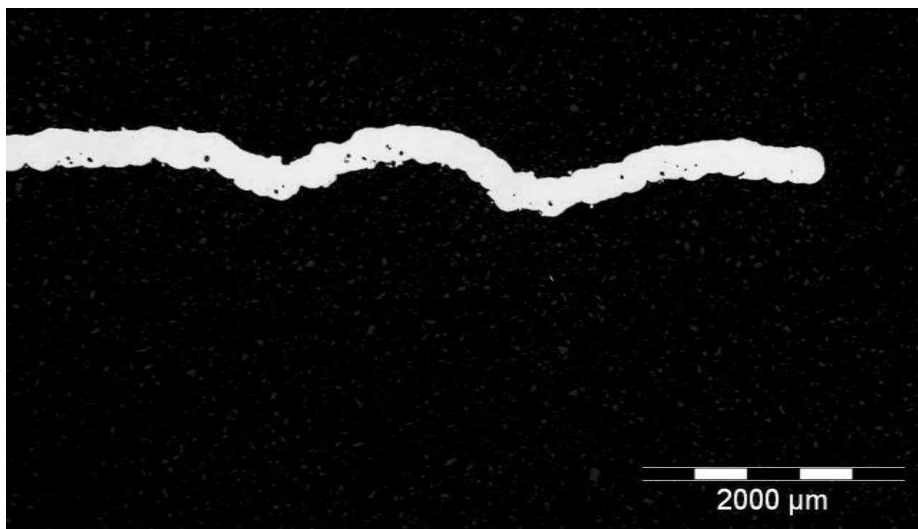


**Tabelle 16:** Raster und Kanal mit den Sollabmessung 0,5 mm

	<p><b>0,5 mm</b></p>
<p><b>Hohlstruktur</b></p>	
<p><b>Vollstruktur</b></p>	
<p><b>Kanal</b></p>	

## 3.2 Probe P\_2

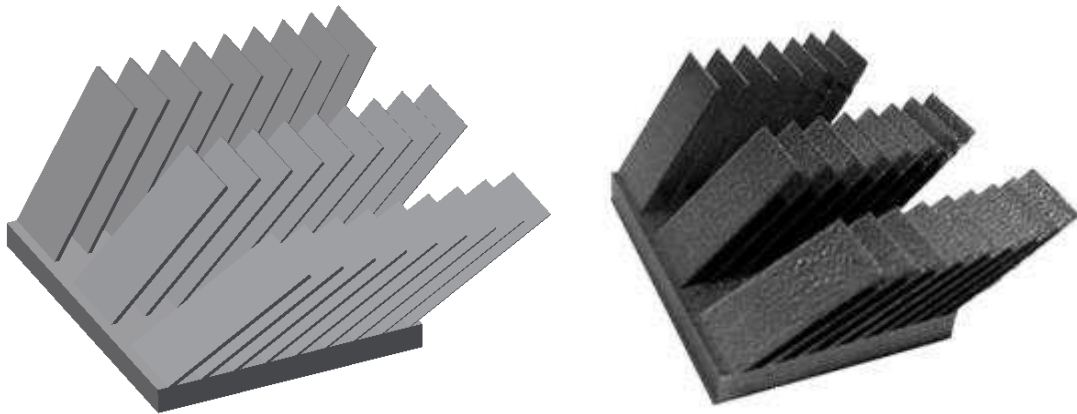
Ziel dieser Probe war es, die Grenzen der Herstellung von quadratischen Querschnitten in verschiedensten Neigungen zu ermitteln. Zusätzlich wurde die Qualität der erzeugten Teile bezüglich Maßhaltung und Oberflächengüte ermittelt. Bereits mit freiem Auge war zu erkennen, dass einige Blättchen der Probe beschädigt waren. Eines der verformten Blättchen wird in **Abbildung 49** gezeigt. Daraus lässt sich schließen, dass es bei einer Bewegung des Pulververteilers über die Bauteiloberfläche, zu einer Kollision mit dem Bauteil gekommen ist. Verursacht wurde die Kollision möglicherweise durch zu große Pulverteilchen, welche vor dem Verteiler hergeschoben wurden. Dabei sind ausschließlich die dünneren Blättchen betroffen, da diese nur einen geringeren Widerstand gegen die Verformung aufbringen.



**Abbildung 49:** Verformtes Blättchen

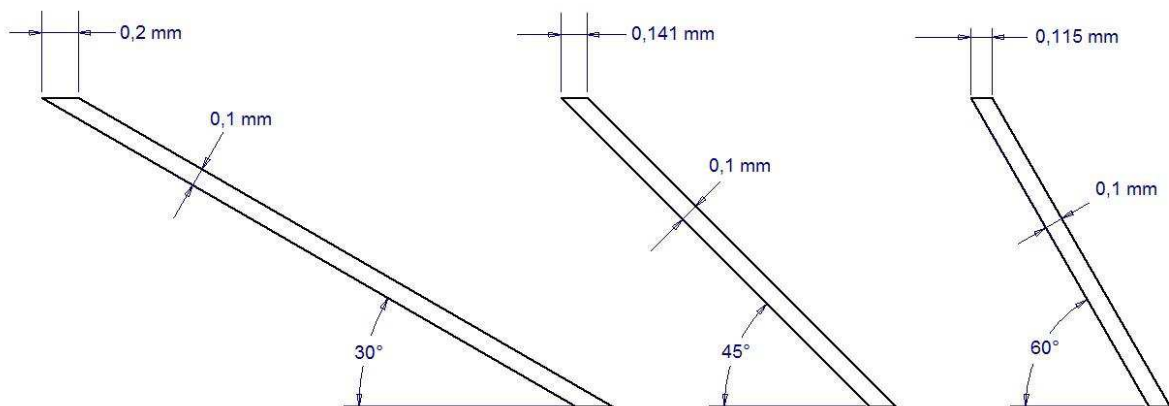
### 3.2.1 Abmessungen

Am fertigen Bauteil wurde nach der Herstellung das Fehlen einzelner Blättchen festgestellt, was in dem Vergleich von 3D-Modell und gefertigtem Teil in **Abbildung 50** zu erkennen ist.

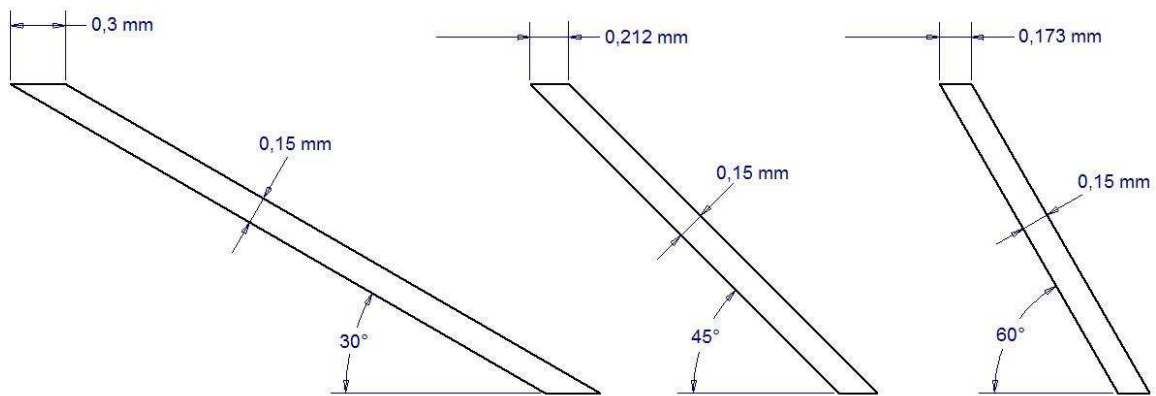


**Abbildung 50:** Vergleich von 3D-Modell (links) und gefertigtem Bauteil (rechts)

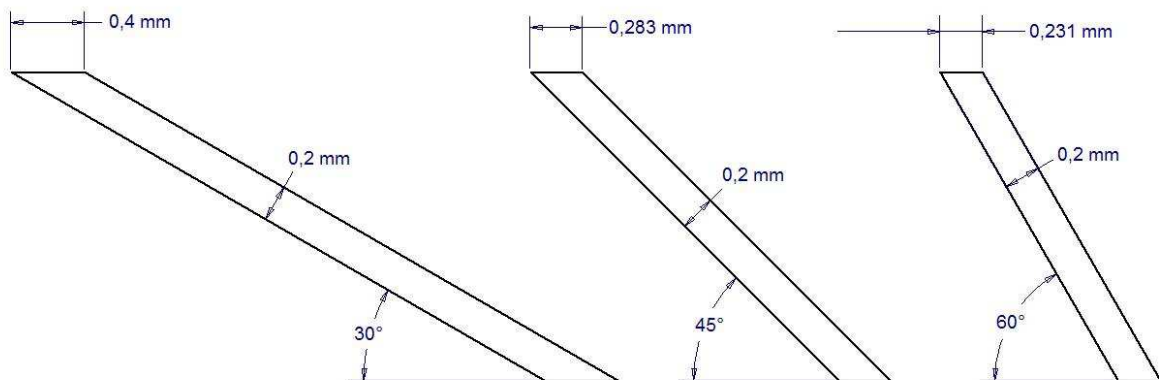
Die Software der Maschine erkannte, ob Teile des Bauteils gefertigt werden können oder nicht. Ist etwa der Querschnitt eines Bauteils zu klein, wird er automatisch gelöscht und nicht gefertigt. Der Grund, warum bei  $30^\circ$  dünnere Blättchenquerschnitte möglich waren liegt in der Neigung. Wird ein horizontaler Schnitt durch die Blättchen gemacht ist zu erkennen, dass mit kleinerem Neigungswinkel der Schnittquerschnitt bei gleicher Dicke zunimmt. **Abbildung 51** zeigt solche horizontal geschnittenen Blättchen mit einer Dicke von  $0,1\text{ mm}$  in den drei Neigungen von  $30^\circ$  (links),  $45^\circ$  (mittig) und  $60^\circ$  (rechts). In **Abbildung 52** und **Abbildung 53** werden die Querschnitte für Blättchen mit den Dicken  $0,15\text{ mm}$  und  $0,2\text{ mm}$  gezeigt.



**Abbildung 51:** Querschnitt von Blättchen mit  $0,1\text{ mm}$  Dicke; links:  $30^\circ$ , mittig:  $45^\circ$ , rechts  $60^\circ$



**Abbildung 52:** Querschnitt von Blättchen mit 0,15 mm Dicke; links: 30 °, mittig: 45 °, rechts 60 °



**Abbildung 53:** Querschnitt von Blättchen mit 0,2 mm Dicke; links: 30 °, mittig: 45 °, rechts 60 °

Aus der Ermittlung der Querschnitte lässt sich schließen, dass die Herstellung der Proben nicht nur von der Dicke der Blättchen, sondern auch von deren Schnittquerschnitt und somit von der Neigung der Bauteile abhängt. Alle Teile, die einen Schnittquerschnitt von kleiner 0,2 mm aufweisen, wurden von der Maschine nicht gefertigt. Also jene mit einer Dicke von 0,1 mm bei einer Neigung von 45 ° und 60 ° und jene mit einer Dicke von 0,15 mm bei einer Neigung von 60 °. Erst bei einer Soll-Dicke von 0,2 mm wurden alle Neigungen realisiert. So lässt sich aus diesem Versuch ableiten, dass Bauteile erst ab einem Querschnitt von 0,2 mm aufgebaut werden. **Tabelle 17** fasst die Soll-Dicken der Blättchen und die, mittels Messschieber, ermittelten tatsächlichen Ist-Dicken zusammen.

Tabelle 17: Soll- und Ist-Dicke der Blättchen

Soll [mm]	30 °		45 °		60 °	
	Ist [mm]	Differenz [mm]	Ist [mm]	Differenz [mm]	Ist [mm]	Differenz [mm]
0,1	0,39	0,29	/	/	/	/
0,15	0,44	0,29	0,34	0,05	/	/
0,2	0,44	0,24	0,36	0,12	0,3	0,18
0,25	0,5	0,25	0,4	0,15	0,36	0,21
0,3	0,53	0,23	0,45	0,22	0,39	0,17
0,35	0,58	0,23	0,48	0,25	0,49	0,24
0,4	0,69	0,29	0,58	0,29	0,49	0,2
0,45	0,82	0,37	0,6	0,23	0,55	0,32
0,5	0,83	0,33	0,65	0,32	0,6	0,28

Für den Vergleich der Ist-Dicken mit den Soll-Dicken wurden den Blättchen globale und lokale Nummern zugewiesen. Die globale Nummer richtet sich nach der Reihenfolge der Blättchen in dem CAD-Modell. D.h. die Blättchen mit der Soll-Dicke 0,1 mm bekommen die Nummer 1 zugewiesen, jene mit 0,15 mm die Nummer 2 und so weiter bis Nummer 10 bei 0,5 mm Dicke. Die lokale Nummerierung weist nur den tatsächlich produzierten Blättchen jeder Reihe bzw. Neigung eine Nummer zu. Wie oben erwähnt wurden bei einer Neigung von 45 ° und 60 ° nicht alle Blättchen gefertigt. Somit hat in der Reihe mit einer Neigung von 45 ° das Blättchen mit einer Soll-Dicke von 0,15 mm die Nummer 1. Das Nummerierungssystem wird in **Abbildung 54** erläutert.

