

Inhalt

Inhalt I

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Einleitung	9
2 Stand der Technik	11
3 Theoretische Grundlagen	13
3.1 <i>Übersicht der Laserstrahleigenschaften</i>	<i>13</i>
3.2 <i>Räumliche Strahlverteilung.....</i>	<i>14</i>
3.2.1 Intensität.....	14
3.2.2 Strahlqualität	17
3.3 <i>Streckenergie</i>	<i>20</i>
3.4 <i>Messprinzip</i>	<i>20</i>
3.4.1 Fokusdurchmesser und Strahlverteilung	20
3.4.2 Zeitliche Pulsform.....	23
3.5 <i>Statische Versuchsplanung.....</i>	<i>24</i>
3.6 <i>Versuchsaufbau</i>	<i>25</i>
3.7 <i>Parametervariationen</i>	<i>27</i>
4 Untersuchungsergebnisse	27

4.1	<i>Pulsfrequenz, Pulsdauer und Pulsleistung</i>	27
4.1.1	Blechdicke 0,5 mm.....	28
4.1.2	Blechdicke 1,0 mm.....	31
4.1.3	Blechdicke 1,5 mm.....	32
4.2	<i>Fokuslage</i>	33
4.2.1	Blechdicke 0,5mm.....	33
4.2.2	Blechdicke 1,0mm.....	34
4.2.3	Blechdicke 1,5mm.....	35
4.3	<i>Düsendurchmesser und Düsenabstand</i>	36
4.3.1	Blechdicke 0,5mm.....	36
4.3.2	Blechdicke 1,0mm.....	38
4.3.3	Blechdicke 1,5 mm.....	39
5	Zusammenfassung	41
6	Demonstrator Struktur	42
7	Bewertung und Ausblick	47
8	Danksagung	48
9	Literatur	49
1	Selbstständigkeitserklärung	L

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Prinzip des Laserstrahlschneidens.....	9
Abbildung 2 Typische Grundanordnungen von Faserlasern	12
Abbildung 3 Wichtige Stahlparameter	14
Abbildung 4 Strahlparameter.....	15
Abbildung 5 ideale theoretische Strahlverteilung (TEM ₀₀ -Mode)	17
Abbildung 6 Divergenzwinkel eines realen Laserstrahls und idealen GAUSS-Strahls.....	18
Abbildung 7 Darstellung der Parameter des Strahles	19
Abbildung 8 Darstellung des Aufbaus eines MicroSpotMonitors	21
Abbildung 9 Kaustik Darstellung nach einer Faserübertragung und Fokussieroptik. 2D-Darstellung mit signifikanten Strahlparametern	21
Abbildung 10 a)3D-Höhendarstellung der Schnittprofile. b) 3D-Strahlprofil für 72µm Fokusedurchmesser und 127 mm Fokussierbrennweite.....	22
Abbildung 11 prinzipieller Aufbau zur Messung des zeitlichen Pulsverlauf	23
Abbildung 12 Zeitliche Rechteck Pulsform mit $P= 1 \text{ KW}$, $f=100 \text{ Hz}$ und Pulsdauer $=0,5 \text{ ms}$	23
Abbildung 13 Versuchsetappen der Statistischen Versuchsplanung	24
Abbildung 14 Statistische Modell	24
Abbildung 15 Normalverteilung der Grate in der Blechdicke 0,5mm 1,0mm 1,5mm	25
Abbildung 16 Laserschneidanlage der Untersuchung	26

Abbildung 17 verschiedene Durchmesser Größe Models.....	26
Abbildung 18 Pulsdauer=0,5 ms Anzahl der Grate in verschiedene Parameters .	30
Abbildung 19 Pulsdauer=1.0 ms Anzahl der Grate in verschiedene Parameters .	30
Abbildung 20 Pulsdauer=0,5 ms Anzahl der Grate in verschiedene Parameters .	31
Abbildung 21 Pulsdauer=1.0 ms Anzahl der Grate in verschiedene Parameters .	31
Abbildung 22 Pulsdauer=0,5 ms Anzahl der Grate in verschiedene Parameters .	32
Abbildung 23 Pulsdauer=1,0 ms Anzahl der Grate in verschiedene Parameters .	32
Abbildung 24 Unterschiedliche Fokusslage vergleichen die unten Grate Höhe.....	33
Abbildung 25 Unterschiedliche Fokusslage vergleichen die unten Grate Höhe.....	34
Abbildung 26 Unterschiedliche Fokusslage vergleichen die unten Grate Höhe.....	35
Abbildung 27 Unten Grate Höhe Vergleichen in Verschiedene Düsendurchmesser	36
Abbildung 28 Untenseiten Grate Hohe Vergleichen mit unterschiedlicher Düsenabstand.....	37
Abbildung 29 Untenseiten Grate Höhe Vergleichen in Verschiedene Düsendurchmesser.....	38
Abbildung 30 Untenseiten Grate Hohe Vergleichen mit unterschiedlicher Düsenabstand.....	39
Abbildung 31 Untenseiten Grate Höhe Vergleichen in Verschiedene Düsendurchmesser.....	39
Abbildung 32 Untenseiten Grate Hohe Vergleichen mit unterschiedlicher Düsenabstand.....	40
Abbildung 33 Skizze der Demonstrator Struktur der Blechdicke 0,5mm.....	42

Abbildung 34 Blechdicke 0,5mm a) 10 bar N ₂ -Schmelzschnitten. b) 5 bar N ₂ -Schmelzschnitten. c) 4 bar O ₂ -Brennschnitten.	45
Abbildung 35 Kreisdurchmesser 2 mm a) N ₂ Faserlaser Schmelzschnitten b) N ₂ Nd: YAG-Laser Brennschnitten c) O ₂ Nd: YAG-Laser Brennschnitten	45
Abbildung 36 Stern Struktur Höhe 0,5mm a) N ₂ Faserlaser Schmelzschnitten b) N ₂ Nd: YAG-Laser Brennschnitten c) O ₂ Nd: YAG-Laser Brennschnitten.....	46
Abbildung 37 Zick-Zack-Linien Maßstab 200µm a) N ₂ Faserlaser Schmelzschnitten b) N ₂ Nd: YAG-Laser Brennschnitten c) O ₂ Nd: YAG-Laser Brennschnitten	46

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Klassifizierung der Kantenqualität	29
Tabelle 2 Verschiedene Schnittverfahren Bedingungen	43

Abkürzungsverzeichnis

I	Intensität	$\frac{W}{cm^2}$
P	Pulsleistung	KW
f	Pulsfrequenz	Hz
τ	Pulsdauer	ms
w_0	Fokusradius	mm
λ	Wellenlänge	μm
Θ	Divergenzwinkel	mrad
t	Zeit	s
A	Fläche	m ²
M ²	Beugungsmaßzahl	
β	Winkel	°
s	Pulsabstand	μm
v	Schnittgeschwindigkeit	mm/min
SPP	Strahlparameterprodukt	mm·mrad
z	Abstand von der Strahlmitte	mm
r	Abstand zur Strahlachse	mm
Q_s	Streckenenergie	KJ/mm
p_m	Mittlere Leistung	KW

p_{max}

Spitze Leistung

KW

 τ_H

Pulsdauer

ms

1 Einleitung

Die Wort „Laser“ war die Kurze Zeichen auf die Englisch Wörter „ **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation“. In den letzten Jahren hat in der industriellen Fertigung der Einsatz von Laserprozessen, wie Schneiden, Bohren oder Schweißen, immer mehr zugenommen. Für eine wirtschaftliche Fertigung war es notwendig, schnell, präzise und flexibel zu arbeiten. Mit dem Prozess des Laserschneidens können verschiedene Materialien wie Metalle, Kunststoffe, Gläser und Keramiken mit hoher Qualität und flexibel bearbeitet werden. In Abbildung 1 war der Schneidprozess dargestellt.

Mit diesem genauen Trennverfahren könnten auch die Möglichkeit Kunststoffe, Verbundwerkstoffe, Gläser und Keramiken sehr flexible und mit hoher Qualität bearbeiten.

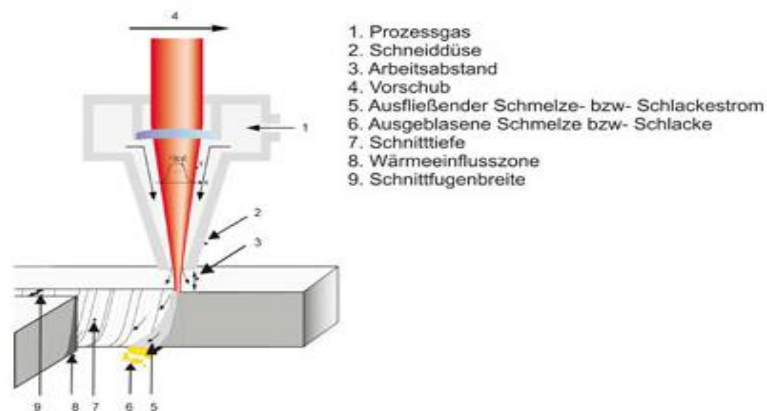


Abbildung 1 Prinzip des Laserstrahlschneidens

Das Laserstrahlschneiden bietet folgende Vorteile:

- Die Wärmebelastung des Werkstücks war sehr gering.
- Der Schnittspalt zeichnet sich durch eine gleichmäßige Schnittfugengeometrie aus.
- Die Rauheit der Schnittflächen war gering

- Die Nachbearbeitung der Schnittkanten war für Laser-Schneidanwendungen nicht erforderlich.
- Der Prozess war gut automatisierbar

Das Laserinstitut Mittelsachsen e.V war ein Institut der Hochschule Mittweida und bearbeitet vorrangig Forschungs- und Entwicklungsthemen sowie Laserapplikation für die Industrie. Die Forschung zum Einsatz der Lasertechnik in der Materialbearbeitung hat am Laserinstitut der Hochschule Mittweida eine fast 40 jährige Tradition.

In dieser Bachelorarbeit wird das Schneiden mit einer gepulsten Laserquelle untersucht.

2 Stand der Technik

In der Industrie wird das Laserschneiden immer mehr eingesetzt. Die Gründe dafür sind hohe Schnittgeschwindigkeiten, eine hohe Präzision und geringe Fertigungskosten. Der sparsame Umgang mit Ressourcen führt zu einer geringeren Umweltbelastung. Im diesem Abschnitt werden die wichtigsten Lasergeräte für das Schneiden vorgestellt. CO₂-Laser: die hauptsächliche Vorteile sind hohen Laserleistung im allgemeinen zwischen 2000-4000W, Es kann die Dicke weniger als 25 mm die Full-Size-Edelstahl, Kohlenstoffstahl und andere Materialien und weniger als 4 mm Aluminium und weniger als 60 mm Acrylplatte, Holzplatte, PVC-Platte schneiden. Es kann auch bei den dünnen Blechen hoch Geschwindigkeit schneiden. CO₂-Laser war ein kontinuierliche Laser. Die glatte Wirkung dem Schneidabschnitt war Best in drei-Arten. Aber meisten der Maschinen sind teuer. Die Zubehör, Wartungskosten und Betriebskosten sind so hoch. Sie sind die hauptsächliche Nachteile für die CO₂-Laser Schneidmaschinen.

Zu den wichtigsten FK-Lasern zählt der Nd:YAG-LASER. Nd:YAG-LASER Können auf mehreren Wellenlängen bzw. Linien ablassen, jedoch liegt der stärkste und am häufigsten genutzte Übergang bei 1,06 µm. Die wichtigsten Vorteile der Festkörperlaser-Maschinen: Es kann die Aluminium, Kupfer und den meisten Nichteisenmetall durchschneiden, welche andere Lasermaschinen nicht durchschneiden kann. Maschinen war billig, geringe Kosten, einfache Wartung, niedrige Zubehör Preise und niedrige Wartungskosten. Arbeitnehmer benötigt keine mehrer Fachkenntnisse. Hauptsächliche Nachteile sind, es kann nur die Dicke dem Material kleiner als 8mm schneiden und die Schneideffizienz sehr niedrig sein. Die hauptsächlichen Anwenden sind KUM(kleine oder mittelständische Unternehmen). Für ihre eigenen Zwecke und Verarbeitungsanforderungen sind nicht besonders hoch in den meisten der Blechfertigung, Elektronikfertigung, Geschirr Herstellung, Dekoration und Werbung. Festkörperlaser-Maschinen werden sukzessiv den Linear Schneid, CNC, Wasserstrahlschneiden, Low-Power-Plasma ersetzen.

