

# **Strategie und CAM-Entwicklung für die zylindrische 2.5D Laserbearbeitung**

Johannes Gysel

Semesterarbeit

HS 2015

Prof. Dr. Konrad Wegener

Maximilian Warhanek

Josquin Pfaff



# Zusammenfassung

In der Mikrobearbeitung gewinnen Ultrakurz-Puls-Laser durch ihre besonderen Eigenschaften zunehmend an Bedeutung. Bei dieser Bearbeitung ist man durch die steigende Komplexität im Fertigungsprozess zunehmend auf CAM Programme angewiesen.

Auf Basis eines vorhandenen CAM-Systems wurde in dieser Semesterarbeit ein erweitertes CAM Programm erstellt. Damit ist die synchrone Laserbearbeitung mit Drehachse und optischer Linearachse zur Herstellung zylindrischer Werkstücke möglich.

Für die Umsetzung des Programms wurden verschiedenen Laserstrategien für die Bearbeitung zylindrische Werkstücke analysiert. Damit konnte die optimale Strategie für den gegebenen Versuchsaufbau bestimmt werden.

Das Programm berechnet aus den dreidimensionalen Geometriedaten des gewünschten Werkstücks die Bahnlinien zu dessen Fertigung. Diese können als NC-Code für diverse Maschinen abgespeichert und ausgeführt werden. Zur einfacheren Bedienung des Programms wurde eine Benutzeroberfläche erstellt. Über diese können die Parameter zur Laserbearbeitung bequem eingegeben werden. Die berechneten Laserbahnen sind direkt über eine Grafik einsehbar. Dadurch können schon vor der Bearbeitung Fehler vermieden werden. Der Aufbau des CAM Programms ist in modulare Funktionen gegliedert. Damit ist der Programmcode übersichtlicher und kann einfacher an weitere Bedürfnisse angepasst werden. Das Programm und der Quellcode steht jedem zur Verfügung.

Der NC-Code für komplexe Werkstückgeometrien konnten mit dem CAM Programm einfach erstellt und auf der Maschine korrekt ausgeführt werden. In diversen Versuchen wurden so verschiedene Werkstücke gefertigt.



# Abstract

Due to the unique properties of ultrashort-pulsed lasers their use is becoming increasingly popular in micromachining. Because of the rising complexity of the production process CAM programs are used.

In this semester thesis an existing CAM-system was extended. With the new CAM program it is possible to use rotational and optical linear axis simultaneous to produce cylindrical workpieces.

Different laser strategies for the production of cylindrical workpieces were analysed. Thus, the optimal strategy for a given experimental setup could be evaluated.

In this program the synchronous movements of the optical and mechanical axes for production are calculated from the three-dimensional geometry of the desired workpiece. These trajectories can be saved as G-code, which can be adjusted for different laser processing machines. A graphical user interface was created. Thus, the parameters for laser processing can be entered more easily. The calculated trajectories can be viewed on a graphic. Therefor errors can be avoided before production. The structure of the CAM program is divided in modular functions. This makes the program code easier to adapt for other needs or processes. This program and the source code are available for everyone.

With the CAM program the G-code for complex geometries could easily be generated and was correctly executed by the machine. In various experiments different workpieces were produced.



---

## Strategie und CAM-Entwicklung für 3.5D Laserbearbeitung

Semesterarbeit

---

### Problemstellung

Der Einsatz von Ultrakurz-Puls-Lasertechnik in der Mikrobearbeitung erfreut sich steigendem Interesse in diversen Industrien (Werkzeug, Medizin, Luft und Raumfahrt, etc.). Neueste Steuerungssysteme erlauben die synchrone Anwendung von optischen Achsen und mechanischen Achsen (Abb. 1). Die IWF-Lasergruppe befasst sich intensiv mit der Entwicklung von Laserbearbeitungsverfahren, welche diese Kombination von Achsen nutzen, um den speziellen Anforderungen der Mikrobearbeitung gerecht zu werden. Zur industriellen Umsetzung dieser Prozesse sind entsprechende CAM-Systeme notwendig.

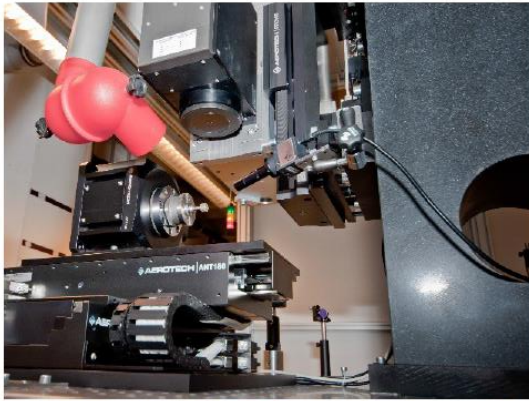


Abb. 1: Scankopf – CNC Kombination [Aerotech]

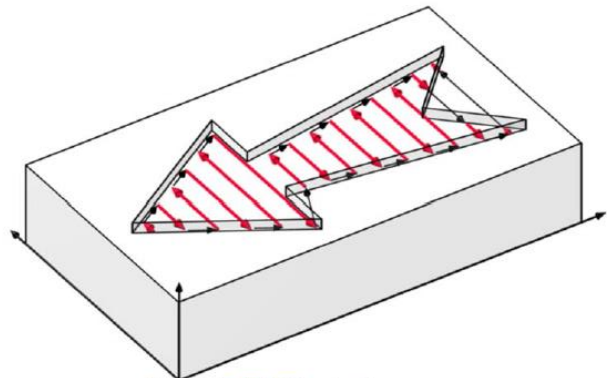


Abb. 2: 2.5D Bearbeitung

### Aufgaben

In dieser Arbeit soll ein, im Institut entwickeltes, CAM Programm für die 2.5D Laserbearbeitung erweitert werden um die Funktionalitäten auf die Bearbeitung einer Zylinderoberfläche zu erweitern (3.5D). Verschiedene Laserstrategien sollen implementiert und evaluiert werden.

- Literaturrecherche
- Programmierung neuer Scanstrategien
- Erweiterung der vorhandenen Software
- Evaluierung der Bearbeitungsstrategien

Vorkenntnisse im Bereich von Laserbearbeitung sind erwünscht aber nicht nötig.

### Kontakt

Maximilian Warhanek  
Josquin Pfaff

PFA H43  
PFA H43

044 633 78 40  
044 633 62 54

[warhanek@iwf.mavt.ethz.ch](mailto:warhanek@iwf.mavt.ethz.ch)  
[pfaff@iwf.mavt.ethz.ch](mailto:pfaff@iwf.mavt.ethz.ch)





## Danksagung

Ich bedanke mich herzlich bei meinen Betreuern Maximilian Warhanek und Josquin Pfaff. Sie ermöglichten mir, dass ich in dieser Semesterarbeit eine eigene Konzeptidee umzusetzen durfte. Sie haben mit ihrer Betreuung eine hervorragende Arbeit geleistet. Dank Maximilian Warhanek erhielt ich mit dieser Arbeit nicht nur viel neues Fachwissen, sondern auch fantastische Bilder und Videoaufnahmen.

Ein weiterer Dank geht an Thorsten Heeling, der sich bereit erklärte, seine funktionsfähige Steuerungskarte für diese Arbeit auszuleihen. Damit konnte nach langer Fehlersuche ein ärgerlicher Defekt in unserer Steuerungskarte gefunden und umgangen werden. Dank dieser Hilfe haben die durchgeführten Versuche letztlich zum Erfolg geführt.



# Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	i
Abstract .....	iii
Danksagung .....	vii
Inhaltsverzeichnis .....	ix
Abbildungsverzeichnis .....	xi
Tabellenverzeichnis .....	xiii
Nomenklatur .....	xv
1. Einleitung .....	1
2. Stand der Technik .....	3
2.1 2.5D Laserbearbeitung kartesischer Werkstücke .....	3
2.2 Laserbearbeitung zylindrische Werkstücke .....	4
2.2.1 Hochpräzise Mikrobearbeitung eines rotierenden Zylinders .....	4
2.2.2 Laserfertigung eines Mikroschleifwerkzeugs aus Diamant .....	5
2.2.3 Mikrofräser aus monokristallinem Diamant .....	5
2.3 Radiale und tangential Laserbearbeitung .....	6
2.3.1 Anwendung radialer Laserbearbeitung .....	7
2.3.2 Anwendung tangentialer Laserbearbeitung .....	7
2.4 CAM Programme .....	8
2.4.1 Siemens NX .....	8
2.4.2 CAGILA .....	9
3. Versuchsaufbau und Hilfsmittel .....	11
3.1 Versuchsaufbau .....	11
3.2 Matlab .....	12
3.3 Optische Messgeräte .....	12

3.3.1	Oberflächenrauheit.....	12
4.	Analyse der Laserstrategien.....	13
4.1	Laserstrategie 1 .....	14
4.2	Laserstrategie 2 .....	15
4.3	Laserstrategie 3 .....	15
4.4	Laserstrategie 4 .....	16
4.5	Laserstrategie 5 .....	17
4.6	Laserstrategie 6 .....	18
5.	CAM Programmierung .....	21
5.1	Übersicht .....	21
5.2	Konstruktion der Modellgeometrie.....	22
5.3	Abrollen der zylindrischen Geometrie.....	22
5.3.1	Spaltung eines Dreiecks .....	23
5.4	Berechnung der Schnittkonturen.....	24
5.5	Berechnung der Schraffuren .....	24
5.5.1	Umrechnung der Y-Koordinaten .....	25
5.5.2	Anpassung des Linienabstandes.....	25
5.5.3	Verzerrungstransformation .....	26
5.5.4	Berechnung der Schraffurlinien .....	26
5.6	Drehoffset zwischen den Abtragsflächen.....	27
5.7	Die Benutzeroberfläche.....	28
5.7.1	Aufbau der Benutzeroberfläche .....	28
5.7.2	Parametereingabe zur Bahnberechnung.....	29
5.7.3	Erstellen des NC-Codes .....	29
6.	Durchgeführte Versuche und Diskussion.....	31
6.1	Spiralbohrer.....	31
6.2	Gewinde .....	33
7.	Schlussfolgerung und Ausblick .....	35
	Anhang.....	37
A.1	Anleitung zum Ausführen des NC-Codes.....	37
A.2	Daten auf der beigelegten CD .....	39
	Literaturverzeichnis .....	41
	Plagiatserklärung.....	43