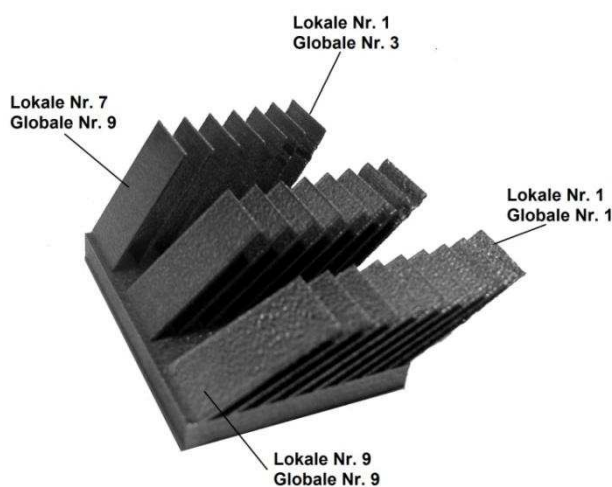
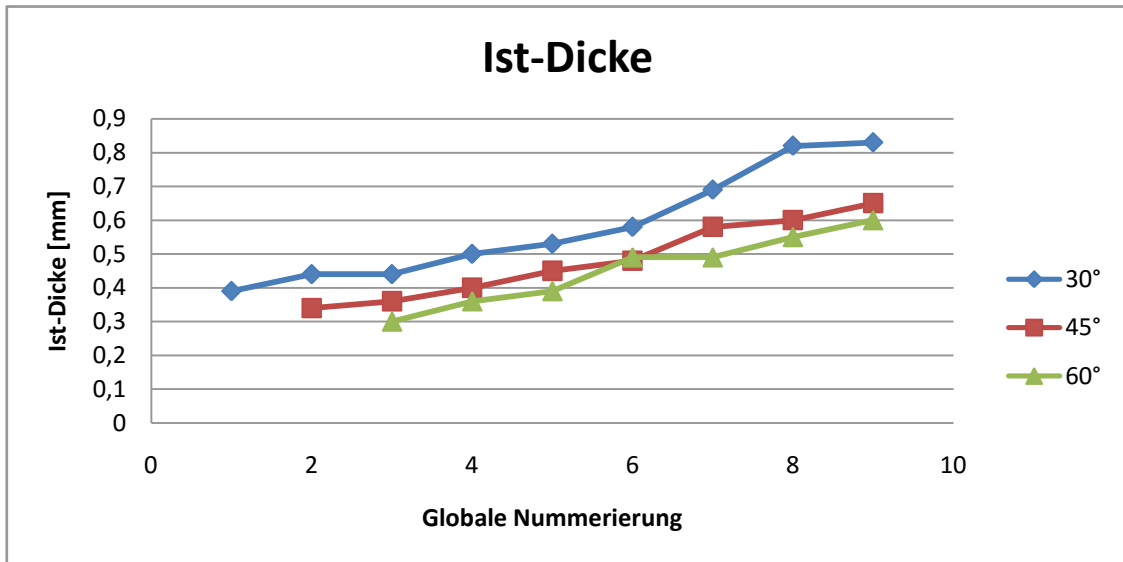


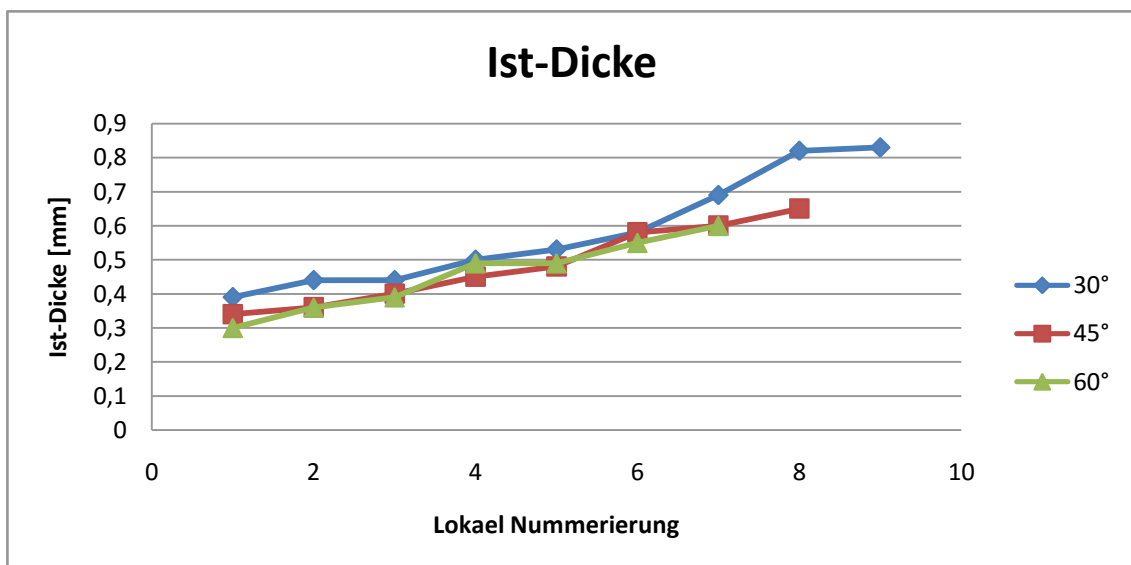
Abbildung 54: Lokale und Globale Nummer

Wird nun die Ist-Dicke über der globalen Nummer aufgetragen, entstehen die Verläufe aus **Abbildung 55**. Die Dicken bei unterschiedlichen Neigungen weisen dabei deutliche Unterschiede auf.



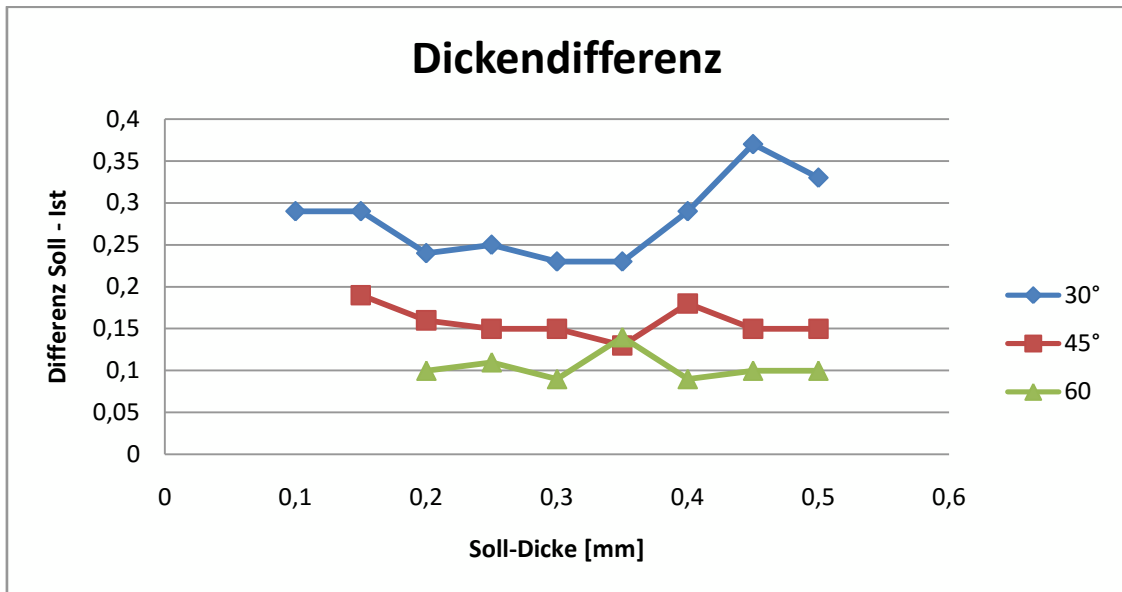
**Abbildung 55:** Verläufe der Ist-Dicken über den Soll-Dicken der Blättchen

Trägt man aber die Ist- Dicke über der lokalen Nummerierung auf, wie in **Abbildung 56** gezeigt wird, ist zu erkennen, dass die Blättchen mit der gleichen Nummer etwa die gleiche Dicke aufweisen. Das Blättchen mit einer Neigung von 30 ° und einer Soll-Dicke von 0,1 mm weist sogar eine etwas größere Ist-Dicke auf, als das Blättchen mit 45 ° Neigung und 0,15 mm Soll-Dicke. Erstaunlicher Weise ist es auch dicker, als jenes mit einer Neigung von 60 ° und einer Soll-Dicke von 0,2 mm.



**Abbildung 56:** Ist-Dicke über der lokalen Nummerierung

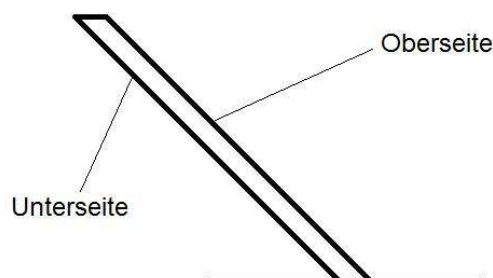
In **Abbildung 57** wird die Dickendifferenz über der Soll-Dicke dargestellt und es ist zu erkennen, dass diese von der Neigung der Blättchen abhängig ist. Die Differenz von Ist- und Soll-Dicke sinkt mit steigendem Neigungswinkel.



**Abbildung 57:** Differenz zwischen Soll- und Ist-Dicke über der Soll-Dicke

### 3.2.2 Oberflächenqualität

Die Rauheit der Blättchenoberflächen wurde mit Hilfe eines Programmes berechnet, welches die Rauheit aus dem Schliffbild der Blättchen ermittelte. Genauere Informationen zum Ablauf der Berechnung bzw. zum Programmaufbau sind **Kapitel 2.4.2.2** zu entnehmen. Zuerst wurden die beiden wesentlichen Oberflächen definiert. **Abbildung 58** zeigt, welche Flächen im Folgenden als Oberseite und welche als Unterseite bezeichnet werden.



**Abbildung 58:** Definition von Unter- und Oberseite

Als Kennwerte für die Oberflächenrauheit wurden zum Einen der arithmetische Mittenrauwert und zum Anderen die gemittelte Rautiefe berechnet. Die **Tabelle 18 bis 20** umfassen die arithmetischen Mittenrauwerte der unterschiedlich geneigten Strukturen und die **Tabellen 21 bis 23** die gemittelten Rautiefen. Zur Bestimmung der Rauheit wurden an jeder Blättchenoberfläche 5 Messungen durchgeführt und anschließend der Mittelwert gebildet.

**Tabelle 18:** Arithmetischer Mittenrauwert Ra der um 30° geneigten Blättchen

30 °												
Soll [mm]	Ra [µm]											
	Unterseite						Oberseite					
	1	2	3	4	5	MW	1	2	3	4	5	MW
<b>0,1</b>	27,0	30,6	26,8	27,7	26,1	<b>27,6</b>	19,3	19,4	18,0	14,3	15,2	<b>17,2</b>
<b>0,15</b>	32,0	27,0	29,0	23,9	25,8	<b>27,5</b>	26,5	20,9	12,2	15,1	15,0	<b>17,9</b>
<b>0,2</b>	32,3	34,8	28,9	32,9	26,0	<b>31,0</b>	15,8	16,5	11,2	13,2	14,2	<b>14,2</b>
<b>0,25</b>	45,5	42,7	24,8	30,8	34,8	<b>35,7</b>	12,8	13,9	9,2	8,2	10,5	<b>10,9</b>
<b>0,3</b>	47,9	33,2	44,6	37,0	54,5	<b>43,4</b>	8,3	11,5	14,3	10,3	12,5	<b>11,4</b>
<b>0,35</b>	37,4	51,4	30,6	45,2	41,1	<b>41,1</b>	8,6	10,8	6,5	7,3	10,8	<b>8,8</b>
<b>0,4</b>	42,4	34,3	43,9	58,6	39,0	<b>43,6</b>	8,3	6,9	12,8	8,6	26,5	<b>12,6</b>
<b>0,45</b>	40,3	48,5	48,3	25,4	49,0	<b>42,3</b>	17,6	12,6	16,3	9,4	11,9	<b>13,5</b>
<b>0,5</b>	31,4	60,1	45,2	39,8	37,8	<b>42,9</b>	13,3	13,1	14,0	7,9	10,0	<b>11,6</b>