In den letzten Jahren haben die Faserlaser (Abbildung 2) eine immer größere Bedeutung erlangt. Die wichtigsten Vorteile der Faserlaserschneidmaschine: höherer Wirkungsgrad. Das bedeutet, es wird mehr elektrische Energie Laserleistung umwandelt. Es könnten Edelstahlplatten bis zu 12 mm Blechstärke durchgeschnitten werden. Es war die schnellste Laser-Maschine in 3-Arten. Spaltbreite sind kleine, es gibt gute Qualität der Fokusleck. Es könnte zum Feinschneiden anwenden. Beim Schneiden verbraucht mehr Prozessgas (sondern beim Stickstoff Schneiden).

Faserlaser werden in Zukunft die meisten Anwendungen der CO₂-Laser ersetzen

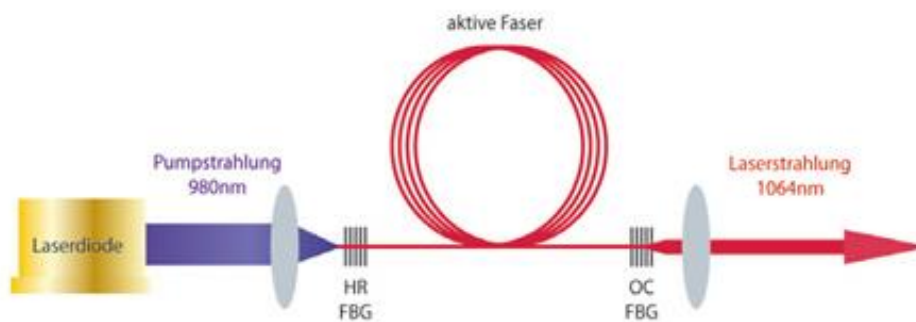


Abbildung 2 Typische Grundanordnungen von Faserlasern

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Übersicht der Laserstrahleigenschaften

Die Eigenschaften der Laserstrahlung unterschieden sich in räumliche und zeitliche Merkmale.

Laserstrahlen besitzen räumliche und zeitliche Strahleigenschaften. Zu den räumlichen Strahleigenschaften gehören:

- Strahlparameterprodukt, Strahlqualität, Strahlkaustik, Rayleigh-Länge
- Radiale und axiale Beschreibung der Strahlausbreitung
- Intensitätsverteilung

Räumliche Eigenschaften verteilte die axiale Beschreibung der Strahlausbreitung und radiale Beschreibung. Axiale Parameter Beschreibung (Strahlparameterprodukt, Strahlqualität, Strahlkaustik, Rayleigh-länge) und radiale Beschreibung (Intensitätsverteilung und Strahlradiusdefinition). Zeitliche Eigenschaften zeigte nur die Strahlkenngrößen (Pulshalbwertsbreite, Pulsform).

Zeitliche Strahleigenschaften sind

- Pulshalbwertsbreite, Pulsform

In Abbildung 3 stellte in dem Laser die Wichtige Strahlparameter der Positionen dar.

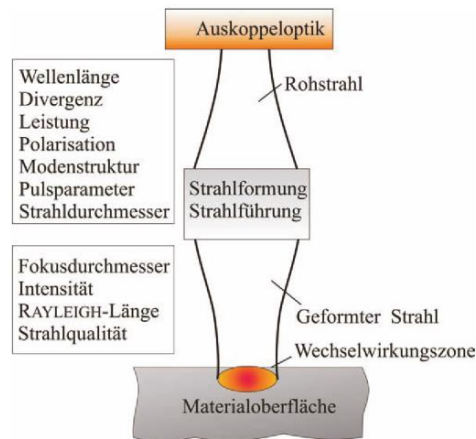


Abbildung 3 Wichtige Stahlparameter

3.2 Räumliche Strahlverteilung

3.2.1 Intensität

Intensität war eine wichtige Größe der Laserstrahlung für das Laserschneiden. Es gab das Verhältnis aus Leistung pro Fläche A an. Diese Formel 1 galt für normalerweise gesamte Laser Intensität.

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{\pi \cdot \omega^2} \quad \text{Formel 1}$$

(Nur für kreisförmige Strahlquerschnitte)

Laserstrahlung wurde in einem Resonator durch stimulierte Emission erzeugt (Verstärkerwirkung). Durch Reflektion zwischen zwei Spiegeln durchlaufen die Photonen den Resonator mehrfach. Ein Spiegel war teildurchlässig, so dass die für die Bearbeitung nutzbare Strahlung ausgekoppelt werden konnte.

Die Intensitätsverteilung des Lasers könnte durch die transversalen Elektromagnetischen Moden (TEM) dargestellt werden. Normalerweise wurde die typische homogene ausgeprägte Mode TEM_{00} dargestellt. Diese Mode wird auch Grundmode oder GAUSS-mode genannt. Durch eine interessante Gleichung war Gaußscher

Laserstrahl = Perfekte Laserstrahl = Grundmode = TEM_{00} . Das war die Ursache, wieso nennt man diese Mode war eine typische homogene ausgeprägte Mode. Für diese ideale typische Mode war natürlich der Beugungsmaßzahl $M^2=1$.

Unterschiedliche Schwingungsformen werden Moden genannt.

Für die Intensität wurde von 2 Parametern beeinflusst. In der Abbildung 4 zeigte die deutliche Strahlparameter.

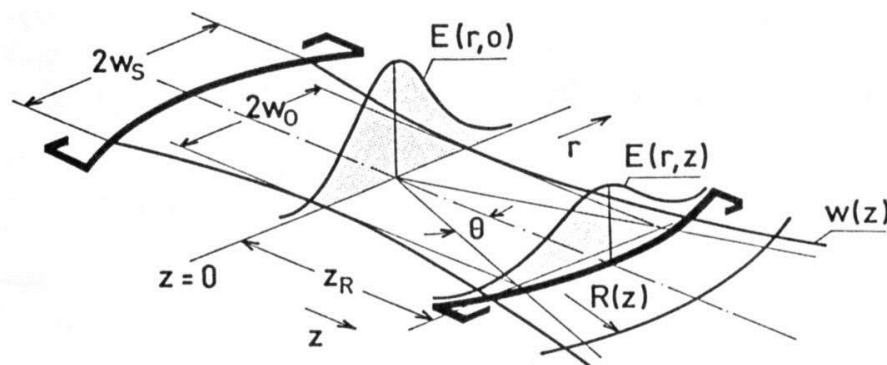


Abbildung 4 Strahlparameter

z : Abstand von der Strahltaile

r : Abstand zur Strahlachse

Verlauf der Strahlintensität in radialer Richtung $I(r) \left[\frac{kw}{cm^2} \right]$.

$$I(r) = I_{max} \cdot e^{-2 \cdot \frac{r^2}{w^2}}$$

Formel 2

Mit I_{max} : Intensitätsmaximum bei $r=0$

Strahlintensität fällt bei $r = w$ auf $1/e^2$

Die Intensität verkleinert mit größerem Abstand r zur Strahlachse.

Verlauf der Strahlintensität in axialer Richtung $I(z)$ [$\frac{kw}{cm^2}$].

$$I(z) = I_{max} \cdot e^{-2 \cdot \frac{w_0^2}{w(z)^2}} \quad \text{Formel 3}$$

Durch Formel 3 könnten wir noch etwas finden. Die Intensität verkleinert auch mit größerem Abstand z von der Strahltaile.

Mit Wachsender Entfernung von der Strahltaile in Z-Richtung vergrößert sich der Strahlradius.

$$W(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left[\frac{z}{z_R}\right]^2} \quad \text{Formel 4}$$

Der Strahlradius war abhängig von dem z -Wert und Divergenzwinkel. Diese beiden Formeln sind nur für den idealen Strahl gültig.

$$W(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left[\frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot w_0^2}\right]^2} \quad \text{Formel 5}$$

bzw.

$$W(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{\Theta^2 \cdot z^2}{w_0^2}} \quad \text{Formel 6}$$

Damit ergibt sich für die Beschreibung der Intensität in Abhängigkeit von r und z folgende Formel:

$$I(r, z) = I_{max} \cdot \frac{w_0^2}{w(z)^2} \cdot e^{-2 \cdot \frac{r^2}{w^2}} \quad \text{Formel 7}$$

$$I(r, z) = I_{max} \cdot \frac{1}{1 + \left[\frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot w_0^2} \right]^2} \cdot e^{-2 \cdot \frac{r^2}{w^2}} \quad \text{Formel 8}$$

Abbildung 5 stellt die radialsymmetrisch theoretische Intensitätsverteilung dar.

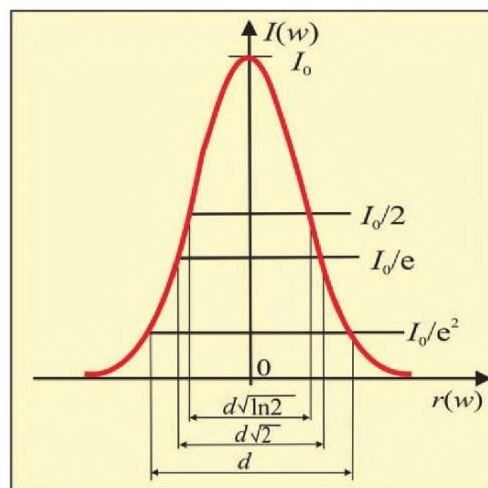


Abbildung 5 ideale theoretische Strahlverteilung (TEM₀₀-Mode)

3.2.2 Strahlqualität

Die Laserstrahlen wurden mit idealen und realen Strahlparametern verglichen, um die Strahlqualitäten zu bestimmen. Ein realer Laserstrahl weicht von idealen GAUSS-Strahl ab. Obwohl der Strahltaillendurchmesser gleich von realer- und ideale Laserstrahlen waren, war die Divergenzwinkel der realen Laserstrahlen größer als GAUSS-Strahl. In Abbildung 6 zeigte diese Verhältnis zwischen Tailendurchmesser und Divergenzwinkel.

In Abbildung 6 zu sehen, dass bei gleichem Strahldurchmesser der reale Laserstrahl einen größeren Divergenzwinkel hat.

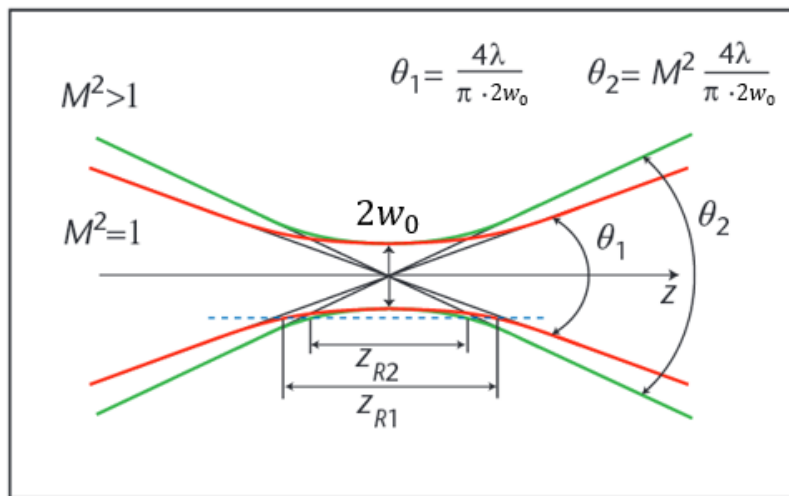


Abbildung 6 Divergenzwinkel eines realen Laserstrahls und idealen GAUSS-Strahls

Für die Strahlqualität verwenden wir die Beugungsmaßzahl M^2 .

$$M^2 = \frac{\pi \cdot 2w_0 \cdot \theta_0}{4 \cdot \lambda}$$

Formel 9

Mit Formel 9 war es möglich, die Beugungsmaßzahl zu berechnen.

Im Falle $M^2=1$ beschreibt der ideale GAUSS-Strahl. Für reale Strahlen gilt immer $M^2 > 1$. Je größer der Wert für M^2 , umso schlechter ist die Strahlqualität des Laserstrahles. Es könnte auch der Strahlpropagationsfaktor k verwendet werden.

Umrechnung

$$K = \frac{1}{M^2}$$

Formel 10

Die Strahlqualität kann auch mit dem Strahlparameterprodukt beschrieben werden.

$$SPP_{ideal} = \frac{\lambda}{\pi} \quad \text{Formel 11}$$

Im Abbildung 7 stellte ich die Strahlkaustik mit den einzelnen Parametern dar.

