
BACHELORARBEIT

Herr
Tommy Knebel

**Untersuchungen zum
Generieren von 3D-Körpern
mittels Mikropulverauftrag-
schweißen (Micro-Cladding)**

2010

BACHELORARBEIT

Untersuchungen zum Generieren von 3D-Körpern mittels Mikropulverauftrag- schweißen (Micro-Cladding)

Autor:
Herr

Tommy Knebel

Studiengang:
Physikalische Technik

Seminargruppe:
PT07wL-B

Erstprüfer:
Professor Dr. -Ing. Horst Exner

Zweitprüfer:
Dipl. -Ing. Sascha Klötzer

Mittweida, November 2010

1 Bibliografische Angaben:

Knebel, Tommy:

Untersuchungen zum Generieren von 3D-Körpern mittels Mikropulverauftragsschweißen (Micro-Cladding) – 2010 – 44 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida (FH), University of Applied Sciences,
Fakultät Mathematik / Naturwissenschaften / Informatik, Bachelorarbeit, 2010

2 Referat:

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Aufbau von 3D- Körpern mittels Micro-Cladding genauer zu untersuchen. Dabei wird vor allem auf die Erzeugung von Spuren mit unterschiedlichem Querschnitt, Volumenkörpern und Gittern eingegangen werden. Zum Schluss werden noch einige Aussagen über den Prozess getroffen, die Ergebnisse zusammengefasst und Vorschläge zu Optimierung gegeben.

Inhalt

1	Einführung	2
2	Stand der Forschung	3
3	Versuchsaufbau	5
3.1	Beschreibung der Anlage.....	5
3.2	Vorstellen der Komponenten.....	6
3.3	Verwendete Parameter	11
4	Theoretische Grundlagen	12
4.1	Wärmeübertragung	12
4.1.1	Wärmeleitung	12
4.1.2	Wärmestrahlung	13
4.1.3	Konvektion.....	13
4.2	Vorbetrachtung des Aufbauprozesses.....	14
5	Versuche zu Spuren	16
5.1	Einzelspuren	16
5.2	Zusammengesetzte Spuren	20
5.3	Spuren mit unterschiedlichem Querschnitt.....	21
5.4	Zusammenfassung.....	23
6	Versuche zu Volumenkörpern	24
6.1	Grundlegende Untersuchungen	25
6.2	Versuche mit Fokusnachführung.....	29
6.3	Versuche zu zusammengesetzten Volumenkörpern	31
7	Versuche zu Gittern.....	34
8	Aufbau von Strukturen auf anderen Substraten	36
9	Aufbauprozess.....	37
10	Schlussteil.....	40
10.1	Erreichte Ziele.....	40
10.2	Zusammenfassung.....	40
10.3	Ausblick.....	41
	Anhang.....	I
	Literaturverzeichnis	IV

3 Einführung

Das Mikropulverauftragschweißen mittels Laser ist ein generatives Verfahren zum Erzeugen von Mikrostrukturen. Das Ziel ist, Körper mit Strukturbreiten von unter 100 μm zu erzeugen, dabei jedoch ein möglichst großes Aspektverhältnis zu erreichen.

Das klassische Pulverauftragschweißen mittels Laser wird mit einem kontinuierlich betriebenen Laser durchgeführt. Damit die Oberfläche des Substrats aufgeschmolzen wird, bedarf es hoher optischer Laserausgangsleistungen, dabei wird jedoch sehr viel Energie in Form von Wärme in das Material eingetragen und es kommt zur Ausbildung eines ausgedehnten Schmelzbades.

Im vorliegenden Prozess wird dies umgangen, indem ein gepulster Laser zum Einsatz kommt. Durch den wesentlich geringeren Wärmeeintrag ins Material und die lokal stark begrenzte Bearbeitungszone wird es möglich, wesentlich geringere Strukturbreiten als bei klassischen Verfahren zu erzeugen. Diese Idee ist jedoch nicht neu, es gibt zu diesem Thema bereits Veröffentlichungen. Das Innovative an dem hier untersuchten Prozess ist die schnelle Strahlablenkung im Bereich von über einem Meter pro Sekunde durch den Einsatz eines Scanners und die schichtweise Erzeugung von Strukturen.

Im Gegensatz zum klassischen Pulverauftragschweißen mittels Laser werden bei diesem Verfahren keine Auftragsraten oder Pulverausnutzungsgrade in den Vordergrund gestellt. Im Gegenteil, sowohl der Pulverausnutzungsgrad als auch die Auftragsraten sind nur sehr gering. Bei diesem Verfahren stehen die erzeugten Strukturbreiten im Vordergrund.

Das Verfahren wurde bereits in zwei vorangegangenen Diplomarbeiten untersucht, jedoch zielten diese auf die prinzipielle Machbarkeit des Verfahrens und eine Parametersuche ab. In der vorliegenden Arbeit werden einzelne erzeugbare Strukturen genauer untersucht. Zu Beginn sollen bereits ermittelte Parameter zur Erzeugung von Einzelspuren bestätigt werden. Anschließend wird untersucht, ob es möglich ist, Spuren mit über die Höhe abnehmender Querschnittsbreite zu erzeugen, und es werden Versuche zum Aufbau von Volumenkörpern Gittern durchgeführt.

4 Stand der Forschung

Das Verfahren wurde bereits in zwei vorangegangenen Diplomarbeiten untersucht. Die erste Diplomarbeit [1] befasste sich mit der prinzipiellen Machbarkeit bzw. den Grundlagen des Verfahrens. Es wurden Untersuchungen zu den Relativsystemen, zu verschiedenen Pulverarten und Bearbeitungsparametern durchgeführt.

Es konnte gezeigt werden, dass das Verfahren prinzipiell durchführbar ist, weiterhin stellte sich das gasverdüστε Edelstahlpulver (vgl. Abschnitt 5.2 Unterabschnitt „Das verwendete Pulver“) als günstig heraus.

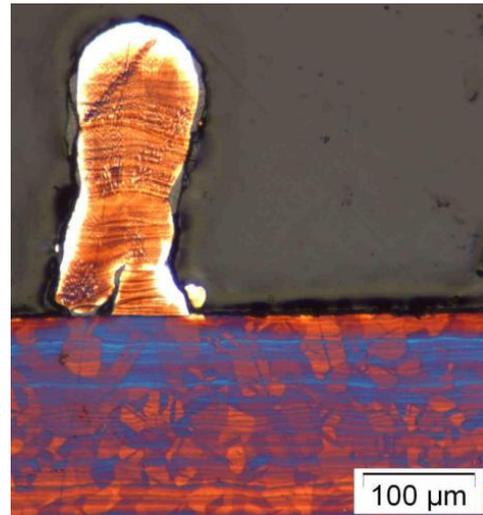


Abbildung 1 Querschliff einer Spur die mit einer Brennweite von 163 mm erzeugt wurde [1]

Die zweite Diplomarbeit [2] beschäftigte sich gezielt mit dem Aufbau von Einzelspuren. Es wurden dabei geeignete Parameter ermittelt. Unter Verwendung einer F-Theta Optik mit einer Brennweite von 100 mm konnten Spurbreiten im Bereich von 80 bis 100 µm erzeugt werden.

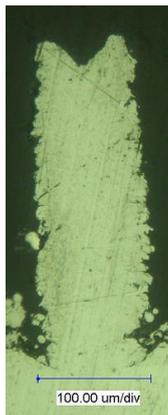


Abbildung 2 Querschliff einer Spur [2]

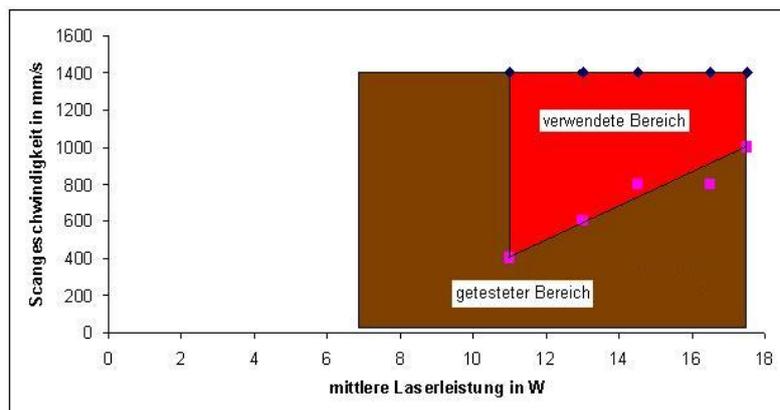


Abbildung 3 Darstellung des untersuchten Parameterbereiches [2]

In *Abbildung 3* ist der in der Arbeit untersuchte Parameterbereich dargestellt. Es wurde dabei festgestellt, dass sich Scangeschwindigkeiten im Bereich von ca. 800 bis 1000 mm/s bei mittleren Laserleistungen von größer 11 W zum Erzeugen von Einzelspuren eignen.

Es wurden ebenfalls Versuche zum Aufbau von Volumenkörpern durchgeführt. Dabei traten jedoch häufig Randüberhöhungen auf. Die Randüberhöhung konnte jedoch mit einer Pulsrepetitionsrate von 50 kHz weitgehend beseitigt werden.

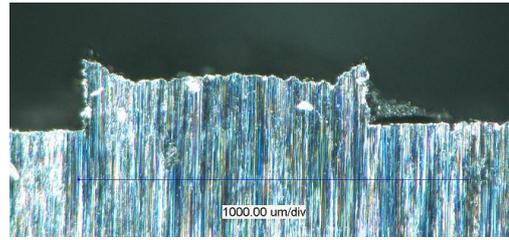


Abbildung 4 Querschliff eines Volumenkörpers [2]

In Sommer 2009 wurde das Thema im Rahmen eines Praktikums weiter bearbeitet. Dabei wurden Parameter zur Erzeugung von Einzelspuren weiter untersucht. Die ermittelten Parameter werden im Abschnitt 5.3 „Verwendete Parameter“, beschrieben.

5 Versuchsaufbau

5.1 Beschreibung der Anlage

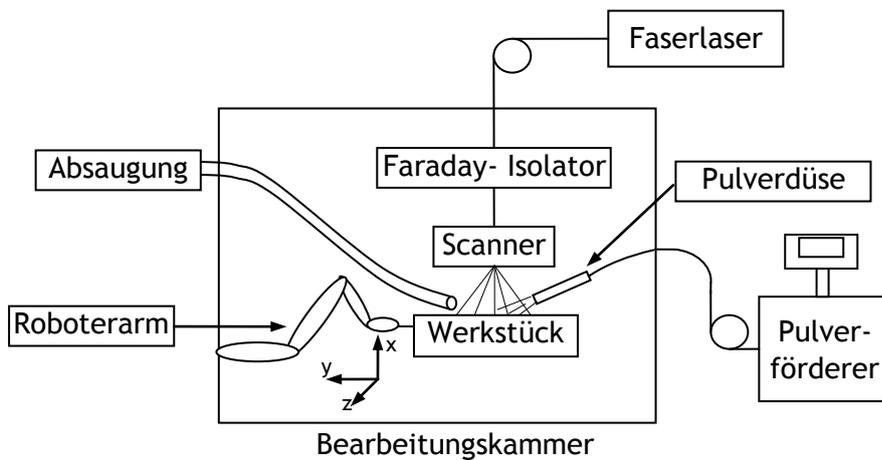


Abbildung 5 Prinzipieller Aufbau der verwendeten Anlage

Bei der Bearbeitung wird durch einen Förderer ein Pulver gefördert, welches mit Hilfe einer Düse auf die Werkstückoberfläche fokussiert wird. In diesem Pulverfokus wird mittels eines Laserstrahls eine Struktur auf dem Werkstück erzeugt. Die Laserstrahlableitung wird über einen Scanner realisiert. Da verschiedene Strukturen auf einer Probe erzeugt werden sollen, ist es nötig, die Probe genau positionieren zu können. Aufgrund der Pulverbelastung in der Luft sind Linearachsen ungeeignet, da sich das Pulver auf den Antriebskomponenten ablagert und zu starken Behinderungen führt, das heißt Fahrbefehle werden gar nicht oder nur sehr ungenau ausgeführt. Aus diesem Grund kommt ein Roboter, der gegen direktes Eindringen von Staubpartikeln aus der Umgebungen geschützt ist, zum Einsatz. Um die Pulverbelastung auf einen Ort zu beschränken, findet der Prozess in einer Bearbeitungskammer statt. Damit die Verschmutzung vor allem der optischen Komponenten nicht zu hoch wird und der Maschinenführer bei der Entnahme der Probe weitestgehend geschützt ist, ist eine Absaugung installiert.

Die Steuerung der Anlage erfolgt zentral über einen PC, im Vorfeld und am Anfang dieser Arbeit, wurden die in der Anlage vorhandenen Komponenten software- und hardwareseitig so verknüpft, dass eine zentrale Steuerung über das verwendete Bearbeitungsprogramm möglich ist. Es können Pulverförderer, Prozessgase, Roboter und Lasergerät über das Bearbeitungsprogramm gesteuert werden.

5.2 Vorstellen der Komponenten

Laser

Zum Einsatz kommt ein gepulster Yb:YAG Faserlaser der Firma SPI (Modell SP-20P). Dieser Laser ist nach dem MOPA¹-Prinzip aufgebaut. Das heißt, es wird ein Strahl hoher Güte und geringer Leistung erzeugt und anschließend vor- und nachverstärkt.

Parameter		Bedingung
Optische Ausgangsleistung	20 W	25± 5 °C
Pulsrepetitionrate	cw oder 25 - 500 kHz	
Pulslänge	20 - 200 ns	
Polarisation	zufällig	
Emissionswellenlänge	1064 ± 10 nm	
Emissionsbandbreite	< 10 nm	FWHM
Stabilität der optischen Ausgangsleistung	< 10 % < 6 %	konst. Temperatur (±2K) 1 min nach Aktivierung 1-60 min nach Aktivierung
Beugungsmaßzahl M^2	≤ 2	
Strahldivergenz	< 1,6 mrad	Bei $M^2=2$
Maximale Pulsenergie	0,8 mJ	

Tabelle 1 Herstellerangaben zum Lasergerät Modell SP-20P [3]

In der vorhandenen Anordnung wurden für eine F-Theta Optik mit 63 mm Brennweite ein Laserstrahlfokusdurchmesser (I_0/e^2) von 52 µm ermittelt [1].

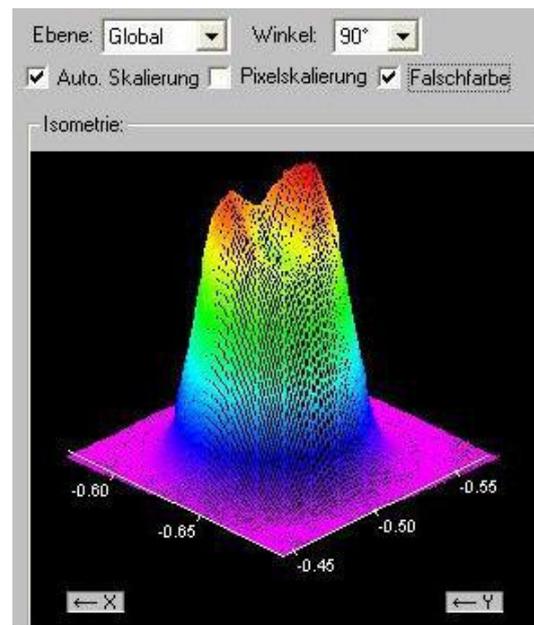


Abbildung 6 Strahlprofil nahe Laserstrahlfokus [1]

¹ Master-Oscillator Power-Amplifier

Roboterarm

In der Anlage ist ein Roboterarm TX60 der Firma Stäubli verbaut. Dieser bietet eine für Roboterarme hohe Positioniergenauigkeit und ist gegen das Eindringen von Staubpartikeln geschützt. Dieser Schutz wird dadurch erreicht, dass das Innere des Armes über eine externe Druckluftversorgung mit einem Überdruck versehen. Diese saubere Luft tritt an den Gelenken des Roboters aus und verhindert somit weitgehend, dass Partikel eindringen.

Maximale Geschwindigkeit im Lastenschwerpunkt	8 m/s
Wiederholgenauigkeit ² bei konstanter Temperatur	±0,02 mm
Tragfähigkeit bei Nenngeschwindigkeit	3,5 kg

Tabelle 2 Herstellerangaben zum Roboterarm TX60 [6]

Scanner

Als Scanner wurde ein Scancube 7 der Firma Scanlab verwendet.

Sprunggeschwindigkeit	15 m/s
Typische Bearbeitungsgeschwindigkeit	2,5 m/s ³

Tabelle 3 Herstellerangaben zum Scanner Scancube 7 [5]

Die tatsächlich möglichen Bearbeitungsgeschwindigkeiten liegen jedoch weit darüber. Bei Messungen unter Verwendung einer F-Theta Optik mit einer Brennweite von 100 mm konnten Bearbeitungsgeschwindigkeiten von bis zu 8 m/s erreicht werden.

Die Pulverdüse

Es handelt sich bei der verwendeten Pulverdüse um eine Dreistrahdüse (vgl. *Abbildung 7*). Der damit erreichte Pulverfokusdurchmesser liegt im Bereich von circa 2 bis 3 mm. Effektiv nutzbar sind davon bis zu 2 mm, da nur in diesem Bereich die Pulverstrahldichte einigermaßen konstant ist. Der Anstellwinkel der Düsen beträgt 60° zur Substratoberfläche. Die Düsenöffnungen haben einen Durchmesser von 2 mm.