**Tabelle 19:** Arithmetischer Mittenrauwert Ra der um 45° geneigten Blättchen

45 °												
Soll [mm]	Ra [µm]											
	Unterseite						Oberseite					
	1	2	3	4	5	MW	1	2	3	4	5	MW
<b>0,1</b>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
<b>0,15</b>	21,5	18,5	19,9	20,7	25,5	<b>21,2</b>	18,6	15,3	15,8	9,4	11,0	<b>14,0</b>
<b>0,2</b>	23,9	22,9	18,6	15,6	11,1	<b>18,4</b>	14,4	18,6	13,0	19,1	10,5	<b>15,1</b>
<b>0,25</b>	28,3	23,9	28,8	24,9	26,7	<b>26,5</b>	9,4	13,2	15,4	7,1	8,4	<b>10,7</b>
<b>0,3</b>	32,2	20,6	27,2	29,6	28,7	<b>27,7</b>	8,1	7,9	6,8	7,6	7,9	<b>7,7</b>
<b>0,35</b>	24,1	29,0	24,4	22,5	25,4	<b>25,1</b>	11,2	9,0	9,1	10,0	8,2	<b>9,5</b>
<b>0,4</b>	30,1	21,8	25,7	20,9	28,3	<b>25,4</b>	10,2	10,0	10,8	11,0	8,9	<b>10,2</b>
<b>0,45</b>	25,6	29,6	22,4	27,6	22,6	<b>25,6</b>	10,5	13,7	9,4	7,7	8,8	<b>10,0</b>
<b>0,5</b>	27,0	28,3	30,8	27,5	25,7	<b>27,9</b>	11,2	10,7	15,0	14,0	10,9	<b>12,4</b>



**Tabelle 20:** Arithmetischer Mittenrauwert Ra der um 60° geneigten Blättchen

60 °												
Soll [mm]	Ra [µm]											
	Unterseite						Oberseite					
	1	2	3	4	5	MW	1	2	3	4	5	MW
<b>0,1</b>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
<b>0,15</b>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
<b>0,2</b>	15,8	13,5	14,1	15,6	13,1	<b>14,4</b>	13,2	10,3	10,6	9,7	9,4	<b>10,6</b>
<b>0,25</b>	30,6	28,1	30,0	22,8	24,0	<b>27,1</b>	7,5	13,5	15,8	6,1	8,2	<b>10,2</b>
<b>0,3</b>	21,5	17,3	13,9	17,0	14,4	<b>16,8</b>	8,4	6,7	10,4	8,7	6,0	<b>8,0</b>
<b>0,35</b>	20,0	16,2	16,5	17,8	19,6	<b>18,0</b>	6,6	12,7	9,5	12,0	9,2	<b>10,0</b>
<b>0,4</b>	20,0	21,8	14,9	15,2	19,4	<b>18,3</b>	9,5	13,6	11,4	10,0	8,1	<b>10,5</b>
<b>0,45</b>	20,1	25,2	22,1	20,6	21,0	<b>21,8</b>	8,8	10,3	10,0	14,1	7,5	<b>10,1</b>
<b>0,5</b>	14,3	25,8	23,5	22,9	22,0	<b>21,7</b>	6,7	10,5	12,3	8,1	9,2	<b>9,4</b>

**Tabelle 21:** Gemittelte Rautiefe Rz der um 30° geneigten Blättchen

30 °												
Soll [mm]	Rz [µm]											
	Unterseite						Oberseite					
	1	2	3	4	5	MW	1	2	3	4	5	MW
<b>0,1</b>	122,0	132,1	116,5	116,5	122,0	<b>121,8</b>	82,6	77,1	102,8	70,6	71,6	<b>80,9</b>
<b>0,15</b>	116,5	109,2	144,0	107,3	112,8	<b>118,0</b>	76,1	58,7	53,2	47,7	54,1	<b>58,0</b>
<b>0,2</b>	138,5	134,9	160,6	127,5	119,3	<b>136,1</b>	60,6	56,0	38,5	53,2	47,7	<b>51,2</b>
<b>0,25</b>	178,9	157,8	113,8	140,4	141,3	<b>146,4</b>	42,2	45,0	43,1	33,0	43,1	<b>41,3</b>
<b>0,3</b>	171,6	133,9	155,0	132,1	167,9	<b>152,1</b>	30,3	45,0	49,5	46,8	45,9	<b>43,5</b>
<b>0,35</b>	149,5	196,3	150,5	196,3	161,5	<b>170,8</b>	39,4	37,6	24,8	29,4	31,2	<b>32,5</b>
<b>0,4</b>	144,0	145,9	179,8	196,3	168,9	<b>167,0</b>	27,5	28,4	33,9	32,1	51,4	<b>34,7</b>
<b>0,45</b>	163,3	189,9	189,0	130,3	191,7	<b>172,8</b>	63,3	54,1	36,7	35,8	35,8	<b>45,1</b>
<b>0,5</b>	144,0	220,2	197,2	167,9	149,5	<b>175,8</b>	39,4	34,9	33,9	30,3	43,1	<b>36,3</b>

**Tabelle 22:** Gemittelte Rautiefe Rz der um 45 ° geneigten Blättchen

45 °												
Soll [mm]	Rz [µm]											
	Unterseite						Oberseite					
	1	2	3	4	5	MW	1	2	3	4	5	MW
<b>0,1</b>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
<b>0,15</b>	101,8	64,2	90,8	105,5	106,4	<b>93,8</b>	46,8	50,5	55,0	41,3	34,9	<b>45,7</b>
<b>0,2</b>	83,5	68,8	72,5	75,2	48,6	<b>69,7</b>	51,4	54,1	49,5	63,3	52,3	<b>54,1</b>
<b>0,25</b>	120,2	97,2	123,9	97,2	120,2	<b>111,7</b>	31,2	33,9	33,9	34,9	48,6	<b>36,5</b>
<b>0,3</b>	146,8	95,4	128,4	135,8	139,4	<b>129,2</b>	31,2	30,3	35,8	26,6	27,5	<b>30,3</b>
<b>0,35</b>	97,2	120,2	107,3	118,3	131,2	<b>114,9</b>	41,3	33,9	45,0	40,4	33,0	<b>38,7</b>
<b>0,4</b>	133,9	123,9	107,3	103,7	111,0	<b>116,0</b>	39,4	24,8	42,2	45,9	32,1	<b>36,9</b>
<b>0,45</b>	106,4	127,5	106,4	116,5	108,3	<b>113,0</b>	33,9	38,5	33,9	31,2	33,0	<b>34,1</b>
<b>0,5</b>	110,1	113,8	112,8	107,3	117,4	<b>112,3</b>	36,7	38,5	56,0	38,5	40,4	<b>42,0</b>

**Tabelle 23:** Gemittelte Rautiefe Rz der um 60 ° geneigten Blättchen

60 °												
Soll [mm]	Rz [µm]											
	Unterseite						Oberseite					
	1	2	3	4	5	MW	1	2	3	4	5	MW
<b>0,1</b>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
<b>0,15</b>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
<b>0,2</b>	58,7	53,2	55,0	66,1	57,8	<b>58,2</b>	54,1	35,8	33,0	38,5	44,0	<b>41,1</b>
<b>0,25</b>	112,8	109,2	110,1	100,0	103,7	<b>107,2</b>	32,1	41,3	30,3	28,4	32,1	<b>32,8</b>
<b>0,3</b>	92,7	84,4	76,1	76,1	70,6	<b>80,0</b>	39,4	32,1	39,4	32,1	33,0	<b>35,2</b>
<b>0,35</b>	98,2	73,4	79,8	87,2	80,7	<b>83,9</b>	39,4	25,7	37,6	42,2	38,5	<b>36,7</b>
<b>0,4</b>	88,1	77,1	74,3	70,6	78,0	<b>77,6</b>	36,7	43,1	40,4	33,9	35,8	<b>38,0</b>
<b>0,45</b>	100,0	81,7	100,0	87,2	94,5	<b>92,7</b>	36,7	34,9	32,1	33,0	27,5	<b>32,8</b>
<b>0,5</b>	76,1	104,6	87,2	<b>107,3</b>	98,2	<b>94,7</b>	35,8	30,3	35,8	34,9	33,0	<b>33,9</b>

Trägt man die Oberflächenrauheit Ra der Blättchen über deren Soll-Dicke auf, erhält man die Verläufe aus **Abbildung 59**, trägt man Rz über die Soll-Dicke auf erhält man jene aus **Abbildung 60**. Es wird deutlich, dass die Oberflächenrauheit mit steigendem Neigungswinkel abnimmt. Grund dafür ist der mit steigenden Neigungswinkeln sinkende Überhang der Blättchen, wodurch weniger Material auf losem Pulver verfestigt wird. Außerdem ist zu erkennen, dass die Rauheit bei gleicher Neigung ab einer Blättchendicke von etwa 0,3 mm annähernd konstante Werte aufweist. Unter 0,3 mm sinkt die Rauheit der

Oberseiten der Blättchen. Bei einer Neigung von 30 ° etwa, sinkt die Rauheit der Unterseite von einem Ra von 40 µm auf knapp unter 30 µm.

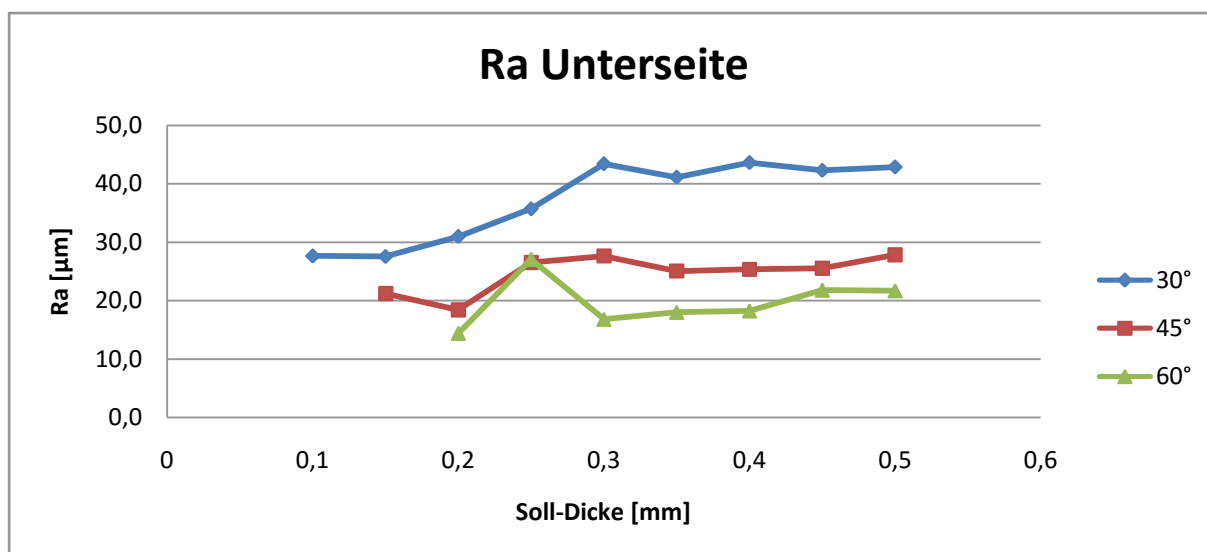


Abbildung 59: Ra der Blättchenunterseiten über der Soll-Dicke

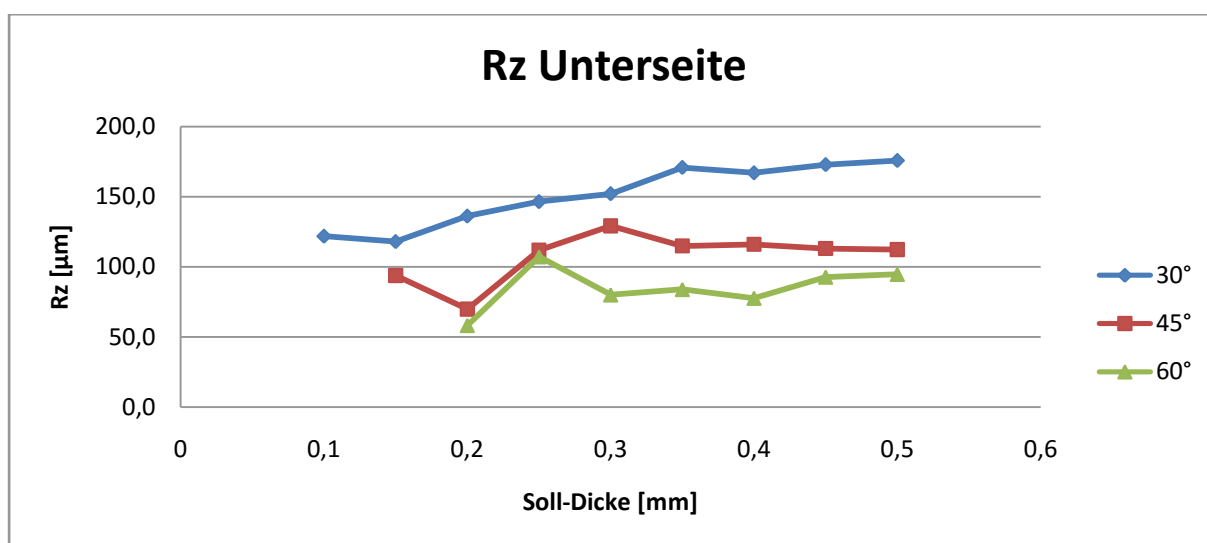


Abbildung 60: Ra der Blättchenunterseiten über der Soll-Dicke

Der arithmetische Mittenrauwert der Blättchenoberseiten bei Neigungen von 30° und 45° nimmt, laut **Abbildung 61**, mit steigender Blättchendicke ab, bis er sich ab einer Dicke von 0,3 mm bei etwa 10 µm einpendelt. Die Qualität der Oberseiten von Blättchen mit einer Neigung von 60° bewegt sich bereits bei dünnen Dicken bei einem Ra von 10µm. Auch die gemittelte Rautiefe der Oberseiten weist ein ähnliches Verhalten auf, was in **Abbildung 62** zu erkennen ist.