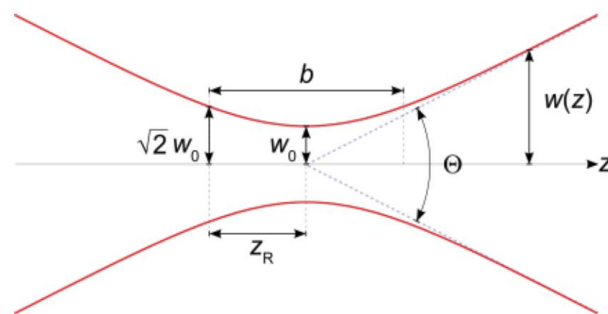


Abbildung 7 Darstellung der Parameter des Strahles

Das Strahlparameterprodukt bleibt nur beim Durchgang durch ideale Linsen erhalten. Bei realen Linsen ändert es sich zu größeren Werten.

$$SPP_{real} = \frac{w_0 \cdot \Theta}{z} \quad \text{Formel 12}$$

Man könnte auch die Beugungsmaßzahl M^2 durch das Verhältnis zwischen ideale und reale Strahlparameterprodukt umrechnen.

$$M^2 = \frac{SPP_{real}}{SPP_{ideal}}$$

Formel 13

Die Strahlqualität war eine wichtige Strahleigenschaft. Man muss sich mit vielen verschiedenen Messverfahren diese Eigenschaften berücksichtigen. Gute Laserqualität kann man bessere Produktqualität Laserschneiden.

Die realen Strahlparameter werden mittels Strahlvermessung ermittelt.

3.3 Streckenergie

Viele Fertigungsverfahren verwenden sich der Parameter Streckenenergie. In der Formel 14 zeigt ein Verhältnis zwischen Leistung am Werkstück und Vorschubgeschwindigkeit.

Ein weiterer Parameter zur Beschreibung des Prozesses war die Streckenenergie. Sie beschreibt, welcher Energie das Material ausgesetzt war.

$$Q_S = \frac{p}{v_f}$$

Formel 14

Laserparameter werden so gewählt, dass die geforderten Qualitätskriterien erfüllt werden

3.4 Messprinzip

3.4.1 Fokusbereich und Strahlverteilung

Vor der Durchführung des Experimentes wurde der Fokusbereich und Strahlverteilung mit dem Messgerät MicroSpotMonitor Primes gemessen. In der Abbildung 8 veranschaulicht den prinzipiellen Aufbau des Monitors. Für die Strahlanalyse wurden auch verstärkt kamerabasierte Systeme eingesetzt. Es benutzte CCD-Chip die Ergebnisse zur Auswertung. Das Verfahren könnte durch der Abbildung 8 kurz erläutern. Diese Messgeräte verwendete ein Messobjektiv und dieses

Messobjektiv verband einen geeigneten Strahlabschwächern den leistungsreduzierten Laserstrahl auf den CCD-Chip. Durch mehrachsige Bewegungssysteme könnte eine automatische Vermessung der Strahlkaustik erfolgen.

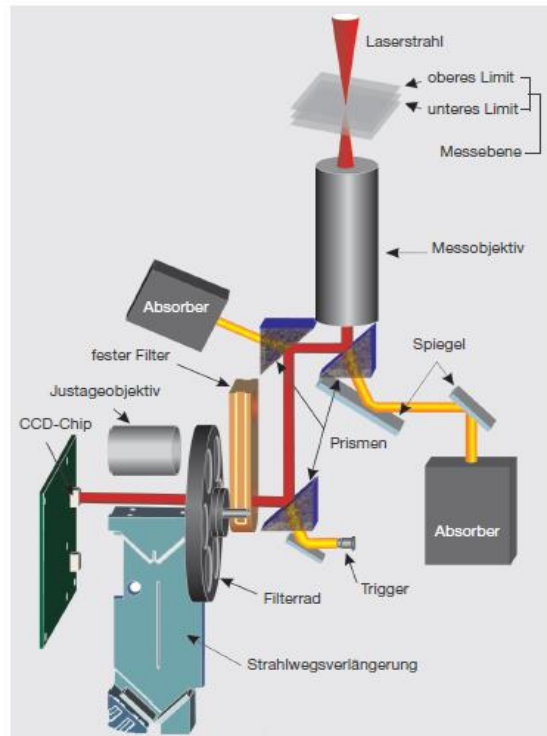


Abbildung 8 Darstellung des Aufbaus eines MicroSpotMonitors

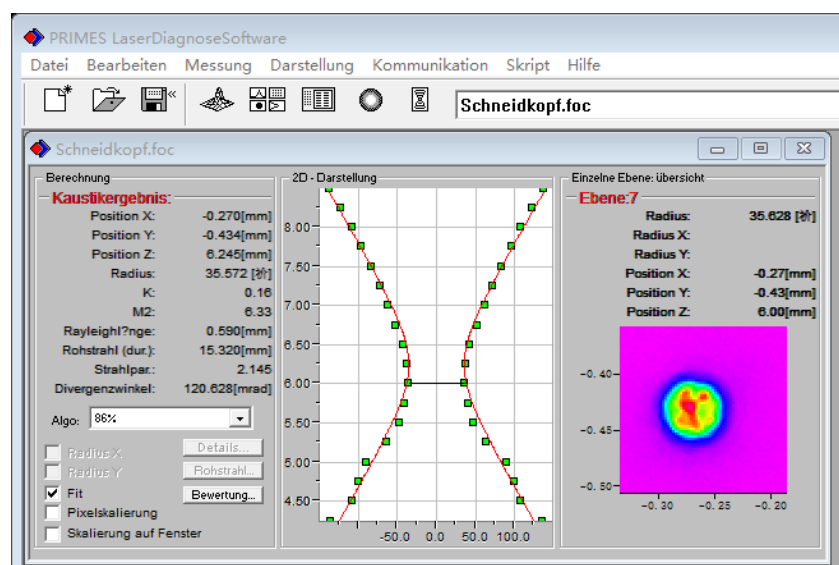


Abbildung 9 Kaustik Darstellung nach einer Faserübertragung und Fokussieroptik. 2D-Darstellung mit signifikanten Strahlparametern

In der Abbildung 9 zeigte die Auswertung der Laserstrahlung. Das Strahlprofil eines Faserlaser wurde mit einer Lichtleitfaser zum Bearbeitungskopf übertragen. Es kollimierte und fokussierte mit einer Fokussieroptik auf die Werkstückoberfläche. Im gepulsten Betrieb (Pulsfrequenz=100 Hz) mit einer mittleren Leistung von $P = 20 \text{ W}$ und ohne zusätzliche Modenblenden ergeben sich am Bearbeitungsort ein Fokusbereich von $w_0 = 70 \text{ }\mu\text{m}$, eine Strahlkennzahl von $M^2 = 6,33$ und eine RAYLEIGH-Länge von $z_R = 0,590 \text{ mm}$.

Gemessene Strahlparameter:

- Strahlverteilung in den
- einzelnen Messebenen
- Fokusabmessungen
- Fokuslage im Raum
- Rayleighlänge
- Divergenz
- Strahlparameterprodukt SPP
- Beugungsmaßzahl M^2

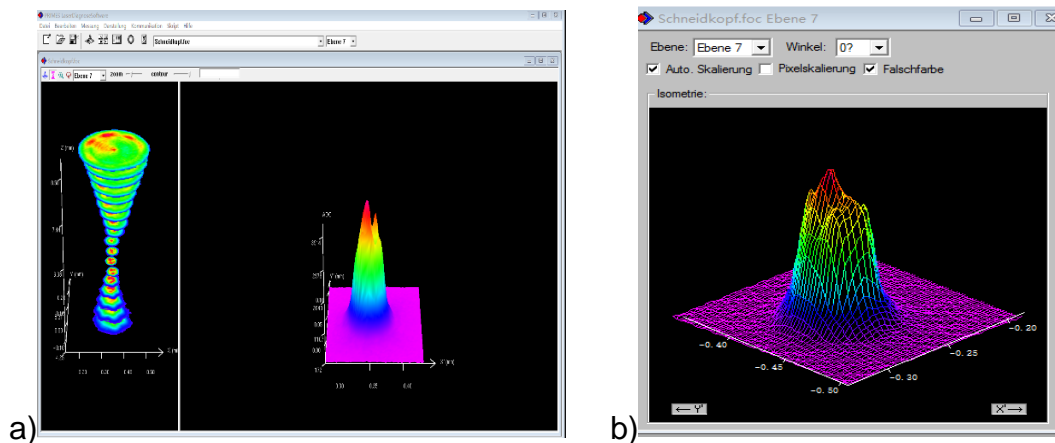


Abbildung 10 a) 3D-Höhendarstellung der Schnittprofile. b) 3D-Strahlprofil für $72 \mu\text{m}$ Fokusbereich und 127 mm Fokussierbrennweite.

In der Abbildung 10 veranschaulicht das Strahlprofil der Fokussmessung eines fasergeführten Bearbeitungssystems.

3.4.2 Zeitliche Pulsform

In der Abbildung 11 zeigte die prinzipieller Aufbau zur Messung des zeitlichen Pulsverlauf. Zur Aufzeichnung des zeitlichen Pulsverlaufs wird die reflektierte Laserstrahlung mit einer Fotodiode (3) gemessen. Ein direktes Positionieren der Fotodiode in den Laserstrahl wäre aufgrund der zu hohen Leistung nicht möglich. Durch große Probeblech (2) reflektierte Laserstrahlung. Diode wurde die reflektierte Laserstrahlung aufnehmen. Dieser wurde dann mit Hilfe eines Speicheroszilloskop (4) dargestellt.

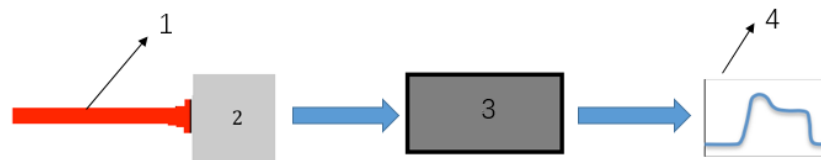


Abbildung 11 prinzipieller Aufbau zur Messung des zeitlichen Pulsverlauf

Bei der praktischen Durchführungen könnten viele Messungenauigkeiten auftreten. So mussten die Anstiegs- bzw. Ansprechzeiten und die Lichtempfindlichkeit der Fotodiode den Anforderungen des Aufbaus entsprechen

In der Abbildung 12 Zeigte die zeitliche Pulsform der Faserlaser-Strahlung.

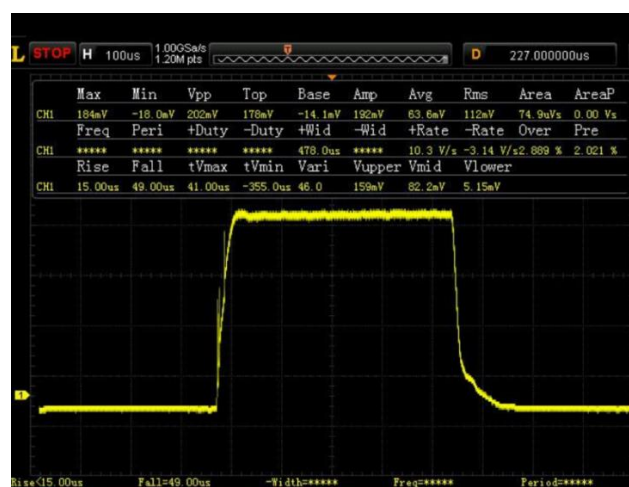


Abbildung 12 Zeitliche Rechteck Pulsform mit $P = 1 \text{ KW}$, $f = 100 \text{ Hz}$ und Pulsdauer $\approx 0,5 \text{ ms}$

3.5 Statische Versuchsplanung

Die Bachelorarbeit Untersuchung wurde die Statische Versuchsplanungen angewendet. Das Ziel der statistischen Versuchsplanung (englisch design of Experiments, DoE) war Erzielen von Ergebnissen mit ausreichender Sicherheit und Genauigkeit bei minimaler Anzahl von Versuchen. Die Schritte der statischen Versuchsplanung wurde in der Abbildung 13 dargestellt.

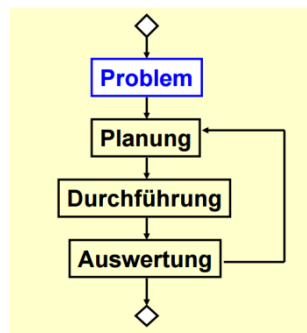


Abbildung 13 Versuchsetappen der Statistischen Versuchsplanung

Mehre Faktoren vollständiger der Konventionelle Methoden der Versuchs-planung wurden verwendet. 7 Einflussgrößen der Meine Untersuchungen X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 waren Pulsfrequenz, Pulsdauer, Pulsleistung, Fokusslage, Düsendurchmesser, Düsenabstand und Geschwindigkeit. 1 Zielgröße Y war Grathöhe. Man könnte wie eine Funktion darstellen. $Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7)$

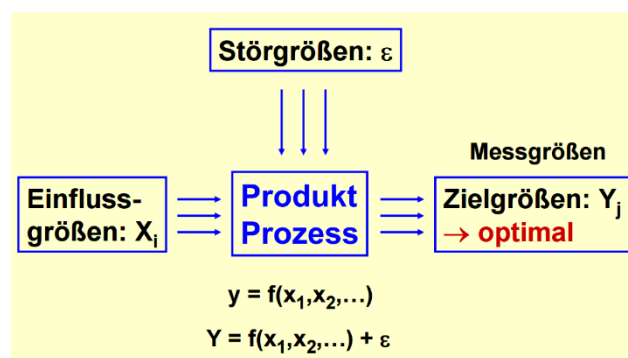


Abbildung 14 Statistische Modell

Abbildung 14 hat die Zusammenhang des statistischen Modells dargestellt.