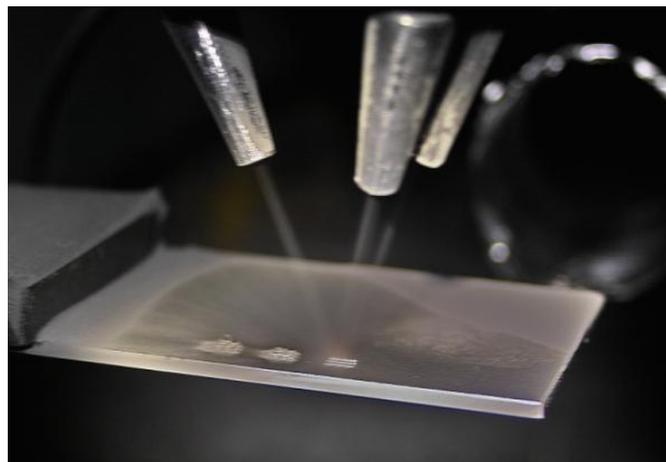


Abbildung 7 Dreistrahpulverdüse bei der Bearbeitung

² Bei geringer Geschwindigkeit und kleinen Lasten kann die Wiederholgenauigkeit noch wesentlich besser sein

³ Diese Werte wurden vom Hersteller mit einer F-Theta Optik mit 160 mm Brennweite ermittelt

Das verwendete Pulver

Bei dem verwendeten Pulver handelt es sich um ein gasverdüstes Edelstahlpulver der Firma Nanoval (vgl. *Abbildung 8*) mit einer mittleren Korngröße von $6,3 \mu\text{m}$ (vgl. *Abbildung 9*). Der verwendete Edelstahl trägt die Werkstoffnummer 1.4404 mit dem Kurznamen X2CrNiMo17-12-2. Dieser Edelstahl zeichnet sich durch geringe interkristalline Korrosion beim Schweißen aus.

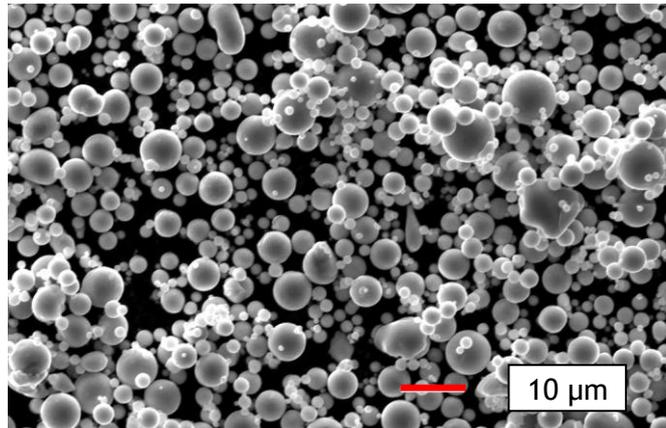


Abbildung 8 REM- Aufnahme des verwendeten Pulvers

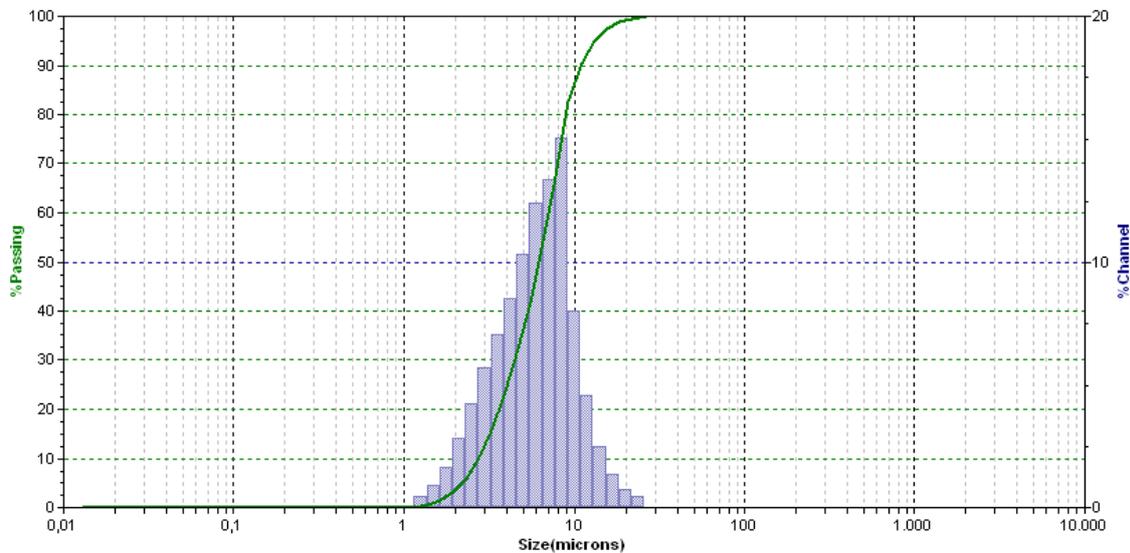


Abbildung 9 Korngrößenverteilung des verwendeten Pulvers

Das Substrat

Als Substrat kommen Bleche, die ebenfalls aus dem Edelstahl 1.4404 bestehen, zum Einsatz. Es standen Probenbleche mit Blechdicken im Bereich von 1 mm bis 3 mm zur Verfügung.

Pulverförderer

In der Anlage wird der Pulverförderer CPF 1 der Firma Thermico verwendet.

Trägergas	Argon
Pulverheizung	vorhanden
Pulverdurchsatz pro Minute	3,5 g bis ca. 100g (bei Edelstahl 1.4404)

Tabelle 4 Herstellerangaben zum Pulverförderer CPF 1 [4]

Im Pulverförderer werden Trägergas und Pulver auf 100 °C vorgeheizt, da sich gezeigt hat, dass das Pulver aufgrund des geringeren Wassergehalts besser fließt.

Probleme mit dem Pulverförderer

Zu Beginn gab es starke Schwankungen der Pulverfördermenge, bzw. des Pulverstroms. Die Schwankungen waren mit bloßem Auge sichtbar. Die auftretenden Schwankungen konnten jedoch in drei Arten unterteilt werden:

- 1. Art: kleine Schwankungen im Sekundentakt
- 2. Art: große Schwankungen aller ca. 15 Sekunden
- 3. Art: zufällige Schwankungen

Prinzip des Pulverförderers :

Das Pulver fällt in die Rinne der Förderscheibe, wird eine halbe Runde weitergedreht und dann mittels Fördergas in das in *Abbildung 10* sichtbare Loch geleitet. Wie nun im Bild sichtbar, sind kleine Haken und größere Verbindungsstege in der Förderrinne der Scheibe vorhanden. Es sind über die gesamte Förderrinne 56 kleine Haken und 4 Verbindungsstege verteilt, das heißt, die kleinen regelmäßigen Pulverschwankungen werden durch die Haken verursacht. Die großen, aller 15 Sekunden auftretenden Schwankungen sind auf die großen Verbindungsstege zurückzuführen, da jedes Mal, wenn eines der beiden Elemente über das Förderloch streicht, ein Stück des Lochs abgeschattet wird, bzw. an diesen Stellen kein Pulver liegt, das gefördert werden kann.



Abbildung 10 Nahaufnahme der Förderscheibe

Die dritte Art von Schwankung, welche zufällig auftritt, wird wahrscheinlich durch verschiedene Dinge beeinflusst. Zum Ersten kommt es aufgrund der sehr geringen Drehzahl der Förderscheibe zu Ungenauigkeiten bei der Geschwindigkeit der Scheibe. Diese Ungenauigkeiten entstehen dadurch, dass die Geschwindigkeit online gemessen und geregelt wird. Durch die geringe Drehzahl liegen die Messpunkte wahrscheinlich zu weit auseinander um die Geschwindigkeit genau regeln zu können, wodurch Ungenauigkeiten von ca. 10 % entstehen. Zum Zweiten können diese Schwankungen auch auf die verschiedenen Schlauchverbindungsstücke zurückgeführt werden. Wenn sich über die Zeit Pulver anlagert und sich dann plötzlich löst, kann es zu solchen Erscheinungen kommen.

Lösung:

Der Pulverstrom wurde nach dem Pulverförderer mehrmals auf verschiedenen Schläuche aufgeteilt und wieder zusammengeführt, wobei die Länge der einzelnen Verbindungsschläuche zwischen zwei Verbindungsstücken variiert. Dadurch konnten vor allem die kleinen regelmäßigen Schwankungen soweit verringert werden, dass sie mit bloßem Auge nicht mehr sichtbar sind und die Schwankungen, die durch die Verbindungsstege des Fördertellers hervorgerufen werden, weitgehend minimiert werden. Durch das zusätzliche Anbringen eines Vibrationsmotors am letzten Verteilerstück konnten die zufälligen Schwankungen noch weiter reduziert werden.

Daraus folgt, dass die Schwankungen zwar immer noch vorhanden waren, jedoch stark minimiert werden konnten. Die auftretenden Schwankungen sind aber immer noch zu groß, um reproduzierbare Einzelspuren zu erzeugen, da selbst mit diesen Umbauten die Ausschussquote immer noch bei ca. 15 % liegt. Ausschuss bedeutet in diesem Falle, dass die Spuren entweder kaum eine Anbindung an das Substrat aufweisen oder dass sie unkontrolliert wuchern. Der Aufbau und die Form der Spur erfolgen allerdings nach wie vor zufällig. Um reproduzierbare Versuche zu Einzelspuren durchzuführen, wäre es folglich notwendig das Förderprinzip grundlegend zu ändern.

5.3 Verwendete Parameter

Bei zuvor, im Rahmen eines Praktikums, durchgeführten Versuchen wurde eine Scangeschwindigkeit von 1,2 m/s bei einer Förderrate von 3,5 g/min, die einer Tellerdrehzahl von 1/min und einer Trägergasdurchflussmenge von 10 l/min entspricht, ermittelt. Laserseitig konnte eine mittlere Laserleistung von 7 W bei einer Pulsrepetitionsrate von 25 kHz und einer Pulslänge von 200 ns bestimmt werden.

Zur Überprüfung dieser Parameter wurden Testreihen angefertigt, die sich jedoch an den Werten orientierten. Zum Beispiel wurde die Laserleistung zwischen 5 und 9 W variiert.

Die zuvor ermittelten Parameter konnten bestätigt werden. In den folgenden Abschnitten wird teilweise noch genauer auf diese Testreihen eingegangen.

Laser	Pulsrepetitionsrate	25 kHz
	Optische Ausgangsleistung	7 W
	Pulslänge	200 ns
Pulverförderer	Pulverdurchsatz	3,5 g/min
	Trägergasdurchsatz	10 l/min
Scanner	Scangeschwindigkeit	1200 mm/s

Tabelle 5 verwendete Parameter

Aus den Parametern und den Daten des Lasergeräts (vgl. Abschnitt 5.2) kann man die Pulsenergie und die Intensität berechnen.

$$W_p = \frac{P_{av}}{f_p} \quad [7]$$

$$I = \frac{W_p}{\tau_H \cdot \pi \cdot w_{86}^2} \quad [7]$$

W_p - Pulsenergie

P_{av} - mittlere optische Ausgangsleistung

f_p - Pulswiederholfrequenz

I - Intensität im Laserstrahlfokus

τ_H - Pulslänge

w_{86} - Strahlradius des Laserstrahlfokus, bei dem die Intensität auf I_0/e^2 abgefallen ist

Es ergibt sich eine Pulsenergie von 0,28 mJ und eine Intensität von $6,6 \cdot 10^7$ W/cm².

6 Theoretische Grundlagen

6.1 Wärmeübertragung

Der Begriff Wärmeübertragung bezeichnet den Übergang von Wärme durch eine Trennwand verschiedener thermodynamischer Systeme. Dabei wird die Wärme von dem System höherer Temperatur an das System mit niedrigerer Temperatur abgegeben. Dieser Wärmeübertrag wird in die drei verschiedenen Teile Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion gegliedert.

6.1.1 Wärmeleitung

Wärmeleitung bezeichnet einen Energieübertrag bzw. Wärmeübertrag in einem Feststoff oder ruhendem Fluid aufgrund von Temperaturunterschieden. Die Wärme fließt dabei, gemäß dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik, in Richtung des kälteren Bereichs und wird dabei über Gitter- bzw. Molekülschwingungen und freie Elektronen übertragen. Vor allem Metalle besitzen aufgrund ihrer vielen freien Elektronen und der Ausbildung von kristallinen Strukturen eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit.

Die Wärmeleitung wird in eine stationäre und instationäre Leitung unterschieden. Instationäre Leitung bedeutet, dass die Temperaturdifferenz ΔT von der Zeit abhängig ist. Bei einer stationären Leitung sind die Temperaturen am Anfang und am Ende des Leiters konstant, womit auch die Temperaturdifferenz ΔT konstant bleibt. Man kann von einer stationären Wärmeleitung im Prozess ausgehen, da sich wahrscheinlich schon nach kurzer Zeit ein Temperaturgleichgewicht ausbildet. Die durch eine solche stationäre Wärmeleitung übertragende Leistung P kann folgendermaßen berechnet werden:

$$P = \frac{\lambda \cdot A \cdot \Delta T}{l} \quad [8]$$

P - übertragene Wärmeleistung

λ - Wärmeleitfähigkeit des Materials

A - Querschnittsfläche des Leiters

ΔT - Temperaturdifferenz zwischen Anfang und Ende des Leiters

l - Länge des Wärmeleiters, auf der die Temperaturdifferenz herrscht

6.1.2 Wärmestrahlung

Jeder Körper, der eine von 0 K verschiedene Temperatur hat, emittiert Wärmestrahlung. Über diese Strahlung gibt er Wärme in Form von Strahlungsenergie ab. Wenn die Umgebungstemperatur mit der des Körpers übereinstimmt, gibt er in der Summe genau so viel Strahlung ab wie er aufnimmt. Falls er jedoch eine höhere Temperatur besitzt, wird durch diesen Prozess Wärme abgeführt. Die dabei abgegebene Strahlungsleistung wird durch das Strahlungsgesetz von Stefan und Boltzmann beschrieben.

$$P = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad [8]$$

P - abgegebene Strahlungsleistung

σ - Stefan-Boltzmann-Konstante

ε - Emissionsgrad der strahlenden Fläche

A - strahlende Oberfläche des Körpers

T_1 - Temperatur des Strahlers

T_2 - Temperatur der Umgebung

6.1.3 Konvektion

Konvektion beschreibt den Wärmeübergang zwischen zwei aneinander angrenzenden thermodynamischen Systemen, welche sich relativ zueinander bewegen. Die Relativbewegung wird dabei durch die Strömung eines Mediums in mindestens einem der beiden thermodynamischen Systeme verursacht. Man unterscheidet dabei freie und erzwungene Konvektion. Bei freier Konvektion beruht die Strömung auf temperaturabhängigen Dichteunterschieden im Medium aufgrund ungleichmäßiger Erwärmung. Bei erzwungener Konvektion handelt es sich um eine Zwangsströmung unter der Einwirkung äußerer Kräfte.

6.2 Vorbetrachtung des Aufbauprozesses

Im vorliegenden Prozess gibt es viele Einflüsse auf das sich ausbildende Temperaturfeld. Für einen stabilen Aufbauprozess ist es nötig, dass sich die Temperatur bzw. die Temperaturänderungen an der Oberfläche des aufzubauenden Körpers während des Prozesses in einem konstanten Temperaturfenster bewegen. Dieses Temperaturfenster wird durch eine maximale und eine minimale Temperatur definiert. Nachdem der Laserstrahl eine Stelle der Oberfläche bearbeitet hat, ist diese durch den Wärmeeintrag wärmer als der Rest der Oberfläche. Bis der Laserstrahl das nächste Mal diese Bearbeitungsstelle trifft, sinkt deren Temperatur durch die Wärmeübertragungsprozesse auf ein Minimum ab. Die Zeit müsste nun so gewählt werden, dass dieses Temperaturminimum einen festen Betrag hat, der möglichst an jedem Ort der Bearbeitungsfläche gleich ist. Dies zu realisieren ist jedoch kaum möglich, da die Wärmeübertragungsprozesse ortsabhängig sind. Ein Bearbeitungsort, der zum Beispiel genau an der Kante der Bearbeitungsfläche liegt, kann weniger Wärmeenergie durch Wärmeleitung ins umliegende Material abgeben, dafür jedoch mehr durch Wärmestrahlung und Konvektion. Bei einem Bearbeitungsort in der Mitte der Bearbeitungsfläche wird hingegen nur ein kleiner Teil der abgeführten Energie über Wärmestrahlung und Konvektion abgegeben, dafür ein größerer Teil über Wärmeleitung in umliegende Gebiete. Damit ist zu vermuten, dass es vor allem in den Randbereichen zum Wärmestau kommt, da in Metallen durch Wärmeleitung im Allgemeinen mehr Energie abgeführt werden kann als durch Strahlung und Konvektion.

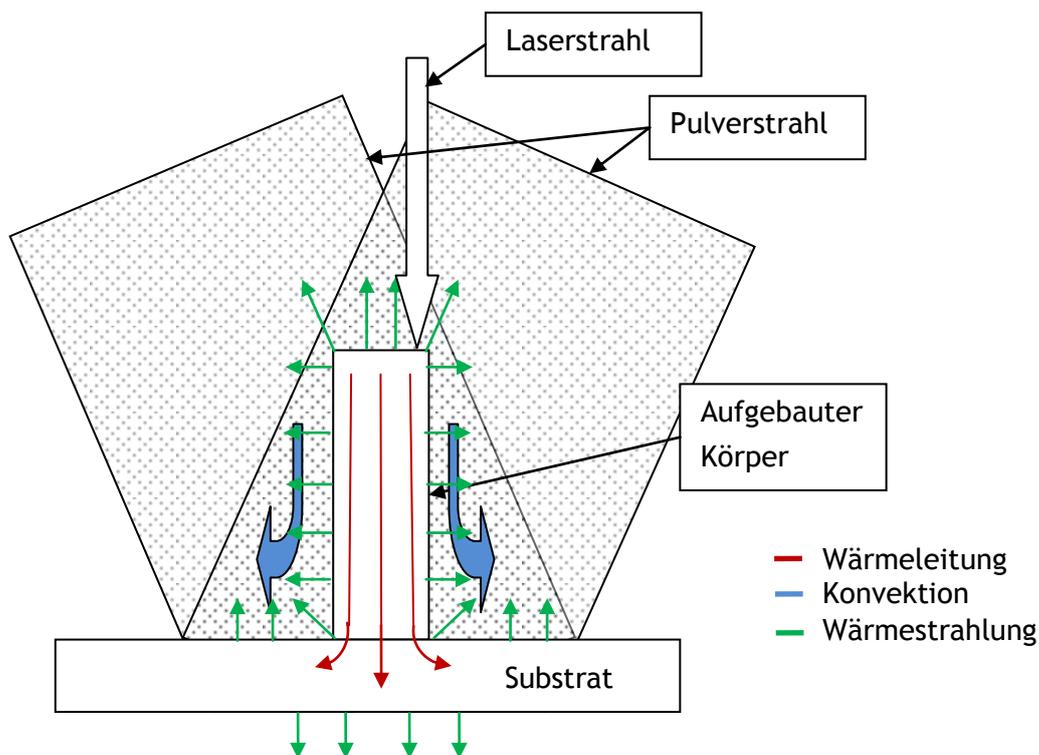


Abbildung 11, Prinzipskizze der Wärmeübertragungsprozesse

Die Skizze (*Abbildung 11*) zeigt den Aufbauprozess und die dabei stattfindenden Wärmeübertragungsprozesse. Die Pfeile geben an in welche Richtung der Wärmeübertrag stattfindet.