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	2.5D Laserbearbeitung eines kartesischen Werkstücks.....	3
Abbildung 2.2:	Durch 2.5D Laserbearbeitung gefertigte Geometrie einer Wendelschneidplatte [4] .....	4
Abbildung 2.3:	Versuchsaufbau zum Bearbeiten eines rotierenden Zylinders [5] .....	4
Abbildung 2.4:	Mikroschleifwerkzeug aus Diamant [6] .....	5
Abbildung 2.5:	Fertigung eines Mikrofräasers aus monokristallinem Diamant [7] .....	6
Abbildung 2.6:	Radiale und tangentielle Laserbearbeitung.....	6
Abbildung 2.7:	Radiale Laserbearbeitung zur Fertigung einer axialen Nut [8].....	7
Abbildung 2.8:	Durch tangentielle Laserbearbeitung gefertigter Mikrofräser [10].....	7
Abbildung 2.9:	Bahnberechnung für die Dreh- Fräsbearbeitung mit Siemens NX .....	8
Abbildung 2.10:	Zylindrische Bahnberechnung mit der CAM Software CAGILA [12] .....	9
Abbildung 3.1:	Darstellung des Versuchsaufbaus mit 1 Laser, 2 Polarisatoren, 3 Teleskop, 4 Scankopf, 5 mechanische Z-Achse, 6 Drehachse, 7 Kreutztisch.....	11
Abbildung 4.1:	Verschiedene Laserbearbeitungsstrategien.....	13
Abbildung 4.2:	Bahnlinien und Parameter von Laserstrategie 1 .....	14
Abbildung 4.3:	Bahnlinien und Parameter von Laserstrategie 2 .....	15
Abbildung 4.4:	Bahnlinien und Parameter von Laserstrategie 3 .....	16
Abbildung 4.5:	Bahnlinien und Parameter von Laserstrategie 4 .....	17
Abbildung 4.6:	Bahnlinien und Parameter von Laserstrategie 5 .....	18
Abbildung 4.7:	Problematik von Laserstrategie 6 .....	18
Abbildung 4.8:	Bahnlinien und Parameter von Laserstrategie 6 .....	19
Abbildung 5.1:	Bahnlinien und Parameter von Laserstrategie 5 .....	21
Abbildung 5.2:	Geometrie des Rohlings, des Werkstücks und des Negativs .....	22
Abbildung 5.3:	Abrollen der zylindrischen Geometrie .....	23
Abbildung 5.4:	Transformation einer Dreiecksfläche .....	23
Abbildung 5.5:	Spaltung einer Dreiecksfläche .....	24
Abbildung 5.6:	Übersicht der Schraffurberechnung.....	25
Abbildung 5.7:	Anpassung des Linienabstandes .....	26
Abbildung 5.8:	Berechnung der Schraffur- und Skywritelinien.....	27
Abbildung 5.9:	Drehoffset zwischen den Abtragsflächen $I_d$ .....	27
Abbildung 5.10:	Benutzeroberfläche des CAM Programms .....	28
Abbildung 5.11:	Anpassung der NC-Befehle .....	30
Abbildung 6.1:	Zylinderrohling, das abgetragene Volumen und die Zielgeometrie .....	31

Abbildung 6.2:	Mikroskopaufnahmen des Spiralbohrers .....	32
Abbildung 6.3:	Trapezförmiges Profil der Spannut .....	32
Abbildung 6.4:	Zylinderrohling, die abgetragenen Volumina und die Zielgeometrie .....	33
Abbildung 6.5:	Mikroskopaufnahmen des gefertigten Gewindes.....	34
Abbildung 6.6:	Topologie- und Profilaufnahme des Gewindes.....	34
Abbildung A.1:	Benutzeroberfläche des Configuration Manager von Aerotech.....	37
Abbildung A.2:	Benutzeroberfläche des Motion Composer von Aerotech .....	38

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1:	Parameter zur Auswertung der Formeln jeder Laserstrategie .....	14
Tabelle 6.1:	Verwendete Parameter für die Fertigung.....	33





# Nomenklatur

$P_a$	Durchschnittliche Laserleistung	[W]
$f_P$	Pulsfrequenz des Lasers	[kHz]
$\tau_p$	Pulsdauer eines Laserimpulses	[ps]
$E_p$	Pulsenergie	[ $\mu$ J]
$M^2$	Beugungsmasszahl	[-]
$\lambda$	Wellenlänge	[nm]
$d_f$	Strahldurchmesser im Fokus	[ $\mu$ m]
$d_e$	Strahldurchmesser vor der Linse	[ $\mu$ m]
$f$	Brennweite	[mm]
$\theta$	Öffnungswinkel	[Grad]
$z_R$	Rayleighlänge	[ $\mu$ m]
$v_A$	Geschwindigkeit der Drehachse	[°/s]
$a_A$	Beschleunigung der Drehachse	[°/s <sup>2</sup> ]
$v_s$	Scangeschwindigkeit	[mm/s]
$a_s$	Beschleunigung der optischen Achse	[m/s <sup>2</sup> ]
$s$	Beschleunigungsstrecke	[ $\mu$ m]
$l_s$	Skywritelänge	[ $\mu$ m]
$l_b$	Linienabstand zwischen den Laserbahnen	[ $\mu$ m]
$l_z$	Schichtdicke	[ $\mu$ m]
$l_x$	Länge der bearbeiteten Mantelfläche	[mm]
$l_d$	Drehoffsetlänge zwischen den Abtragsflächen	[mm]
$d$	Durchmesser	[mm]

$\delta$	Schraffurwinkel	[Grad]
$n$	Anzahl Sektorflächen	[-]
$\varphi$	Abrollwinkel	[Grad]
$r$	Radius zur X-Achse	[mm]
$k$	Verhältnis zwischen Markierlinie und Jumpline	[-]
$Ra$	Arithmetischer Mittelwert der Profilordinate	[ $\mu\text{m}$ ]
$E$	Eckpunkt	
$S$	Schnittpunkt	
CAM	Computer Aided Manufacturing	
CAD	Computer Aided Design	
CVD	Chemical Vapor Deposition	

## Einleitung

1960 entwickelte Theodore Maiman den ersten funktionierenden Laser. Mit einer Xenon Blitzlampe beleuchtete er einen Rubinkristall. Dieser emittierte rotes Licht mit einer Wellenlänge von 694 nm. Mit einer Spiegeloptik konnte er einen gezielten Laserstrahl erzeugen [1].

In den darauf folgenden Jahren wurden von weiteren Wissenschaftlern zahlreiche neue Lasertypen entwickelt. War damals die Anwendung von Lasern unbekannt, ist sie heute aus vielen Bereichen nicht mehr wegzudenken. Gerade in der Fertigungstechnik erfreut sich die Laserbearbeitung zunehmenden Interesses.

Die Laserbearbeitung hat gegenüber herkömmlichen Bearbeitungsverfahren mehrere Vorteile. Da sie berührungslos ist, gibt es keine mechanischen Beschädigungen durch Prozesskräfte zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück. Zudem gibt es keine Abnutzung der Werkzeuge wie es beispielsweise beim Fräsen, beim Drehen oder beim Funkenerodieren der Fall ist. Ein weiterer Vorteil der Laserbearbeitung ist die hohe Flexibilität. Da man nicht auf die Geometrie von mechanischen Bearbeitungswerkzeugen eingeschränkt ist, kann die Bearbeitung nur durch Ändern des NC-Codes jederzeit angepasst werden [2].

Die Erstellung des NC-Codes geschieht vermehrt durch CAM Programme. Ohne diese wäre die Berechnung der Bahnlinien für komplexe Bearbeitung nicht möglich, da es für den Menschen einfach zu lange dauern würde um die vielen Zeilen NC-Code zu schreiben.

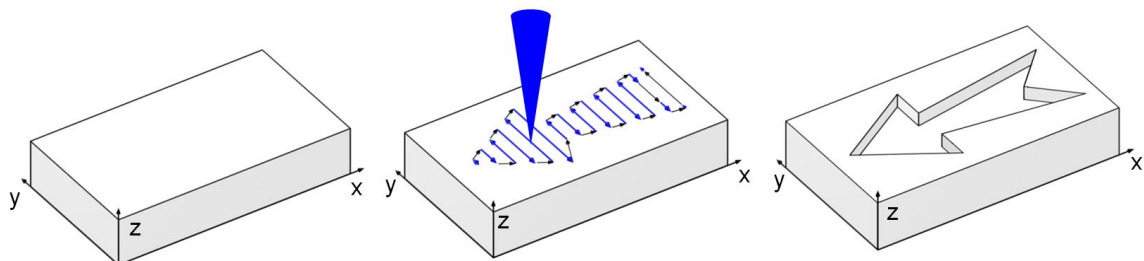
Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein bestehendes CAM-System aus der Bachelorarbeit mit dem Titel „Entwicklung eines CAM-Systems für 2D und 2.5D Laserbearbeitung“ erweitert [3]. Dank dieser Erweiterung kann der NC-Code für die Laserbearbeitung komplexer zylindrischer Werkstücke einfach erstellt werden.



## Stand der Technik

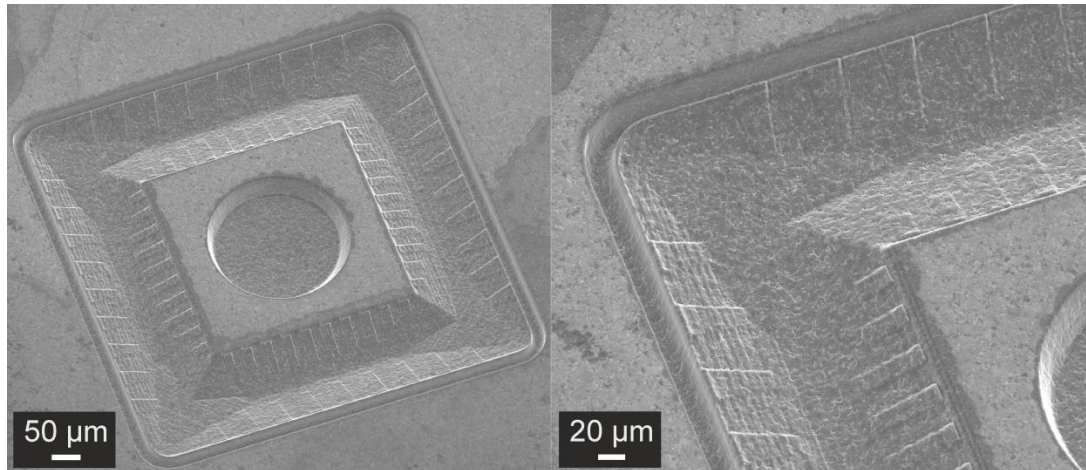
### 2.1 2.5D Laserbearbeitung kartesischer Werkstücke

Bei der 2.5D Laserbearbeitung wird der Fokus des Lasers in engen Bahnen über die Oberfläche des Werkstücks geführt. Dieser trägt das Material durch sehr kurze intensive Lichtimpulse ab. Mithilfe einer Positionierachse parallel zur optischen Achse des Laserstrahls wird der Fokus jeweils um eine Schichtdicke nachgestellt. Der Materialabtrag erfolgt Schicht um Schicht bis die gewünschte Zielgeometrie erreicht ist. In Abbildung 2.1 ist dieser Prozess veranschaulicht.