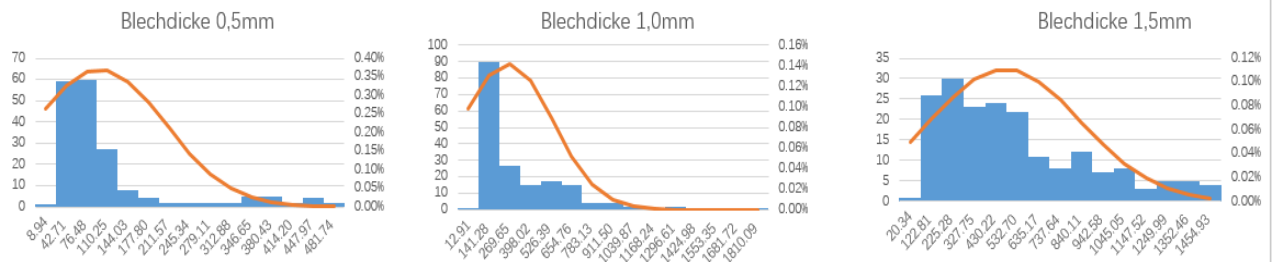


Abbildung 15 Normalverteilung der Grate in der Blechdicke 0,5mm 1,0mm 1,5mm

In der Abbildung 15 zeigte die Normalverteilungen der Grate in die Blechdicke 0,5mm 1,0mm und 1,5mm. Die Grathöhe wurde ursprünglich mit einer Messung pro Schnitt durchgeführt, die Grathöhe wurde dann einmal durch 5 Messungen pro Schnitt bestimmt. Größerer Pulsabstand führt zur geringeren Gratbildung aber zu einer höheren Rauheit der Schnittkante. Die kanten der Schnittpalt sahen wellig aus. Die Oberflächen der Schnitt waren schlecht. Es war nicht immer möglich alle gewünschten Parameter zu untersuchen. Die Fehler oder Begrenzung waren von der Anlag. Z.b manch mal Laser Störung.

3.6 Versuchsaufbau

Die Untersuchungen des Bachelorarbeit wurden mit einem gepulsten QCW-Faserlaser durchgeführt. In Abbildung 16 war die Versuchsanlage gezeigt. Der Schneidkopf konnte mit der Z-achse nach oben und unten bewegen werden sowie in der Y-Achse nach links und rechts. Die Bewegung in der X-Achse erfolge mit einer separaten. In den Versuchen verwendete ich einen Schneidkopf HP 1,5“ (Z) / FL. Dieser wird für das abstandsgeregelte Schneiden von Dünn-und Dickblech mit Faser-Lasern an Flachbettanlagen eingesetzt. Es war präzise gearbeitet, robust, servicefreundlich und leicht zu justieren. Der Schneidkopf könnte bis zu einem Schneidgasdruck von maximal 25 bar betrieben werden. Er verfügte über zwei Schneidgasanschlüsse. Der unbenutzte Anschluss war mit einer Verschlusschraube zu verschließen. Alle Anschlüsse befanden sich oben am Schneidkopf

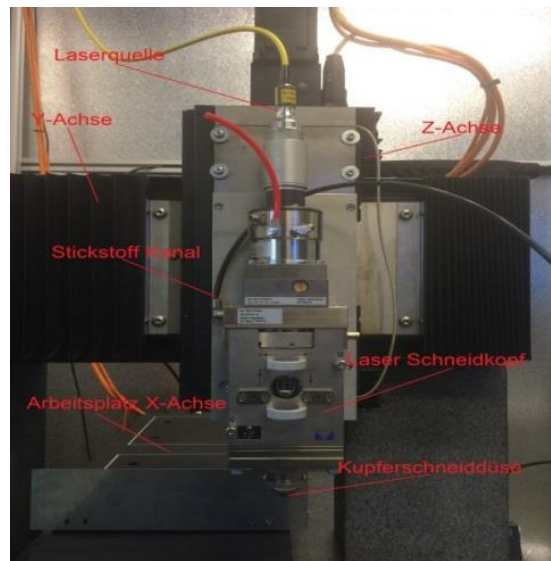


Abbildung 16 Laserschneidanlage der Untersuchung

Im Abbildung 17 zeigte die Kupferschneiddüsen. Wir benutzten das Model P0591-573-00015 und Konisch Durchmesser 1,5 mm , 1,2mm und 1,0mm. Die Schneid-
düsen waren leicht auswechselbar und optimierten die Schnittergebnisse erheblich.

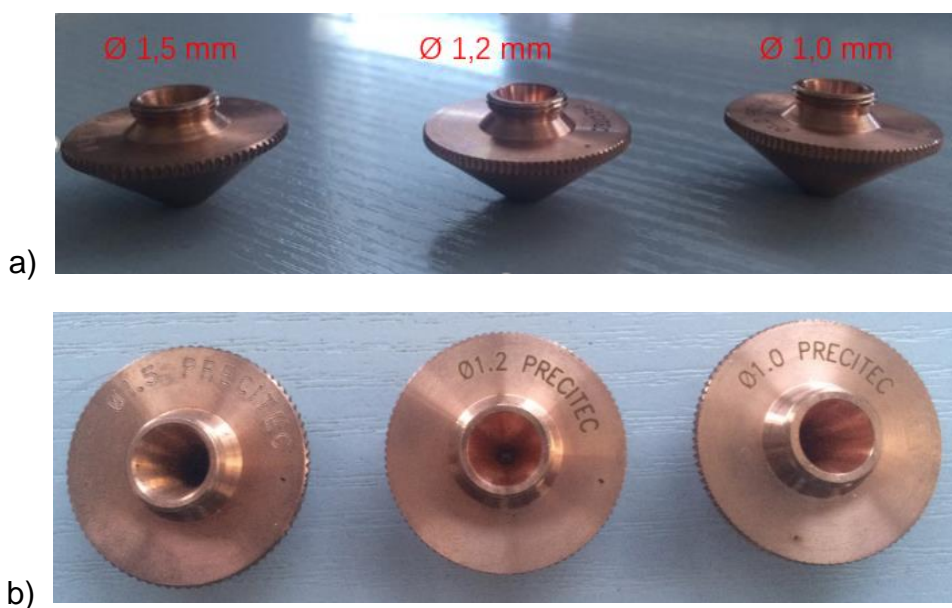


Abbildung 17 verschiedene Durchmesser Größe Models

3.7 Parametervariationen

In den Versuchen wurden die Einflüsse der verschiedenen Parameter untersucht.

Die Parameter waren:

- Geschwindigkeit (mm/min)
- Pulsleistung (W)
- Fokusbereich (mm)
- Pulsfrequenz (Hz)
- Pulsdauer (ms)
- Düsendurchmesser (mm)
- Düsenabstand (mm)

Jeder Parameter sollte verschiedene Untersuchungsergebnisse beeinflussen. Zur Auswertung mussten pro Versuch mehrere Proben geschnitten und mit Lichtmikroskop die Schnittspalte und die Graterhöhen gemessen werden. Diese Versuche wurden mit der Statistischen Versuchsplanung zur Optimierung aufgrund der Parametervielfalt angewendet. Die Dicke der Probe Blechen wurde in 0,5mm, 1,0mm und 1,5mm aufgeteilt. Durch die Untersuchungen muss man die guten Parameter zusammenfassen und mit guten Parametern eine sehr gute Schnittqualität erzielen.

4 Untersuchungsergebnisse

4.1 Pulsfrequenz, Pulsdauer und Pulsleistung

Diese Untersuchungen wurden mit statistischer Versuchsplanung durchgeführt. Zuerst hielten wir die anderen Parameter (Fokusbereich, Düsendurchmesser, Düsenabstand) als bestimmten Parameter nicht geändert. Gas: Stickstoff, Gasdruck= 10bar, Fokusbereich= -0,75mm, Düsendurchmesser= 1.5mm und Düsenabstand= 1mm. Durch statistische Versuchsplanung können man die guten Parameter der Pulsfrequenz, Pulsdauer und Pulsleistung bestimmen.

4.1.1 Blechdicke 0,5 mm


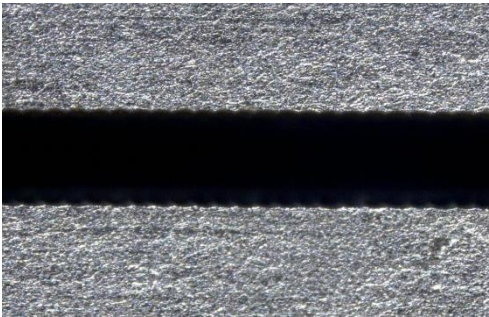
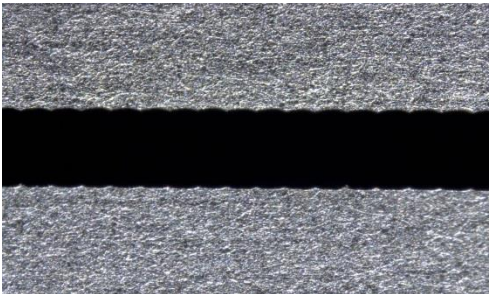

Die Untersuchungsergebnisse wurden mit einem Digitalmikroskop der Fa. Keyence gemessen. Es könnte die genaue Spaltbreite der Obenseiten und Unterseiten, Grathöhe messen. Nach dem Messen habe ich gefunden. Die Pulsabstände $s(\mu\text{m})$ waren auch eine wichtige Parameter der Schnittqualität.

$$s=v \cdot t=v/f$$

Formel 15

durch Formel 15 berechnete den Pulsabstand mit Verschiebgeschwindigkeit (mm/min) und Pulsfrequenz(Hz). Verschiedene Klassifizierungen der Kantenqualität wurde mit **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** geordnet. Pulsabstand wurde die Oberfläche Rauheit beeinflussen.

Tabelle 1 Klassifizierung der Kantenqualität

	Klasse
	$s < 40\mu\text{m}$ gerade Kante
	$40\mu\text{m} < s < 60\mu\text{m}$ geringe Welligkeit
	$60\mu\text{m} < s < 80\mu\text{m}$ mittlere Welligkeit
	$s > 80\mu\text{m}$ starke Welligkeit

Durch Tabelle 1 wurde die Pulsabstand kleiner als 40 μm sein müssen.