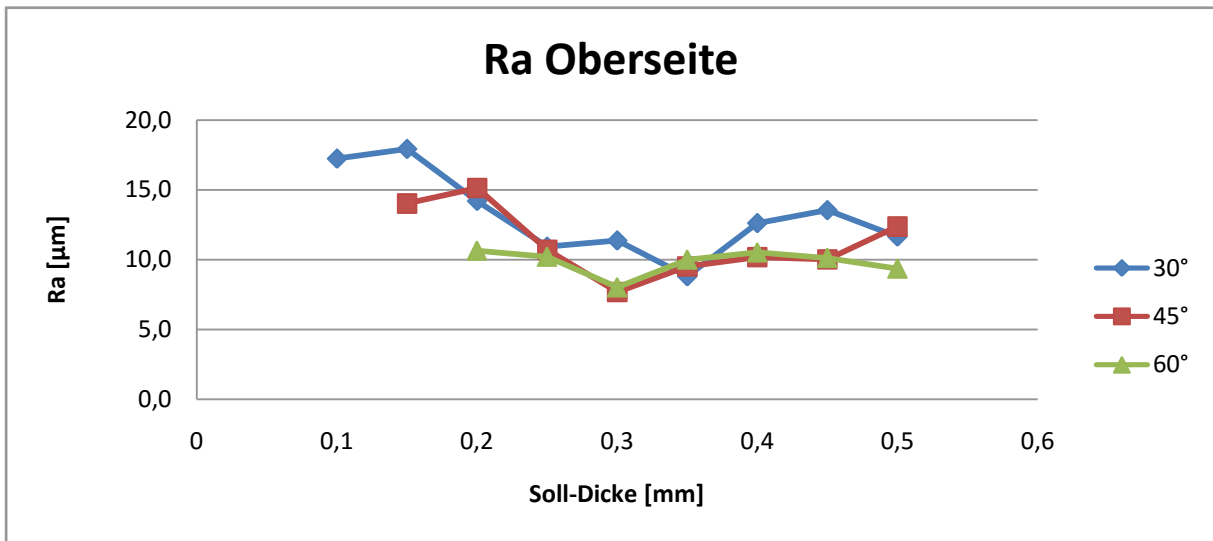


Abbildung 61: Ra der Oberseiten über der Soll-Dicke

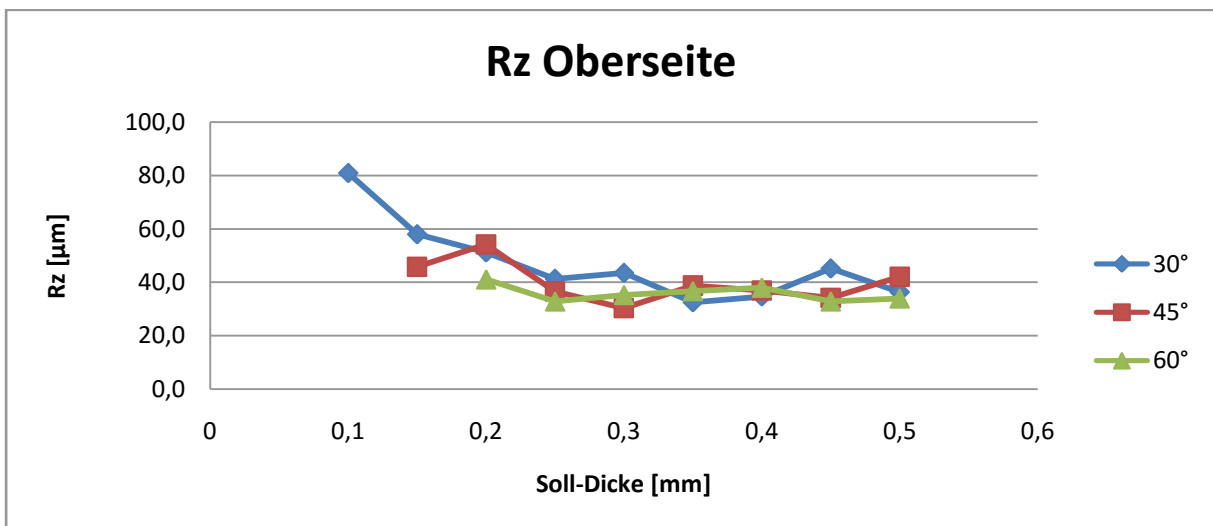
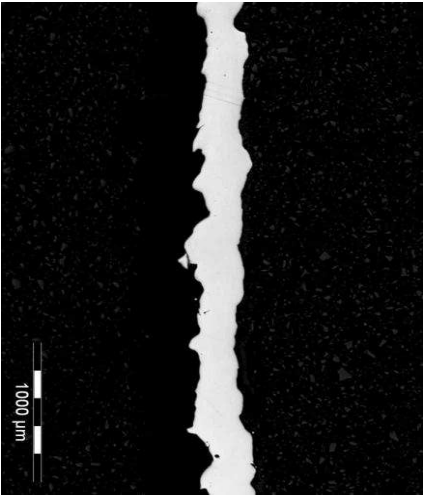
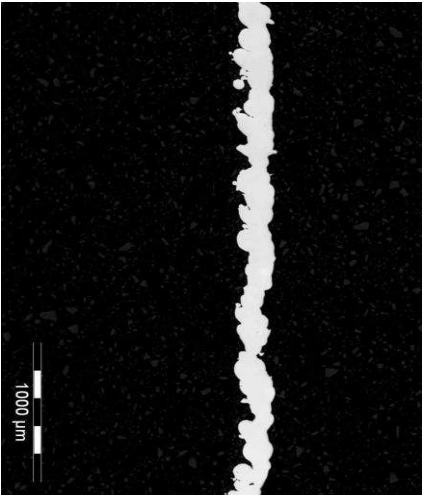
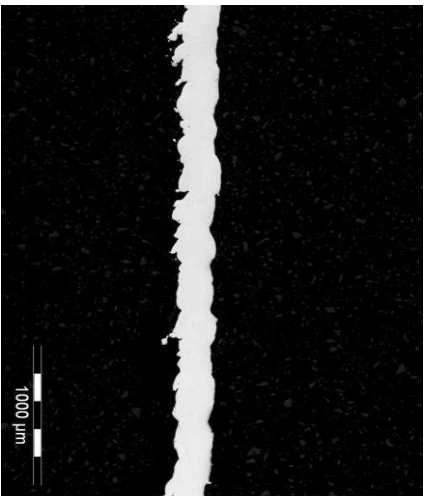


Abbildung 62: Rz der Oberseiten über der Soll-Dicke

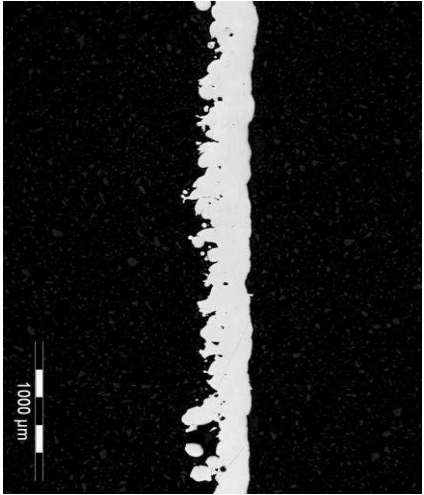
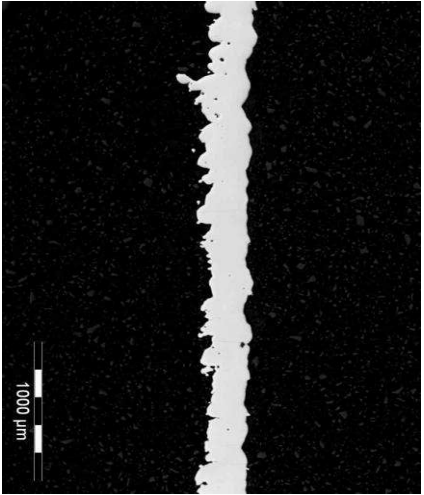
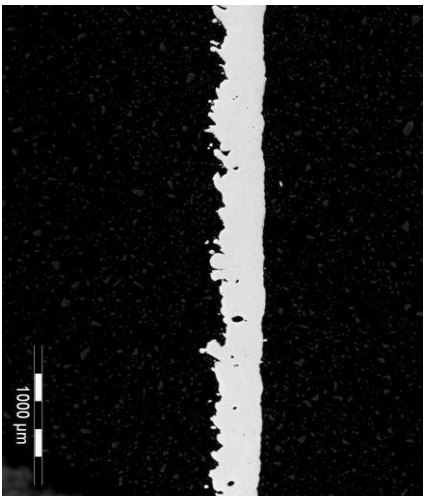
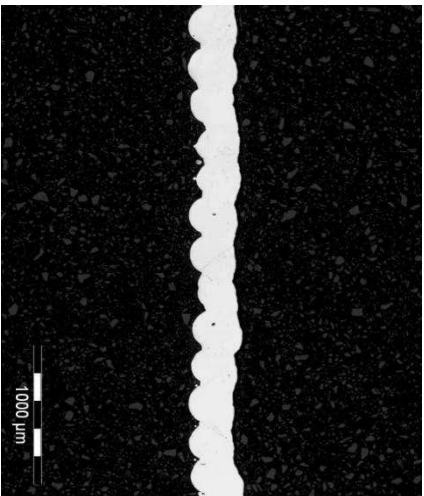
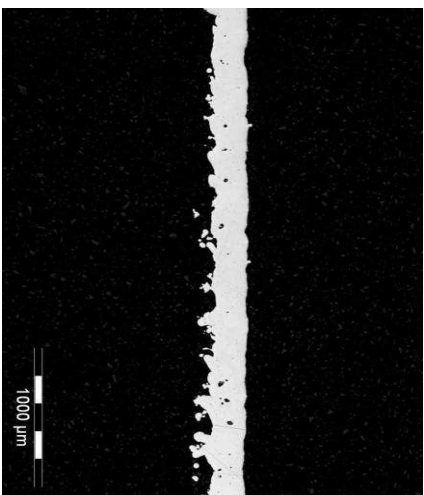
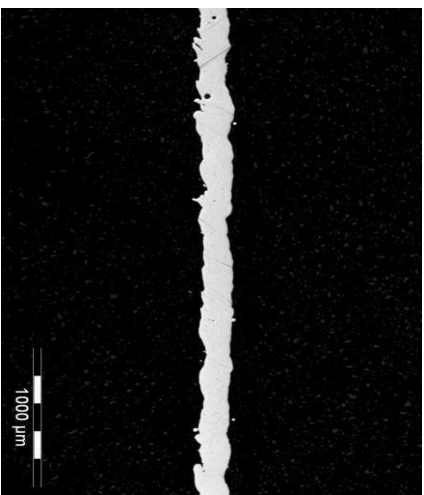
### 3.2.3 Aufnahmen der Blättchenquerschnitte

Tabelle 24 bis Tabelle 28 zeigen mit dem Lichtmikroskop gemachte Aufnahmen der Blättchen mit unterschiedlichen Dicken und Neigungswinkeln.