In welchem Umfang die Wärmeabgabe durch Strahlung und durch Konvektion erfolgt, lässt sich nur schwer bestimmen. Es ist noch unklar, welche Temperatur die Oberfläche bzw. der ganze Körper besitzt und wie viel Energie tatsächlich über die Wärmeleitung an das Substrat abgegeben wird, da keine Abhängigkeit des Prozesses von der Substratdicke festgestellt werden konnte. Diese hat wiederum einen großen Einfluss darauf, wie viel Wärme transportiert werden kann.

Diese thermischen Aspekte sollen in einer weiterführenden Arbeit eingehender untersucht werden, es wird jedoch trotzdem an späterer Stelle weiter darauf eingegangen.

7 Versuche zu Spuren

Ziel dieser Versuche ist es, Spuren beziehungsweise Wände mit einer Spurbreite von unter 100 μm und Spuren mit abnehmender Breite bei zunehmender Höhe zu erzeugen.

7.1 Einzelspuren

Es wurden bereits vorher Versuche zu Einzelspuren durchgeführt (vgl. Abschnitt 4), welche jedoch keine gerade Oberfläche, das heißt keine einheitliche Höhe über die Länge aufwiesen. Bei geringer Spurbreite ist diese Ausbildung der Oberfläche scheinbar zufällig.

Es war vermutet worden, dass dies am sich ausbildenden Temperaturfeld über die Länge der Spur liegt. Deshalb wurde zuerst ein großes Testfeld mit verschiedenen On- und Off-Delays angelegt. Als erstes wurde nur in eine Richtung gescannt, das heißt der Aufbau fand immer in der gleichen Richtung entlang der Spur statt.

Anhand dieses Testfeldes ließ sich jedoch keine Tendenz ableiten. Das erzeugte Höhenprofil schien bei geringer Höhe, also Höhen im Bereich bis ca. 300 μm zufällig verteilt zu sein. Bei zunehmender Anzahl an Überfahrten und somit steigender Höhe überwiegt jedoch die konvexe Form, was wahrscheinlich auf die Pulververteilung zurückzuführen ist, da dieser Effekt ebenfalls bei zunehmender Länge der Spuren auftritt.

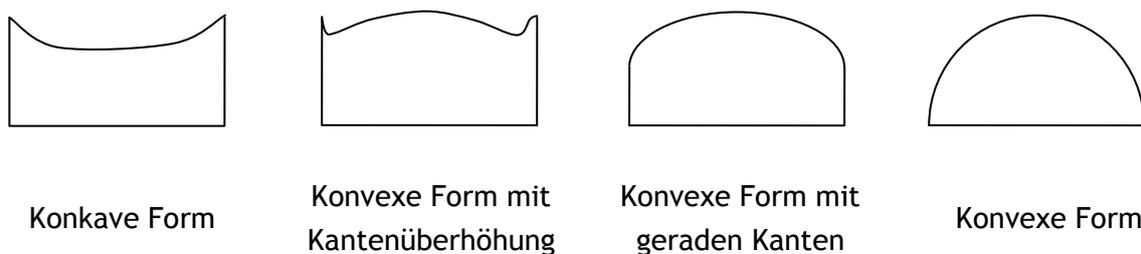


Abbildung 12 Übersicht über die Oberflächenformen der Einzelspuren im Seitenprofil

Um dies genauer zu überprüfen, wurden mehrere Spuren mit gleichen Parametern erzeugt, jedoch unterschieden sich diese stark. Im nebenstehenden Bild sind drei Spuren mit einer Länge von jeweils 1 mm zu sehen, die mit gleichen Parametern erzeugt wurden und trotzdem sehr unterschiedliche Oberflächenformen aufweisen. Die Spur Nummer 1 hat eine leicht konvexe Form mit geraden Kanten. Die Spur 2 hat eine ähnliche Form, jedoch ist die Überhöhung in der Mitte deutlicher ausgeprägt und asymmetrisch. Die Spur 3 hat ebenfalls eine leicht konvexe Form, die jedoch mit einer Kantenüberhöhung auf der linken Seite einhergeht.

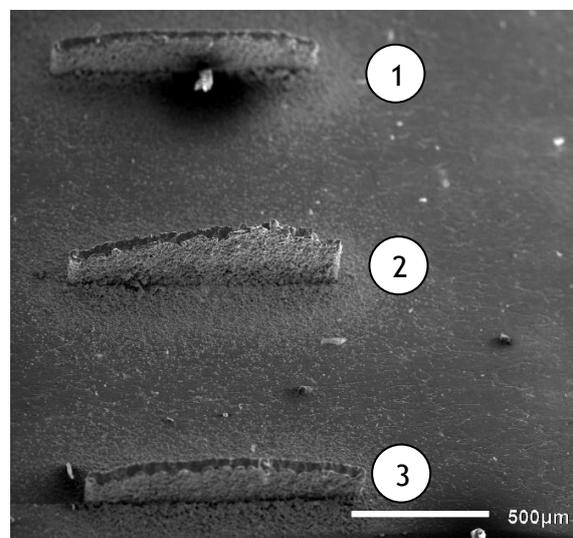


Abbildung 13 perspektivische REM-Aufnahme von 1 mm langen, mit gleichen Parametern erzeugten, Spuren

Dieser Versuch hat gezeigt, dass der Aufbauprozess sehr instabil ist, da selbst bei gleichen Parametern große Unterschiede in der Oberflächenform und Höhe der Spuren entstehen. Bei der Suche nach der Ursache des Problems wurden verschiedene Einflüsse untersucht. Während des Prozesses konnte beobachtet werden, dass sowohl die Position als auch die Intensität des Pulvers im Pulverfokus schwanken. Die Position schwankte jedoch nur leicht, das heißt die Auslenkungen waren wesentlich geringer als der Durchmesser des Pulverfokus.

Als erstes wurde der Einfluss der drei Absaugungsrohre auf den Prozess untersucht, da diese relativ nah, in einem Abstand von ca. 10 cm, von der Bearbeitungsstelle angebracht sind. Wenn nun der abgesaugte Volumenstrom schwankt, kann dies den Pulverstrom beeinflussen und somit die Pulverdichte in Substratnähe und evtl. sogar die Lage des Pulverfokusses. Außerdem könnten die Position der Absaugungsrohre und deren Anzahl eine Rolle spielen. Dabei hat sich herausgestellt, dass drei Absaugungsrohre für eine einigermaßen homogene Absaugung ausreichend sind, solange diese einigermaßen gleichmäßig um den Bearbeitungsort herum verteilt sind. Die Winkelposition der Absaugungsrohre zu den Pulverdüsen scheint in erster Näherung ebenfalls keinen Einfluss zu haben. Diese sollte jedoch zu gegebenem Zeitpunkt und mit einem stabileren Prozess noch einmal genauer untersucht werden. Es wurde desweiteren festgestellt, dass es günstig ist, die Absaugung so nahe wie möglich an der Bearbeitungsstelle zu positionieren, damit das Pulver, was nicht aufgeschweißt wurde, abgesaugt wird und nicht unkontrolliert anhaftet. Es konnte auch mit verschiedenen Abständen der Absaugungsrohre zum Bearbeitungsort keine Verbesserung der Prozessstabilität erzielt werden, da diese zufälligerweise schon vorher optimal eingestellt waren.

Ein weiterer Ansatz war, dass es zu statischen Aufladungen im elektrisch nicht leitenden Pulverschlauch kommt und sich Pulver an den Schlauchwänden ablagert und wieder löst. Daraufhin wurde elektrisch leitender Pulverschlauch genutzt, das Problem blieb jedoch bestehen. Somit blieb als Ursache der Schwankungen nur der Pulverförderer (vgl. Abschnitt 5.2 Unterabschnitt „Probleme mit dem Pulverförderer“).

Der Einfluss der Pulverschwankungen wird bei Einzelspuren besonders deutlich. Zu erklären ist dies damit, dass die Oberflächentemperatur wesentlich höher ist als bei Volumenkörpern, da die Zeit zwischen der Bearbeitung an der gleiche Stelle wesentlich geringer ist als bei Volumenkörpern. Weiterhin ist auch die Wärmeleitung durch die Geometrie stark eingeschränkt, was das unkontrollierte Wachstum begünstigt. Im Falle einer Schwankung des Pulverstroms wirkt sich deshalb eine solche Unregelmäßigkeit sofort auf das Höhenprofil der Spur aus. Bei Volumenkörpern hingegen ist wesentlich mehr Zeit zwischen zwei Pulsen, die auf die gleiche Stelle an der Oberfläche des Körpers treffen und somit wirken sich die Schwankungen nicht so stark auf das Höhenprofil aus.

Besonders starke Schwankungen des Pulverstroms während des Spuraufbaus bewirken, dass die Spuren sehr schlechte oder gar keine Anbindung an das Substrat haben oder dass die Spuren unkontrolliert wuchern.

Es hat sich gezeigt, dass bei Spuren ab einer Länge von circa 4 mm dieser Einfluss stark abnimmt. Der Nachteil ist jedoch, dass die Spuren nicht mehr ausschließlich im Pulverfokus liegen und es somit immer zu einer konvexen Form der Spuroberfläche kommt. Eine Lösung dieses Problems wäre es, die Pulverdüse an die Spurgeometrie anzupassen und einen Linienfokus des Pulverstroms zu erzeugen, was den Prozess jedoch richtungsabhängig machen würde. Die Richtungsabhängigkeit könnte jedoch durch den richtigen Einsatz des Roboterarms kompensiert werden.

Um auch kürzere Spuren mit hohem Aspektverhältnis erzeugen zu können, müsste eine Variante gefunden werden, das sich ausbildende Temperaturfeld unter Kontrolle zu bekommen bzw. gezielt beeinflussen zu können, da die thermische Belastung bei kurzen Spuren wesentlich höher ist als bei langen Spuren und es somit zu einer Überhitzung kommen kann.

Um das Problem zu beheben, wurden Wartezeiten in das Bearbeitungsprogramm eingefügt. Dies ist jedoch vorerst keine Lösung, da die im Programm eingestellten Wartezeiten nur die computerinterne Abarbeitung beeinflussen. Es ist jedoch unklar, wie lang diese Wartezeiten dann im Prozess wirklich sind.

Ein weiterer Lösungsansatz war es mehrere Spuren gleichzeitig zu bearbeiten. Dabei wurde versucht die Spuren direkt abwechselnd zu bearbeiten oder eine gewisse Anzahl an Überfahrten pro Spur zu machen und dann zur nächsten Spur zu wechseln. Es haben jedoch beide Ansätze nicht funktioniert, da wahrscheinlich die Zeit zwischen der Bearbeitung der gleichen Spur zu hoch war um die optimale Prozesstemperatur zu erreichen, denn die Spuren haben bei gleicher Anzahl an Überfahrten nur einen Bruchteil der Höhe einer mit einem Mal aufgebauten Spur erreicht.

Weitere Ansätze wären das Kühlen der Probe oder das Pulver nicht vorzuheizen, was jedoch die Schwankungen im Pulverstrom deutlich verstärkt und somit den Prozess noch instabiler macht.

Aufgrund der Unregelmäßigkeiten war es nicht möglich, den Aufbau genauer zu untersuchen. Es wurden zwar Versuchsreihen z.B. zur Aufbauhöhe in Abhängigkeit der Überfahrten durchgeführt, die Streuung ist allerdings so groß, dass daraus keine vernünftigen Aussagen getroffen werden können. Es konnten jedoch auch gute Ergebnisse erzielt werden, ein Beispiel dafür ist die in *Abbildung 14* dargestellte Spur. Diese Spur hat eine Höhe von ca. 1,2 mm bei einer relativ konstanten Breite von ca. 50 μm . Dies entspricht einem Verhältnis der Breite zur Höhe von 1:24.

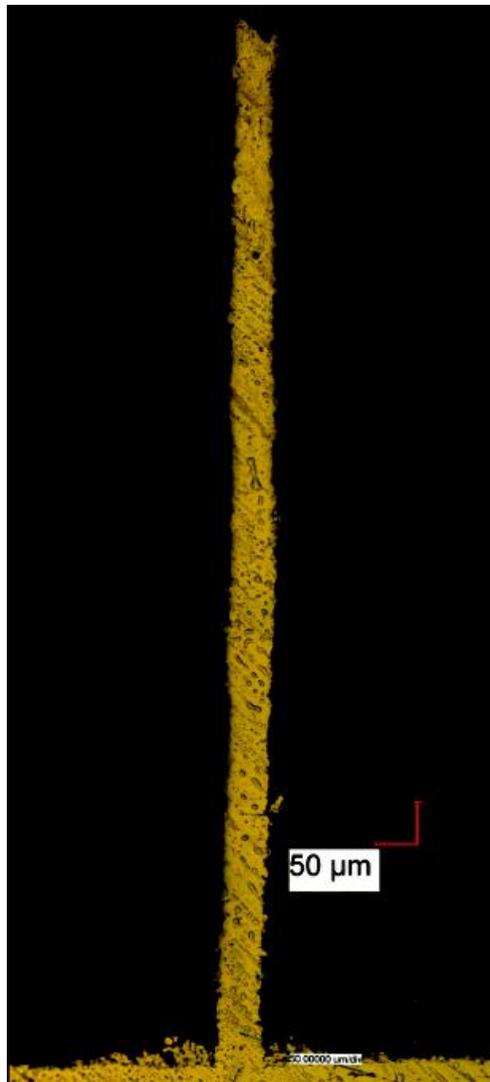


Abbildung 14 Einzelspur, Breite 50 μm , Höhe 1,2 mm

7.2 Zusammengesetzte Spuren

Bei diesen Versuchen wurde beabsichtigt, Einzelspuren aneinanderzusetzen um somit längere Spuren erzeugen zu können.

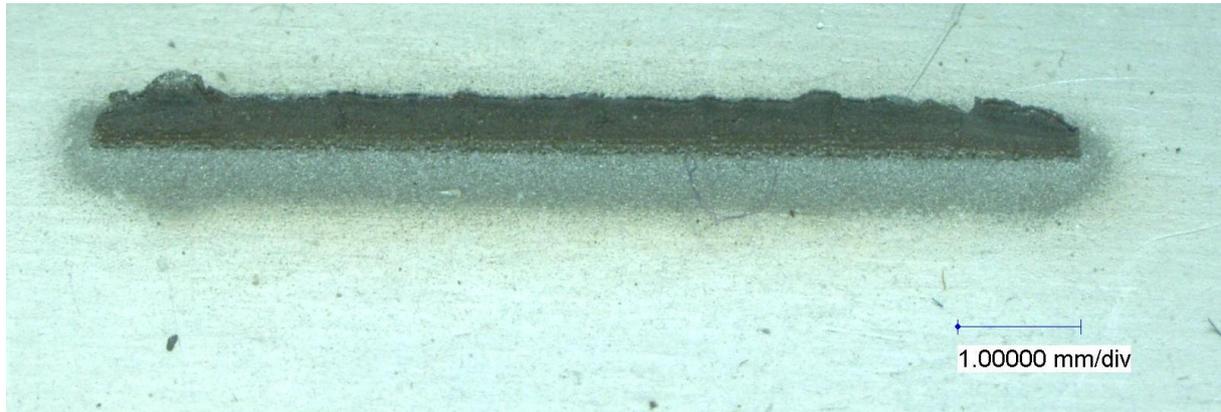


Abbildung 15 aus 8 Einzelspuren zusammengesetzte Spur, ca. 870 μm Höhe

In *Abbildung 15* wurden acht Einzelspuren mit einer Länge von je einem Millimeter nebeneinandergesetzt um eine lange Spur zu erhalten. Es ist jedoch zu erkennen, dass das Oberflächenprofil vor allem der äußeren Einzelspuren sehr unterschiedlich ist. In den Versuchen sind bei gleichen Parametern auch andere Oberflächenformen aufgetreten. Diese Spur wurde ausgewählt, da sie die Ergebnisse repräsentiert. Im Allgemeinen ist die Oberfläche gerade, die äußeren Spuren haben jedoch stets eine andere Form. Die Geradheit der Oberfläche ist jedoch, wahrscheinlich aufgrund der Schwankungen des Pulverstroms, nicht immer gegeben (vgl. Anhang: zusammengesetzte Spuren).

Versuche, diese zusammengesetzten Spuren durch das Versetzen der einzelnen Spurelemente um eine halbe Länge gegeneinander, ähnlich einer Ziegelmauer, zu erzeugen waren nicht erfolgreich, da dann nicht alle Einzelement gleich lang sind. Weiterhin zeigte sich, dass die kürzeren Einzelspuren am Rand sind. Aufgrund der Kürze der Spuren und deren Randposition war es nicht möglich durch Variation der Überfahrten deren Höhe an den Rest der Schicht anzupassen.