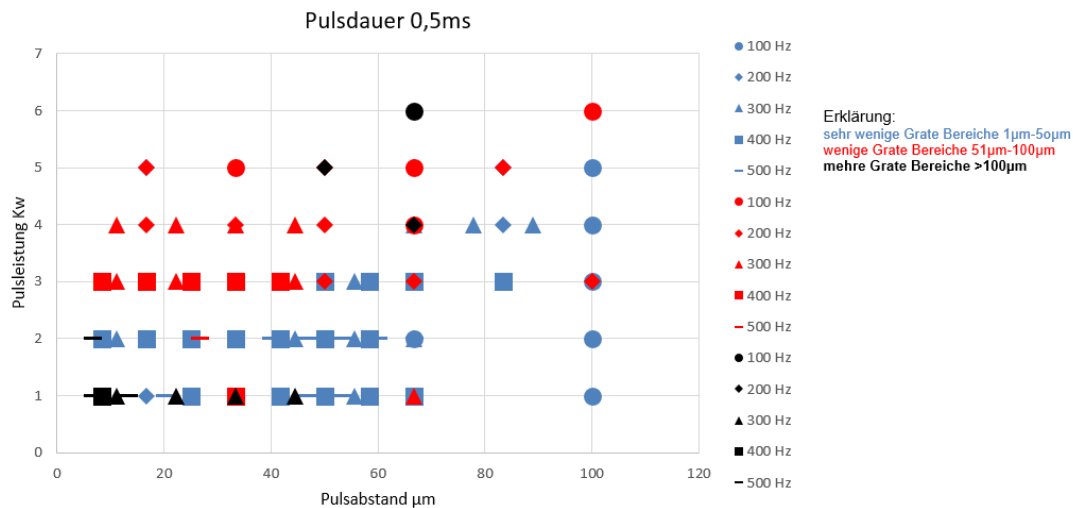


Abbildung 18 Pulsdauer=0,5 ms Anzahl der Grate in verschiedene Parameters

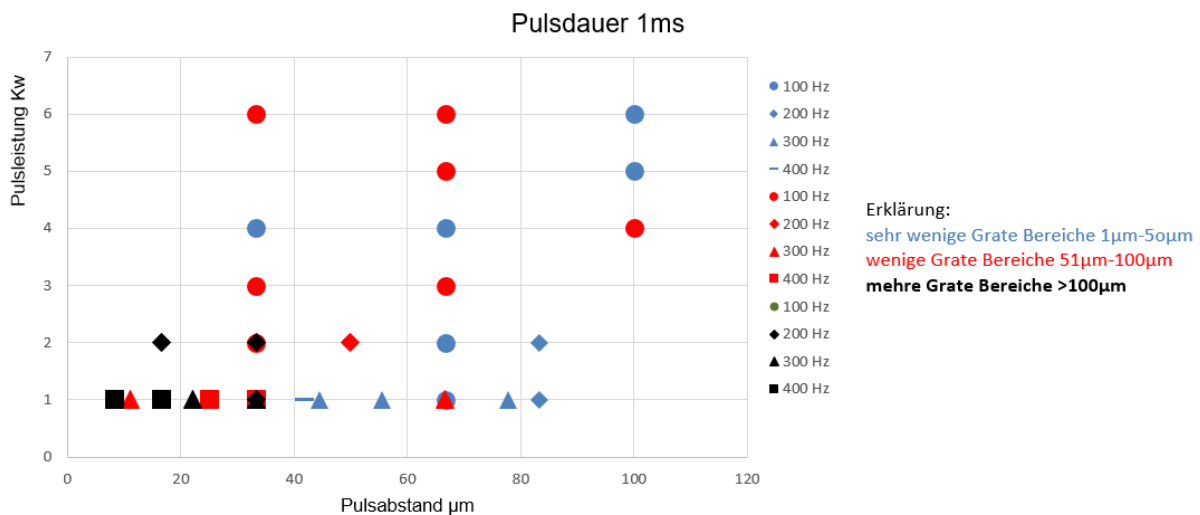


Abbildung 19 Pulsdauer=1.0 ms Anzahl der Grate in verschiedene Parameters

Abbildung 18 und Abbildung 19 wurde verglichen. Es zeigte deutlich, dass in gleichen Bedingungen Pulsdauer 0,5 ms weniger Grate als Pulsdauer 1.0 ms entstanden. Die folgenden Untersuchungen wurden analysierte. Je größer Pulsdauer war, desto mehrere Grate entstanden. Danach analysierte in der Abbildung 18. Blaue Farbe bedeuteten sehr wenige Grate Bereich. Für die gute Oberfläche Qualität wurden die kleinere Pulsabstände gewählt. Die Pulsdauer 0,5 ms, Pulsfrequenz 400 Hz und Pulsleistung 2 KW waren die beste Parameters. Diese drei beste Pa-

rameters wurden als bestimmte Parameters für die folgende Untersuchungen (Fokuslage, Düsendurchmesser, Düsenabstand) gewählt.

4.1.2 Blechdicke 1,0 mm

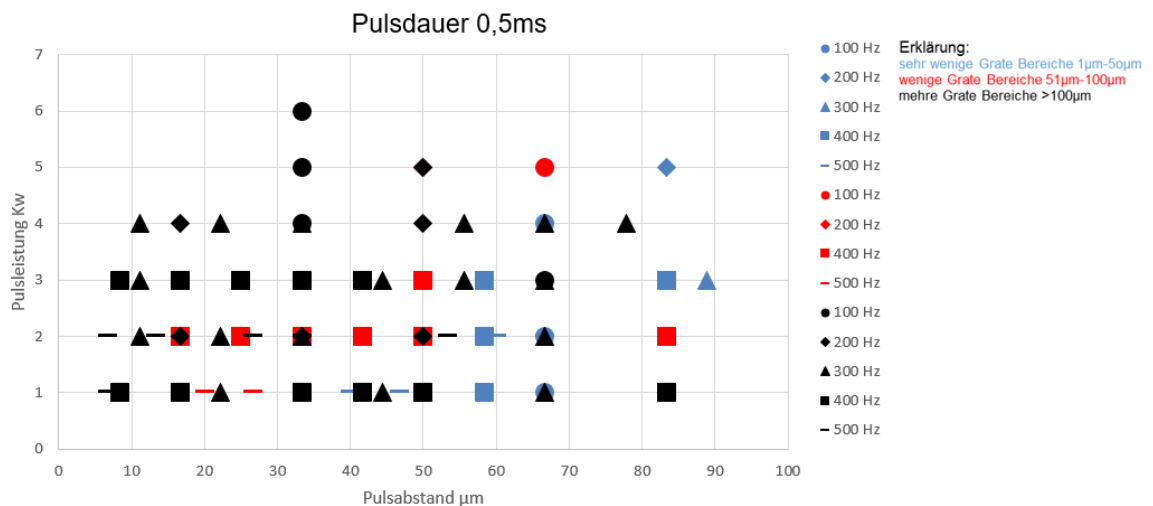


Abbildung 20 Pulsdauer=0,5 ms Anzahl der Grate in verschiedene Parameters

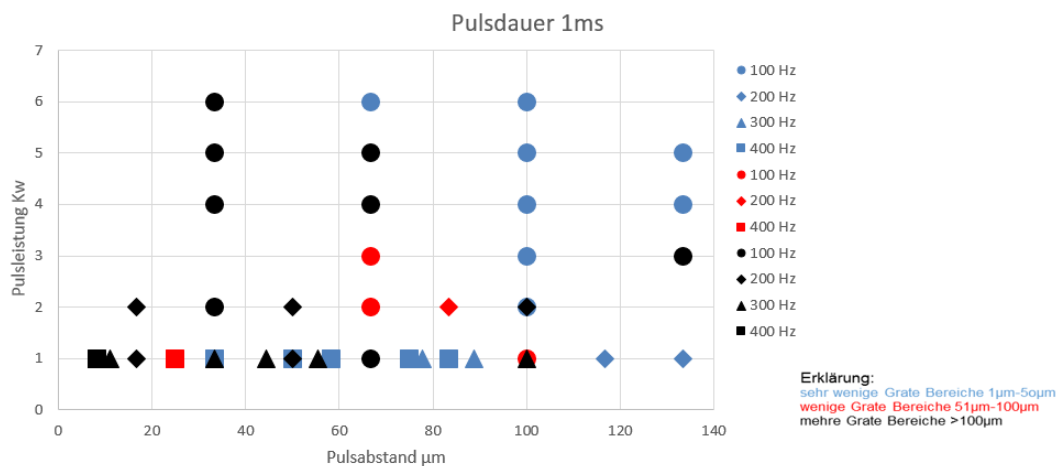


Abbildung 21 Pulsdauer=1.0 ms Anzahl der Grate in verschiedene Parameters

Abbildung 20 und Abbildung 21 wurden verglichen. Es zeigte deutlich, dass in gleiche Bedingungen Pulsdauer 1,0 ms weniger Grate als Pulsdauer 0,5 ms entstand. Durch Analysierung in der Abbildung 21 die blaue Farbe bedeutete sehr

wenige Grate Bereich. Für die gute Oberfläche Qualität wurde die Pulsdauer 1,0 ms gewählt. Die Pulsdauer 1,0 ms , Pulsfrequenz 400 Hz und Pulsleistung 1 KW waren die beste Parameters. Diese drei beste Parameters wurden als bestimmte Parameters für die folgende Untersuchungen (Fokuslage, Düsendurchmesser, Düsenabstand) gewählt.

4.1.3 Blechdicke 1,5 mm

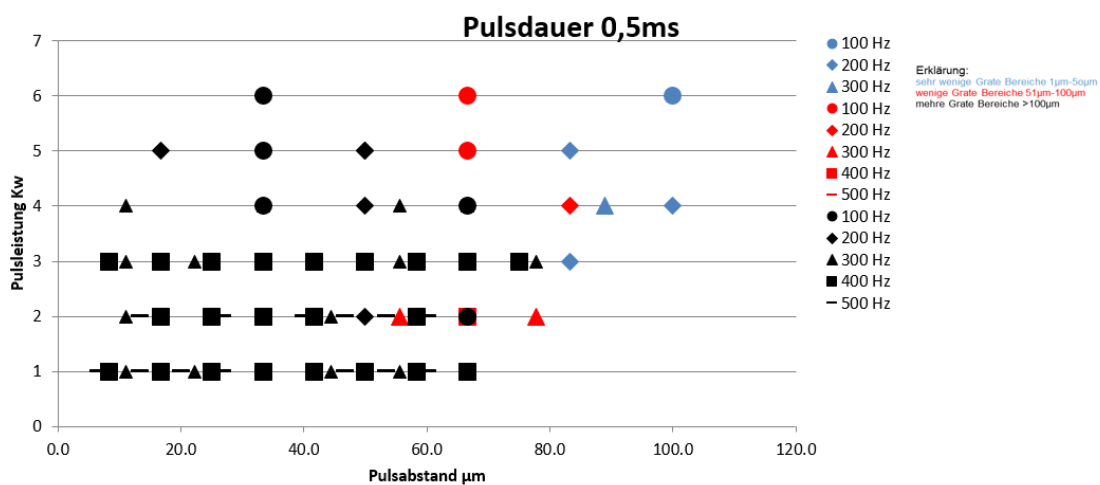


Abbildung 22 Pulsdauer=0,5 ms Anzahl der Grate in verschiedene Parameters

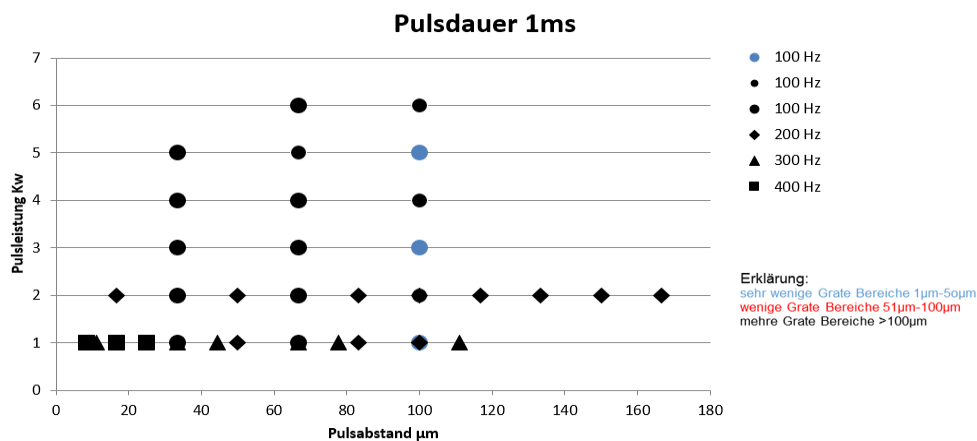


Abbildung 23 Pulsdauer=1,0 ms Anzahl der Grate in verschiedene Parameters

Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigten sehr deutlich, dass in jedem Falls mehr Grate entstanden. Die Ursache war die Dicke zu groß. Aber Pulsdauer 0,5ms war besser als 1,0ms, wenn die Pulsleistung 6 KW war. Durch Proben mehrere Mals

verglichen, Die Pulsdauer 0,5 ms, Pulsfrequenz 100 Hz und Pulsleistung 6 KW waren die beste Parameters. Diese drei besten Parameters wurden als bestimmten Parameters für die folgende Untersuchungen (Fokuslage, Düsendurchmesser, Düsenabstand) gewählt.