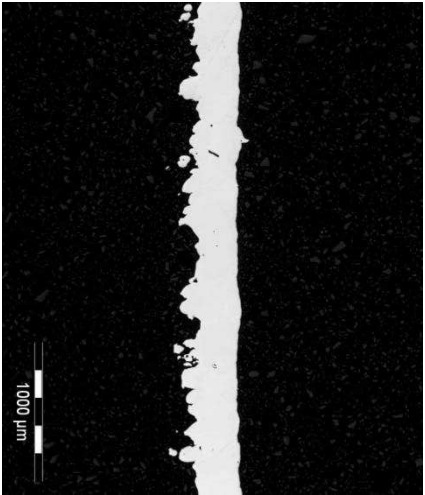
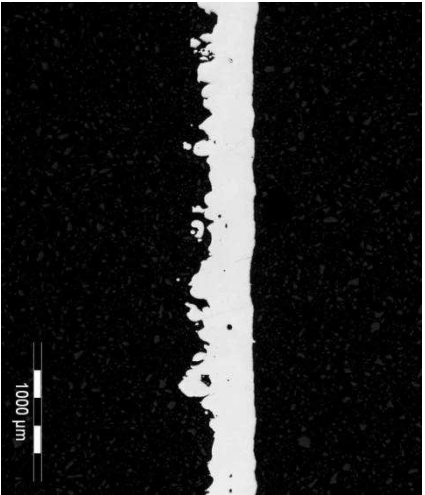
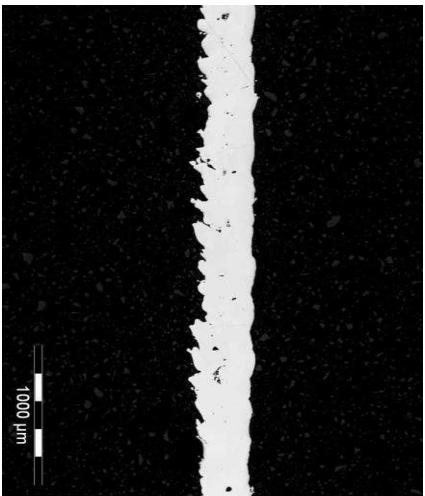
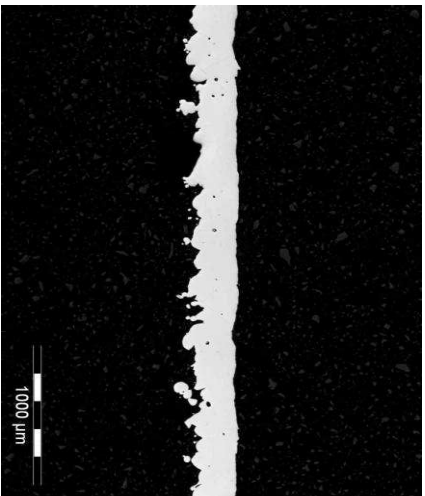
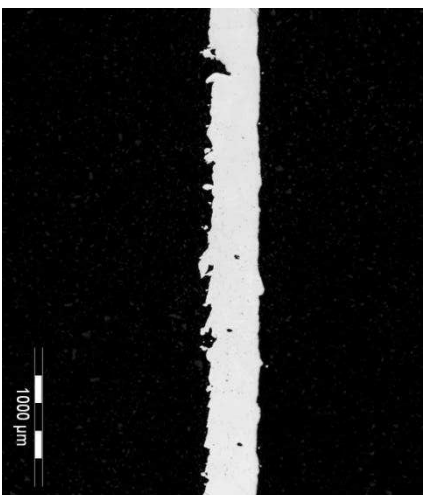
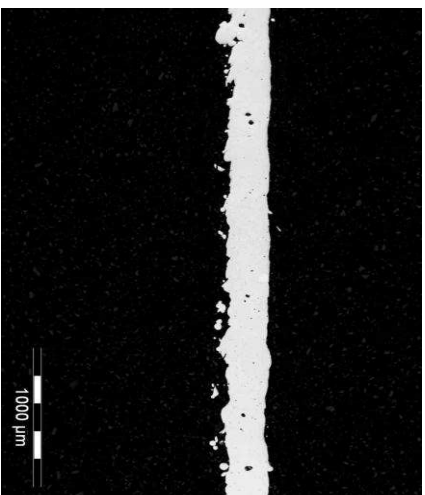
**Tabelle 24:** Querschnitte mit einer Dicke von 0,1 mm und 0,15 mm in Winkeln von 30, 45 und 60 °

0,15 mm	0,1 mm	
		30 °
	X	45 °
X	X	60 °

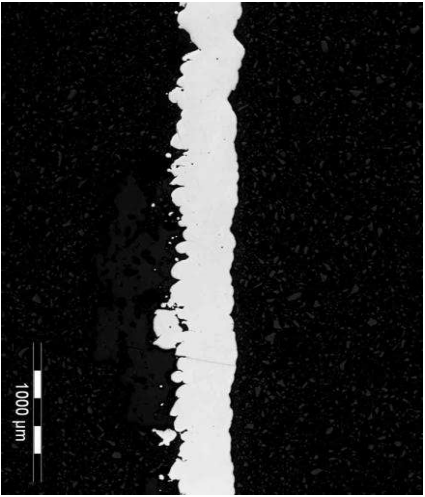
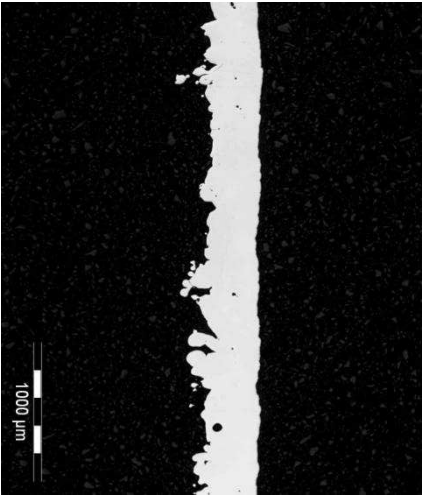
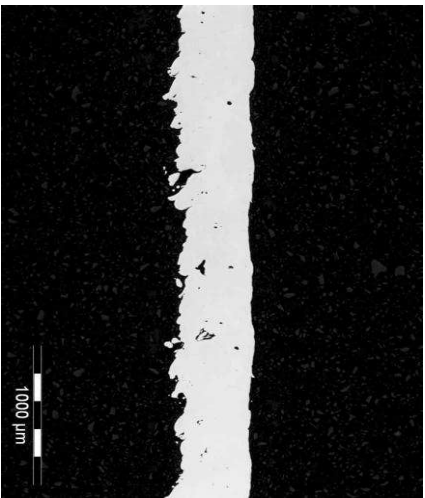
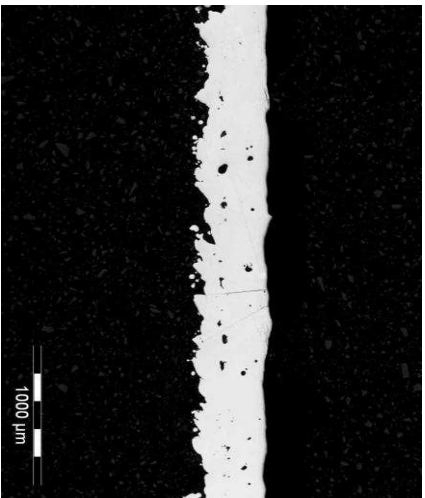
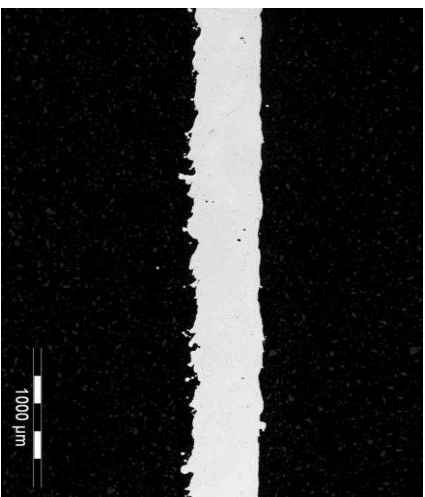
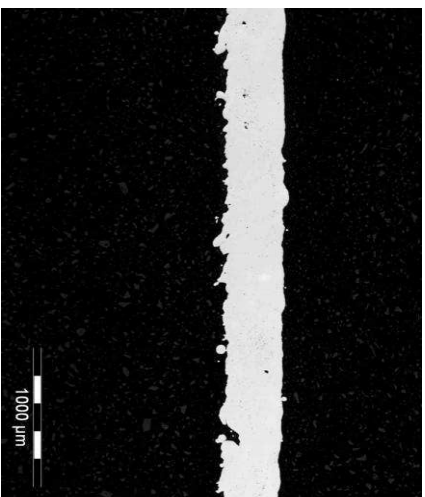
**Tabelle 25:** Querschnitte mit einer Dicke von 0,2 mm und 0,25 mm in Winkeln von 30, 45 und 60 °

0,25 mm	0,2 mm	
		30 °
		45 °
		60 °

**Tabelle 26:** Querschnitte mit einer Dicke von 0,35 mm und 0,3 mm in Winkeln von 30, 45 und 60 °

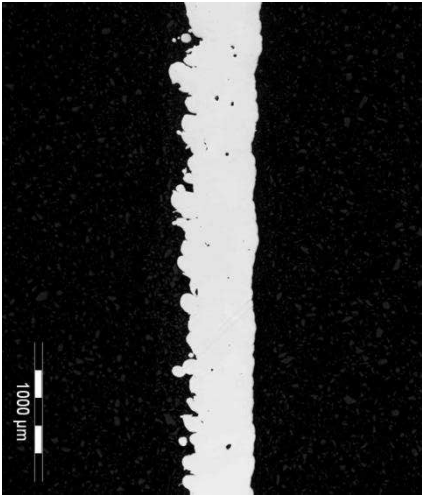
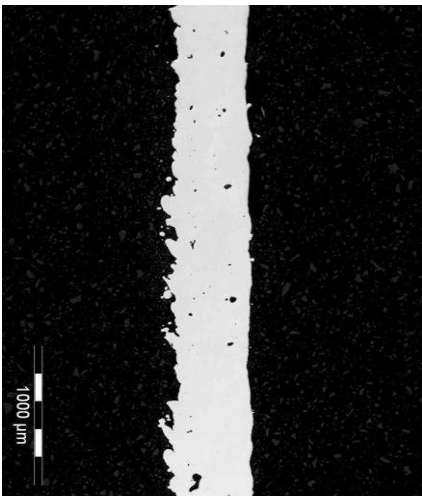
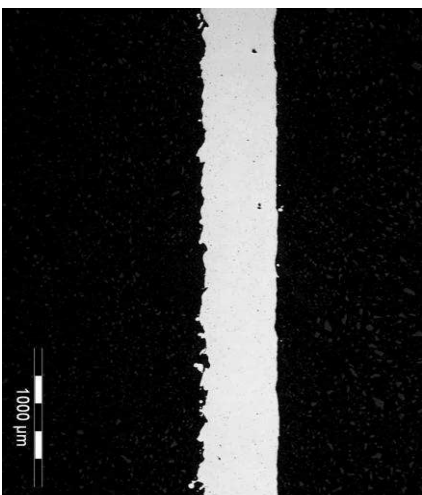
0,35 mm	0,3 mm	
		<p>30 °</p>
		<p>45 °</p>
		<p>60 °</p>

**Tabelle 27:** Querschnitte mit einer Dicke von 0,45 mm und 0,4 mm in Winkeln von 30, 45 und 60 °

0,45 mm	0,4 mm	
		<p><b>30 °</b></p>
		<p><b>45 °</b></p>
		<p><b>60 °</b></p>

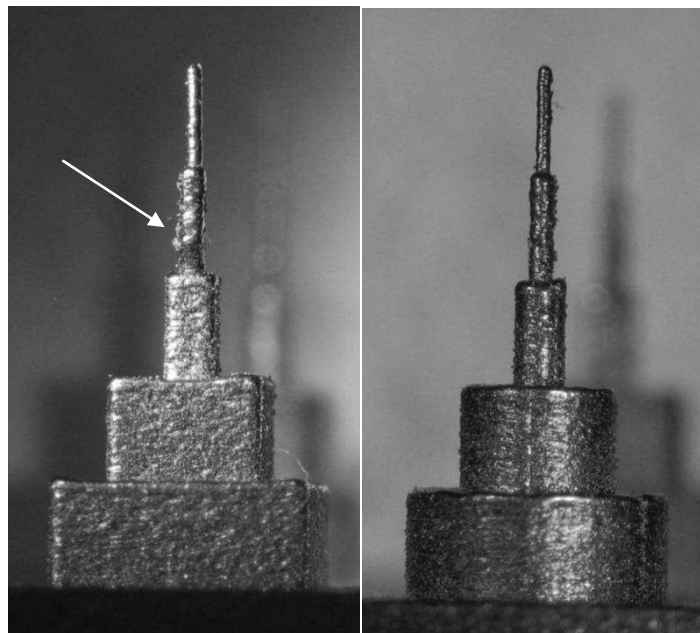


**Tabelle 28:** Querschnitte mit einer Dicke von 0,5 mm in Winkeln von 30, 45 und 60 °

0,5 mm	
	30 °
	45 °
	60 °

### 3.3 Probe P\_3

Die Probe diente zur Überprüfung der Herstellbarkeit von zwei Turmstrukturen, die Eine aufgebaut aus Quadern, die Andere bestehend aus Zylindern. Außerdem wurde die Rauheit der unterschiedlichen Probenoberflächen bestimmt. Neben der Vermessung der Seitenflächen wurde ein Kegel gefertigt, an welchem die allgemein erreichbare Oberflächenqualität bestimmt wurde. **Abbildung 63** zeigt, dass beide Türme gut dargestellt wurden. Wie schon bei Probe P\_1 ist aber auch hier der Verteiler, welcher nach jedem Arbeitsschritt eine neue Schicht Pulver aufträgt, mit der bereits festen Struktur kollidiert und hat diese leicht beschädigt. Die Beschädigung wird in **Abbildung 63** durch einen Pfeil markiert.