7.3 Spuren mit unterschiedlichem Querschnitt

Zum Erzeugen von Spuren, bei denen die Spurbreite mit zunehmender Höhe abnimmt, wurden zwei Spuren direkt nebeneinandergesetzt und deren Abstand nach einer gewissen Anzahl an Überfahrten verringert. Dieser Vorgang wurde dann mehrmals wiederholt.

Der Abstand der Einzelspuren wurde anfänglich auf 50 μm gesetzt. Dann wurde eine gewisse Anzahl an Überfahrten durchgeführt und anschließend der Abstand um 2 μm verringert. Insgesamt wurde dieser Vorgang 25-mal wiederholt, sodass die beiden Spuren am Ende genau übereinanderlagen. Dieses Vorgehen scheint auf den ersten Blick unlogisch, da in der untersten Schicht die Spuren nebeneinander liegen und zum Beispiel in der obersten Schicht genau übereinander liegen, was wiederum vermuten lässt, dass die Breite nicht gleichmäßig abnimmt. Die Spur in *Abbildung 16* beweist jedoch das Gegenteil. Bei 300 Wiederholungen pro Schicht und 25 Schichten konnte erreicht werden, dass die Spurbreite relativ gleichmäßig über die Höhe abnimmt. Dieser Effekt könnte damit erklärt werden, dass, wenn die Spuren nebeneinander liegen, noch ein gewisser Teil der eingetragenen Energie in die angrenzende Spur über Wärmeleitung abfließen kann. In den oberen Schichten nimmt dies systematisch ab, was dazu führt, dass ein Wärmestau entsteht und somit im Verhältnis zu dem aufgebauten Material immer mehr Material abgetragen wird. Wie in einem späteren Teil der Arbeit gezeigt wird, werden bei Volumenkörpern höhere Auftragsraten erreicht. Bei einem Volumenkörper, genauer einem Quader, können die ca. 900 μm Höhe, die in *Abbildung 16* mit 7500 Überfahrten erreicht wurden, bereits mit rund 2200 Überfahrten erreicht werden (vgl. *Diagramm 4*).

Weiterhin ist zu erkennen, dass dieser Effekt nicht mit den Überfahrten pro Schicht skaliert, denn bei 500 Wiederholungen pro Schicht (*Abbildung 17*) tritt dieser Effekt eher in den Hintergrund und die Abnahme der Spurbreite über die Spurbreite ist nicht mehr linear. Wahrscheinlich wurde mit den Parametern der in *Abbildung 16* erzeugten Spur ein gewisses Optimum gefunden.

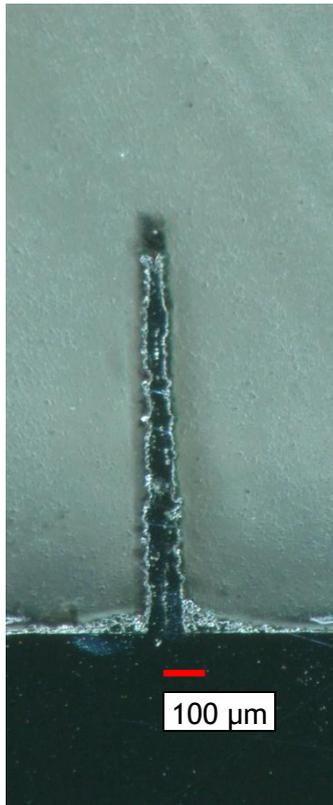


Abbildung 16 Pyramidenspur mit 300 Wdh. pro Schicht und 25 Schichten, Sockelbreite 93 µm, Breite an der Spitze 42 µm, Höhe 904 µm



Abbildung 17 Pyramidenspur mit 500 Wdh. pro Schicht und 25 Schichten, Sockelbreite 103 µm, Breite an der Spitze 57 µm, Höhe 1,82 mm

Das erzeugte Höhenprofil entspricht dem, was auch bei einfachen Spuren festgestellt wurde. Was bei diesen Versuchen auch der Tatsache geschuldet ist, dass die Spuren eine Länge von 4 mm besitzen. Bei wesentlich geringeren Längen der Spuren tritt unregelmäßiges Wachstum auf.

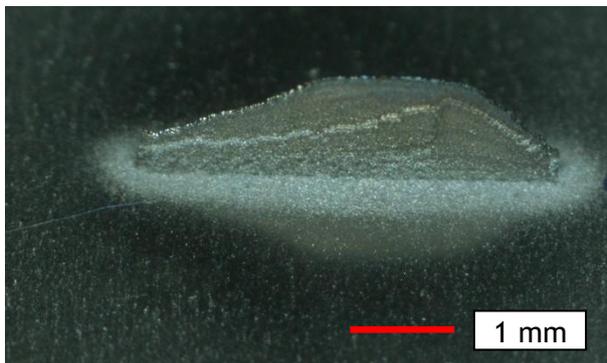


Abbildung 18 Seitenansicht einer Pyramidenspur mit 25 x 300 Wdh. (vgl. *Abbildung 16*)

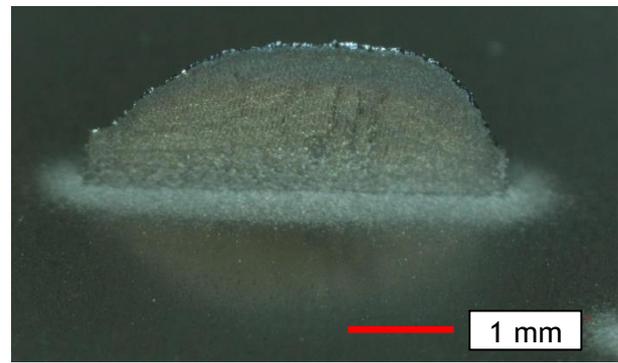


Abbildung 19 Seitenansicht einer Pyramidenspur mit 25 x 500 Wdh. (vgl. *Abbildung 17*)

In beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass viele horizontale Streifen existieren. Dabei tritt der in *Abbildung 18* erkennbar horizontal verlaufende helle Streifen deutlich hervor. Es könnte zwei Ursachen für diese Streifen geben.

Eine Ursache könnten die Schichten sein, sodass die Streifen jeweils bei der Verringerung des Abstandes zwischen den Einzelspuren entstehen, dies würde jedoch nicht den besonders hellen Streifen erklären. Der helle Streifen könnte durch eine besonders große Schwankung im Pulverstrom erklärt werden.

7.4 Zusammenfassung

Die Versuche zu Einzelspuren waren durchaus erfolgreich. Es hat sich trotz der schlechten Reproduzierbarkeit gezeigt, dass es möglich ist solche Spuren zu erzeugen. Mit einigen Veränderungen am Versuchsaufbau kann der Prozess wahrscheinlich deutlich an Stabilität und Reproduzierbarkeit gewinnen. Das Problem, dass es ab einer gewissen Anzahl an Überfahrten zur Ausbildung einer konvexen Oberflächenform kommt, wird die größte Schwierigkeit darstellen. Es ist jedoch fraglich, ob Einzelspuren mit einer Breite von 50 μm und einer Höhe von einem Millimeter und mehr eine industrielle Anwendung finden werden. Wahrscheinlicher ist es, dass eine Anwendung in Richtung von geringen Spürhöhen und zusammengesetzten Spuren gehen wird, z.B. um Leiterbahnen oder ähnliche Strukturen zu erzeugen. Die Versuche zu Einzelspuren sind jedoch wichtig, um den vorliegenden Aufbauprozess besser verstehen zu können, da dieser noch nicht genau geklärt ist.

8 Versuche zu Volumenkörpern

In diesem Teil der Arbeit wird die Erzeugung von Strukturen untersucht, die groß im Vergleich zum Laserstrahlfokus sind.

Zu Beginn mussten grundlegende Untersuchungen zu den Volumenkörpern durchgeführt werden. Diese beziehen sich dabei sowohl auf die Größe der Körper als auch auf deren Struktur bzw. Aufbau an sich.

Als Versuchskörper wurden Quader gewählt, da diese Körper relativ einfach zu generieren sind, ohne dass es Probleme mit unterschiedlichen Linienabständen oder unterschiedlichen Strukturbreiten im Körper gibt.

Als grundlegendes Verfahren zum Aufbau dieser Körper wurden äquidistante Linienscans mit unterschiedlichen Laufrichtungen gewählt, die pro Überfahrt um 90° gedreht werden.

Diese Abfolge ergibt jeweils eine Schicht, das heißt, eine Schicht besteht eigentlich aus jeweils 4 Überfahrten. Im Nachfolgenden wird nur noch die Schichtanzahl angegeben.

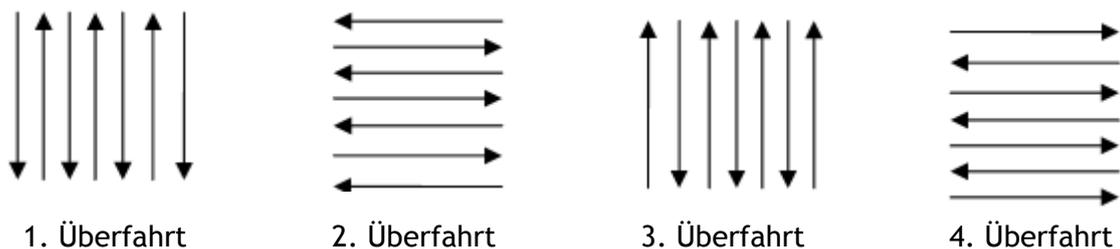


Abbildung 20 Schematische Darstellung der Vorgehensweise beim Erzeugen von Quadern

Diese Vorgehensweise hat sich als günstig herausgestellt, da die Einflüsse, die durch die Scanrichtung entstehen, weitgehend kompensiert werden konnten.

8.1 Grundlegende Untersuchungen

Als erster Schritt zur Untersuchung zum Aufbau von Volumenkörpern wurde ermittelt, welcher Abstand der äquidistanten Linienscans, also der Linienabstand, günstig zum Aufbau von Volumenkörpern ist. Es wurden dabei Quader mit einer Kantenlänge von 2 mm verwendet.

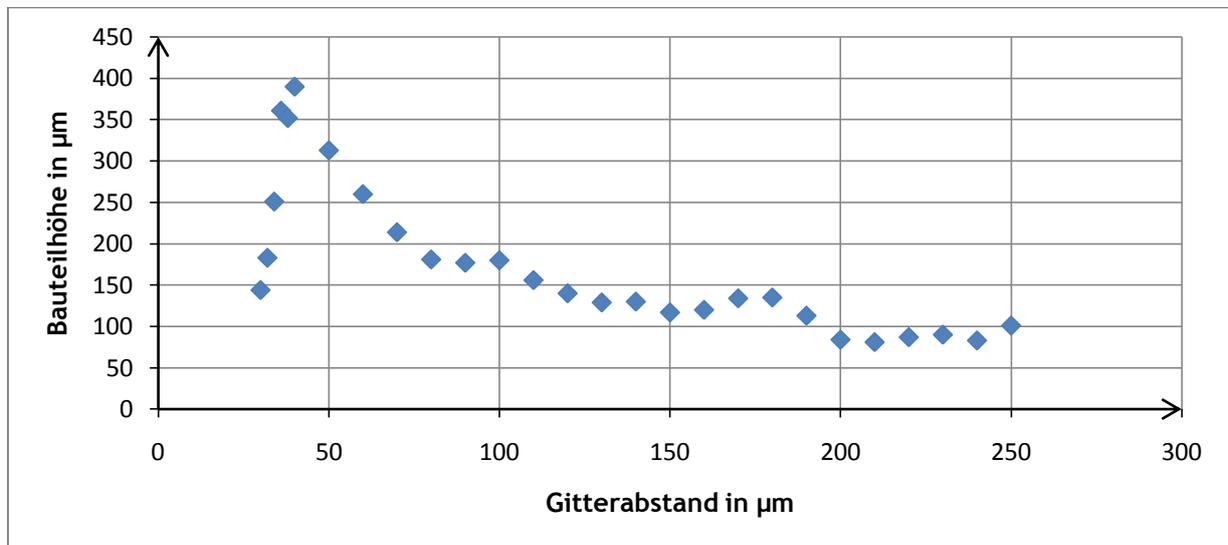


Diagramm 1 Bauteilhöhe in Abhängigkeit des Linienabstands

Bei der Untersuchung zum Linienabstand hat sich ein deutliches Maximum bei einem Linienabstand von $40\ \mu\text{m}$ gezeigt. Bei diesem Linienabstand wird nicht nur ein Maximum an Höhe erreicht, sondern in diesem Bereich ist auch die Oberfläche relativ gerade. Bei einem Linienabstand von unter $40\ \mu\text{m}$ ist der aufgebaute Körper sehr massiv und weist kaum Fehlstellen, wie z.B. Löcher im Gefüge, auf, hat jedoch eine unebene Oberfläche (vgl. *Abbildung 21*). Bei einem Linienabstand von $40\ \mu\text{m}$ sind erkennbar mehr Fehlstellen vorhanden (vgl. *Abbildung 22*). Für die folgenden Versuche wird jedoch aufgrund der geraden Oberfläche, des relativ konstanten Aufbauverhaltens und der vergleichsweise hohen Auftragsraten ein Linienabstand von $40\ \mu\text{m}$ als Grundlage verwendet.

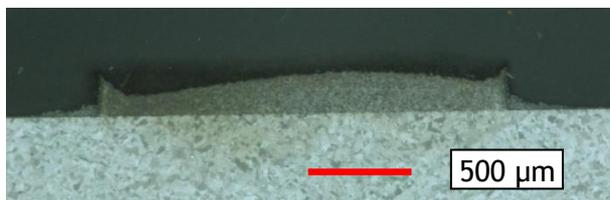


Abbildung 21 Schliff eines Quaders mit $30\ \mu\text{m}$ Linienabstand

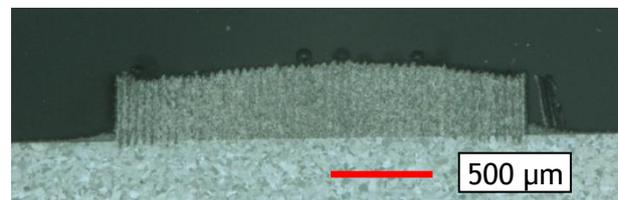


Abbildung 22 Schliff eines Quaders mit $40\ \mu\text{m}$ Linienabstand

Weiterhin gibt es einen deutlichen Unterschied in den Oberflächenstrukturen. Bei einem Linienabstand von $30\ \mu\text{m}$ ist die Oberfläche vergleichsweise eben (vgl. *Abbildung 21* und *Abbildung 23*). Bei einem Linienabstand von $40\ \mu\text{m}$ ist die Oberfläche wesentlich unebener (vgl. *Abbildung 22* und *Abbildung 24*). Aufgrund des geringeren Linienabstands ist der Wärmeeintrag wahrscheinlich so hoch, dass an der Bearbeitungsstelle das Material soweit aufgeschmolzen wird, dass es die angrenzenden, durch Verdampfung des Materials entstandenen Löcher wieder schließen kann (vgl. *Abbildung 23*).

Durch die höhere Temperatur wird jedoch auch mehr Material pro Puls abgetragen, sodass das Verhältnis von aufgetragenem zu abgetragenem Material schlechter wird.

Bei einem größeren Linienabstand als 40 μm wird nicht mehr genügend Energie eingebracht, um die optimale Prozesstemperatur zu erreichen.

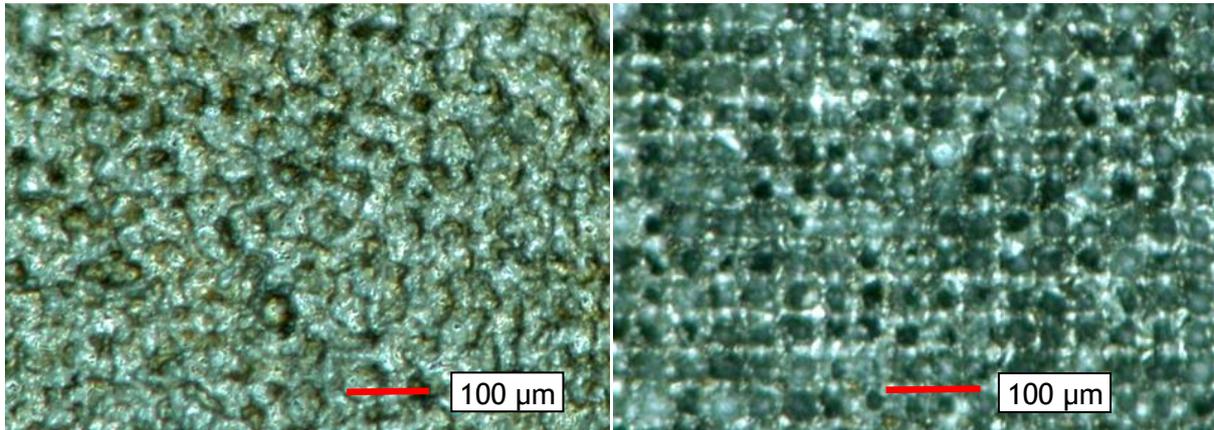


Abbildung 23 Oberfläche eines Quaders mit 30 μm Linienabstand

Abbildung 24 Oberfläche eines Quaders mit 40 μm Linienabstand

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass ab einem Linienabstand zwischen 80 und 90 μm der Volumenkörper endgültig von einem Gitter abgelöst wird. Die Tendenz dazu zeigt sich jedoch schon eher, in einem Übergangsbereich ab größer 50 μm Linienabstand, da dann immer mehr Fehlstellen zwischen zwei benachbarten Linien auftreten. Von einem Gitter kann jedoch erst ab einem Abstand von ca. 90 μm gesprochen werden, da ab diesem Linienabstand die in einer Richtung verlaufenden Spuren deutlich voneinander getrennt sind.