4.2 Fokuslage

4.2.1 Blechdicke 0,5mm

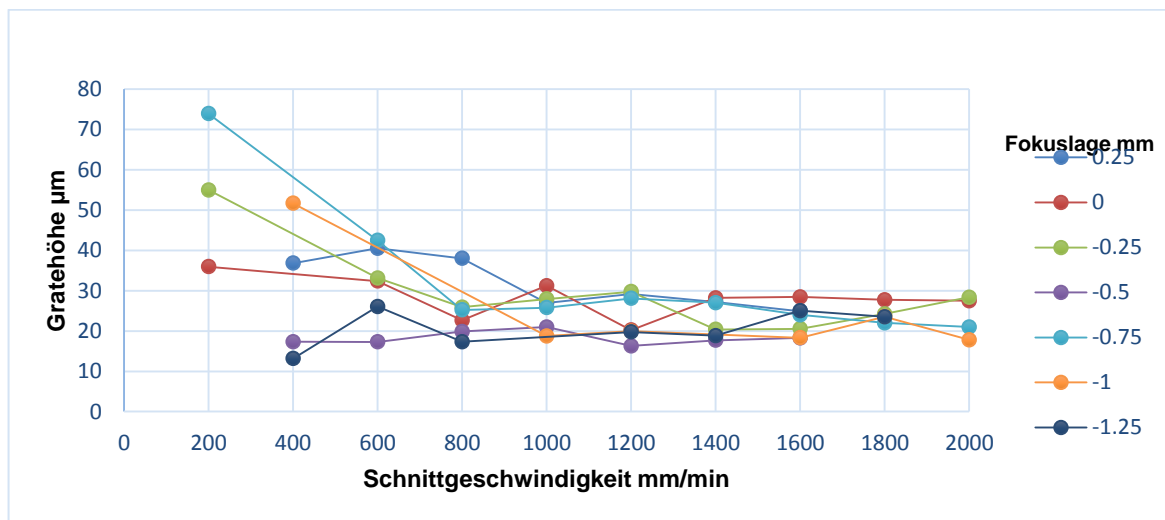


Abbildung 24 Unterschiedliche Fokuslage vergleichen die unten Grate Höhe

Für die Fokuslage Untersuchung der Blechdicke 0,5 mm wurde die gutes Parameters Pulsdauer 0,5 ms, Pulsfrequenz 400 Hz und Pulsleistung 2 KW gewählt. Nach dem Laserschneiden entstanden zwangsläufige Grate. Bei manchen Schnittlinien entstand mehr Grate, weniger Grate oder sehr wenige Grate. Die Untersuchungsergebnisse waren in der Abbildung 24 dargestellt. Eine gute gewählte Fokuslage führte zu kleinen Grathöhe und insgesamt sehr wenige Grate. Im Abbildung 24 zeigte die Höhe der Gratbildung an der Unterseite in unterschiedlicher Fokuslage. Durch das Vergleichen von Ober- und Unterseite bekam man die beste Fokuslage $f = -0,5$ mm für die Blechdicke 0,5mm.

4.2.2 Blechdicke 1,0mm

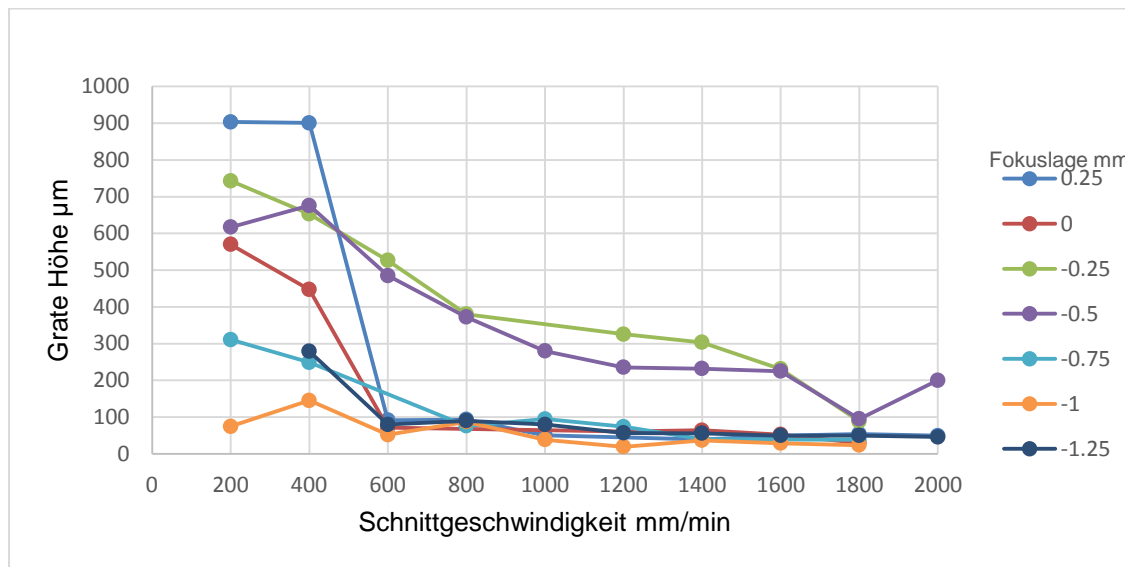


Abbildung 25 Unterschiedliche Fokusslage vergleichen die unten Grate Höhe

Für die Fokusslage Untersuchung der Blechdicke 1,0 mm wurde die gute Parameter Pulsdauer 1,0 ms, Pulsfrequenz 400 Hz und Pulsleistung 1 KW gewählt. Nach dem Laserschneiden entstanden zwangsläufige Grate. Bei manchen Schnittlinien entstand mehr Grate, weniger Grate oder sehr wenige Grate. Die Untersuchungsergebnisse waren in der Abbildung 25 dargestellt. Eine gute gewählte Fokusslage führte zu kleiner Grathöhe und insgesamt sehr wenigen Graten. In der Abbildung 25 zeigt die Höhe der Grathöhe an der Unterseite in unterschiedlicher Fokusslage. Durch das Vergleichen von Ober- und Unterseite bekam man die beste Fokusslage $f = -1,0$ mm für die Blechdicke 1,0 mm.

4.2.3 Blechdicke 1,5mm

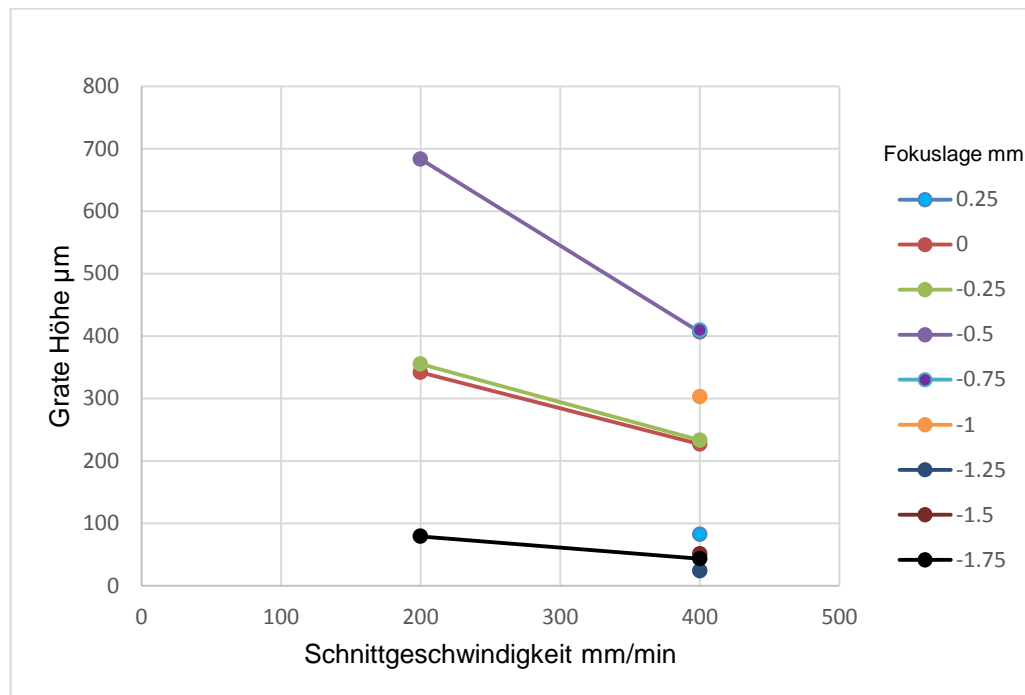


Abbildung 26 Unterschiedliche Fokusslage vergleichen die unten Grate Höhe

Für die Dicke 1,5mm könnte der Laser nur mit niedrige Schnittgeschwindigkeit (200mm/min und 400 mm/min) schneiden. Aber manchmal wurde die Problem der Laser-Störung eintreffen. Es bedeutete keine Laser. Wenn die Geschwindigkeit 400 mm/min überschritt, könnten die Bleche nicht durchschneiden. Für die Fokusslage Untersuchung der Blechdicke 1,5 mm wählte ich die gutes Parameters Pulsdauer 0,5 ms, Pulsfrequenz 100 Hz und Pulsleistung 6 KW. Nach dem Laserschneiden entstanden zwangsläufige Grate. Bei manchen Schnittlinien entstand mehr Grate, weniger Grate oder sehr wenige Grate. Die Untersuchungsergebnisse waren in der Abbildung 26 dargestellt. Eine gute gewählte Fokusslage führte zu kleinen Grathöhe und insgesamt sehr wenige Grate. Im Abbildung 26 zeigte die Höhe der Gratbildung an der Unterseite in unterschiedlicher Fokusslage. Durch das Vergleichen von Ober- und Unterseite bekam man die beste Fokusslage $f = -1,25$ mm für die Blechdicke 1,5mm.

4.3 Düsendurchmesser und Düsenabstand

Der Einfluss der Düsendurchmessers und des Düsenabstand auf das Schnittergebnis wurde ebenfalls untersucht. Für diese Untersuchung wurden drei unterschiedliche Düsendurchmesser (1mm 1,2mm 1,5mm) und Düsenabstand 0,5mm und 1,0mm gewählt.

4.3.1 Blechdicke 0,5mm

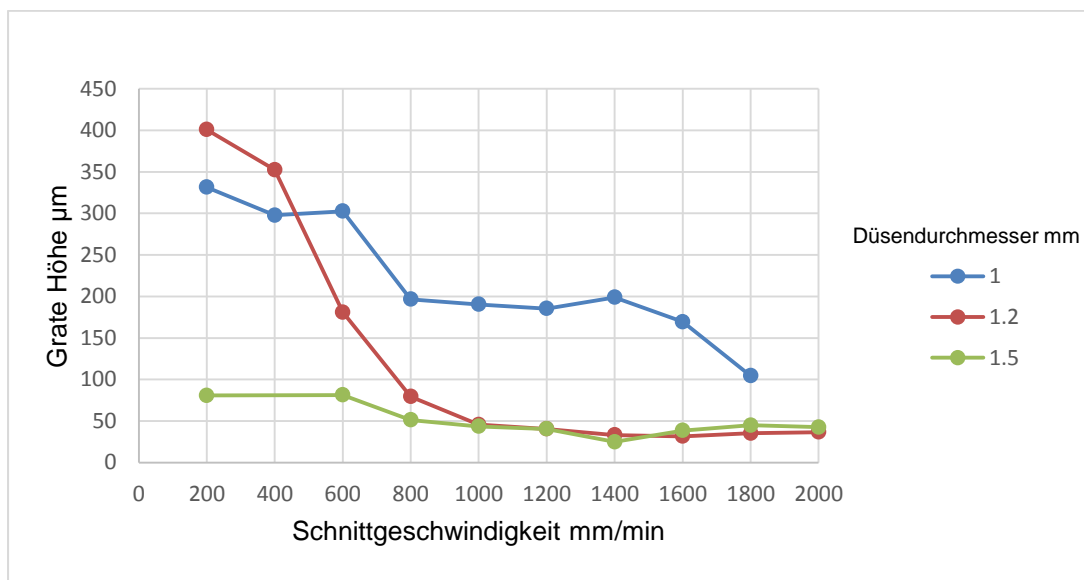


Abbildung 27 Unten Grate Höhe Vergleichen in Verschiedene Düsendurchmesser

Diese Untersuchungen wurden mit Pulsdauer 0,5 ms, Pulsfrequenz 400 Hz, Pulsleistung 2 KW, Düsenabstand 1mm und Fokusslage -0,75 durchgeführt. In der Abbildung 27 zeigte Untenseiten Grate Höhe in Verschiedene Düsendurchmesser. Mit Abbildung 27 könnte man deutlich auswerten. Wenn man mit Düsendurchmesser 1,5mm schnitt, entstand weniger Grate als Düsendurchmesser 1,0mm und 1,2mm. Durch Vergleichen fand ich die Düsendurchmesser 1,5mm besser als Düsendurchmesser 1,0mm und 1,2mm. Danach änderte ich die zwei Größen Dü-

senabstände mit Düsendurchmesser 1,5mm. In der Abbildung 28 zeigte die Untenseiten Grate Vergleichen mit unterschiedlichem Düsenabstand.