**Abbildung 2.1:** 2.5D Laserbearbeitung eines kartesischen Werkstücks

Obwohl für die 2.5D Laserbearbeitung nur drei Bearbeitungsachsen nötig sind, können trotzdem komplexe Geometrien abgetragen werden. Die einzige Einschränkung ist, dass keine Hinterschneidungen möglich sind. In einem Artikel von Gregory Eberle und Claus Dold ist die Anwendung und Fertigung von feinen Strukturen in harten Materialien durch 2.5D Laserbearbeitung beschrieben [4]. Gerade bei der Herstellung von Wendschneidplatten bietet dieses Verfahren neue Möglichkeiten. Herkömmliche Schleifprozesse stoßen hier an ihre Grenzen. Eine durch 2.5D Laserbearbeitung gefertigte Geometrie einer Wendschneidplatte ist in Abbildung 2.2 ersichtlich. Dank dieser Struktur kann der Span beim Drehen gezielt abgeführt werden.



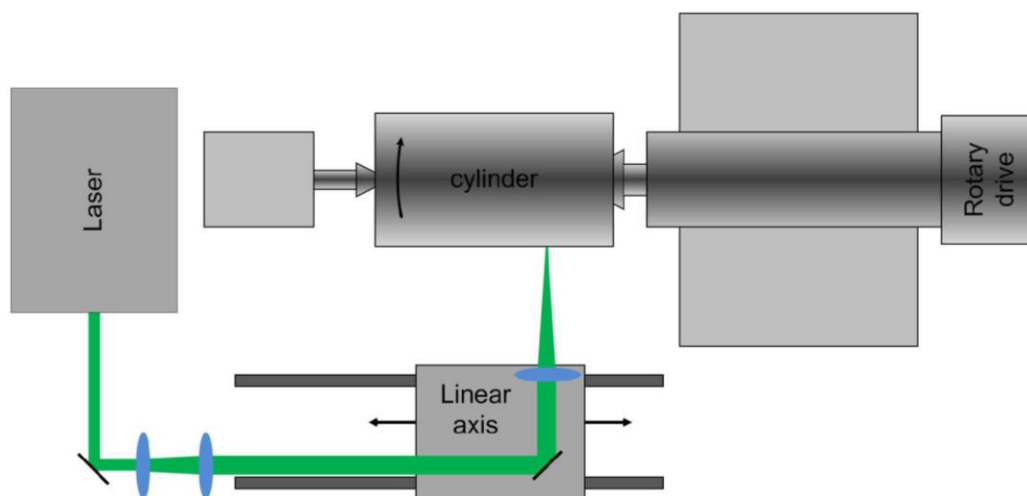
**Abbildung 2.2:** Durch 2.5D Laserbearbeitung gefertigte Geometrie einer Wendelschneidplatte [4]

## 2.2 Laserbearbeitung zylindrische Werkstücke

Die Laserbearbeitung zylindrischer Werkstücke erfolgt ähnlich wie bei der 2.5D Laserbearbeitung. Der Materialabtrag erfolgt in mehreren Schichten radial von aussen nach innen. Das Werkstück muss während der Bearbeitung gedreht werden. Dazu ist eine mechanische Drehachse notwendig.

### 2.2.1 Hochpräzise Mikrobearbeitung eines rotierenden Zylinders

An der Berner Fachhochschule für angewandte Physik befasst sich eine Gruppe mit der Anwendung von Ultrakurz-Puls- Lasern in der Mikrobearbeitung. In einer Studie haben sie diverse Versuche zur Laserbearbeitung rotierender Zylinder durchgeführt [5]. In Abbildung 2.3 ist der verwendete Versuchsaufbau abgebildet. Mit Hilfe des gepulsten Lasers wurde von einem rotierenden Stahlzylinder, der galvanisch mit Kupfer beschichtet wurde, gezielt Material in mehreren Bearbeitungsschichten abgetragen. Mit einer mechanischen Linearachse konnte der Fokus des Lasers parallel zur Zylinderachse ausgerichtet werden.

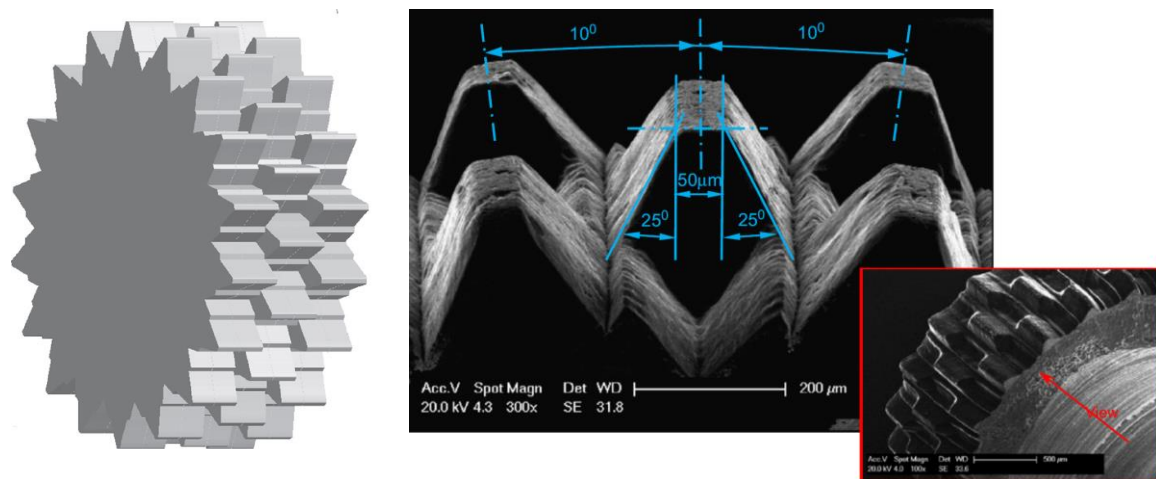


**Abbildung 2.3:** Versuchsaufbau zum Bearbeiten eines rotierenden Zylinders [5]

Mit einer Drehgeschwindigkeit von 8.5 Umdrehungen pro Sekunde erreichte der Zylinder mit einem Durchmesser von 150 mm eine Oberflächengeschwindigkeit von 4 m/s. Mit einer speziell entwickelten Steuerung wurde die Bewegungen der Dreh- und Linearachse gezielt auf die Pulse des Lasers abgestimmt. Dadurch war es möglich mit dem Laser denselben Punkt auf dem rotierenden Zylinder mit einer Genauigkeit von  $1\text{ }\mu\text{m}$  zu treffen. Anhand von Schwarzweissbildern wusste die Steuerung, wo die einzelnen Lichtimpulse auf dem Zylinder platziert werden mussten. Jeder schwarze Pixel entsprach dabei dem Materialabtrag durch einen Lichtimpuls.

### 2.2.2 Laserfertigung eines Mikroschleifwerkzeugs aus Diamant

Durch die Verwendung eines gepulsten Lasers ist es einer Gruppe an der Universität von Nottingham gelungen ein Mikroschleifwerkzeug aus Diamant herzustellen [6]. Das Ausgangsmaterial für das Schleifwerkzeug war eine zylindrische Scheibe aus polykristallinem CVD Diamant mit einem Durchmesser von 3mm und einer Dicke von 0.9 mm. Um aus diesem Ausgangsmaterial die Zielgeometrie, die in Abbildung 2.4 links dargestellt ist zu erhalten, wurde das Werkstück mit einer präzisen Drehachse 36 Mal um  $10^\circ$  gedreht. Nach jedem Nachstellen dieses Winkels wurde mit dem Laser und zwei optischen Linearachsen gezielt Material von dem Diamanten abgetragen. In Abbildung 2.4 rechts ist eine vergrößerte Elektronenmikroskopaufnahme der Schneidzähne des gefertigten Mikroschleifwerkzeugs ersichtlich.



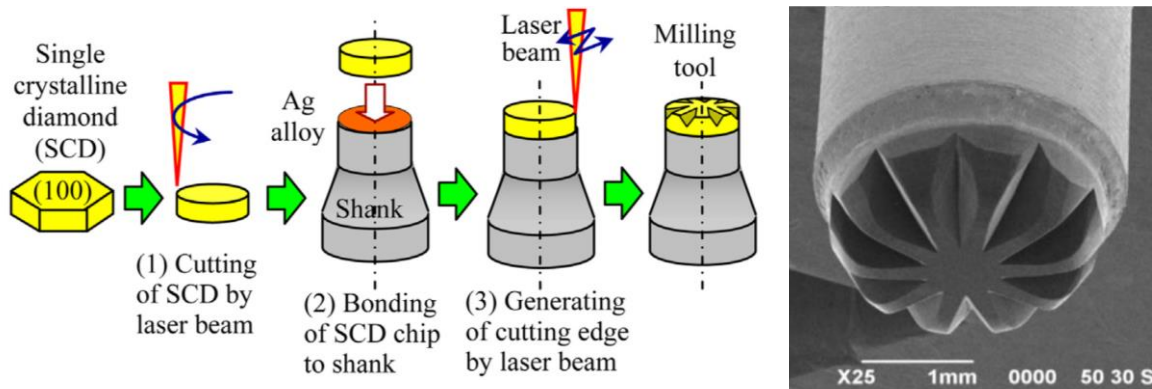
**Abbildung 2.4:** Mikroschleifwerkzeug aus Diamant [6]

Schleifversuche mit Ti–Al–4V haben gezeigt, dass das Mikroschleifwerkzeug gegenüber herkömmlichen, mit Diamantkörnern versetzten Schleifscheiben eine deutlich bessere Oberflächenqualität erzeugt. Zudem erreicht der Mikrofräser durch das Layout der Schneiden eine erhöhte Standzeit und gleichmässige Prozesskräfte bei der Bearbeitung.