**Abbildung 63:** Links: Turm aus Quadern; rechts: Turm aus Zylindern

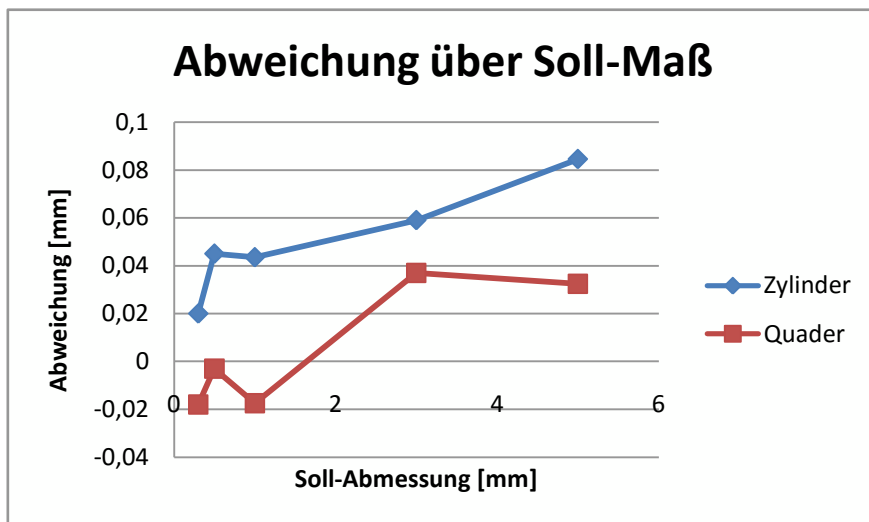
#### 3.3.1 Abmessungen

Um die Geometrie der Türme zu vermessen, wurden die einzelnen Elemente von dem Probenkörper getrennt und mit Kalteinbettmittel fixiert. Anschließend wurden die Querschnitte geschliffen und poliert und unter dem Lichtmikroskop vermessen. **Tabelle 29** dokumentiert die Querschnitte der Zylinder und Quader mit den Abmessungen von 0,3 mm, 0,5 mm, 1 mm, 3 mm und 5 mm.

**Tabelle 29:** Abmessungen der einzelnen Turmelemente

	Abmessungen [mm]					
	Zylinder	MW	A	Quader	MW	A
<b>0,3 mm</b>	0,286	0,28	0,02	0,302	0,318	-0,018
	0,274			0,334		
<b>0,5 mm</b>	0,448	0,455	0,045	0,503	0,503	-0,003
	0,462			0,503		
<b>1 mm</b>	0,953	0,9565	0,0435	0,999	1,0175	-0,0175
	0,96			1,036		
<b>3 mm</b>	2,961	2,941	0,059	2,955	2,963	0,037
	2,921			2,971		
<b>5 mm</b>	4,928	4,9155	0,0845	4,97	4,9675	0,0325
	4,903			4,965		

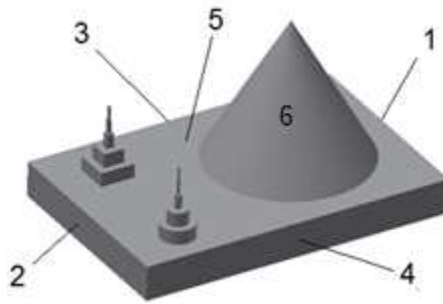
Die Abweichung der Zylinderdurchmesser bzw. der Quaderseitenlängen wird in **Abbildung 64** grafisch aufbereitet. Zu erkennen ist ein leichter Anstieg der Abweichung mit der Abmessung.



**Abbildung 64:** Abweichung der Zylinderdurchmesser bzw. Quaderseitenlängen von dem Soll-Maß

### 3.3.2 Oberflächenqualität

Zur Bestimmung der Oberflächenqualität wurden Messungen an den verschiedensten Flächen durchgeführt. **Abbildung 65** benennt die verschiedenen Flächen der Probe, welche mit Hilfe des optischen Messgerätes gemessen wurden.



**Abbildung 65:** Definition der verschiedenen Probenoberflächen

Jede der Seitenflächen (Flächen 1-4) wurde dreimal vermessen und aus den Messwerten wurde der Mittelwert gebildet. Die Mittelwerte der einzelnen Flächen wurden wiederum gemittelt um die allgemein erreichbare Oberflächenqualität von Seitenflächen zu ermitteln. Eine Übersicht der Messwerte, sowie die berechneten Mittelwerte finden sich in **Tabelle 30**.

**Tabelle 30:** Rauheit der unterschiedlichen Seitenflächen

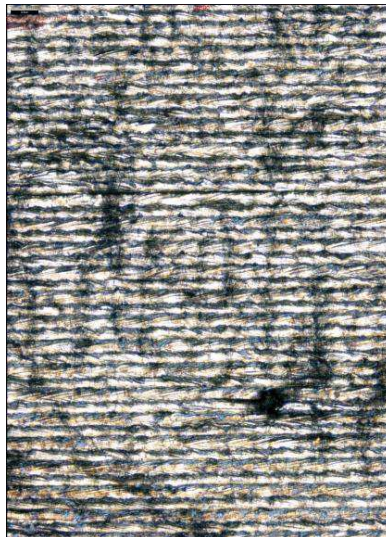
Fläche	Ra [ $\mu\text{m}$ ]		Rz [ $\mu\text{m}$ ]	
	Messwerte	MW	Messwerte	MW
1	3,6	3,3	23,8	21,1
	3,8		24,7	
	2,6		14,9	
2	3,2	3,5	17,2	21,8
	4,2		30	
	3,2		18,2	
3	3	2,7	20,6	17,2
	2,5		15,5	
	2,7		15,5	
4	3,7	3,6	22,6	20,7
	3,6		18,9	
	3,4		20,5	
	<b>MW</b>	<b>3,3</b>	<b>MW</b>	<b>20,2</b>

Der erreichbare arithmetische Mittenrauwert liegt bei etwa  $3,3 \mu\text{m}$ , die gemittelte Rautiefe bei  $20,2 \mu\text{m}$ . Neben den Seitenflächen wurde auch die Oberflächenrauheit der horizontalen Bauteiloberfläche (Fläche 5) gemessen und in **Tabelle 31** gelistet. Aber nicht nur die vertikalen und horizontalen Flächen sind von Bedeutung. Auch die Rauheit der Kegeloberfläche (Fläche 6) wurde bestimmt und in **Tabelle 31** vermerkt.

**Tabelle 31:** Oberflächenrauheit der horizontalen Fläche 5

Fläche	Messwerte [ $\mu\text{m}$ ]			
	Ra	MW	Rz	MW
5	2,1	2,0	14,2	11,9
	1,9		10,2	
	2,1		11,2	
6	4,1	4,5	26,5	29,3
	4,6		30,9	
	4,8		30,5	

Eine Aufnahme der horizontalen Oberfläche mit einem Ra von ungefähr  $2 \mu\text{m}$  und Rz von etwa  $11,9 \mu\text{m}$  ist in **Abbildung 66** dargestellt.

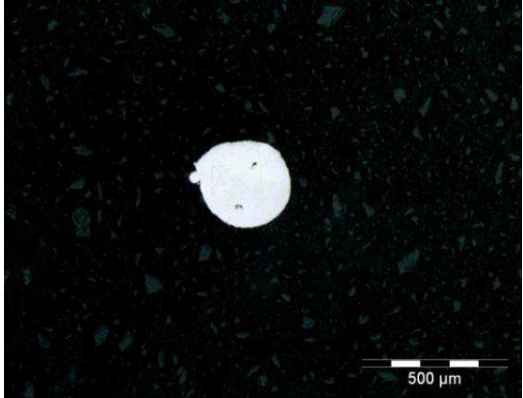
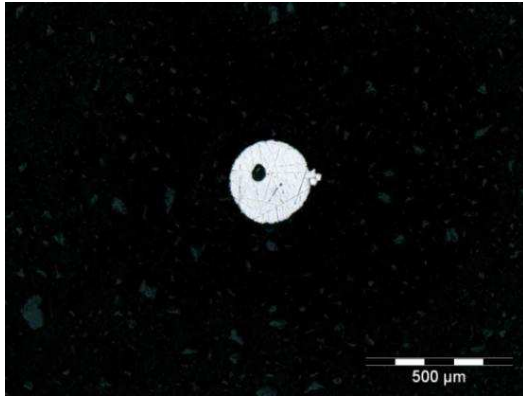
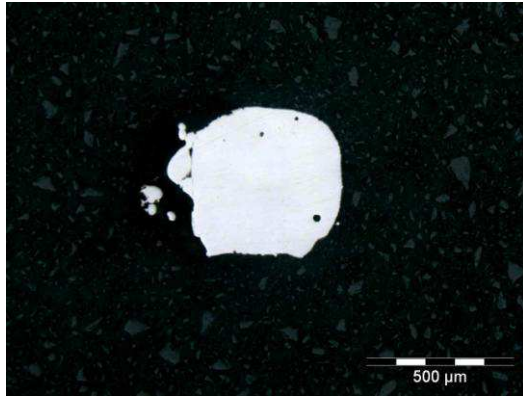
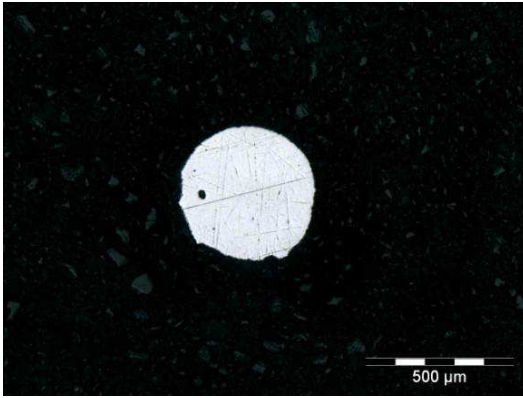
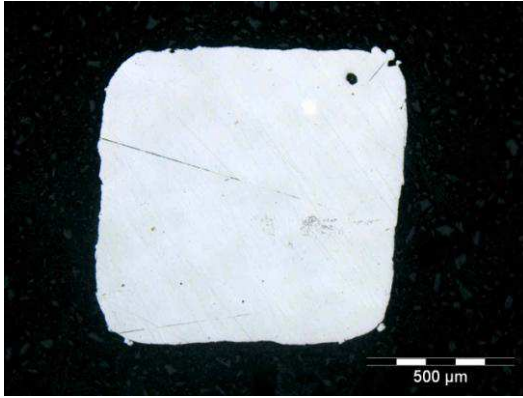
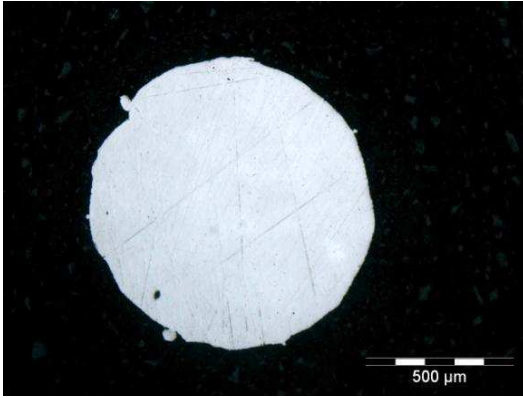