Grundfläche des Volumens:

Es hat sich gezeigt, dass Quader mit einer Grundfläche von 2 x 2 mm^2 bis 0,5 x 0,5 mm^2 erwartungsgemäß aufgebaut werden konnten. Jedoch ist ab einer Grundfläche von über 1,0 x 1,0 mm^2 der Einfluss der vorliegenden Pulververteilung recht groß, sodass die Oberfläche des aufgebauten Volumens uneben wird. In Versuchen mit Fokuspolführung hat sich diese Unebenheit hingegen nicht als Problem herausgestellt. Es hat sich sogar gezeigt, dass die Aufbauraten in dem untersuchten Bereich nahezu identisch und scheinbar unabhängig von der Grundfläche des Körpers sind.

Die gleichen Aufbauraten der verschiedenen Volumina sind im ersten Moment unerwartet, da die unterschiedlichen Volumina bzw. deren bestrahlte Oberflächen unterschiedliche Größen aufweisen. Bei einer Grundfläche von 2 x 2 mm^2 ist die Fläche zum Beispiel 16-mal größer als bei einer Grundfläche von 0,5 x 0,5 mm^2 . Somit müssten die Temperaturen auf der kleineren Werkstückoberfläche deutlich höher sein.

Durch den Einsatz eines Scanners gibt es jedoch eine Abhängigkeit von Strukturgröße bzw. der bestrahlten Fläche zur mittleren Laserleistung. Um den Einfluss von Beschleunigungsstrecken gering zu halten oder bewusst zu beeinflussen, werden Delays genutzt. Diese Delays bestimmen, wie groß die Verzögerung zwischen An- bzw. Abschalten des Lasers und der Bewegung der Scannerspiegel ist.

Die Zeit, die zwischen dem Beenden einer Strecke und dem Beginn einer weiteren benötigt wird, ist somit unabhängig von deren Länge. Das heißt, es gibt ein Verhältnis von der Zeit, in der der Laserstrahl bei der Bearbeitung freigegeben ist, zu der Zeit, die er während der Bearbeitung nicht freigegeben ist. Die Zeit zwischen Ab- und Anschalten des Laserstrahls ist somit konstant, da der Spurbestand und die verwendete Geschwindigkeit bei den verschiedenen Volumenkörpern ebenfalls konstant sind. Nicht konstant ist hingegen die Zeit, in der der Laserstrahl freigegeben ist. Diese Zeit wird mit geringeren abgefahrenen Strecken immer kleiner und somit verschiebt sich das Verhältnis zwischen der An- und Auszeit.

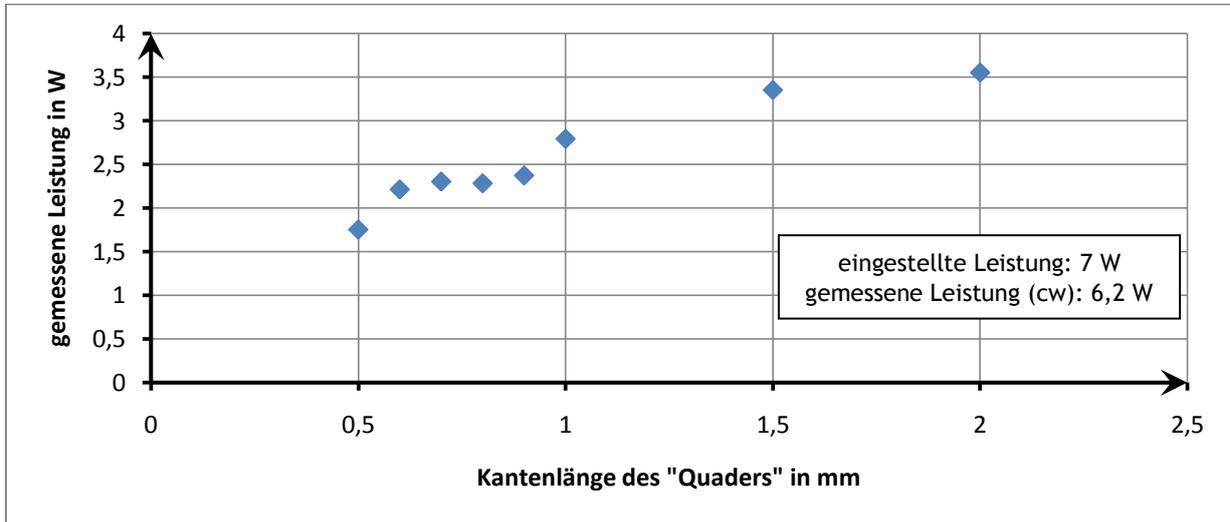


Diagramm 2 Leistung auf der Oberfläche in Abhängigkeit der Kantenlänge bei 7 W eingestellt

Im Diagramm ist zu erkennen, dass die auf der Oberfläche des Materials ankommende mittlere Leistung mit abnehmender Kantenlänge ebenfalls abnimmt. Die verwendeten Parameter sind eine eingestellte Laserleistung von 7 W, gemessen wurden im cw-Betrieb 6,2 W, und ein Linienabstand von 40 µm.

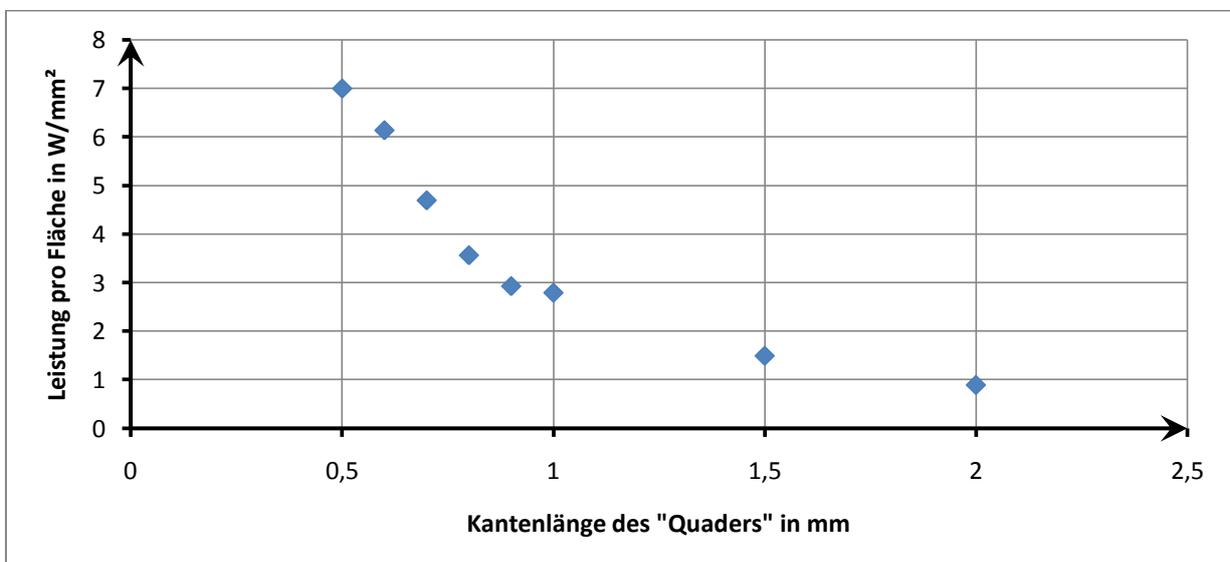


Diagramm 3 Leistung pro Fläche in Abhängigkeit der Kantenlänge bei 7 W eingestellt

In *Diagramm 3* sind die in *Diagramm 2* dargestellten Leistungen über die Oberfläche des Quaders in Abhängigkeit von der Grundfläche dargestellt. Auffällig ist, dass, obwohl die Leistung pro Fläche mit abnehmender Kantenlänge stark ansteigt, die Aufbauraten der verschiedenen Quader trotzdem etwa gleich sind. Das bedeutet, dass bei Volumenkörpern ab einer gewissen Grundfläche die Aufbauraten in erster Näherung unabhängig von der eingestrahlten Leistung pro Fläche ist. Daraus folgt, dass wahrscheinlich der Aufbau nur von der Energie pro Fläche abhängig ist, da diese im vorliegenden Fall bei allen Grundflächen gleich ist. Nicht gleich ist sie jedoch in den vorangegangenen Versuch zum Linienabstand.

Als nächstes wurde untersucht, wie sich die Anzahl der Überfahrten auf die Höhe des Körpers auswirkt. Als Untersuchungsobjekt wurden Quader mit einer Grundfläche von $1 \times 1 \text{ mm}^2$ ausgewählt.

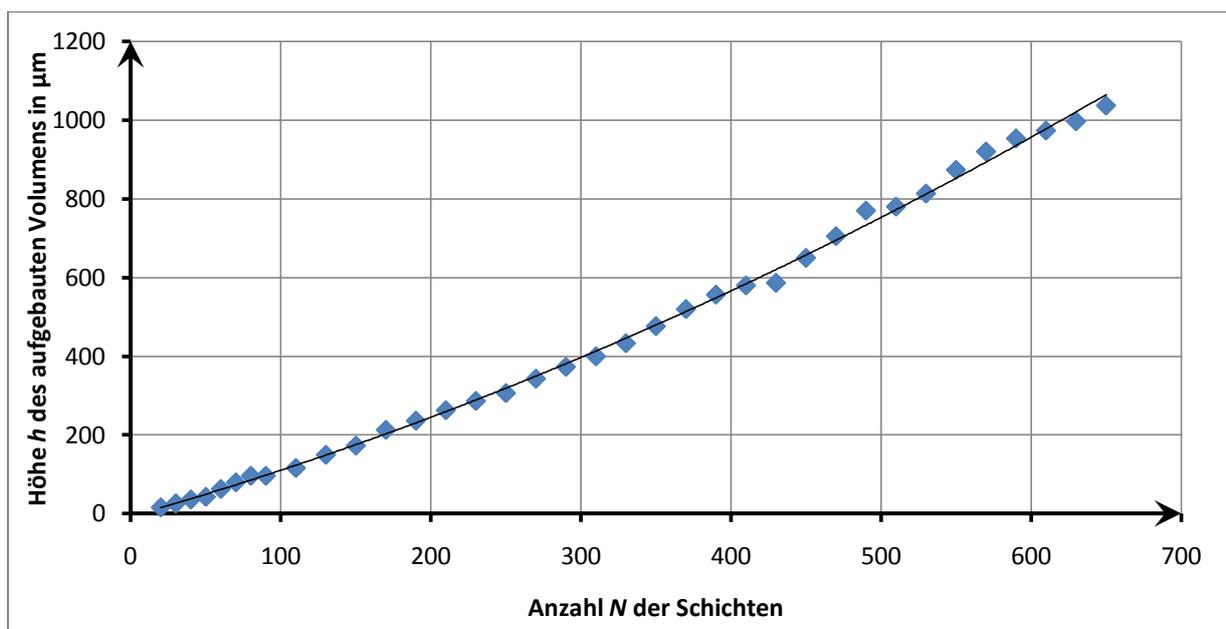


Diagramm 4 Höhe in Abhängigkeit der Anzahl der Schichten

Eine polynomische Regression lieferte die beste Anpassung an die experimentell ermittelten Werte für die Abhängigkeit der Körperhöhe h von der Schichtanzahl N .

$$h = 9 \cdot 10^{-4} \mu\text{m} \cdot N^2 + 1,09 \mu\text{m} \cdot N - 7,05 \mu\text{m}$$

Es ist jedoch anzunehmen, dass die Aufbauraten nicht weiter zunimmt, sondern sich einem Maximum nähert und dann wieder abfällt, da ab einer gewissen Bauteilhöhe die Defokussierung des Laser- und des Pulverstrahls zu groß werden und kein Aufbau mehr stattfindet.

Die erste Überlegung war die Reihe in zwei Teile zu gliedern. Der erste Teil sollte die Ausbildung des Temperaturfeldes repräsentieren und der zweite Teil dann einen Aufbau mit konstantem Temperaturfeld. Es hat sich jedoch gezeigt, wie später noch beschrieben wird, dass das Temperaturfeld bei Volumenkörpern keinen wesentlichen Einfluss hat.

8.2 Versuche mit Fokuspachführung

Um wesentlich höhere Körper aufzubauen ist es notwendig, den Fokus während der Bearbeitung nachzuführen. Dabei wird eine gewisse Anzahl an Schichten aufgebaut und anschließend der Fokus nachgeführt. Es hat sich als günstig erwiesen, zwischen der Fokuspachführung 270 Schichten aufzubauen, was einer Höhe von 350 μm entspricht, da in diesem Bereich die Reproduzierbarkeit sehr hoch ist, das heißt die erzeugte Höhe schwankt nur leicht.

Es wurden dabei zwei Varianten des Aufbaus überprüft. Die erste Variante ist, den Körper mit einem Mal aufzubauen, das heißt, 270 Schichten aufzubauen und anschließend den Fokus um 350 μm nachzuführen (vgl. Anhang: *Abbildung 43* bis *Abbildung 46*). Dabei hat sich der gleichmäßige Aufbau der Quader mit verschiedenen Grundflächen bestätigt.

Die zweite Variante war, die vier Quader mit verschiedenen Grundflächen gleichmäßig aufzubauen, das heißt es wurden erst 270 Schichten bei jedem Quader aufgebaut, dann der Fokus nachgeführt und anschließend die nächsten Schichten aufgebaut (vgl. *Abbildung 47* bis *Abbildung 50*). Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um den Einfluss des sich ausbildenden Temperaturfeldes zu untersuchen, da zwischen den einzelnen Schichten genug Zeit war, damit der Körper wieder nahezu seine Anfangstemperatur erreicht. Es ließ sich jedoch kaum ein Unterschied zu Variante 1 feststellen (vgl. *Tabelle 6*), denn die Höhen variieren nur geringfügig. Dies wiederum bestätigt, bestätigt, dass das sich ausbildende Temperaturfeld bei Volumenkörpern wenig Einfluss hat.

Grundfläche	0,5 x 0,5 mm ²	1 x 1 mm ²	1,5 x 1,5 mm ²	2 x 2 mm ²
Höhe (Variante 1) in mm	1,79	1,75	1,8	1,84
Höhe (Variante 2) in mm	1,87	1,91	1,93	1,84

Tabelle 6 Aufbauhöhe in Abhängigkeit von Aufbauvariante und Grundfläche der Quader

Es ist jedoch auffällig, dass die Quader, die mit Variante 2 erzeugt wurden, in drei von vier Fällen höher sind. Zum einen könnten dies einfach Unregelmäßigkeiten bzw. Toleranzen im Aufbau sein, es könnte jedoch auch der Einfluss der Oberflächentemperatur sein. Die mit Variante 2 erzeugten Quader können jedoch zwischen der Fokuspachführung abkühlen, was dazu führt, dass die Oberflächentemperatur wesentlich geringer ist als bei den mit Variante 1 erzeugten Körpern. Wenn die Oberflächentemperatur nun geringer ist, heißt das, dass bei gleicher Pulsenergie der Abtrag pro Puls geringer ist. Außerdem ist es bei Metallen so, dass die Absorption der Laserstrahlung mit steigender Temperatur zunimmt, was den Abtrag in Variante begünstigen würde. Es spricht also durchaus einiges dafür, dass die Höhendifferenz zwischen den zwei Varianten nicht nur auf die Toleranz zurückzuführen ist.

Der Aufbauprozess mittels Fokuspachführung ist nicht nur theoretisch beliebig fortsetzbar. Durch 20-maliges Nachführen des Laserstrahlfokus konnte ein Quader mit einer Höhe von 6,2 mm bei einer Kantenlänge der quadratischen Grundfläche von 500 μm erzeugt werden (vgl. *Abbildung 25*). Es wurden auch bei diesem Körper jeweils 270 Überfahrten aufgebaut, bevor der Laserstrahlfokus nachgeführt wurde.

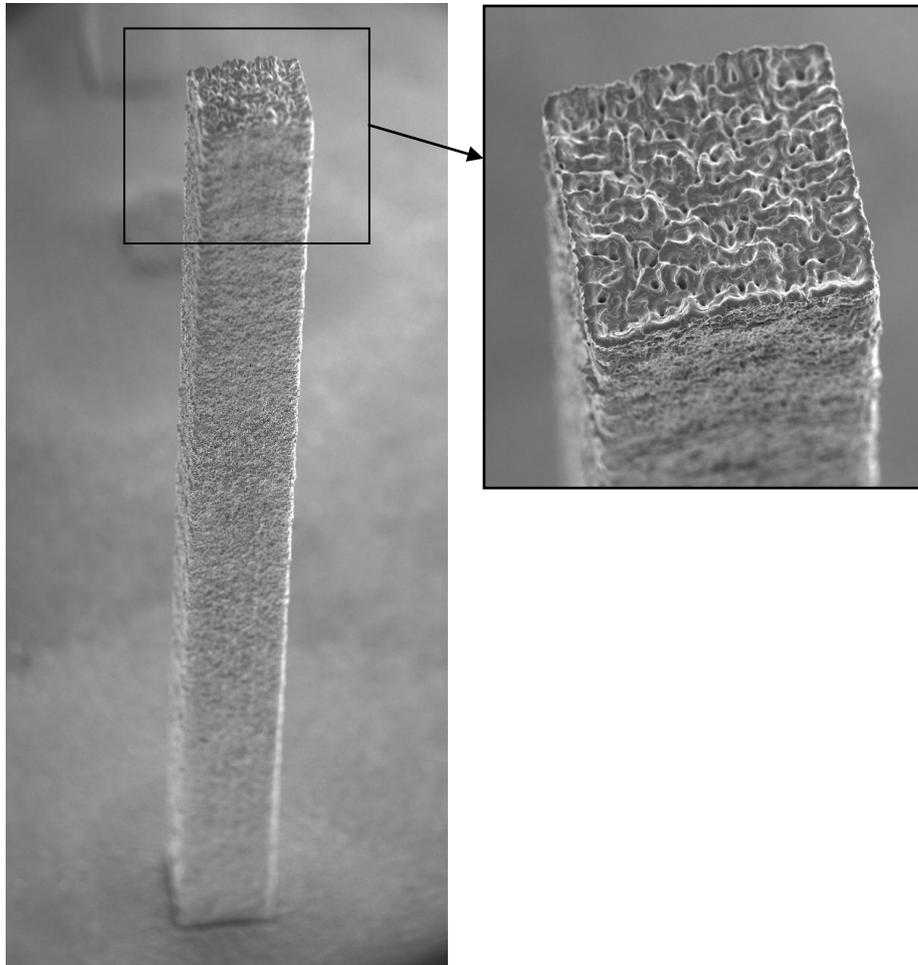


Abbildung 25 perspektivische REM-Aufnahme eines Quader mit einer Größe von $0,5 \times 0,5 \times 6,2 \text{ mm}^3$; 5400 Schichten mit Fokuspachführung

8.3 Versuche zu zusammengesetzten Volumenkörpern

Nachdem erfolgreich Versuche zum Aufbau von Volumenkörpern durchgeführt wurden, sollten aus diesen kleinen Körpern größere Körper erzeugt werden. Das bedeutet, dass die zuvor erzeugten Körper aneinandergesetzt werden, um dadurch größere Körper zu generieren.