### 2.2.3 Mikrofräser aus monokristallinem Diamant

Zur Bearbeitung von keramischen Werkstoffen wurde an der Chubu University in Japan ein Mikrofräser aus monokristallinem Diamant gefertigt [7]. Diese Bearbeitung wurde durch die Verwendung eines gepulsten IR YVO<sub>2</sub> Lasers mit einer Wellenlänge von 1064 nm möglich. Abbildung 2.5 links zeigt den Fertigungsprozess des Mikrofräasers. Im ersten Schritt wurde mit dem Laser eine zylindrische Scheibe aus dem monokristallinen Rohdiamant geschnitten. Diese wurde mit einer Silberlegierung auf einen Schaft aus Hartmetall verbunden. Im letzten Schritt wurden die Schneidezähne auf der Stirnfläche des Fräasers mit dem Laser und der Positionierbewegung des Werkstücks mit drei mechanischen Linearachsen abgetragen. Abbildung

2.5 rechts zeigt eine vergrößerte Aufnahme des gefertigten Mikrofräasers. Dieser ist mit 10 Schneidezähnen bestückt und hat einen äusseren Durchmesser von 2 mm.

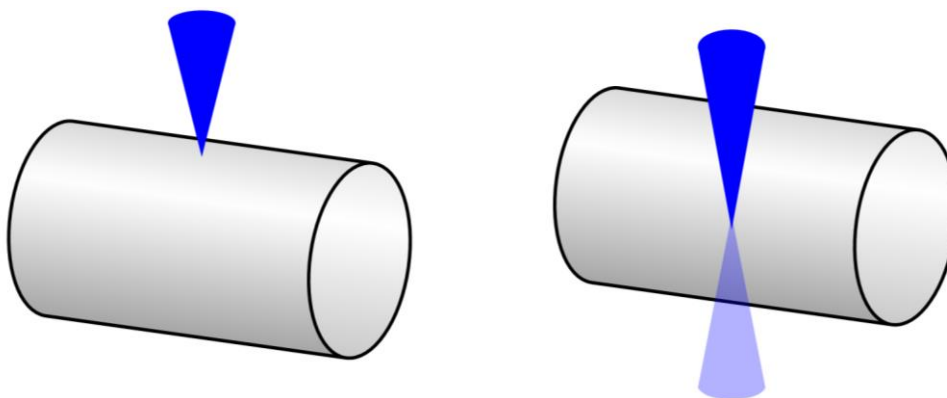


**Abbildung 2.5:** Fertigung eines Mikrofräasers aus monokristallinem Diamant [7]

Mit dem gefertigten Mikrofräser konnte bei einer Drehzahl von 50'000 Umdrehungen pro Minute Wolframcarbid duktil gefräst und eine Formgenauigkeit von 100 nm mit einer Oberflächenrauheit von 12 nm  $R_z$  erreicht werden. Mit dieser Genauigkeit ist die Fertigung von hochpräzisen Gesenkschmieden für die Herstellung optischer Komponenten möglich.

## 2.3 Radiale und tangentielle Laserbearbeitung

Bei der Laserbearbeitung zylindrischer Werkstücke gibt es zwei grundlegende Bearbeitungsstrategien. Bei der radialen Laserbearbeitung (siehe Abbildung 2.6 links) wird der Laser radial auf das Werkstück gerichtet. Da die Energie des Laserstrahls besser ins Werkstück gelangt, erreicht man auch bei geringer Laserleistung einen erhöhten Materialabtrag. Zudem hat man eine höhere Effizienz und geometrische Flexibilität. Da die radiale Laserbearbeitung ein abbildendes Verfahren ist, sind die einzelnen Lichtimpulse und die Bahnen des Lasers auch auf dem Werkstück zu erkennen. Zudem können sich Unebenheiten und Defekte auf der Startoberfläche bei der Bearbeitung fortsetzen. Deshalb resultiert bei der radialen Laserbearbeitung eine geringere Oberflächenqualität.



**Abbildung 2.6:** Radiale und tangentielle Laserbearbeitung

Bei der tangentialen Laserbearbeitung (siehe Abbildung 2.6 rechts) ist der Laser tangential auf das Werkstück gerichtet. Bei dieser Bearbeitung wird ein Teil der Laserstrahlung an der Oberfläche reflektiert. Dadurch hat man bei erhöhter Laserleistung einen geringen Materialabtrag. Dafür erreicht man eine bessere Oberflächenqualität. Die tangentielle Laserbearbeitung ist nur bei Werkzeuggeometrien anwendbar, bei denen sich der fokussierte Laserstrahl auch tangential an die Oberfläche des Werkstücks schmiegen kann. Diese Einschränkung hat man bei der radialen



Laserbearbeitung nicht. Deshalb können bei der radialen Laserbearbeitung auch komplexere Geometrien mit Taschen oder kleinsten Oberflächenstrukturen realisiert werden. In dieser Arbeit wird nur die radiale Laserbearbeitung verwendet.

### 2.3.1 Anwendung radialer Laserbearbeitung

Pascal Gilgen machte in seiner Semesterarbeit diverse Versuche zur Fertigung einer axialen Rundnut in einem Zylinderrohling, der aus zwei verschiedenen Materialien zusammengesetzt war [8]. Diese Nut wurde durch 2.5D Laserbearbeitung in mehreren Schichten abgetragen. Abbildung 2.7 links veranschaulicht, wie die radiale Bearbeitung zur Fertigung der Nut erfolgte. Der polykristalline Diamant ist schwarz und das Hartmetall grau dargestellt. Der Durchmesser des Zylinderrohrlins beträgt 6 mm. Die Berechnung der Laserbahnen erfolgte mit dem CAM Programm SamLight3D. Zur Fertigung der 15 mm langen und 1.2 mm breiten Nut wurde eine Laser Line von EWAG benutzt [9]. Das treppenartige Profil auf der Topologieaufnahme der Rundnut in Abbildung 2.7 rechts lässt sich dadurch erklären, dass die radiale Laserbearbeitung ein abbildendes Verfahren ist und damit die einzelnen abgetragenen Schichten sichtbar werden.

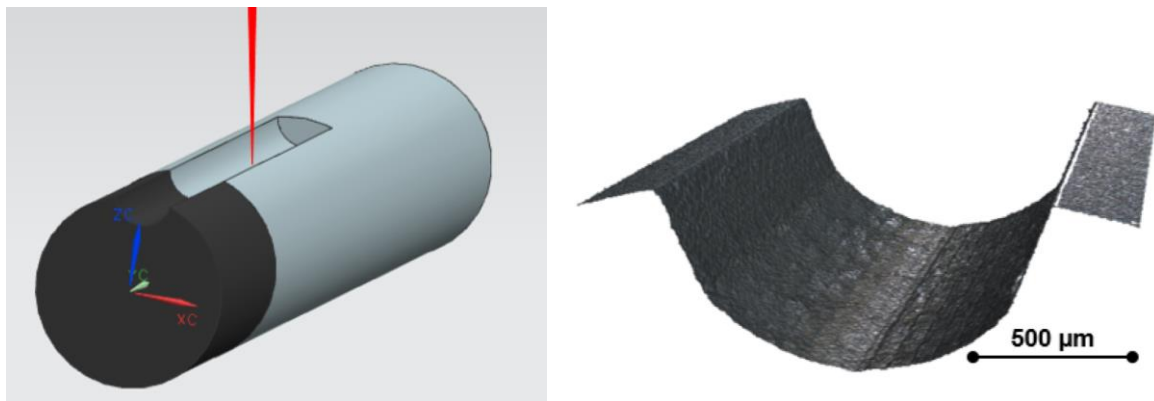


Abbildung 2.7: Radiale Laserbearbeitung zur Fertigung einer axialen Nut [8]

### 2.3.2 Anwendung tangentialer Laserbearbeitung

In der Masterarbeit von Shoshana Huber wurden diverse Versuche zur tangentialen Laserablation durchgeführt und mit diesem Verfahren ein Mikrofräser aus Hartmetall erzeugt [10]. Dieser besitzt zwei Schneidezähne und hat einen Durchmesser von 2 mm. Eine Mikroskopaufnahme des gefertigten Fräsers ist in Abbildung 2.8 dargestellt.



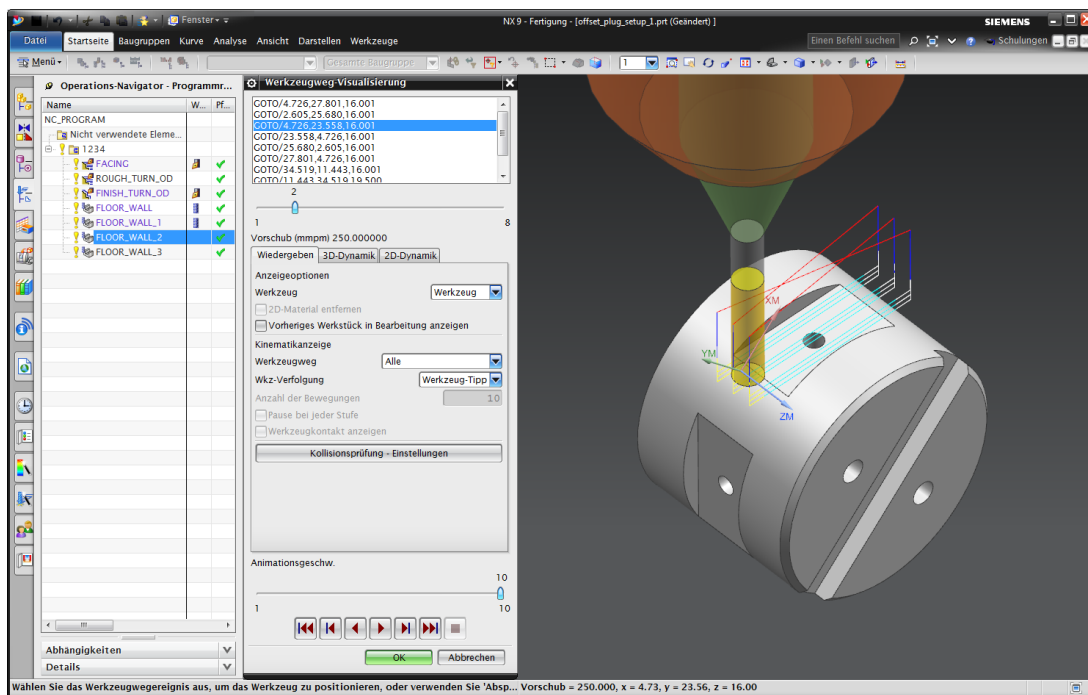
Abbildung 2.8: Durch tangentiale Laserbearbeitung gefertigter Mikrofräser [10]

Die Fertigung erfolgte auf der Laser Line der Firma EWAG. Diese hat 3 optische und 5 mechanische Bearbeitungsachsen [9]. Diese Vielzahl von Achsen ist nötig damit das Werkstück bei der tangentialen Laserbearbeitung korrekt gegenüber dem Laserstrahl ausgerichtet werden kann. Die Fertigung erfolgte in 5 Schritten. Bei jedem Teilschritt wurde das Werkstück in die richtige Lage und Position gebracht und durch gezielte Laserablation ein bestimmtes Volumen abgetragen um das gewünschte Formelement zu erhalten. Im letzten Bearbeitungsschritt wurde das Werkstück mit konstanter Geschwindigkeit gedreht und mit tangentialer Laserbearbeitung der Durchmesser reduziert. Dadurch wurden die Hauptschneiden geschärft und ein Schneidkantenradius von 2  $\mu\text{m}$  erreicht. Dank der tangentialen Laserbearbeitung konnte bei der Aussenkontur ein Ra Wert von 135 nm erreicht werden. Die Ra Werte der anderen Oberflächen liegen in einem ähnlichen Bereich.