**Abbildung 66:** Aufnahme der horizontalen Oberfläche (# 5)

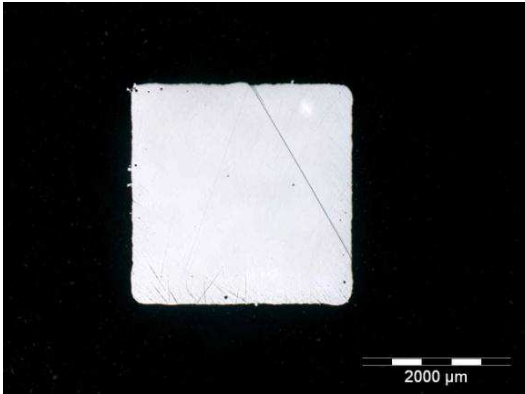
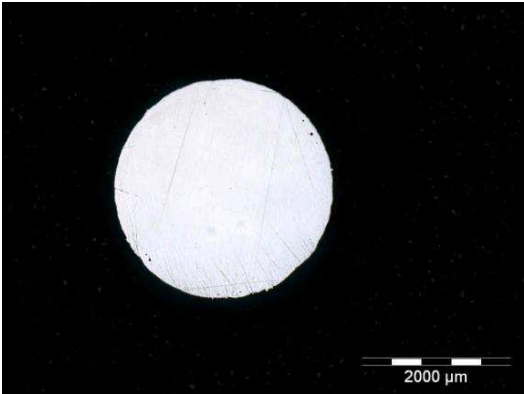
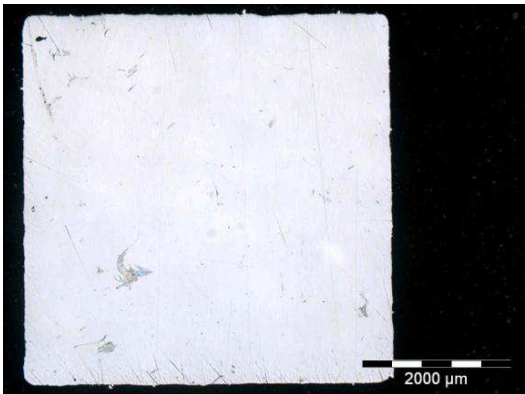
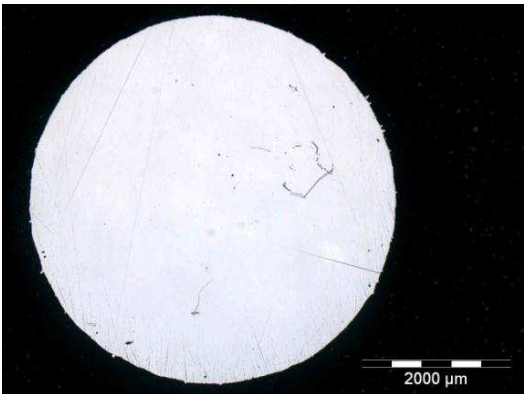
### 3.3.3 Abbildungen der Zylinder- und Quaderquerschnitte

In **Tabelle 32** und **Tabelle 33** finden sich Schlifffbilder der Türmchenquerschnitte. Die Strukturen mit Durchmessern bzw. Seitenlängen von  $0,3$ ,  $0,5$  und  $1 \text{ mm}$  wurden mit einer Vergrößerung von  $10$  aufgenommen, jene mit Abmessungen von  $3$  und  $5 \text{ mm}$  mit einer Vergrößerung von  $2,5$ .

**Tabelle 32:** Schliffbilder der unterschiedlichen Turmelemente (0,3 mm / 0,5 mm / 1 mm) in 10-facher Vergrößerung

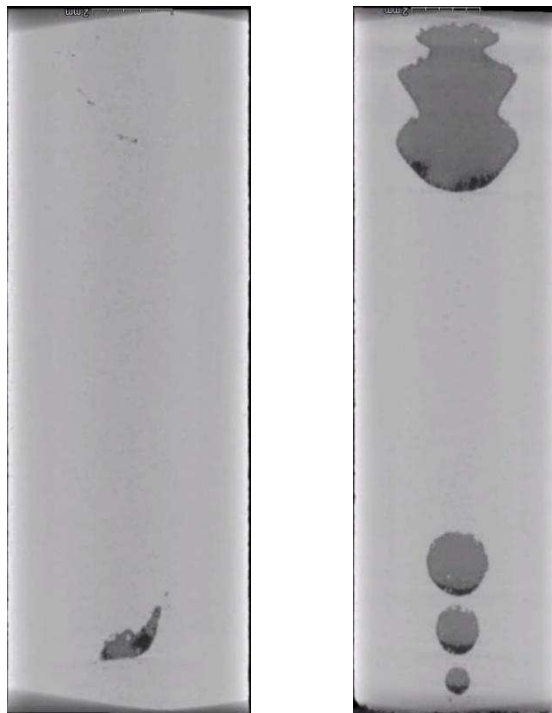
	Quader	Zylinder
0,3 mm		
0,5 mm		
1 mm		

**Tabelle 33:** Schliffbilder der unterschiedlichen Turmelemente (3 mm / 5 mm) in 2,5-facher Vergrößerung

	Quader	Zylinder
3 mm		
5 mm		

### 3.4 Proben P\_4 und P\_5

Mit Hilfe der Proben P\_4 und P\_5 wurden Gießfehler, wie etwa Lunker und Risse, in kleinen Zylinder simuliert. Die hergestellten Proben wurden mittels Computertomografie durchstrahlt um die Ausbildung der gewünschten Hohlräume zu prüfen. Auf der linken Seite von **Abbildung 67** ist ein Schnitt durch die Probe P\_4 und auf der Rechten einer durch Probe P\_5 gezeigt.



**Abbildung 67:** Schnitt durch Probe P\_4 und P\_5

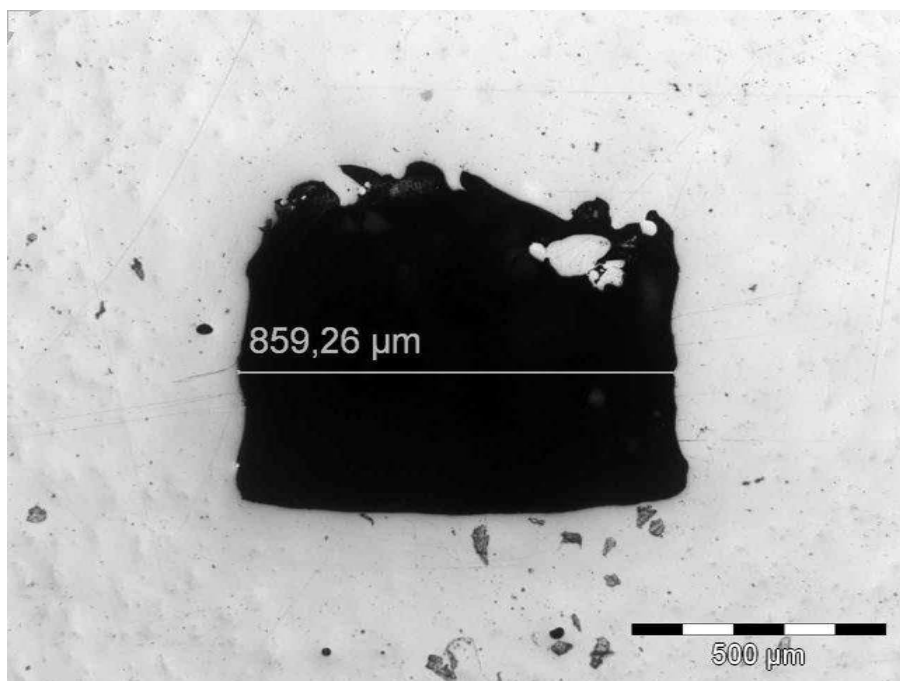
Die hellgrauen Bereiche stellen Vollmaterial dar, die etwas dunkleren im Hohlraum verbliebenes Pulver und die schwarzen Bereiche Luft. Die Kanäle durch welche das Pulver die Hohlräume verlassen sollte wurden mit einem Durchmesser von 0,1 mm zu klein ausgeführt. Der Großteil des Pulvers ist daher im Lunker bzw. den Poren und Rissen verblieben. Außerdem wurde der dünne Riss mit 0,1 mm zu klein dimensioniert wodurch er nicht über die ganze Länge offen hergestellt wurde. Die größeren Hohlräume wie die Poren und der Lunker konnten aufgrund des ausreichenden Dichteunterschieds zwischen Vollmaterial und losem Pulver gut dargestellt werden. **Abbildung 68** zeigt 3D-Aufnahmen der Proben. In diesen sind die beiden Risse etwas besser zu erkennen.





**Abbildung 68:** CT-Aufnahme von Probe P\_4

**Abbildung 69** zeigt einen Schnitt durch den oberen Riss der Probe P\_4. Hier kann die überhängende Fläche anhand der rauen Oberfläche gut erkannt werden.



**Abbildung 69:** Querschnitt durch den schmalen Riss der Probe P\_4

## 4 Tabellarische Zusammenfassung

- Hohlstrukturen können kleinere Abmessungen aufweisen als Vollstrukturen.
- Die kleinste mögliche Abmessung von Hohlstrukturen, wie etwa Kanäle, liegt im Bereich von 100  $\mu\text{m}$ , die von Vollstrukturen bei etwa 200  $\mu\text{m}$ .
- Hohlstrukturen wurden mit einem leichten Übermaß von 32  $\mu\text{m}$ , Vollstrukturen mit einem Untermaß von 46  $\mu\text{m}$  realisiert.
- Die Abweichung von gewünschten und tatsächlich produzierten Kanaldurchmessern steigt mit dem Durchmesser der Kanäle an.
- Die Produzierbarkeit von Strukturen hängt von deren Neigung ab. Je geringer der Neigungswinkel, desto größer ist der horizontale Querschnitt und desto dünnere Strukturen sind möglich.
- Vollstrukturen ohne Stützstruktur werden von der Fertigungsmaschine erst ab einem horizontalen Querschnitt von 0,2 mm erstellt.
- Die Herstellung von Vollstrukturen mit quadratischem Querschnitt ist ab einer Kantenlänge von 0,5 mm möglich. Darunter sind nur zylindrische Querschnitte realisierbar.
- Die Abweichung der theoretischen Abmessungen von Zylinder und Quadern zu tatsächlichen Maßen steigt mit der Größe der Strukturen.
- Um Kollisionen des Pulververteilers mit den Bauteilen zu vermeiden, ist auf eine konstante Pulverqualität zu achten.
- Zylindrische Proben, welche für die Durchstrahlung mittels CT konzipiert werden, sollten einen Durchmesser von 6 mm nicht überschreiten.
- Kanäle, über welche loses Pulver einen Hohlraum im Bauteil verlassen kann, sollten einen Mindestdurchmesser von 0,2 mm aufweisen.
- Der arithmetische Mittenrauwert  $R_a$  von vertikalen Außenflächen beträgt etwa 3,3  $\mu\text{m}$  von horizontalen etwa 2  $\mu\text{m}$ .
- Der arithmetische Mittenrauwert  $R_a$  eines Kegels mit einem Öffnungswinkel von 60 ° beträgt 4,5  $\mu\text{m}$ .
- Der arithmetische Mittenrauwert der Innenflächen von Hohlstrukturen liegt bei etwa 9  $\mu\text{m}$ , die der Innenflächen von Vollstrukturen bei ca. 7  $\mu\text{m}$ .
- Die Oberflächenqualität von Überhängen nimmt mit der Neigung der überhängenden Strukturen ab. Je geringer die Neigung, desto mehr Material wird auf losem Pulveruntergrund verfestigt, wodurch die Rauheit steigt.
- Die Oberflächenqualität von überhängenden Strukturen sinkt mit der Dicke dieser Strukturen.

# Akronyme

A	Abweichung zwischen Soll- und Istwert
AM	Additive Manufacturing
BO	Beam Overlap (Strahlversatz)
$C_{sp}$	Lasergeschwindigkeit für die Erstellung der Kontur
CAD	Computer Aided Design
d	Schichtdicke
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
HIP	Hot Isostatic Pressing
Hs	Hatch-Abstand
$H_{SP}$	Hatch-Geschwindigkeit
$I_m$	Gesamtmessstrecke zum Ermitteln der Oberflächenqualität
$L_{pw}$	Laserleistung für die Erstellung der Kontur
LAM	Laser Additive Manufacturing
LED	Light-Emitting Diode
LS	Laser Sintering
LM	Laser Melting
LMD	Laser Metal Deposition
MW	Mittelwert
MWA	Mittelwert aus den Abweichungen
ÖGI	Österreichisches Gießereinstitut
Ra	Arithmetischer Mittenrauwert
RM	Rapid Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
Rz	Gemittelte Rautiefe

x	x-Werte des Rauheitsprofils
y	y-Werte des Rauheitsprofils
$z_n$	Längenabschnitt ( $n = 1 - 5$ )

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Grundlegender Prozessablauf beim Rapid Prototyping [1] .....	1
<b>Abbildung 2:</b> Übersicht Laser Additive Manufacturing [2] .....	2
<b>Abbildung 3:</b> Ablauf des Lasersinterns [2] .....	3
<b>Abbildung 4:</b> Oberflächen beim (a) LM und (b) LS [2] .....	4
<b>Abbildung 5:</b> Aufbau des LS//LM bzw. DMLS Prozesses [7] .....	4
<b>Abbildung 6:</b> Prozessschritte des Laser Additive Manufacturing [3] .....	5
<b>Abbildung 7:</b> LMD Prozess [2].....	6
<b>Abbildung 8:</b> Die wichtigsten Prozessparameter des DMLS [6].....	7
<b>Abbildung 9:</b> Strahldurchmesser [6] .....	7
<b>Abbildung 10:</b> Verfahrenswege des Laserstrahls [6].....	8
<b>Abbildung 11:</b> Strahlversatz beim Sintern [1] .....	8
<b>Abbildung 12:</b> Herstellung von runden Geometrien [1].....	10
<b>Abbildung 13:</b> Unterschiedliche Schichtdicken [1].....	10
<b>Abbildung 14:</b> Belichtungsstrategien; links: gleiche Richtung; rechts: wechselnde Richtung [1] .....	11
<b>Abbildung 15:</b> Links: Erläuterung der Inselstrategie [1]; Rechts: Beispiel für Anwendung [10] .....	11
<b>Abbildung 16:</b> Ausbildung von Hohlräumen; links: mittels Inselstrategie; rechts: mittels einfacher Parallelstrategie [1] .....	12
<b>Abbildung 17:</b> (a) In x-Richtung; (b) In y-Richtung; (c) Alternierend [8].....	12
<b>Abbildung 18:</b> Hatch Winkel [5].....	13
<b>Abbildung 19:</b> Richtige Anordnung von Bauteilen [1] .....	13
<b>Abbildung 20:</b> Bevorzugte Orientierung von überhängenden Strukturen [1].....	14
<b>Abbildung 21:</b> Benchmark-Modell zum Überprüfen der Prozessqualität [12].....	15
<b>Abbildung 22:</b> EOSINT M280 am Institut für Umformtechnik/Leoben [13].....	16