Zu diesem Zweck wurde als erstes untersucht, welchen Einfluss der Abstand der Einzelkörper hat und wie dieser zu wählen ist.

Die REM- Aufnahmen der Ergebnisse sind im Anhang unter *Abbildung 51* bis *Abbildung 56* zu finden. Es ist zu erkennen, dass der Aufbau mit steigendem Überlapp der einzelnen Körper immer schlechter wird. Zu vermuten ist, dass bei einem Überlapp die bereits aufgebauten Kanten durch die nochmalige Bearbeitung zum einen thermisch stark belastet werden und zum anderen, dass es durch diese Aufheizung des bereits aufgebauten Materials zum unkontrollierten Anhaften des Pulvers an der Seitenfläche kommt.

Weiterhin wurden zwei Varianten zum Aufbau einer Linie durch Aneinanderreihung von einzelnen Körpern untersucht. Das grundlegende Prinzip beim Aufbau der von zusammengesetzten Körpern aus Einzelkörpern ist es, eine Schicht pro Einzelkörper, also ein Segment aufzubauen und dann erst zum nächsten Segment überzugehen. Dabei wurde lediglich die Reihenfolge der Segmente einer Schicht verändert.

Als Versuchskörper wurden Quader mit einer Grundfläche von $1 \times 1 \text{ mm}^2$ verwendet. Der Aufbau der einzelnen Segmente in *Abbildung 26* erfolgt von links nach rechts. In *Abbildung 27* wird ebenfalls links angefangen, dann jedoch nur jedes zweite Segment aufgebaut, anschließend wurden die Lücken von links nach rechts gefüllt und dann wird erst die nächste Schicht Segmente aufgebaut. Zwischen den Segmentschichten wird der Fokus um $350 \text{ }\mu\text{m}$ nachgeführt, da dies der mittleren Aufbauhöhe bei 270 Schichten entspricht. Der Aufbau ist schematisch über den Abbildungen dargestellt, die Zahlen stehen dabei für die Reihenfolge, in der die einzelnen Segmente erzeugt wurden.

11	12	13	14	15
6	7	8	9	10
1	2	3	4	5

13	16	14	17	15	18
7	10	8	11	9	12
1	4	2	5	3	6

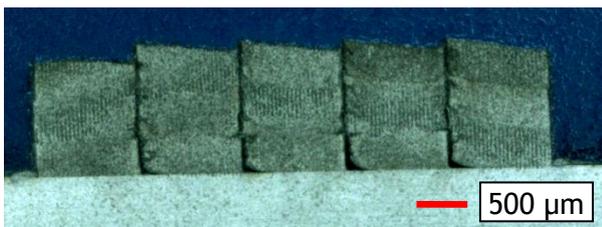


Abbildung 26 3 x 270 Schichten, darüber Reihenfolge des Aufbaus der Segmente

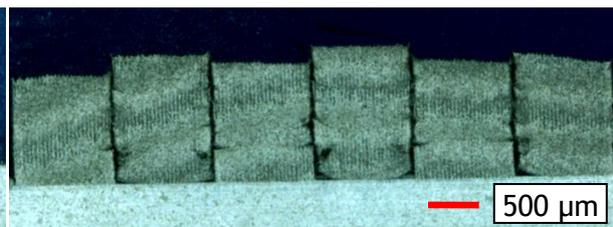


Abbildung 27 3 x 270 Schichten, darüber Reihenfolge des Aufbaus der Segmente

Bei der Vorgehensweise, die in *Abbildung 26* dargestellt ist, kommt es zu einer schuppigen Oberflächenform, das heißt die dem vorangegangenen Segment zugewandte Seite weist an der Oberkante sowohl eine Überhöhung auf als auch einen Aufbaufehler an der unteren Kante. In *Abbildung 27* tritt dieser Effekt ebenfalls auf, jedoch fast ausschließlich bei den Segmenten, welche die Lücken füllen. Damit kann ausgeschlossen werden, dass die noch vorhandene Wärme im vorher erzeugten Element zu diesen Fehlern führt. Die Ursache für die Aufbaufehler könnte loses, bzw. nur leicht anhaftendes Pulver sein, welches sich bei der Reinigung der Proben im Ultraschallbad löst und Hohlräume bzw. Fehlstellen hinterlässt (vgl. *Abbildung 28*). Auf diesen Pulverresten werden dann die nächsten Körper erzeugt und weisen somit von Anfang an eine nicht ebene Struktur auf, die sich bis nach oben fortpflanzt und das schuppige Oberflächenprofil verursacht. Es wäre jedoch ebenfalls möglich, dass es zu Verwirbelungen im Pulverstrom oder zur vermehrten Anhaftung von Pulver an den bereits aufgebauten Elementen kommt. Es ist somit zu vermuten, dass es mehrere Ursachen dafür gibt.

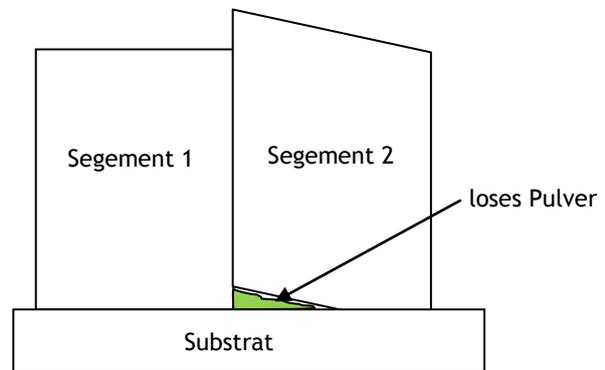


Abbildung 28 mögliche Entstehung der Aufbaufehler

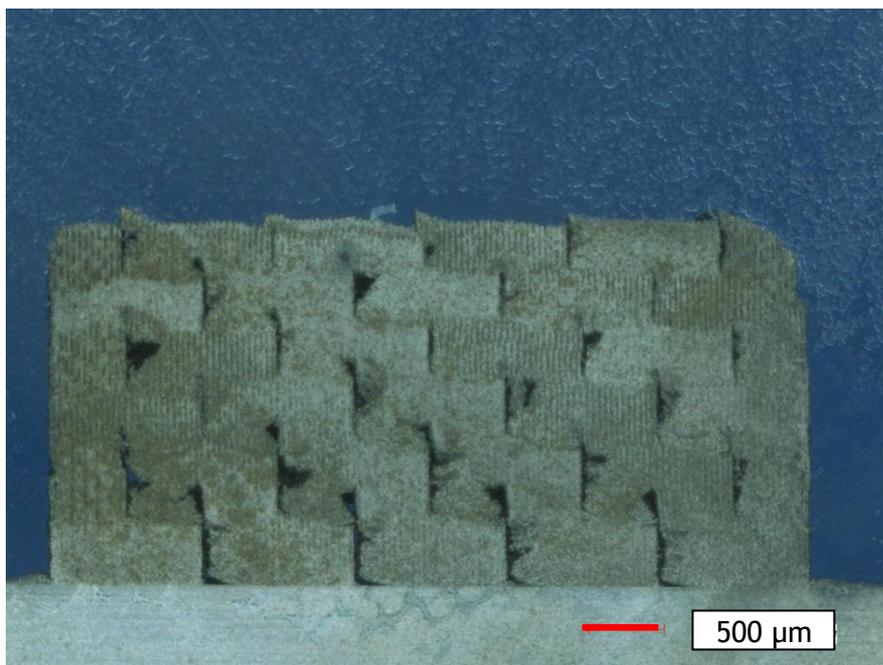


Abbildung 29 6 Segmentschichten, zu je 270 Schichten, jede Schicht ist um ein halbes Segment versetzt

In *Abbildung 29* wird deutlich, dass sich trotz des Versatzes um ein halbes Segment pro Segmentschicht die Fehler fortsetzen.

Bisher wurden die Körper nur durch das Zusammensetzen von Einzelkörpern in einer Linie bzw. Richtung betrachtet. Im Folgenden soll nun der Aufbau in einer zweiten Richtung betrachtet werden. In *Abbildung 30* ist zu erkennen, dass das mittlere Element fehlt. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass es ansonsten zu massiven Aufbaufehlern kommt, da die Aufbaufehler durch Verwirbelung des Pulverstroms und lose Pulveranhaftung Anhaftungen in zwei Richtungen und nicht mehr nur in einer Richtung auftreten. Eine Möglichkeit zur Minimierung dieses Problems wäre es, die Höhe der Segmente zu minimieren, eine andere Möglichkeit wäre es, die Fläche vorher mit höherer Laserleistung zu reinigen. Die Höhe der Segmente zu verringern war jedoch unter den gegebenen Umständen nicht ohne weiteres möglich, da die Aufbauhöhe nur in dem verwendeten Bereich reproduzierbar war. Mittels einer online Prozesskontrolle, welche die Höhe des aufgebauten Volumens prüft und ggf. die Schichtanzahl variiert, könnte dieses Problem jedoch behoben werden. Die Reinigung erwies sich als schwierig, da es nicht möglich war die Pulverreste mittels Laserstrahl so zu entfernen, dass eine ebene Substratoberfläche erhalten bleibt. Es wurde weiterhin versucht, die losen Pulverreste mittels einer extra angebrachten Druckluftdüse zu entfernen. Dabei ergab sich jedoch das Problem, dass bei dem dafür benötigten Volumenstrom auch umliegendes Pulver aufgewirbelt wurde und das Schutzglas der Optik stark mit Pulver verunreinigt wurde. Die Verunreinigungen waren so stark, dass das Schutzglas gereinigt werden musste bevor eine Weiterführung des Bearbeitungsprozesses möglich war. Zur Reinigung müssen jedoch sowohl die Probe als auch die Pulverdüse entfernt werden, was beim Wiedereinbau eine Justage der selbigen zur Folge hat und somit eigentlich nicht praktikabel ist.

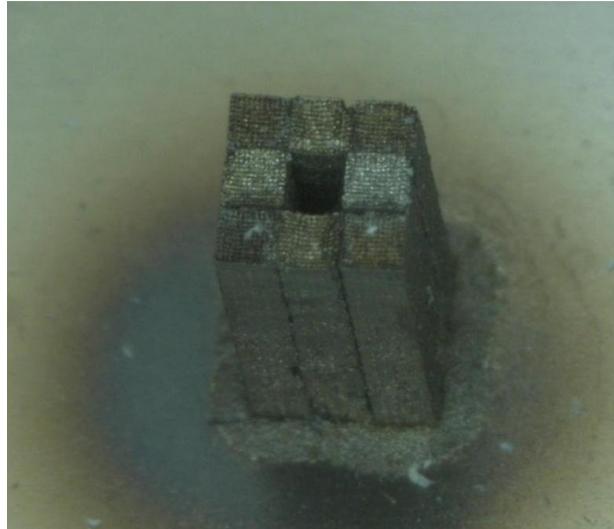


Abbildung 30 Körper zusammengesetzt aus 8 Einzelsegmenten (Kantenlänge 0,5 mm), 5 Segmentschichten zu je 270 Schichten

Zur Reinigung des Substrats mittels Laserstrahl müssten erst geeignete Parameter gefunden werden, dann könnte jedoch mit der gleichen Prozesskontrolle wie für die Aufbauhöhe ein gleichmäßiger Abtrag durchgeführt werden.

9 Versuche zu Gittern

Bei den Versuchen zu verschiedenen Gittern zeigte sich, dass sich diese je nach Linienabstand eher wie Volumenkörper oder eher wie Einzelspuren verhalten. Das heißt, je kleiner der Linienabstand wird, umso gleichmäßiger wird der Aufbau.

Die Gitter werden mit der gleichen Vorgehensweise wie die Quader erzeugt (vgl. Absatz 8). Es hatte sich bereits in den Untersuchungen zum Linienabstand bei Quadern gezeigt, dass sich Gitter ab einem Linienabstand von ca. 90 μm ausbilden.

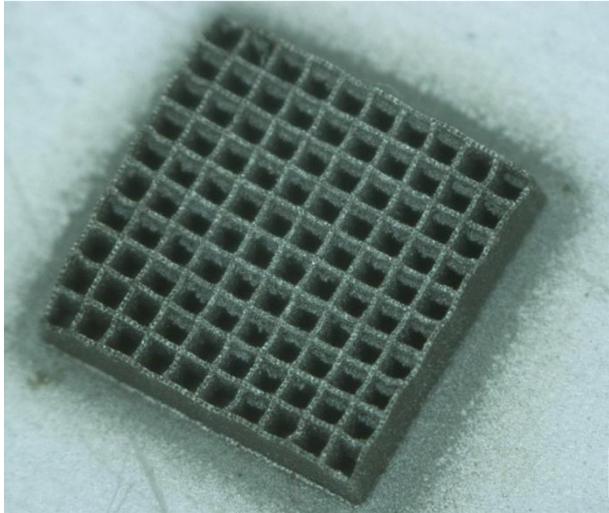


Abbildung 31 Gitter mit 300 μm Linienabstand

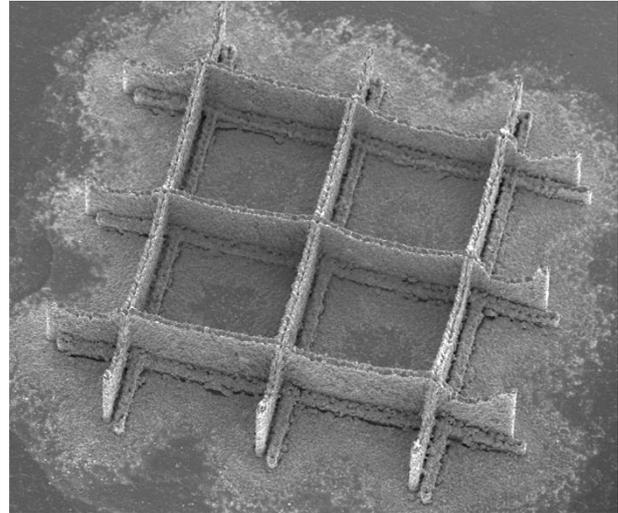


Abbildung 32 Gitter mit 900 μm Linienabstand

Wie in *Abbildung 31* deutlich wird, haben Gitter mit geringem Linienabstand eine relativ gerade Oberfläche. Die Unebenheiten an den Ecken sind damit zu erklären, dass das Gitter eine Grundfläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$ besitzt und sich somit nicht mehr ausschließlich im Pulverstrahlfokus befindet. In *Abbildung 32* ist ein Gitterelement dargestellt, das dazu dienen sollte, Gitter mit einer größeren Grundfläche zu erzeugen. Man kann in diesem Beispiel gut erkennen, dass das Verhalten in diesem Fall sehr ähnlich dem von Einzelspuren ist. Erklärt werden kann das dadurch, dass bei engmaschigeren Gitter der Wärmeabfluss wesentlich besser ist als bei vergleichsweise grobmaschigen Gittern, zum anderen sind auch noch, abhängig von der Grundfläche, die Zeiten unterschiedlich, die zur Erzeugung einer Schicht benötigt werden.

Ein Effekt, der bei allen Gittern auftritt, wenn auch in sehr unterschiedlichem Maße, ist eine Überhöhung an den Kreuzungspunkten der Linien. In *Abbildung 33* ist die Überhöhung der Kreuzungspunkte nur sehr gering, in *Abbildung 32* sind diese teilweise etwas stärker ausgeprägt. Diese Erhöhungen waren zu vermuten, da sich an diesen Stellen die Linien kreuzen und somit sozusagen die doppelte Anzahl an Überfahrten vorliegt und die Wärmeableitung vergleichsweise hoch ist. Da der Abstand der Einzelpulse jedoch im Bereich der Dicke einer Linie ist, kann dieser Aufbau je nach Ort des Pulses unterschiedlich sein.

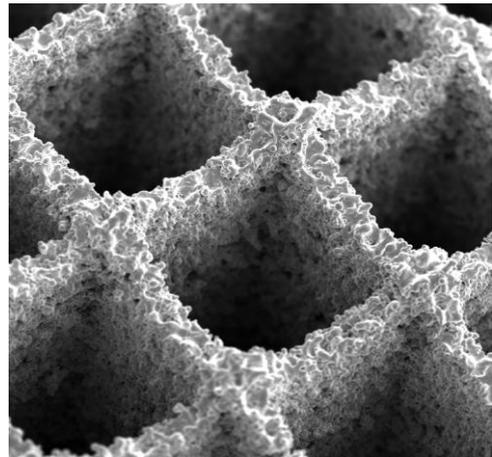


Abbildung 33 Nahaufnahme eines Gitters mit 300 µm Linienabstand

Die Vermutung, dass die Überhöhung der Kreuzungspunkte auch auf die Wärmeleitung zurückzuführen ist, könnte durch Versuche mit thermisch schlecht leitenden, bzw. isolierenden Substraten gestützt werden.