## 2.4 CAM Programme

### 2.4.1 Siemens NX

Siemens NX ist ein CAD und CAM Programm der Firma Siemens PLM Software. Es erlaubt die Konstruktion von Werkstückgeometrien, die auch komplexe Freiformflächen enthalten. Mit dem CAM Modul können die Werkzeugbahnen für die Synchronbearbeitung mit bis zu 5 Achsen berechnet werden. Über einen Postprozessor kann der NC-Code für die entsprechende Dreh- oder Fräsmaschine erstellt werden [11]. Abbildung 2.9 zeigt wie mit Siemens NX die Fräserbahnen auf einem zylindrischen Drehteil erstellt werden.



**Abbildung 2.9:** Bahnberechnung für die Dreh- Fräsbearbeitung mit Siemens NX

Für die Fertigung von komplexen Werkstücken, wie es in Abbildung 2.9 der Fall ist, muss bei der Bearbeitung zwischen verschiedenen Dreh- und Fräswerkzeugen gewechselt und die entsprechende Bearbeitungsstrategie angepasst werden. Dazu gibt es in Siemens NX eine sehr grosse Auswahl an Funktionen und Möglichkeiten. Durch die hohe Funktionalität und Komplexität ist die Benutzerfreundlichkeit des Programms eingeschränkt.

## 2.4.2 CAGILA

CAGILA 3D ist eine kommerziell erhältliche Software der Firma CAM-Service und ermöglicht die Bahnberechnung für verschiedene Strahlbearbeitungsverfahren [12]. Durch die Synchronbearbeitung von bis zu 5 Achsen kann der Anstellwinkel des Schneidstrahls gegenüber der Oberfläche des Werkstücks angepasst werden. Dadurch können komplexe Konturen auf Rohren ausgeschnitten werden. Wie diese Schneidbahnen in CAGILA berechnet werden wird in Abbildung 2.10 veranschaulicht.

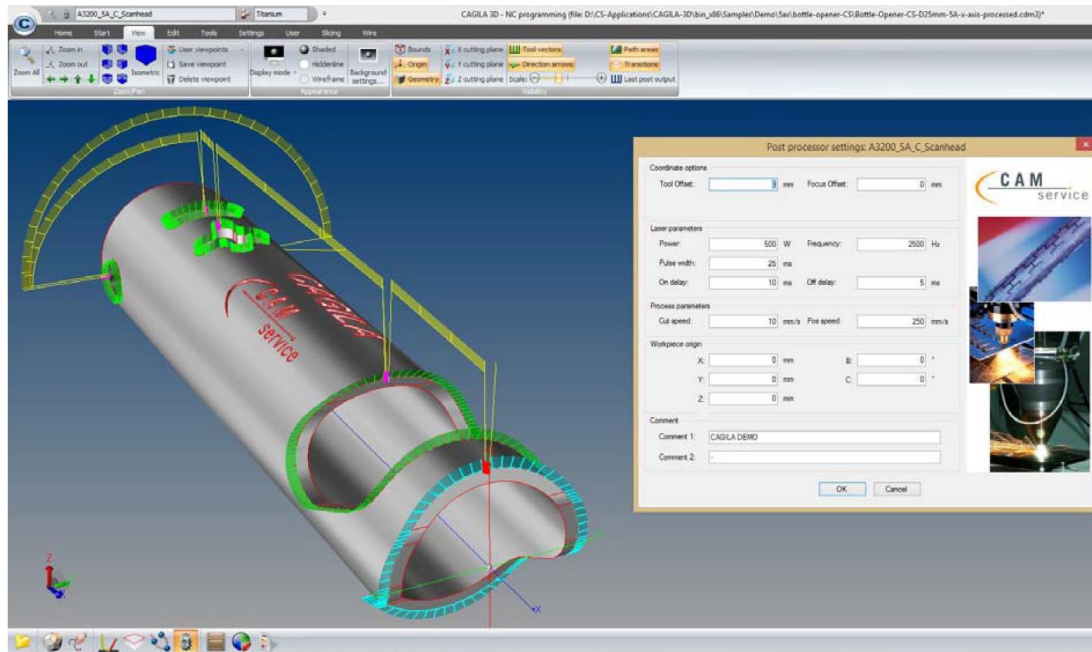


Abbildung 2.10: Zylindrische Bahnberechnung mit der CAM Software CAGILA [12]

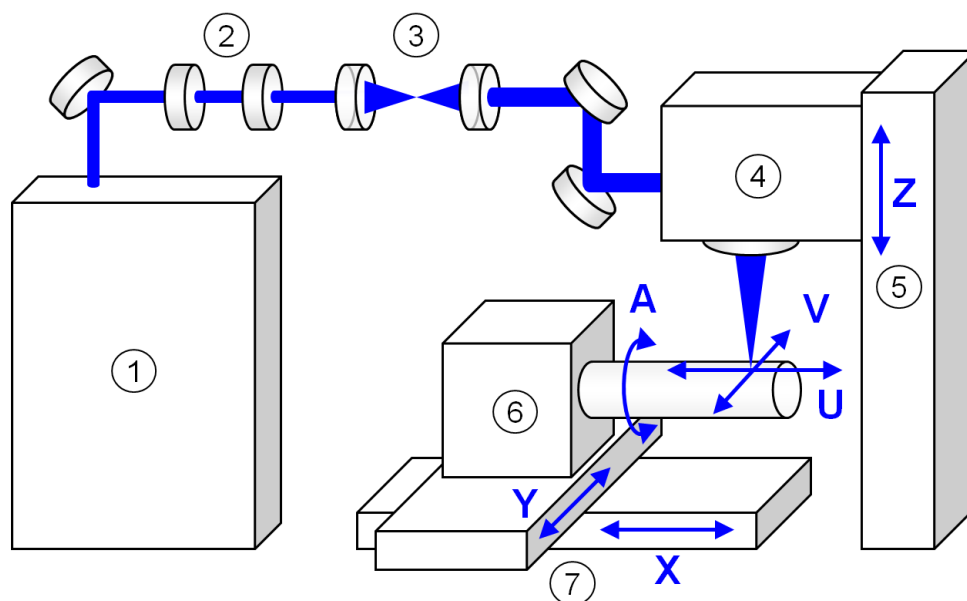
Mit einem Slicing-Modul kann mit CAGILA 3D zusätzlich die Bahnberechnung für den dreidimensionalen Volumenabtrag erstellt werden. Dieser berechnet für jede Bearbeitungsebene splinebasierte, zweidimensionale Kurven, die mit der CAGILA 2D Software weiter verarbeitet werden können. Mit einem 3 Achsen-Scanner ist so ein 2.5D Flächenabtrag beziehungsweise Flächenauftrag möglich.



## Versuchsaufbau und Hilfsmittel

### 3.1 Versuchsaufbau

Abbildung 3.1 gibt einen guten Überblick über den Versuchsaufbau wie er in dieser Arbeit verwendet wurde.



**Abbildung 3.1:** Darstellung des Versuchsaufbaus mit 1 Laser, 2 Polarisatoren, 3 Teleskop, 4 Scankopf, 5 mechanische Z-Achse, 6 Drehachse, 7 Kreuztisch

Der verwendete Duetto Ultrakurz-Puls-Laser ist von der Firma Time-Bandwidth Products und hat eine durchschnittlichen Laserleistung  $P_a$  von 10 bis 15W. Die Pulsdauer  $\tau_p$  eines einzelnen Lichtimpulses ist dabei kürzer als 12ps. Die Wellenlänge  $\lambda$  kann zwischen 1064nm, 532nm und 355nm umgeschaltet werden. In dieser Arbeit wurde nur mit 532nm gearbeitet. Die Pulsfrequenz  $f_p$  kann zwischen 50kHz und 8.2MHz eingestellt werden [13]. Vom Laser gelangt der Strahl durch zwei Polarisatoren. Diese ändern das linear polarisierte Licht des Lasers in

zirkularpolarisiertes. Danach gelangt der Laserstrahl in ein Teleskop mit dem der Durchmesser des Laserstrahls vergrößert wird. Anschliessend gelangt der Laserstrahl in den Scankopf IntelliSCAN 14 der Firma SCANLAB. Dieser lenkt den Strahl durch zwei hochdynamische Umlenkspiegel in U- und V-Achsenrichtung um. Am Scankopf ist eine F-Theta Linse montiert. Damit wird der Laserstrahl auf die Oberfläche des Werkstücks fokussiert. Durch den Scankopf wird eine Beschriftungsgeschwindigkeit von bis zu 2000 mm/s und eine Positioniergeschwindigkeit von 5000 mm/s erreicht [14]. Der Scankopf ist an einer mechanischen Z-Achse befestigt. Diese ist eine PRO165 der Firma Aerotech. Mithilfe dieser kann der Fokus des Lasers auf die Oberfläche des Werkstücks justiert werden. Das Werkstück ist in einer Drehachse eingespannt und kann so um die Rotationsachse A gedreht werden. Die Drehachse vom Typ AP150DR-115 ist von der Firma Aerotech. Sie hat eine maximale Beschleunigung von  $450 \text{ rad/s}^2$  [15]. Die maximale gemessene Drehzahl liegt bei 7.5 Umdrehungen pro Sekunde. Die Drehachse ist auf einem mechanischen X-Y-Kreuztisch montiert. Beide Achsen sind vom Typ ANT180 und ebenfalls von der Firma Aerotech. Der Kreuztisch wird vor der Laserbearbeitung benutzt um das Werkstück korrekt in X- und Y-Position unter dem Scankopf zu platzieren. Während der Laserbearbeitung wird nur die Drehachse A, die optische Achse U und die Z-Achse verwendet.