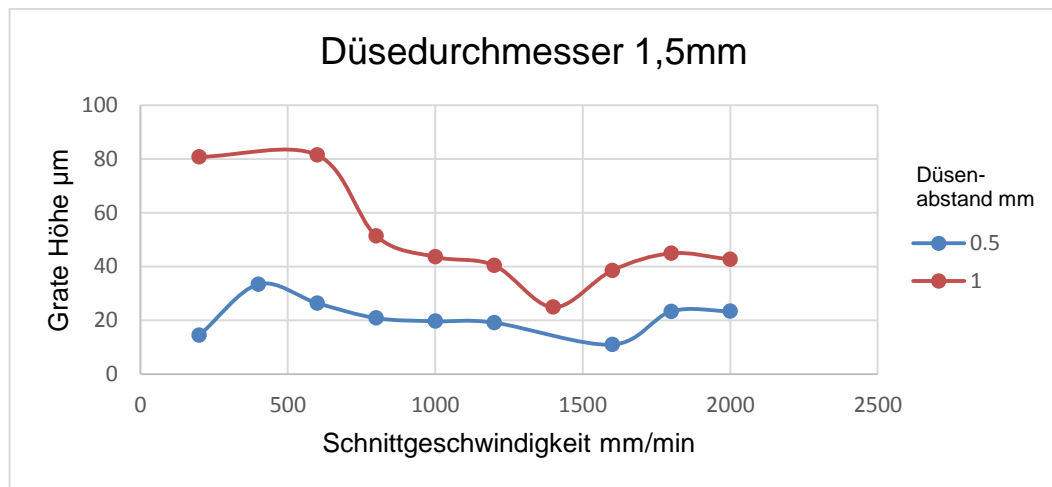


Abbildung 28 Untenseiten Grate Hohe Vergleichen mit unterschiedlicher Düsenabstand

Wenn die Bleche mit Düsenabstand 0,5 mm die Bleche 0,5mm geschnitten wurde, entstand niedrigere Grate als Düsenabstand 1,0mm. Es könnte auch die Schnittqualität so hoch optimieren.

4.3.2 Blechdicke 1,0mm

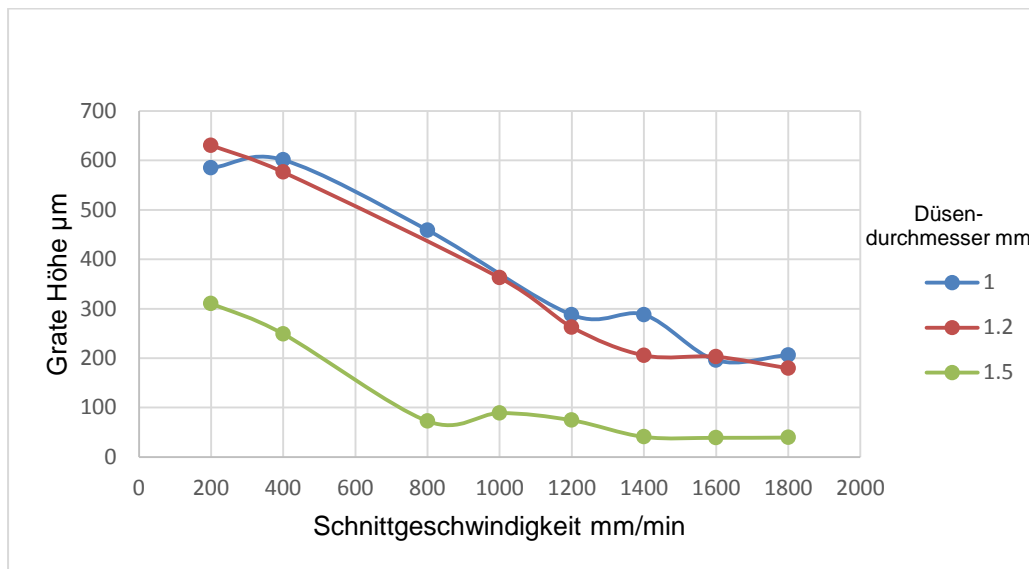


Abbildung 29 Untenseiten Grate Höhe Vergleichen in Verschiedene Düsendurchmesser

Diese Untersuchungen wurden mit Pulsdauer 1,0 ms, Pulsfrequenz 400 Hz, Pulsleistung 1 KW, Düsenabstand 1mm und Fokusslage -0,75 durchgeführt. In der Abbildung 29 zeigte Untenseiten Grate Höhe in Verschiedene Düsendurchmesser. Mit Abbildung 29 könnte man deutlich auswerten. Wenn man mit Düsendurchmesser 1,5mm schnitt, entstand wenigere Grate als Düsendurchmesser 1,0mm und 1,2mm. Durch Vergleichen waren die Düsendurchmesser 1,5mm besser als Düsendurchmesser 1,0mm und 1,2mm. Die zwei Größen Düsenabstände wurden mit Düsendurchmesser 1,5mm geändert. In der Abbildung 30 zeigte die Untenseiten Grate Vergleichen mit unterschiedlichem Düsenabstand.

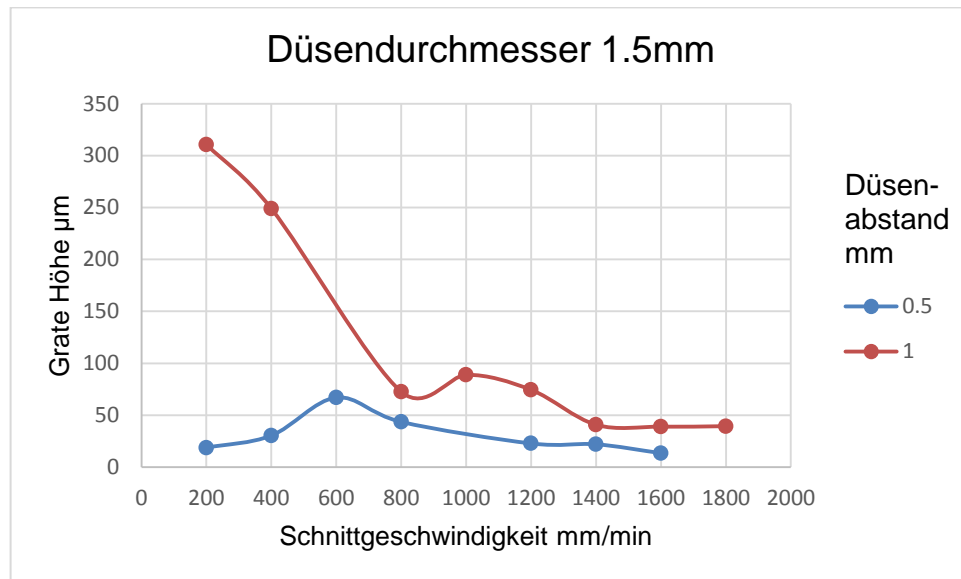


Abbildung 30 Untenseiten Grate Höhe Vergleichen mit unterschiedlicher Düsenabstand

Wenn die Bleche mit Düsenabstand 0,5 mm die Bleche 1,0mm geschnitten wurde, entstand niedrigere Grate als Düsenabstand 1,0mm. Es könnte die Schnittqualität so hoch optimieren.

4.3.3 Blechdicke 1,5 mm

Diese Untersuchungen wurden mit Pulsdauer 0,5 ms, Pulsfrequenz 100 Hz, Pulsleistung 6 KW, Düsenabstand 1mm und Fokuslage -1,25mm durchgeführt.

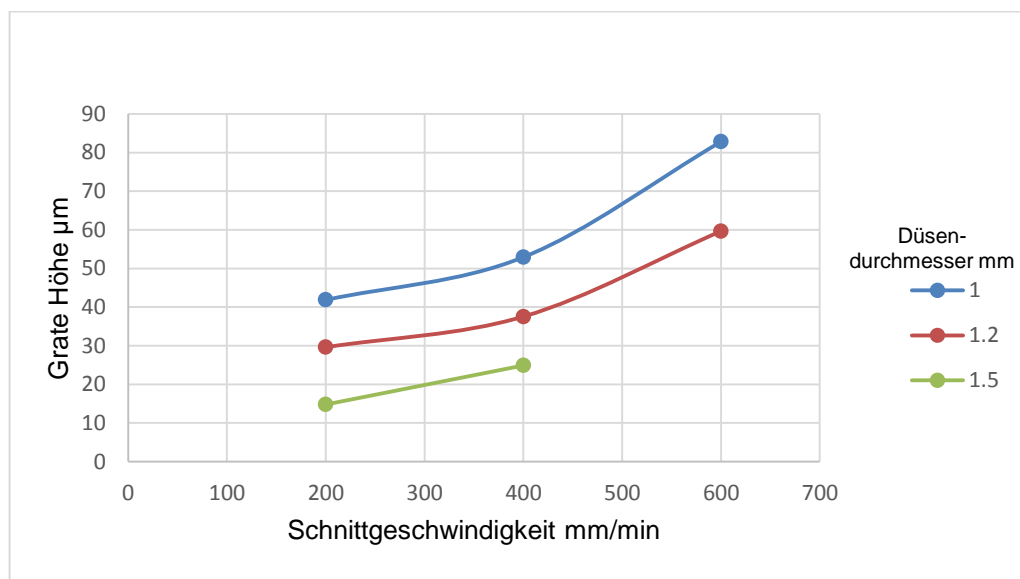


Abbildung 31 Untenseiten Grate Höhe Vergleichen in Verschiedene Düsensdurchmesser

In der Abbildung 31 zeigte Untenseiten Grate Höhe in Verschiedene Düsendurchmesser. Mit Abbildung 31 könnte man deutlich auswerten. Wenn die Bleche mit Düsendurchmesser 1,5mm geschnitten wurde, entstand weinigere Grate als Düsendurchmesser 1,0mm und 1,2mm. Durch Vergleichen waren die Düsendurchmesser 1,5mm besser als Düsendurchmesser 1,0mm und 1,2mm. Die zwei Größen Düsenabstände wurden mit Düsendurchmesser 1,5mm geändert. In der Abbildung 32 zeigte die Untenseiten Grate Vergleichen mit unterschiedlichem Düsenabstand.

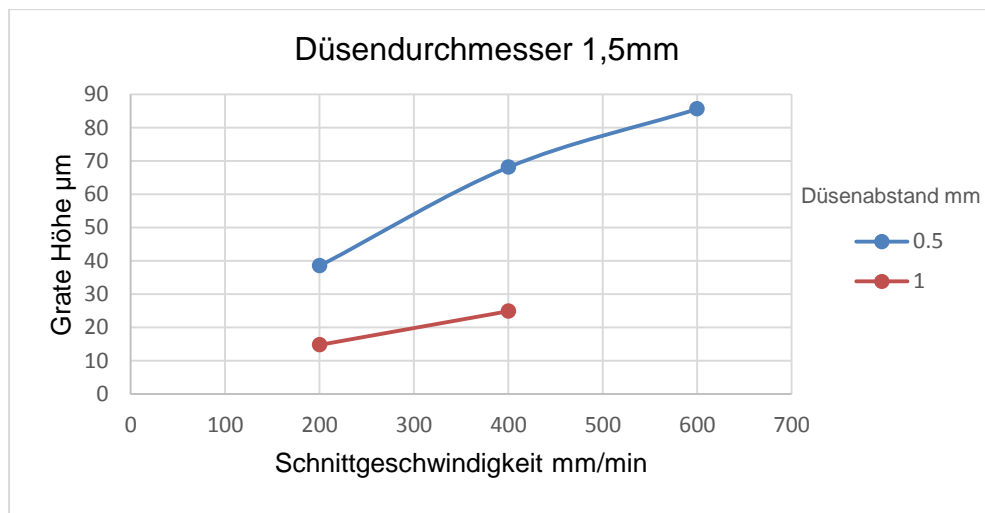


Abbildung 32 Untenseiten Grate Hohe Vergleichen mit unterschiedlicher Düsenabstand

Wenn die Bleche mit Düsenabstand 0,5 mm die Bleche 1,5mm geschnitten wurde, entstand niedrigere Grate als Düsenabstand 1,0mm. Es könnte die Schnittqualität so hoch optimieren.

5 Zusammenfassung

Durch statistische Versuchsplanungen könnten die guten Parameters bekommen und eine sehr gute Schnittqualität erzielen.

Die gute Parameters der Blechdicke 0,5mm waren Pulsdauer 0,5 ms, Pulsfrequenz 400 Hz, Pulsleistung 2 KW, Fokusbildung -0,5mm, Düsen-durchmesser 1,5mm und Düsenabstand 0,5mm. Mit diese Parameters könnten niedrige Grate und Höhe Schnittqualität schneiden. Demonstrator Struktur wurde auch mit diesen guten Parameters geschnitten. Die Schnittqualität wurde mit Nd: YAG-Laser verglichen.

Die gute Parameters der Blechdicke 1,0mm waren Pulsdauer 1,0 ms, Pulsfrequenz 400 Hz Pulsleistung 1 KW, Fokusbildung -1,0mm, Düsen-durchmesser 1,5mm und Düsenabstand 0,5mm.

Die gute Parameters der Blechdicke 1,5mm waren Pulsdauer 0,5 ms, Pulsfrequenz 100 Hz, Pulsleistung 6 KW, Fokusbildung -1,0mm, Düsen-durchmesser 1,5mm und Düsenabstand 0,5mm.

6 Demonstrator Struktur

Die Demonstrator Struktur wurde mit eckigen und runden Durchbrüchen erstellt. Diese Demonstrator Struktur wurde von gepulstem Faserlaser und Nd: YAG-Laser(KLS-Brennschneiden) geschnitten. Die Schnittgeschwindigkeit und Schnittqualität wurde auch verglichen.