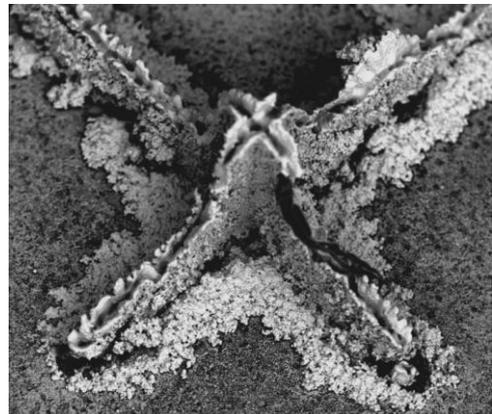


Abbildung 34 Nahaufnahme eines Gitters mit 900 µm Linienabstand, auf thermisch isolierendem Substrat

10 Aufbau von Strukturen auf anderen Substraten

In diesem Abschnitt soll kurz auf Versuche mit thermisch schlecht leitenden bzw. isolierenden und thermisch instabilen Substraten eingegangen werden. In diesen Teil der Arbeit soll nur die prinzipielle Machbarkeit gezeigt werden. Dies ermöglicht jedoch auch einen tieferen Einblick in den Aufbauprozess.

Da die Versuche zu Gittern und Einzelkörpern durchaus erfolgreich waren, wurde versucht, ob es möglich ist, diese auch auf anderen artfremden Materialien zu erzeugen.

Zum einen wurden Versuche mit Al_2O_3 -Keramiken durchgeführt, wobei jedoch keine geeigneten Parameter ermittelt werden konnten. Zum anderen war es jedoch möglich, Strukturen auf dem Thermoplast Polyvinylchlorid, kurz PVC, zu erzeugen. Es konnten dazu sogar die gleichen Parameter genutzt werden wie bei dem Edelstahlsubstrat, was durchaus erstaunlich ist, da die Zersetzungstemperatur um mehr als 1000 K geringer ist als die Schmelztemperatur des Edelstahls. Möglich ist dies dadurch, dass im PVC nur ein kleiner Teil der Laserstrahlung absorbiert wird und somit die Strahlungsenergie hauptsächlich im Pulver absorbiert wird. Es zeigt sich auch, dass der Kunststoff nur oberflächennah angeschmolzen bzw. teilweise aufgeschäumt wurde. Durch die fehlende Wärmeleitung ins Substrat entstehen jedoch relativ unsaubere Spuren (vgl. *Abbildung 35*), an denen auch seitlich Pulver anhaftet. Weiterhin tritt hier die Überhöhung der Kreuzungspunkte der Linien wesentlich deutlicher hervor (vgl. *Abbildung 34/Abbildung 36*), da in diesen Bereichen die Wärme besser abfließen kann.

Diese Versuche zeigen jedoch auch, wie vergleichsweise gering die thermische Belastung bei relativ engmaschigen Gittern ist und dass die thermische Belastung bei Einzelspuren deutlich höher ist, weil die Erzeugung von Einzelspuren nicht möglich war, da diese ins Substrat „eingesunken“ sind.

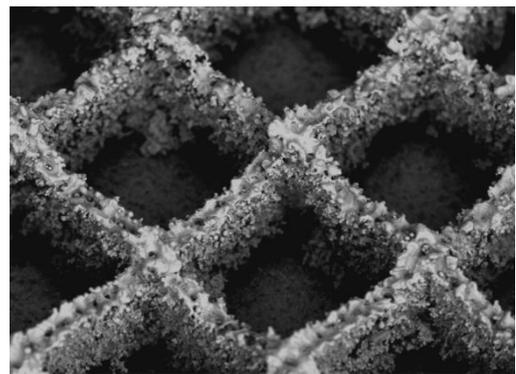


Abbildung 35 Gitter mit 300 µm Linienabstand auf PVC-Substrat (Nahaufnahme)

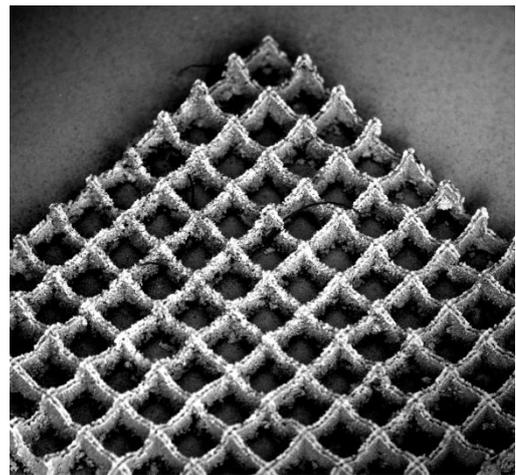


Abbildung 36 Gitter mit 300 µm Linienabstand auf PVC-Substrat

11 Aufbauprozess

Beim Mikropulverauftragschweißen mittels Laser handelt es sich um ein generatives Verfahren. Die ermittelten Parameter sprechen jedoch scheinbar dagegen, denn es werden auf dem Werkstück Intensitäten im Bereich von $6,6 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$ erreicht. Diese Intensitäten ordnet man jedoch im Allgemeinen in den Bereich zwischen Verdampfen und Plasmabildung ein und es konnte auch teilweise die Ausbildung eines Plasmas beobachtet werden (vgl. *Abbildung 37*).

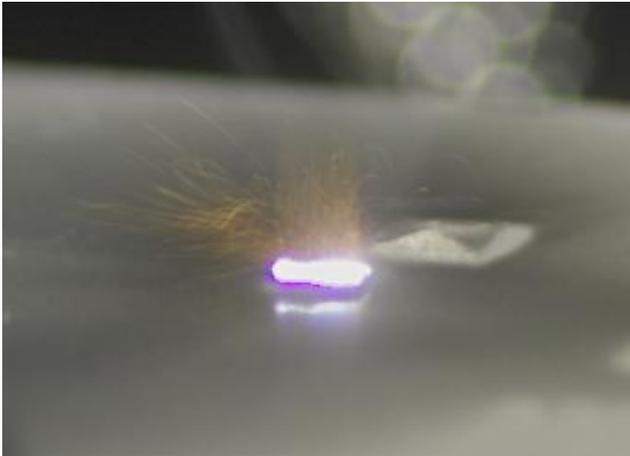


Abbildung 37 Nahaufnahme des Prozesses bei der Erzeugung von Volumenkörpern

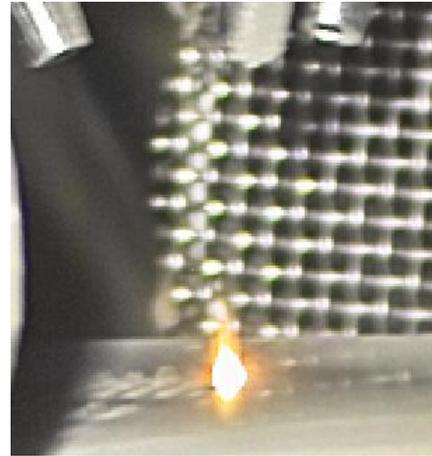


Abbildung 38 Prozessleuchten bei der Erzeugung von Einzelspuren

Die Plasmabildung war jedoch nicht immer vorhanden und deutete vor allem bei Einzelspuren meist auf eine Überhitzung hin, da die Spuren, bei denen diese Erscheinung auftrat, fast immer unkontrolliert wucherten. Die optimale Prozesstemperatur bei Einzelspuren geht mit einem rot-orange-farbigem Leuchten einher (vgl. *Abbildung 38*).

Warum es trotz dieser Intensitäten zu einem Aufbau kommt, lässt sich nur vermuten. Eine mögliche Erklärung wäre, dass der Laserpuls einen Teil des Materials verdampft und einen Teil aufschmilzt. An dem aufgeschmolzenen Bereich kann nun das Pulver anhaften. Wenn der Auftrag größer als der Abtrag ist, kommt es zum Aufbau. Weiterhin muss das Pulver bereits beim Passieren des Laserstrahls aufgeschmolzen werden, da an keiner Probe festgestellt wurde, dass sich noch unaufgeschmolzene Pulverkörner auf der Oberfläche befinden. Es müssten jedoch Pulverkörner vorhanden sein, wenn das Pulver nur in der Schmelzphase haften bliebe, da zumindest die letzte Schicht nicht noch einmal aufgeschmolzen wird. Außerdem wäre die Spur dann mit hoher Wahrscheinlichkeit breiter, da Pulverkörner auch von schräg außen auf der Oberfläche haften bleiben könnten, ähnlich wie bei den Versuchen mit PVC-Substrat. Aber selbst bei einer Höhe von über 1 mm ist dies nicht der Fall. Dies allerdings führt zur nächsten Überlegung. Mit zunehmender Höhe nimmt auch der Fokussdurchmesser zu, was ebenfalls zu einer Verbreiterung der Spur führen müsste. Die Intensität auf der Oberfläche nimmt jedoch mit zunehmender Höhe ab. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass dann nur die Intensitätsspitze zur Bearbeitung genutzt wird, denn bei sehr hohen Spuren kann teilweise festgestellt werden, dass eine Verjüngung der Spur auftritt.

Ebenfalls verschiebt sich das Verhältnis von Abtrag zu Aufbau mit zunehmender Höhe der aufgebauten Struktur, zumindest bei Einzelspuren und Gittern wird dies sichtbar (vgl. *Abbildung 39*). Dieser Effekt konnte jedoch teilweise auch bei Volumenkörpern festgestellt werden (vgl. *Abbildung 40*).

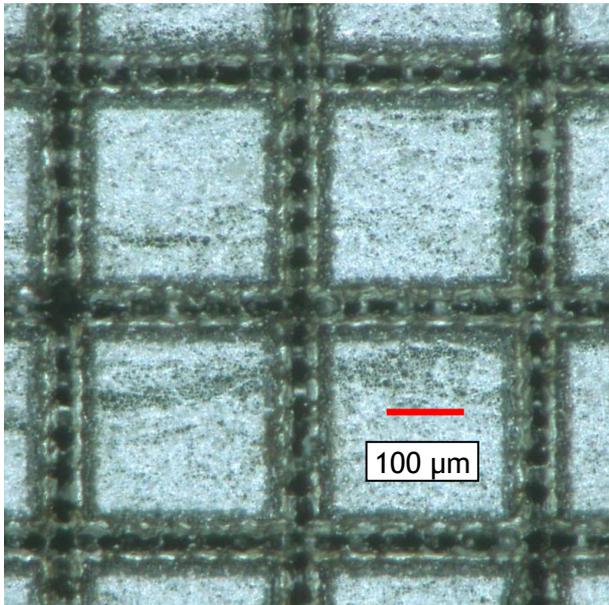


Abbildung 39 Ausschnitt eines Gitters mit wenigen Schichten, Linienabstand 300 µm

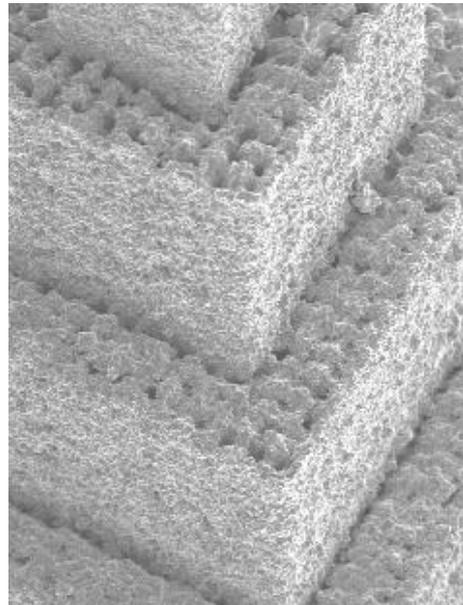


Abbildung 40 Nahaufnahme eines Volumenkörpers, 40 µm Linienabstand

Die in den beiden Abbildungen sichtbaren Löcher in der Oberfläche sind auf den Abtrag durch Laserpulse zurückzuführen, denn deren Abstand passt ideal mit dem Abstand zweier Pulse überein, der aus Pulswiederholfrequenz und Scangeschwindigkeit ermittelt werden kann.

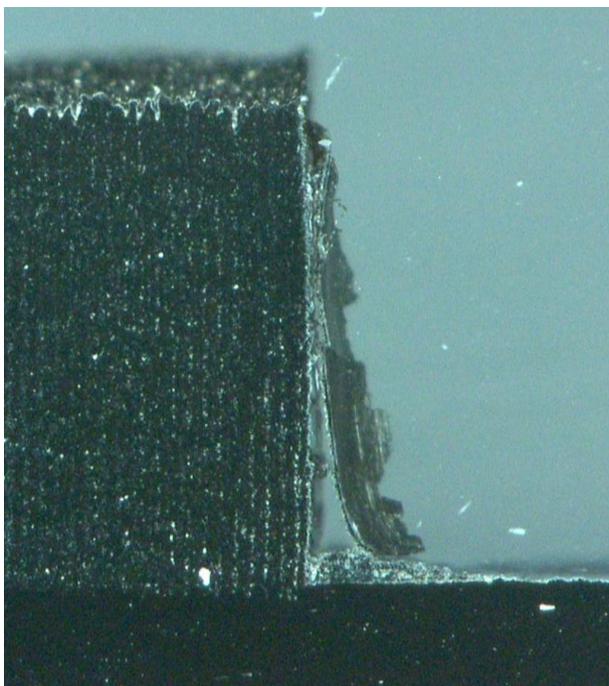


Abbildung 41 vollständige Ablösung der äußersten Spur

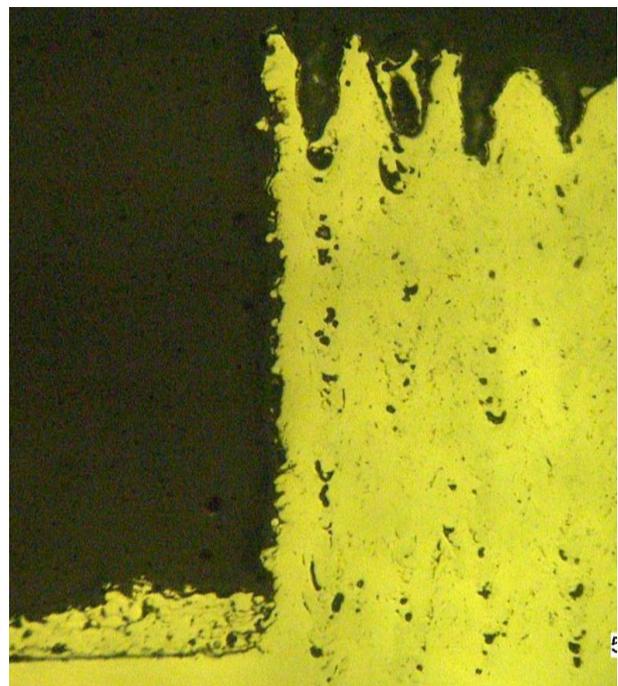


Abbildung 42 teilweise Ablösung bzw. schlechte Anbindung der äußersten Spur

Bei Volumenkörpern ist dieser Abtrag in den Randbereichen sogar so hoch, dass es zur teilweisen oder sogar vollständigen Abspaltung der äußersten Spur kommt (vgl. *Abbildung 41* und *Abbildung 42*). Dabei ist es jedoch so, dass nicht die gesamte Spur abgelöst wird, sondern nur die Hälfte, das heißt in der äußersten Spur wird von der Intensitätsspitze des Laserpulses verhältnismäßig mehr abgetragen, wodurch es zu einer Teilung der Spur kommt. Es bleibt jedoch unklar, warum dieser Effekt nur bei Volumenkörpern auftritt nicht aber bei Einzelspuren. Da es sich jeweils nur um die äußerste Spur handelt, könnte man einen Wärmestau vermuten. Die thermische Belastung von Einzelspuren ist jedoch noch höher. Und daran, dass die äußerste Spur am weitesten vom Mittelpunkt des Pulverfokus entfernt ist, kann es ebenfalls nicht liegen, da der Effekt auch bei Einzelspuren, die die doppelte Länge des Pulverfokusdurchmessers besitzen, nicht auftritt.

12 Schlussteil

12.1 Erreichte Ziele

In dieser Arbeit wurden grundlegende Untersuchungen zur Erzeugung von verschiedenen Strukturen mit dem Mikropulverauftragschweißen mittels Laser durchgeführt. Es wurde somit zwar kein konkretes Ziel erreicht, es konnte jedoch gezeigt werden, dass es möglich ist, sowohl Einzelspuren im Bereich des Fokusbereichs des Laserstrahls als auch Spuren mit über die Höhe abnehmender Querschnittsbreite, Volumenkörper und Gitter zu erzeugen.

Weiterhin wurden der Aufbauprozess genauer untersucht sowie Vermutungen dazu geäußert, die durch Versuche gestützt bzw. daraus abgeleitet wurden.

12.2 Zusammenfassung

Die Erzeugung von Einzelspuren erwies sich aufgrund von thermischen Gegebenheiten als schwierig. Dabei bezogen sich die Probleme nicht auf die Erzeugung an sich, sondern vor allem auf die Reproduzierbarkeit und die Maßhaltigkeit bzw. die erzeugbaren Oberflächenformen. Diese Probleme sind nicht zuletzt auf die Ungenauigkeiten bei der Pulverförderung zurückzuführen. Es ist jedoch auch so, dass die thermischen Belastungen bei Einzelspuren wesentlich höher sind als bei Körpern mit größeren Strukturen, wodurch diese wesentlich anfälliger auf die Schwankungen im Pulverstrom sind. Durch die Anfälligkeit der Spuren auf diese Schwankungen ist es nur schwer möglich, zusammengesetzte Spuren zu erzeugen, da zur Erzeugung dieser ein reproduzierbarer Prozess notwendig wäre.

Die Erzeugung von Spuren mit über die Höhe abnehmender Querschnittsbreite weist vergleichbare Probleme auf. Dazu kommt, dass die Spuren bei unterschiedlicher Spurbhöhe auch ein unterschiedliches Aufbauverhalten zeigen, wodurch die konstante Abnahme der Breite über die Höhe keinen einfachen Zusammenhang zeigt, sondern sich die einzelnen Schichten gegenseitig beeinflussen. Es konnte jedoch ein Parametersatz gefunden werden, bei dem die Abnahme gleichmäßig stattfindet.