Der Scankopf ist über einen Nmark SsaM Controller mit dem Computer verbunden. Mit diesem Controller wird zudem das Signal generiert um den Laser an- und auszuschalten. Leider war der Ausgang, der dieses Signal generiert schon zu Beginn der Arbeit defekt. Nach einer langen Fehlersuche konnte diese Fehlerquelle durch Austauschen eines neuen Controllers eliminiert werden. Jede mechanische Achse ist ebenfalls über einen Controller mit dem Computer verbunden. Auf dem Computer können über die Software Motion Composer die verschiedenen Achsen angesteuert werden. Diese Produkte sind von der Firma Aerotech und bilden zusammen die CNC-Steuerung A3200. Alle Achsen und der Laser können mit NC-Befehlen nach ISO 6983 [16] angesteuert werden. Trotzdem sind einzelne NC-Befehle wie bei vielen CNC-Steuerungen produktbezogen.

## 3.2 Matlab

Matlab ist eine kommerzielle Software des Unternehmens The MathWorks, Inc. Matlab ist primär für numerische Berechnungen mithilfe von Matrizen ausgelegt, woher sich auch der Name ableitet: MATrix LABoratory [17].

Das gesamte CAM Programm dieser Arbeit wurde mit Matlab programmiert. Der Vorteil von Matlab ist, dass es relativ einfach zu benutzen ist. Der Code kann jederzeit gestoppt und die Variablen angezeigt werden. Diese Werkzeuge sind sehr hilfreich bei der Analyse des Programmcodes. Zudem ist die Darstellung von dreidimensionalen Objekten, Punkten und Geraden durch die bereits vorhandenen Funktionen einfach zu realisieren.

## 3.3 Optische Messgeräte

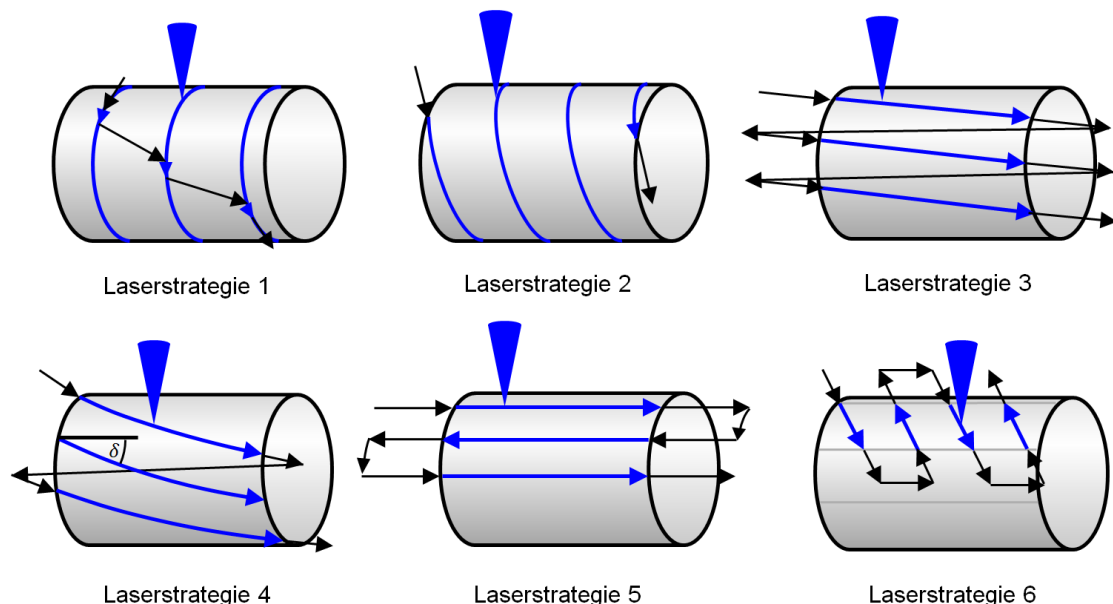
Zur Auswertung der gefertigten Werkstücke wurde zwei Lichtmikroskope des Herstellers Leica benutzt. Das Leica M80 hat einen Vergrößerungsfaktor von 7.5 bis 60. Es dient zur einfachen optischen Überprüfung der Werkstücke. Das Leica DCM 3D bietet die Möglichkeit, durch mehrere konfokale Aufnahmen ein topografisches Oberflächenbild zu erstellen.

### 3.3.1 Oberflächenrauheit

Die Rauheitsmessungen in dieser Arbeit wurden nach DIN EN ISO 4288 durchgeführt. Diese definiert eine Mindestlänge der Profilmessstrecke sowie die Grenzwellenlänge des Profilfilters. In den Messungen wurden Ra-Werte zwischen  $0.1$  und  $2 \mu\text{m}$  gemessen. Die Norm schreibt für diese Ra-Werte eine Grenzwellenlänge von  $0.8$  Millimeter und eine Gesamtmessstrecke von  $4$  Millimeter vor.

## Analyse der Laserstrategien

Für die Laserbearbeitung zylindrischer Werkstücke gibt es verschiedene Bearbeitungsstrategien. In Abbildung 4.1 sind sechs Laserstrategien dargestellt. Dabei wird die Bearbeitung der ersten, äussersten Mantelfläche veranschaulicht. Die blauen Pfeile zeigen die Laserbahnen bei denen der Laser eingeschaltet ist und Material abträgt. Die schwarzen Pfeile sind jene Laserbahnen auf denen der Laser ausgeschaltet ist. Bei der realen Laserbearbeitung liegen die Laserbahnen wesentlich dichter beieinander als in Abbildung 4.1 dargestellt.



**Abbildung 4.1:** Verschiedene Laserbearbeitungsstrategien

Die verschiedenen Laserstrategien können nach unterschiedlichen Kriterien beurteilt werden. Ein wichtiges Kriterium ist die Bearbeitungszeit. Je kürzer diese ist, umso besser ist die entsprechende Strategie. Da die Beschleunigungen und maximalen Geschwindigkeiten der einzelnen Achsen durch den Versuchsaufbau gegeben sind, kann die Bearbeitungszeit anhand von Formeln abgeschätzt werden. Für jede Laserstrategie gibt es eine andere Formel. Um jede Formel einfach zu halten wird nur die Zeit berechnet, die nötig ist um die erste, oberste Mantelfläche eines

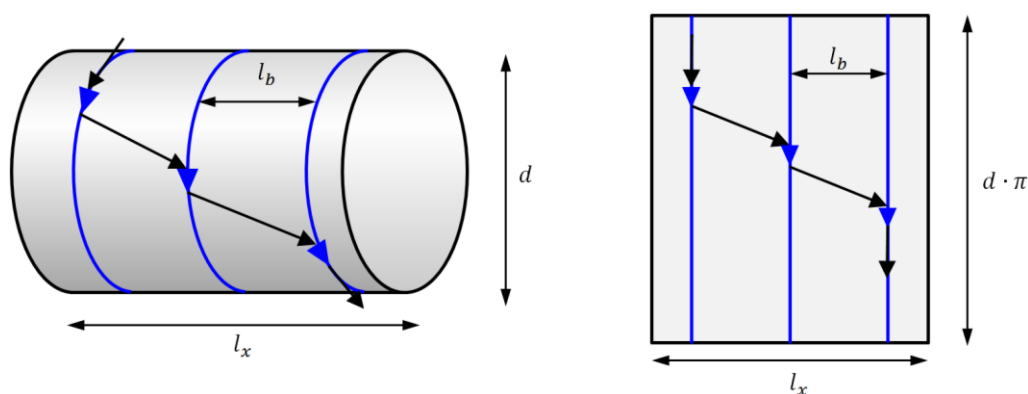
zylindrischen Werkstücks abzutragen. In diese Formeln fließen weitere Bearbeitungsparameter wie der Linienabstand der Laserbahnen, der Durchmesser und die Länge der Bearbeitungsfläche ein. Natürlich ist die Bearbeitungszeit abhängig von der Grösse des Werkstücks. Bei langen Werkstücken mit grossem Durchmesser dauert diese länger als bei kurzen mit kleinem Durchmesser. Um ein Gefühl für die Bearbeitungszeiten zu bekommen, wurde jede Formel jeder Laserstrategie mit den Werten aus Tabelle 4.1 ausgewertet. Der Faktor  $k$ , der das Verhältnis von Markierlinie zu Jumplinie angibt, wird nur bei Laserstrategie 3 benötigt. Auf diesen Parameter wird vertieft in Kapitel 4.3 eingegangen.

Maximale Geschwindigkeit der Drehachse $v_{Amax}$	2700 °/s
Beschleunigung der Drehachse $a_A$	25'000 °/s <sup>2</sup>
Scangeschwindigkeit $v_s$	1000 mm/s
Beschleunigung der optischen Achse $a_s$	20'000 m/s <sup>2</sup>
Linienabstand zwischen den Laserbahnen $l_b$	5 µm
Durchmesser des Werkstücks $d$	1 mm
Länge der bearbeiteten Fläche $l_x$	3 mm
Verhältnis von Markierlinie zu Jumplinie $k$	0.6

**Tabelle 4.1:** Parameter zur Auswertung der Formeln jeder Laserstrategie

## 4.1 Laserstrategie 1

Bei Laserstrategie 1 erfolgt der Abtrag einer Mantelfläche durch mehrere Bahnlinien entlang des Umfangs. Der Schraffurwinkel  $\delta_1$  beträgt dabei genau 90°. Zwischen den Abtragslinien wird mit der optischen Achse um einen Linienabstand nachgestellt. Der Vorteil dieser Laserstrategie ist, dass man bei grossen Durchmessern hohe Scangeschwindigkeiten erreicht und mit einer konstanten Drehbewegung arbeitet. Nachteilig ist, dass die Axialachse nach jedem abgetragenen Umfang nachgestellt werden muss und dass bei kleinen Durchmessern die Scangeschwindigkeit gering ist. Abbildung 4.2 zeigt wie die einzelnen Bahnlinien abgefahren werden. Rechts ist die abgerollte Mantelfläche des linken Zylinders dargestellt. Diese Abbildung und die eingetragenen Parameter tragen zum Verständnis von Formel (4.1) bei.