---

<b>Abbildung 23:</b> Verwendetes Koordinatensystem .....	18
<b>Abbildung 24:</b> Probe P_1 in 3D Ansicht .....	20
<b>Abbildung 25:</b> Definition von Hohlstruktur, Vollstruktur und Kanal .....	21
<b>Abbildung 26:</b> Abmessungen der Probe P_1 in mm .....	21
<b>Abbildung 27:</b> Probe P_2 in 3D Ansicht .....	22
<b>Abbildung 28:</b> Abmessungen der Probe P_2 in mm .....	22
<b>Abbildung 29:</b> Probe P_3 in 3D Ansicht .....	23
<b>Abbildung 30:</b> Abmessungen der Probe P_3 in mm .....	23
<b>Abbildung 31:</b> Probe P_4 in 3D Ansicht; Hohlstrukturen als dünne Linie .....	24
<b>Abbildung 32:</b> Skizze der Probe P_4 mit Abmessungen in mm .....	24
<b>Abbildung 33:</b> Probe P_5 in 3D Ansicht; Hohlstrukturen als dünne Linie .....	25
<b>Abbildung 34:</b> Skizze der Probe P_5 mit Abmessungen in mm .....	25
<b>Abbildung 35:</b> Alicona Infinite Focus G4 [15] .....	26
<b>Abbildung 36:</b> 3D-Abbildung der Kegeloberfläche .....	27
<b>Abbildung 37:</b> Draufsicht der Kegeloberfläche; Messverlauf durch helle Linie gekennzeichnet .....	27
<b>Abbildung 38:</b> Oberflächenprofil der Kegeloberfläche .....	28
<b>Abbildung 39:</b> Beispiel für die gemessenen Rasteroberflächen .....	28
<b>Abbildung 40:</b> Oberflächenprofil einer Rasterinnenfläche .....	29
<b>Abbildung 41:</b> Bearbeitung eines Schliffbildes zum Messen der Oberflächenqualität .....	32
<b>Abbildung 42:</b> a) Berechnung von arithmetischem Mittenrauwert Ra; b) Berechnung von gemittelter Rautiefe Rz [16] .....	33
<b>Abbildung 43:</b> Links: Schliffbild des Kanalquerschnitts; Rechts: Umwandlung in SW und Entfernen der Löcher .....	36
<b>Abbildung 44:</b> Abweichung der Vollstruktur über dem Sollmaß .....	40
<b>Abbildung 45:</b> Abweichung der Hohlstruktur über dem Sollmaß .....	41
<b>Abbildung 46:</b> Abweichung der Kanaldurchmesser von dem Soll-Maß .....	43
<b>Abbildung 47:</b> Schliffbild der Spitze des eingebrachten Keils .....	43

<b>Abbildung 48:</b> Ra [ $\mu\text{m}$ ] über dem Soll-Maß [mm] der Hohl- und Vollstrukturen.....	45
<b>Abbildung 49:</b> Verformtes Blättchen.....	51
<b>Abbildung 50:</b> Vergleich von 3D-Modell (links) und gefertigtem Bauteil (rechts).....	52
<b>Abbildung 51:</b> Querschnitt von Blättchen mit 0,1 mm Dicke; links: 30 °, mittig: 45 °, rechts 60 ° .....	52
<b>Abbildung 52:</b> Querschnitt von Blättchen mit 0,15 mm Dicke; links: 30 °, mittig: 45 °, rechts 60 ° .....	53
<b>Abbildung 53:</b> Querschnitt von Blättchen mit 0,2 mm Dicke; links: 30 °, mittig: 45 °, rechts 60 ° .....	53
<b>Abbildung 54:</b> Lokale und Globale Nummer.....	54
<b>Abbildung 55:</b> Verläufe der Ist-Dicken über den Soll-Dicken der Blättchen .....	55
<b>Abbildung 56:</b> Ist-Dicke über der lokalen Nummerierung .....	55
<b>Abbildung 57:</b> Differenz zwischen Soll- und Ist-Dicke über der Soll-Dicke.....	56
<b>Abbildung 58:</b> Definition von Unter- und Oberseite .....	56
<b>Abbildung 59:</b> Ra der Blättchenunterseiten über der Soll-Dicke.....	60
<b>Abbildung 60:</b> Ra der Blättchenunterseiten über der Soll-Dicke.....	60
<b>Abbildung 61:</b> Ra der Oberseiten über der Soll-Dicke.....	61
<b>Abbildung 62:</b> Rz der Oberseiten über der Soll-Dicke .....	61
<b>Abbildung 63:</b> Links: Turm aus Quadern; rechts: Turm aus Zylindern .....	67
<b>Abbildung 64:</b> Abweichung der Zylinderdurchmesser bzw. Quaderseitenlängen von dem Soll-Maß .....	68
<b>Abbildung 65:</b> Definition der verschiedenen Probenoberflächen .....	69
<b>Abbildung 66:</b> Aufnahme der horizontalen Oberfläche (# 5).....	70
<b>Abbildung 67:</b> Schnitt durch Probe P_4 und P_5 .....	73
<b>Abbildung 68:</b> CT-Aufnahme von Probe P_4 .....	74
<b>Abbildung 69:</b> Querschnitt durch den schmalen Riss der Probe P_4 .....	74

---

# Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Technische Daten der EOSINT M 280 [13].....	17
<b>Tabelle 2:</b> Verwendete Prozessparameter .....	18
<b>Tabelle 3:</b> Chemische Zusammensetzung Maragingstahl [14] .....	19
<b>Tabelle 4:</b> Probenübersicht mit Bezeichnung und Zweck der Herstellung .....	19
<b>Tabelle 5:</b> Technische Daten des verwendeten Computertomografen .....	38
<b>Tabelle 6:</b> Abmessungen der Vollstruktur.....	40
<b>Tabelle 7:</b> Abmessungen der Hohlstruktur .....	41
<b>Tabelle 8:</b> Gemessene Kanaldurchmesser und Abweichung vom Sollmaß .....	42
<b>Tabelle 9:</b> Berechnete äquivalente Kreisdurchmesser .....	42
<b>Tabelle 10:</b> Arithmetischer Mittenrauwert der Flächen der Hohlstrukturen .....	44
<b>Tabelle 11:</b> Arithmetischer Mittenrauwert der Flächen der Vollstrukturen .....	44
<b>Tabelle 12:</b> Raster und Kanäle mit Sollabmessungen 0,1 mm und 0,15 mm.....	46
<b>Tabelle 13:</b> Raster und Kanäle mit Sollabmessungen 0,2 mm und 0,25 mm.....	47
<b>Tabelle 14:</b> Raster und Kanäle mit Sollabmessungen 0,3 mm und 0,35 mm.....	48
<b>Tabelle 15:</b> Raster und Kanäle mit Sollabmessungen 0,4 mm und 0,45 mm.....	49
<b>Tabelle 16:</b> Raster und Kanal mit Sollabmessung 0,5 mm .....	50
<b>Tabelle 17:</b> Soll- und Ist-Dicke der Blättchen.....	54
<b>Tabelle 18:</b> Arithmetischer Mittenrauwert Ra der um 30° geneigten Blättchen .....	57
<b>Tabelle 19:</b> Arithmetischer Mittenrauwert Ra der um 45° geneigten Blättchen .....	57
<b>Tabelle 20:</b> Arithmetischer Mittenrauwert Ra der um 60° geneigten Blättchen .....	58
<b>Tabelle 21:</b> Gemittelte Rautiefe Rz der um 30 ° geneigten Blättchen .....	58
<b>Tabelle 22:</b> Gemittelte Rautiefe Rz der um 45 ° geneigten Blättchen .....	59
<b>Tabelle 23:</b> Gemittelte Rautiefe Rz der um 60 ° geneigten Blättchen .....	59
<b>Tabelle 24:</b> Querschnitte mit 0,1 mm und 0,15 mm in Winkeln von 30, 45 und 60 ° .....	62



<b>Tabelle 25:</b> Querschnitte mit 0,2 mm und 0,25 mm in Winkeln von 30, 45 und 60 ° .....	63
<b>Tabelle 26:</b> Querschnitte mit 0,35 mm und 0,3 mm in Winkeln von 30, 45 und 60 ° .....	64
<b>Tabelle 27:</b> Querschnitte mit 0,45 mm und 0,4 mm in Winkeln von 30, 45 und 60 ° .....	65
<b>Tabelle 28:</b> Querschnitte mit 0,5 mm in Winkeln von 30, 45 und 60 ° .....	66
<b>Tabelle 29:</b> Abmessungen der einzelnen Turmelemente.....	68
<b>Tabelle 30:</b> Rauheit der unterschiedlichen Seitenflächen .....	69
<b>Tabelle 31:</b> Oberflächenrauheit der horizontalen Fläche 5 .....	70
<b>Tabelle 32:</b> Schliffbilder der unterschiedlichen Turmelemente (0,3 mm / 0,5 mm / 1 mm) in 10-facher Vergrößerung.....	71
<b>Tabelle 33:</b> Schliffbilder der unterschiedlichen Turmelemente (3 mm / 5 mm) in 2,5-facher Vergrößerung .....	72

## Literaturverzeichnis

- [1] Kumar, S., Kap. 10.05 - Selective Laser Sintering/Melting, Comprehensive Materials Processing, Volume10, Elsevier, (2014), 94-134
- [2] Gu, D.D., W. Meiners, K. Wissenbach und R. Poprawe, Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms, International Materials Reviews, Volume 57-3, (2012), 133-164
- [3] Kranz, J., D. Herzog und C. Emmelmann, Grundlegende Gestaltungsrichtlinien für die laseradditive Fertigung, AM Design & Engineering Symposium, Frankfurt, 26.11.2014
- [4] Abele, E., H.A. Stoffregen, M. Kniepkamp, S. Lang und M. Hampe, Selective Laser Manufacturing of thin-walled porous elements, Journal of Materials Processing Technology, Volume 215, (2015), 114-122
- [5] Hanzel, P., M. Zetek, T. Baksa und T. Kroupa, The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of SLM Parts, Procedia Engineering, Volume 100, (2015), 1405-1413
- [6] Bineli, A.R.R., A.P.G. Peres, A.L. Jardini und R.M. Filho, Direct metal laser sintering (DMLS): Technology for design and construction of microreactors, 6<sup>th</sup> Brazilian Conference on Manufacturing Engineering, Caxias do Sul, Brasilien, 11-15.4.2011
- [7] Khaing, M.W., J.Y.H. Fuh und L. Lu, Direct metal laser sintering for rapid tooling processing and characterisation of EOS parts, Journal of Materials Processing Technology, Volume 113, (2001), 269-272
- [8] Simchi, A. und H. Pohl, Effects of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder, Materials and Engineering, A359, (2003), 119-128
- [9] Kruth, J.P., L. Froyen, J. Van Vaerenbergh, P. Mercelis, M. Rombouts und B. Lauwers, Selective laser melting of iron-based powder, Journal of Materials Processing Technology, Volume 149, (2004), 616-622
- [10] Levy, G.N., The role and future of the Laser Technology in the Additive Manufacturing environment, Physics Procedia, Volume 5, (2010), 65-80
- [11] Kruth, J.P., M. Badrossamay, E. Yasa, J. Deckers, L. Thijs und J. Van Humbeek, Part and material properties in selective laser melting of metals, 16<sup>th</sup> International Symposium on Electromachining, (2010)
- [12] Kruth, J.P., B. Vandenbroucke, J. Van Vaerenbergh und P. Mercelis, Benchmarking of different SLS/SLM processes as rapid manufacturing techniques, Int. Conf. Polymers & Moulds Innovations, Gent, Belgien, 20-23.4.2015

[13] [www.metalforming.at](http://www.metalforming.at) (aufgerufen am 27.08.2015)

[14] [www.eos.info](http://www.eos.info) (aufgerufen am 30.06.2015)

[15] [www.alicon.at](http://www.alicon.at) (aufgerufen am 29.06.2015)

[16] Muhs, D., H. Wittel, M. Becker, D. Jannasch und J. Voßiek, Roloff / Matek  
Maschinenelemente Normung, Berechnung, Gestaltung, 16. Auflage, Vieweg Verlag, 2003