Bei der Erzeugung von Quadern konnten sehr gute Ergebnisse erzielt werden, vor allem im Bereich zwischen 0,5 und 1 mm Kantenlänge der quadratischen Grundfläche. Es hat sich aber auch gezeigt, dass der Wärmeabfluss durch das aufgebaute Volumen so gut ist, dass das sich ausbildende Temperaturfeld kaum einen Einfluss hat, wodurch auch evtl. auftretende Pulverschwankungen keine große Bedeutung haben. Bei den Versuchen mit Fokusbildung konnten ebenfalls gute Ergebnisse erzielt werden. Es wurde gezeigt, dass es einen Bereich gibt, in dem der Prozess so stabil ist, dass der Fokus 20mal nachgeführt werden konnte, ohne dass der Prozess abgerissen ist.

Beim Aufbau von größeren Körpern aus kleinen Volumenkörpern traten jedoch Probleme auf, da neben den bereits aufgebauten Körpern immer ein wenig Pulver anhaftet, was jedoch den Aufbauprozess behindert. Außerdem kommt es aufgrund der bereits aufgebauten Körper zu Abschattungen des Pulverstroms und Verwirbelungen. Eine Lösung wäre, die Schichtdicke zu reduzieren, was den Aufbauprozess jedoch wieder sehr instabil macht. Eine Reinigung des Bereiches hat sich auch als schwierig erwiesen.

Der Aufbau von Gittern konnte ebenfalls durchaus zufriedenstellende Ergebnisse liefern. Es konnte zumindest gezeigt werden, dass vor allem engmaschige Gitter gut aufgebaut werden konnte.

12.3 Ausblick

In dem Prozess steckt ein großes Potential, vor allem aufgrund der Tatsache, dass bei verschiedenen Strukturen die thermische Belastung des Substrates so gering ist, dass diese sogar auf Polyvinylchlorid (PVC) aufgebaut werden konnten. Somit könnten sich durchaus Einsatzmöglichkeiten bei Verfahren ergeben, bei denen das Substrat keiner großen thermischen Belastung ausgesetzt werden darf.

Wenn der Aufbau von Einzelspuren bzw. großmaschigen Gittern genauer untersucht werden soll, sollte man überlegen, ob man das Förderprinzip, also den Pulverförderer, auswechselt um noch einmal grundlegende Versuche zur Förderrate zu machen, da der Pulverförderer zurzeit an seiner unteren Grenze arbeitet und dadurch nicht konstant fördert.

Es sollte jedoch auch versucht werden den Prozess genau zu verstehen und evtl. sogar simulieren zu können. Dazu bedarf es jedoch noch einiger Forschung. Laut derzeitigem Stand soll das Verfahren noch genauer im Rahmen einer Master-Arbeit und eines Forschungs- und Entwicklungsprojekts untersucht werden.

Anhang

Zusammengesetzte Spuren



Versuche mit Fokuspachführung

5 x 270 Schichten, jeweils mit Fokuspachführung und ein Körper nach dem anderen

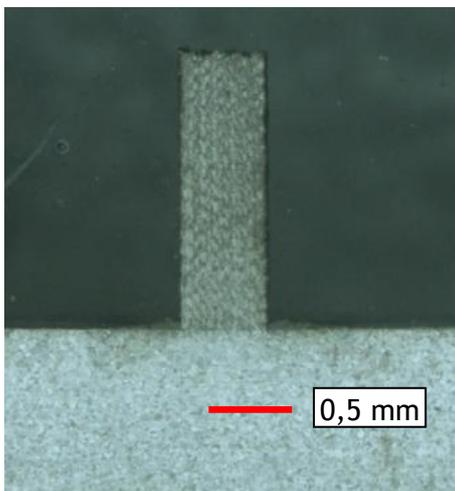


Abbildung 43 Grundfläche 0,5 x 0,5 mm²
Höhe 1,79 mm

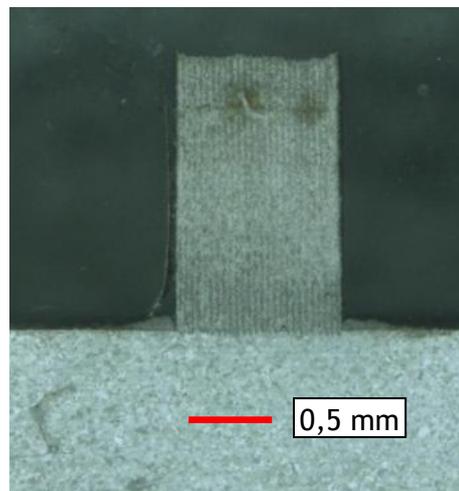


Abbildung 44 Grundfläche 1 x 1 mm²
Höhe 1,75 mm

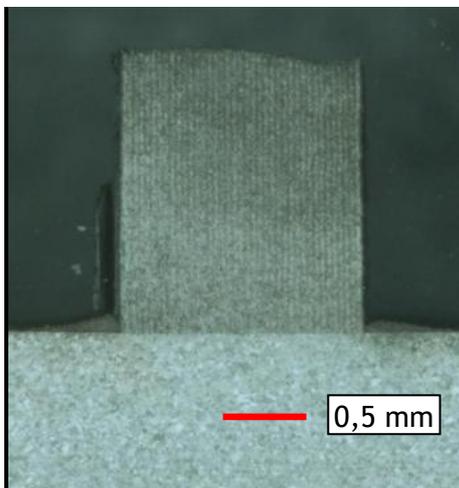


Abbildung 45 Grundfläche 1,5x1,5 mm²
Höhe 1,8 mm

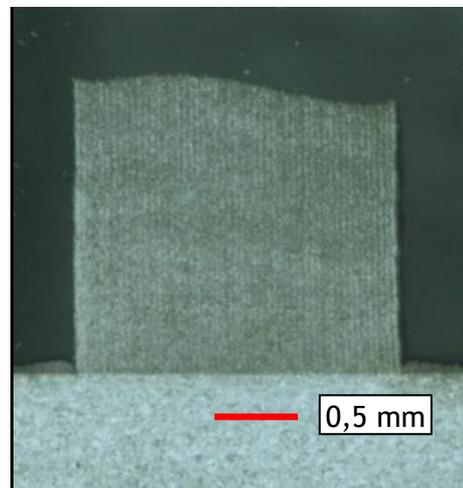


Abbildung 46 Grundfläche 2 x 2 mm²
Höhe 1,84 mm

5 x 270 Schichten, jeweils mit Fokuspachführung und pro Körper eine Schicht, dann erst Fokuspachführung und nächster Schicht

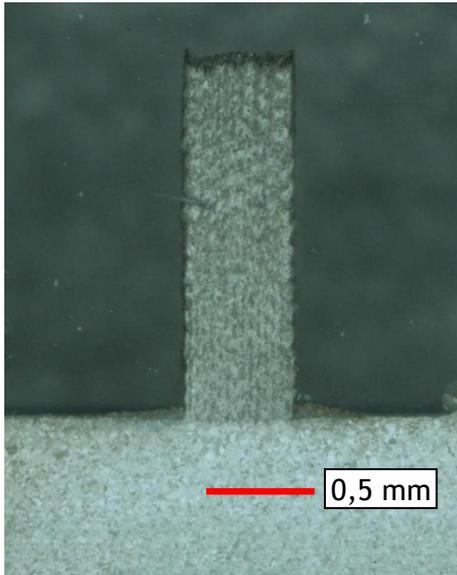


Abbildung 47 Grundfläche 0,5 x 0,5 mm²
Höhe 1,87 mm

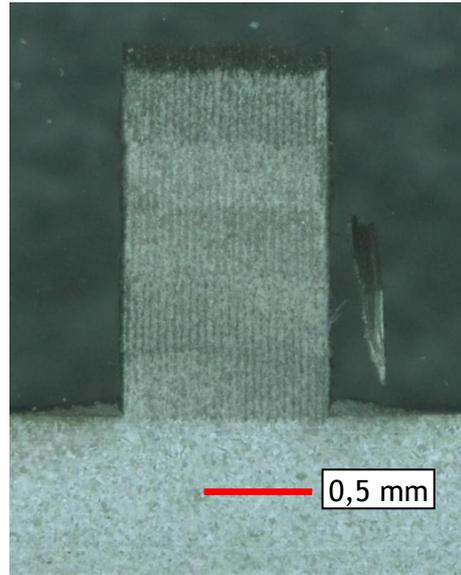


Abbildung 48 Grundfläche 1 x 1 mm²
Höhe 1,91 mm

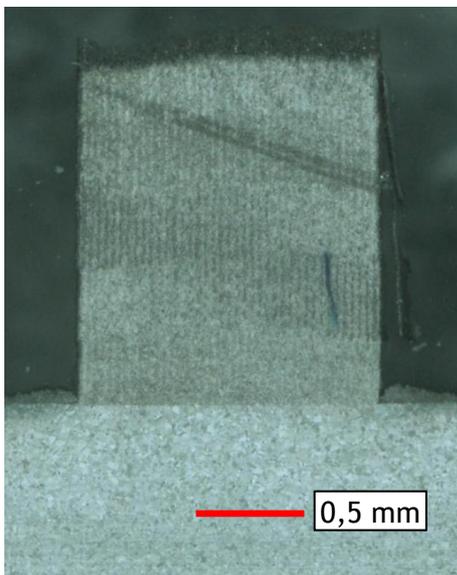


Abbildung 49 Grundfläche 1,5x1,5 mm²
Höhe 1,93 mm

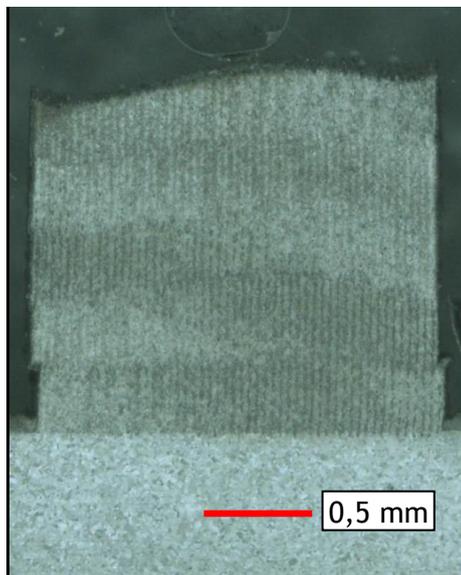


Abbildung 50 Grundfläche 2 x 2 mm²
Höhe 1,84 mm

Versuche zu Zusammengesetzten Volumenkörpern

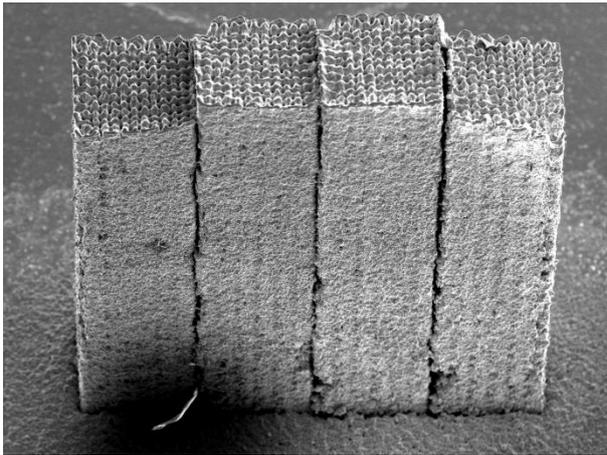


Abbildung 51, kein Überlapp

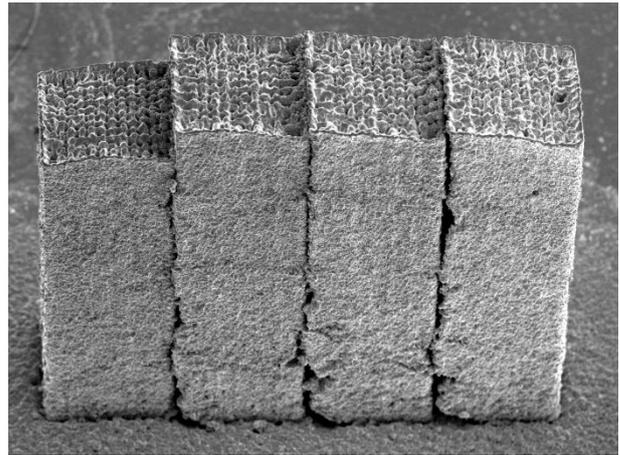


Abbildung 52, 5 µm Überlapp

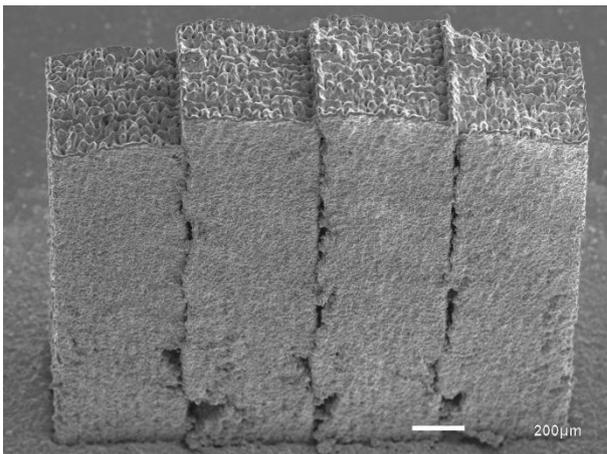


Abbildung 53, 10 µm Überlapp

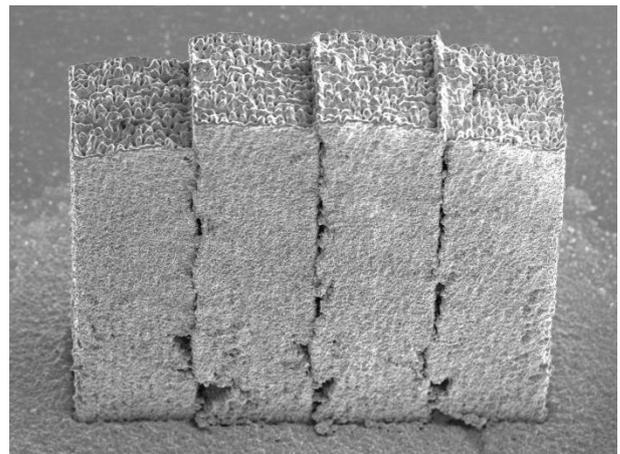


Abbildung 54, 15 µm Überlapp

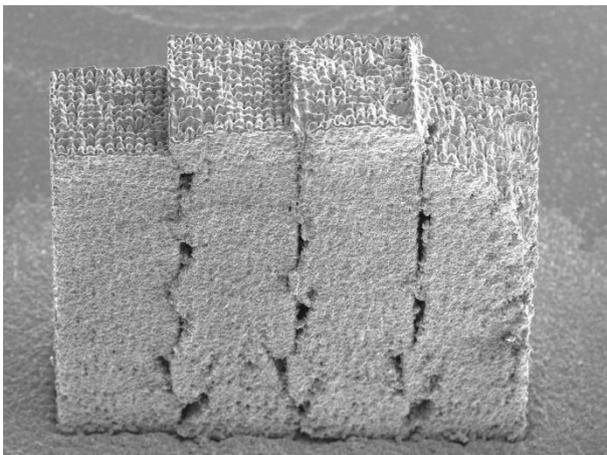


Abbildung 55, 20 µm Überlapp

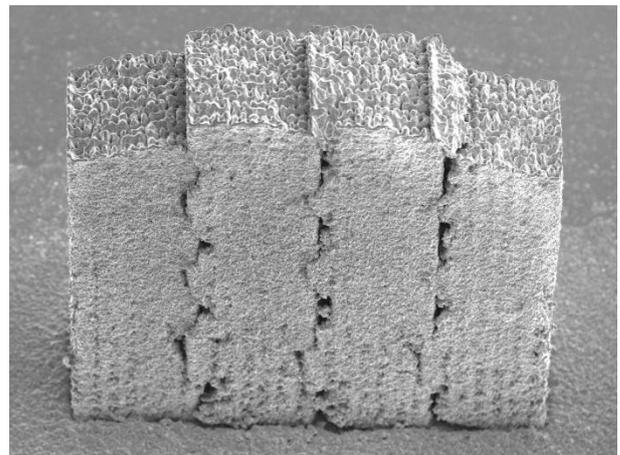


Abbildung 56, 25 µm Überlapp

Literaturverzeichnis

- [1] Heinrich, Marcel: Grundlegende Untersuchungen zum Mikropulverauftragschweißen mittels gepulster Faserlaserstrahlung. 2008 ; Diplomarbeit Fachbereich MPI, Hochschule Mittweida
- [2] Erler, Martin: Weiterführende Untersuchungen zum Mikropulverauftragschweißen mittels gepulster Faserlaserstrahlung. 2009 ; Diplomarbeit Fachbereich MPI, Hochschule Mittweida
- [3] Installation Guide and User Manual - Pulsed Fibre Laser and Laser Controller SP 20; S. 124 f; SPI Lasers Uk, Ltd. 2006
- [4] Bedienungsanleitung Pulverförderer CPF 1 mit Container- und Pulvergasheizung; Baujahr 2006; Maschinenummer: 67110607; Thermico GmbH & Co.KG; Dortmund
- [5] Scanlab (5/2010), Datenblatt, high speed in pocket size, Typenabhängige Spezifikation
- [6] Stäubli (5/2006), Roboterarm Baureihe TX60, Betriebsanleitung
- [7] Exner, Horst: Begleitheft zur Vorlesung Lasertechnik für den Studiengang Physikalische Technik. März 2009, Hochschule Mittweida
- [8] Kuchling, Horst: Taschenbuch der Physik, 19. Auflage, 2007, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag München

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Mittweida, den 13.12.2010

Tommy Knebel