**Abbildung 4.2:** Bahnlinien und Parameter von Laserstrategie 1

Mit Formel (4.1) kann die Bearbeitungszeit  $T_1$  für den Abtrag einer vollen Mantelfläche nach Laserstrategie 1 abgeschätzt werden.

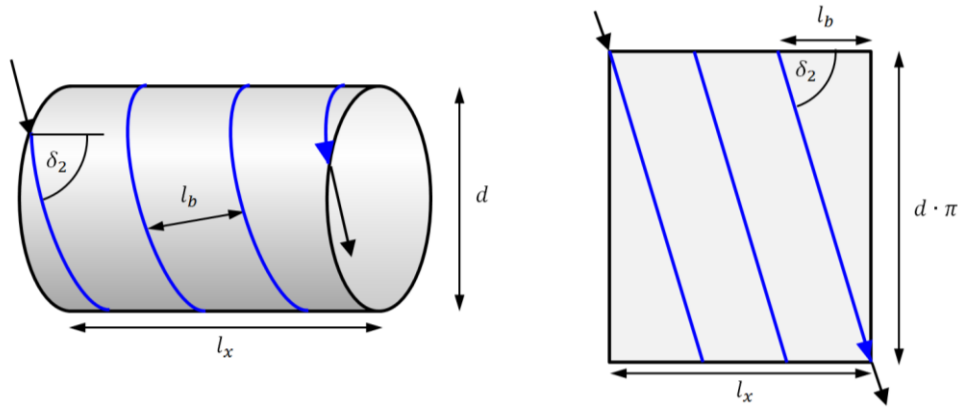


$$T_1 \approx \frac{l_x}{l_b} \cdot \left( \frac{360^\circ}{v_{Amax}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{l_b}{a_s}} \right) + 2 \cdot \frac{v_{Amax}}{a_A} \quad (4.1)$$

Wird diese Formel (4.1) mit den Werten von Tabelle 4.1 ausgewertet, resultiert eine Bearbeitungszeit  $T_1$  von ungefähr 80.3 Sekunden. Diese dauert so lange, weil durch den kleinen Durchmesser  $d$  nur eine kleine Abtragsgeschwindigkeit in Drehrichtung erreicht wird.

## 4.2 Laserstrategie 2

Bei Laserstrategie 2 erfolgt der Abtrag einer Schicht durch eine kontinuierliche, schraubenförmige Bahnlinie. Vorteil dieser Strategie ist, dass Dreh- und Linearbewegung mit konstanter Geschwindigkeit ausgeführt werden. Wie bei Laserstrategie 1 ist auch hier die erreichbare Abtragsgeschwindigkeit entlang des Umfangs wesentlich vom Durchmesser des Werkstücks abhängig. Abbildung 4.3 veranschaulicht Laserstrategie 2. Die eingetragenen Parameter helfen beim Verständnis von Formel (4.2) und Formel (4.3).



**Abbildung 4.3:** Bahnlinien und Parameter von Laserstrategie 2

Mit Formel (4.2) kann die Bearbeitungszeit  $T_2$  für den Abtrag einer vollen Mantelfläche nach Laserstrategie 2 abgeschätzt werden.

$$T_2 \approx \frac{l_x}{l_b} \cdot \frac{360^\circ}{v_{Amax}} + 2 \cdot \frac{v_{Amax}}{a_A} \quad (4.2)$$

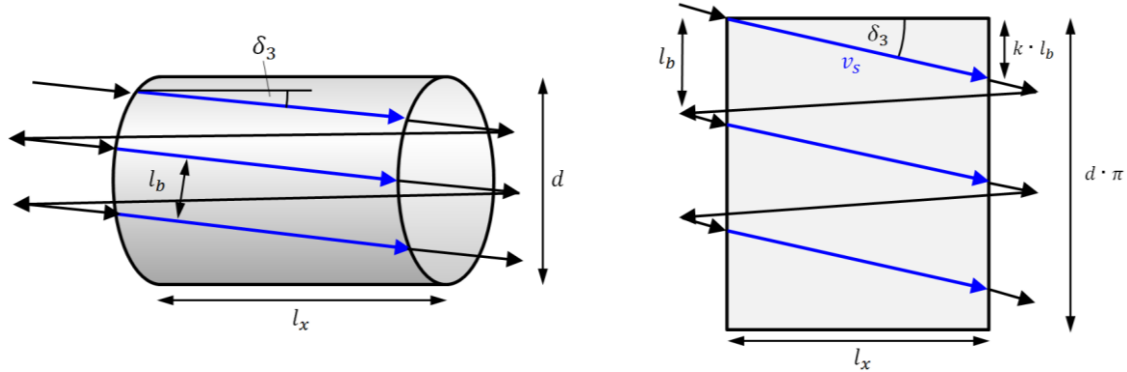
Durch Einsetzen der Werte von Tabelle 4.1 in Formel (4.2) erhält man für Laserstrategie 2 eine Bearbeitungszeit  $T_2$  von 80.2 Sekunden. Mit Formel (4.3) lässt sich der Schraffurwinkel  $\delta_2$  dieser Strategie berechnen.

$$\delta_2 = \arccos\left(\frac{l_b}{d \cdot \pi}\right) \quad (4.3)$$

## 4.3 Laserstrategie 3

Bei Laserstrategie 3 erfolgt der Abtrag einer Mantelfläche durch mehrere axiale Bahnlinien mit konstanter Drehbewegung. Vorteil dieser Laserstrategie ist, dass man mit einer dynamischen optischen Achse hohe Scangeschwindigkeit erreichen kann, unabhängig davon, wie gross der Durchmesser ist. Nachteil dieser Laserstrategie ist, dass die optische Achse nach jeder Abtragslinie mit ausgeschaltetem Laser zurückspringen muss. Mit einem Polygonscanner könnten

bei dieser Laserstrategie sehr schnelle Scangeschwindigkeiten und damit kürzere Bearbeitungszeiten erreicht werden. Zudem ist mit einem Polygonscanner das Zurückspringen zwischen den Bearbeitungslinien nicht mehr nötig. Abbildung 4.4 veranschaulicht Laserstrategie 3. Rechts ist wiederum die abgerollte Mantelfläche des linken Zylinders dargestellt. Die eingetragenen Parameter tragen zum Verständnis von Formel (4.4) und Formel (4.5) bei.



**Abbildung 4.4:** Bahnlinien und Parameter von Laserstrategie 3

Mit Formel (4.4) lässt sich der Schraffurwinkel  $\delta_3$  von Laserstrategie 3 berechnen. Dieser ist abhängig von dem Faktor  $k$ . Dieser gibt das Verhältnis von Markierlinie zu Jumpline an und liegt zwischen 0 und 1. Ein guter Ausgangswert ist 0.6. Je grösser dieser Faktor gewählt wird, desto kürzer ist die Bearbeitungszeit. Wird er zu gross gewählt, hat die optische Achse mit der Jumpline zu wenig Zeit für das Zurückspringen und es können Abtragsfehler entstehen. Der optimale Faktor  $k$  muss experimentell bestimmt werden.

$$\delta_3 = \arccos\left(\frac{k \cdot l_b}{l_x}\right) \quad (4.4)$$

Mit Formel (4.5) kann die Bearbeitungszeit  $T_3$  für den Abtrag einer vollen Mantelfläche nach Laserstrategie 3 abgeschätzt werden.

$$T_3 \approx \frac{d \cdot \pi}{v_s \cdot \sin(\delta_3)} \quad (4.5)$$

Durch einsetzen der Werte von Tabelle 4.1 in Formel (4.5) erhält man für Laserstrategie 3 eine Bearbeitungszeit  $T_3$  von 3.1 Sekunden. Diese ist so kurz, weil bei dieser Laserstrategie die hohe Dynamik der optischen Achse voll ausgenutzt werden kann, unabhängig davon wie gross der Durchmesser  $d$  ist.

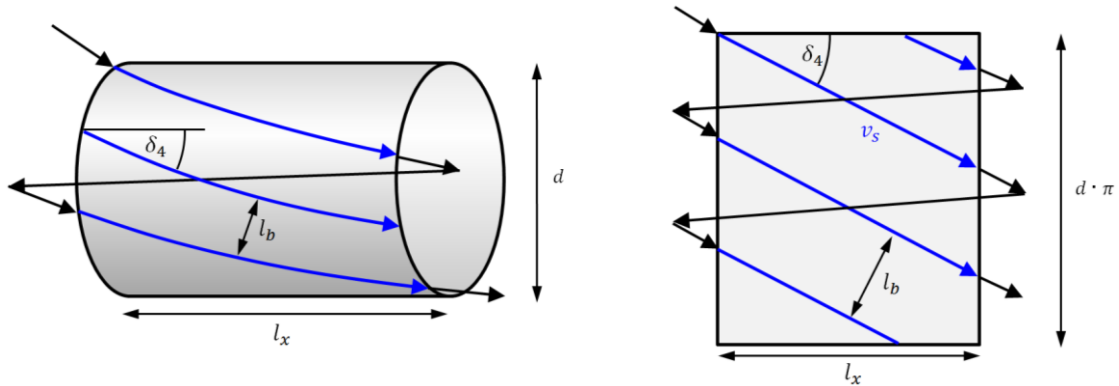
Mit Formel (4.6) kann der Vorschub  $v_A$  der Drehachse in Grad pro Sekunde berechnet werden.

$$v_A = \frac{360^\circ \cdot v_s \cdot \sin(\delta_3)}{d \cdot \pi} \quad (4.6)$$

## 4.4 Laserstrategie 4

Bei Laserstrategie 4 kann über den Schraffurwinkel  $\delta_4$  die Steigung der Bahnlinien frei gewählt werden. Der Winkel liegt dabei zwischen dem der Laserstrategie 2 und Laserstrategie 3. Der Abtrag einer Mantelfläche erfolgt in mehreren Umdrehungen. Dabei wird jede  $n$ -te Bahnlinie nacheinander abgetragen. Vorteil dieser Laserstrategie ist die konstante Drehbewegung und dass bei kleinen Winkeln hohe Scangeschwindigkeiten erreicht werden. Nachteil ist, dass die optische Achse zwischen den einzelnen Bahnlinien zurückspringen muss und dass bei grossen Winkeln die maximale Drehgeschwindigkeit erreicht wird und dann die Scangeschwindigkeit reduziert werden

muss. Zudem ist unbekannt welchen Einfluss der Abtrag jeder n-ten Bahnlinie auf das Abtragsverhalten und die Oberflächenqualität hat. In Abbildung 4.5 wird Laserstrategie 4 veranschaulicht. Rechts ist wiederum die abgerollte Mantelfläche des linken Zylinders dargestellt. Die eingetragenen Parameter tragen zum Verständnis von Formel (4.4) und Formel (4.5) bei.