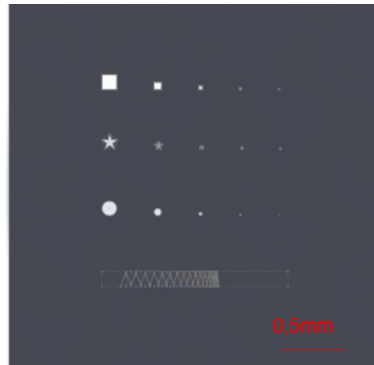


Abbildung 33 Skizze der Demonstrator Struktur der Blechdicke 0,5mm

Zuerst musste man die Demonstrator Struktur darstellen. Die Struktur (Abbildung 33) wurde mit Solidworks gezeichnet. Diese Zeichnung enthielt 5 Stücke Rechtecke (breite 4mm, 2mm, 1mm, 0,5mm und 0,25mm), Sterne(Höhe 4mm, 2mm, 1mm, 0,5mm und 0,25mm) und Kreise(Durchmesser 4mm, 2mm, 1mm, 0,5mm und 0,25mm). Es enthielt noch eine Zick-Zack-Linien. Die Winkels der Zick-Zack-Linien wurden ab 40 grad bis 4 grad verkleinert. Die Solidworks Zeichnung wurde mit einem Prozessor umwandelt. Alle Demonstrator Struktur wurde in die Blechdicke 0,5mm durchschneiden.

$$P_m = P_{max} \cdot \tau_H \cdot f_p$$

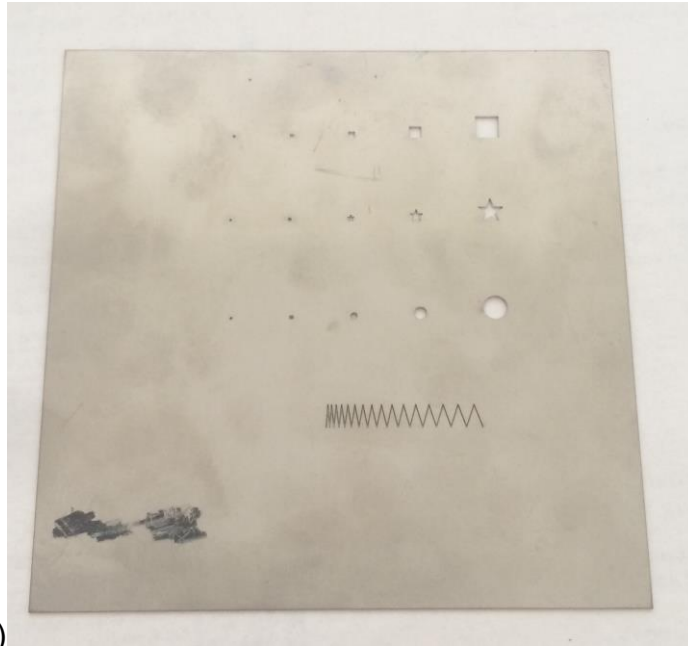
Formel 16

Durch Formel 16 könnte man die Spitzleistung und mittlere Leistung umrechnen.

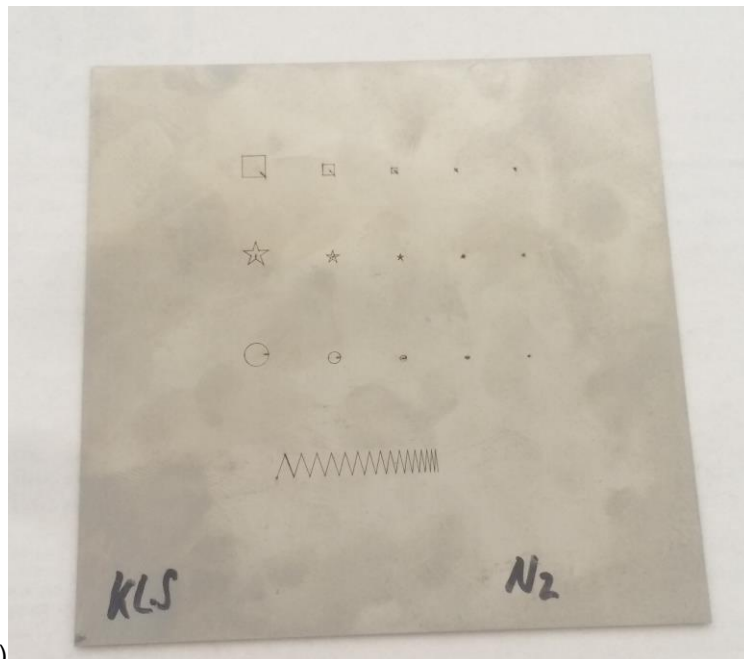
Tabelle 2 Verschiedene Schnittverfahren Bedingungen

Schnittverfahren	KLS- Brennschneiden	KLS- Schmelzschnneiden	Gepulste Faserla- ser Schmelzschnneiden
Mittlere Leistung KW	0,12	0,12	0,40
Pulsdauer ms	0,1	0,1	0,5
Frequenz Hz	300	300	400
Schnittgeschwindigkeit mm/min	300	300	1000
Blechdicke mm	0,5	0,5	0,5
Fokuslage mm	auf der Ober- fläche	-0,5	-0,5
Gas	O_2	N_2	N_2
Gas Druck bar	4	5	10

Tabelle 2 zeigte die unterschiedlichen Schnittverfahren. Demonstrator Struktur wurde mit die Bedingungen der Tabelle.2 durchschnitten. In der Abbildung 34 zeigte die Übersicht der Demonstrator Struktur.



a)



b)

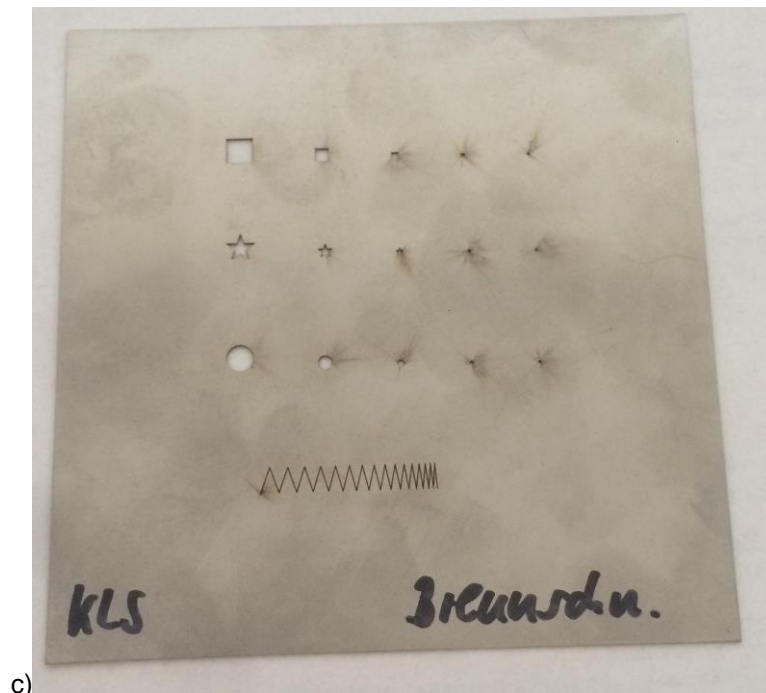


Abbildung 34 Blechdicke 0,5mm a) 10 bar N₂-Schmelzschnitten. b) 5 bar N₂-Schmelzschnitten. c) 4 bar O₂-Brennschnitten.

Die Bahnsteuerung des KLS-Systeme war besser als UNIPOS 110. KLS-System könnte ganz Kreis durchschneiden. Aber UNIPOSS 110 könnte nur mit mehrer gerade Linien wie ein Kreis durchschneiden. Die Untenseiten der Demonstrator Struktur wurde mit Digitalmikrokops gemessen.



Abbildung 35 Kreisdurchmesser 2 mm a) N₂ Faserlaser Schmelzschnitten b) N₂ Nd: YAG-Laser Brennschnitten c) O₂ Nd: YAG-Laser Brennschnitten

In der Abbildung 35 zeigte die Schnittergebnisse der unterschiedlichen Verfahrens. a) entstand mehrere kleine Winkeln bei den kreiskanten. C) sah gut als a) aus. Die Ursache war Anlage - Bahnsteuerungen. Die schnittspaltbreite der b) war sehr kleine. Es entstand mehrere kleine Grate. Die Grate verbanden beide Teile zusammen.

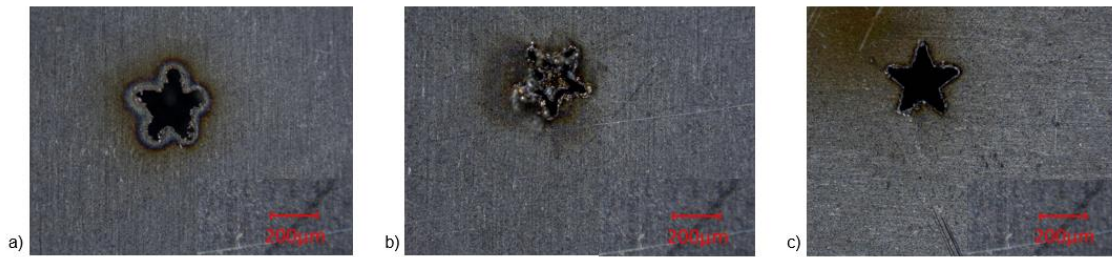


Abbildung 36 Stern Struktur Höhe 0,5mm a) N2 Faserlaser Schmelzschnitten b) N2 Nd: YAG-Laser Brennschneiden c) O2 Nd: YAG-Laser Brennschneiden

In der Abbildung 36 zeigte. Wenn der kleine Stern durchschnitten, war die Struktur der c) besser als a). Nd: YAG-Laser mit kleinem Gasdruck N_2 entstand mehrere kleine Grate als Faserlaser mit hohem Gasdruck N_2 .



Abbildung 37 Zick-Zack-Linien Maßstab 200µm a) N2 Faserlaser Schmelzschnitten b) N2 Nd: YAG-Laser Brennschneiden c) O2 Nd: YAG-Laser Brennschneiden

Abbildung 37 zeigte einen Teil der Zick-Zack-Linien. Die Winkel wurden immer kleiner geändert. Wenn die Zick-Zack-Linien schnitten, entstanden in diesem Prozess große Wärme. Es hat ein Problem eingetroffen. Die Wärme war schwierig abgeleitet. Aber durch Vergleich waren die Faserlaser mit N_2 besser als Nd: YAG-Laser mit N_2 .

7 Bewertung und Ausblick

Wenn man die Faserlaser der Anlage UNIPOS 110 benutzte, schnitt eine Demonstrator Struktur nur 50,19s. Aber mit die Nd: YAG-Laser des KLS-Systeme kostete 79.85s. Faserlaser gab hohe Produktivität. Wenn man mit Faserlaser schnitt, entstand Grate niedriger als Nd: YAG-Laser Durch diese Vergleichen könnte man wissen, dass Faserlaser besser als Nd: YAG-Laser war.

8 Danksagung

Besonders möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Dipl.-Phys. Robby Ebert, Dipl.-Ing. (FH) Lars Hartwig, Dipl.-Ing. Jan Bachale und Jens Woytkowiak, B.Sc. bedanken. Sie übernahmen die umfangreiche Betreuung und unterstützten mich durch seine hilfreichen Anregungen und Ratschläge. Zudem gilt mein Dank auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner, der mir als Betreuender Professor ebenfalls unterstützend zur Seite stand.

Abschließend bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglicht haben und auf deren Unterstützung ich immer zählen kann und konnte. Außerdem bei meinen Freunden, die mich während dieser Zeit unterstützten und begleiteten.

9 Literatur

[1] Lasermaterialbearbeitung Grundlagen-Verfahren-Anwendungen-Beispiele:
Jens Bliedtner/ Hartmut Müller/ Andrea Barz

[2] Bedienungsanleitung UNIPOS 110. Für Software-Version: 10.4. ©1995 Föh-
renbach Positioniersystem

[3] Betriebsanleitung: Schneidkopf HP1,5“ (Z)/FL Lasermatic®(Z) Schneidkopf für
Faserlaser © Precitec KG · Version 10/2005

[4] <https://wiki.induux.de/images/4/44/Laserschneiden.png>

[5] <http://www.primes.de/de/sup>

[6] https://www.lmtc.tu-berlin.de/fileadmin/f28/Blockkurs_Teil2.pdf

1 Selbstständigkeitserklärung

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

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 31.05.2015

<unterschrift>

Jiadi Li