**Abbildung 4.5:** Bahnlinien und Parameter von Laserstrategie 4

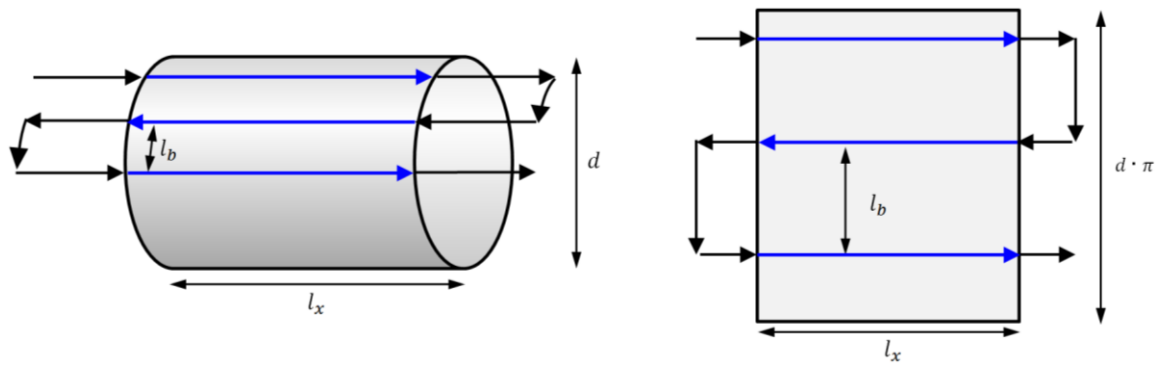
Bei Laserstrategie 4 ist die Bearbeitungszeit  $T_4$  abhängig vom gewählten Schraffurwinkel  $\delta_4$ . Kann dieser frei gewählt werden, bekommt Formel (4.7) eine wesentliche Bedeutung. Diese muss bei jeder Bearbeitung eingehalten werden. Mit ihr kann der maximale Schraffurwinkel  $\delta_{max}$  berechnet werden, bei dem die maximale Drehzahl  $v_{Amax}$  der Drehachse erreicht wird. Diese Formel erhält man, wenn man bei Formel (4.6) den Vorschub  $v_A$  der Drehachse durch die maximale Geschwindigkeit der Drehachse  $v_{Amax}$  ersetzt und die Gleichung nach dem Schraffurwinkel  $\delta_3$  auflöst.

$$\delta_{max} = \arcsin\left(\frac{v_{Amax} \cdot d \cdot \pi}{360^\circ \cdot v_s}\right) \quad (4.7)$$

Wird der Schraffurwinkel  $\delta_4$  kleiner gewählt als der maximale Schraffurwinkel  $\delta_{max}$ , beträgt die Bearbeitungszeit  $T_4$  für den Abtrag einer vollen Mantelfläche ungefähr gleichlang wie bei Laserstrategie 3 nach Formel (4.5). Mit den verwendeten Parameter von Tabelle 4.1 also ungefähr 3.1 Sekunden. Will man mit einem grösseren Schraffurwinkel  $\delta_4$  bearbeiten, muss die Scangeschwindigkeit  $v_s$  reduziert werden. Dadurch steigt die Bearbeitungszeit  $T_4$  an. Diese ist aber immer kleiner oder gleich der Bearbeitungszeit  $T_2$  von Laserstrategie 2. Mit den Parametern von Tabelle 4.1 also kleiner oder gleich 80.2 Sekunden.

## 4.5 Laserstrategie 5

Bei Laserstrategie 5 erfolgt der Abtrag einer vollen Mantelfläche über mehrere axiale Bahnlinien. Der Schraffurwinkel  $\delta_5$  beträgt dabei genau  $0^\circ$ . Zwischen den Bahnlinien wird mit der Drehachse um einen Linienabstand  $l_b$  nachgestellt. Vorteil dieser Laserstrategie ist die erhöhte axiale Scangeschwindigkeit, die mit optischen Achsen erreicht werden kann, unabhängig wie gross der Durchmesser des Werkstücks ist. Zudem muss die optische Achse nach einer Bearbeitungslinie nicht zurückspringen. Nachteil ist, dass die Drehachse für jede Abtragslinie abgebremst und beschleunigt werden muss. Deshalb wäre bei dieser Strategie die Verwendung von Schrittmotoren zur Drehung des Werkstücks geeignet. Abbildung 4.6 verdeutlicht Laserstrategie 5 und hilft bei der Interpretation von Formel (4.8).



**Abbildung 4.6:** Bahnlinien und Parameter von Laserstrategie 5

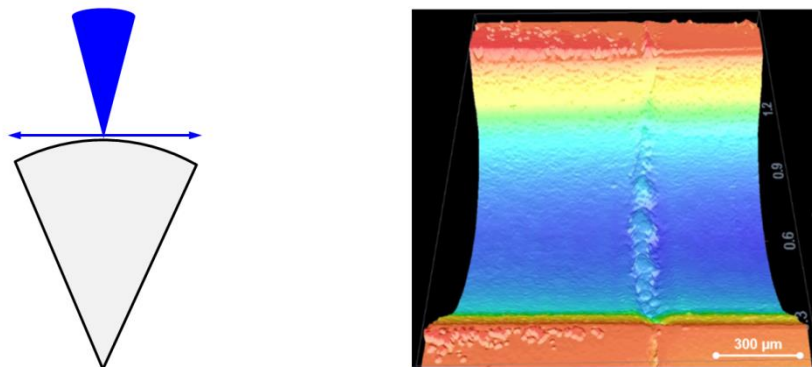
Nach Formel (4.8) kann die Bearbeitungszeit  $T_5$  für den Abtrag einer vollen Mantelfläche nach Laserstrategie 5 abgeschätzt werden.

$$T_5 \approx \frac{d \cdot \pi}{l_b} \cdot \left( \frac{l_x}{v_s} + 2 \cdot \sqrt{\frac{l_b \cdot 360^\circ}{a_A \cdot d \cdot \pi}} + \frac{v_s}{a_s} \right) \quad (4.8)$$

Wird diese Formel mit den Werten von Tabelle 4.1 ausgewertet erhält man eine Bearbeitungszeit  $T_5$  von ungefähr 7.9 Sekunden. Diese Bearbeitungszeit ist höher als jene von Laserstrategie 3, weil bei dieser Strategie die Drehachse nach jeder abgetragenen Bahnlinie beschleunigt und wieder abgebremst werden muss und dadurch ein Zeitverlust resultiert.

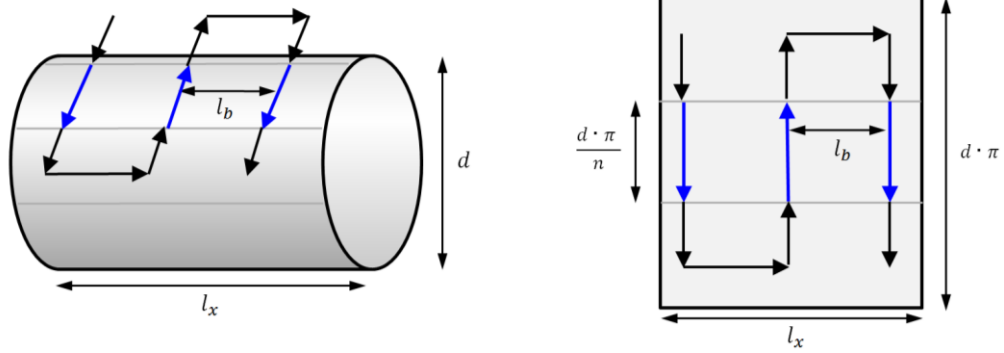
## 4.6 Laserstrategie 6

Laserstrategie 6 unterscheidet sich deutlich von den vorangehenden Laserstrategien. Hier erfolgt der Abtrag einer vollen Mantelfläche durch den Abtrag von  $n$  aneinandergrenzenden Sektorflächen, die mit beiden optischen Achsen simultan bearbeitet werden. Dazwischen wird das Werkstück bis zur nächsten Sektorfläche gedreht. Vorteil dieser Laserstrategie ist, dass wiederum hohe Scangeschwindigkeiten mit den optischen Achsen erreichbar sind, unabhängig vom Durchmesser des Werkstücks. Ein Nachteil dieser Strategie ist, dass der Fokus des Lasers nicht exakt auf der Oberfläche des Zylinders liegt. Dieses Problem wird in Abbildung 4.7 links verdeutlicht. Zudem ist unbekannt wie gut der Materialabtrag bei den Übergängen zwischen den Sektorflächen ist. Die Befürchtung ist, dass sich hier Materialrückstände bilden können, die nicht sauber abgetragen werden. Eine ähnliche Problematik hatte Pascal Gilgen in seiner Semesterarbeit [8]. Aus dieser ist die Abbildung 4.7 rechts.



**Abbildung 4.7:** Problematik von Laserstrategie 6

Die eingetragenen Parameter in Abbildung 4.8 tragen zum Verständnis von Formel (4.9) bei.



**Abbildung 4.8:** Bahnlinien und Parameter von Laserstrategie 6

Nach Formel (4.9) kann die Bearbeitungszeit  $T_6$  für den Abtrag einer vollen Mantelfläche nach Laserstrategie 6 abgeschätzt werden.

$$T_6 \approx \frac{360^\circ}{v_{Amax}} + n \cdot \frac{l_x}{l_b} \cdot \left( \frac{d \cdot \pi}{n \cdot v_s} + 2 \cdot \sqrt{\frac{l_b}{a_s}} + 2 \cdot \frac{v_s}{a_s} \right) \quad (4.9)$$

Wird diese Formel mit den Werten von Tabelle 4.1 für  $n$  gleich 12 Sektorflächen ausgewertet, erhält man eine Bearbeitungszeit  $T_6$  von ungefähr 3 Sekunden. Damit ist Laserstrategie 6 die schnellste und braucht für den Abtrag einer vollen Mantelfläche etwas weniger Zeit als die zweitschnellste Laserstrategie 3 mit einer Bearbeitungszeit  $T_3$  von 3.1 Sekunden.



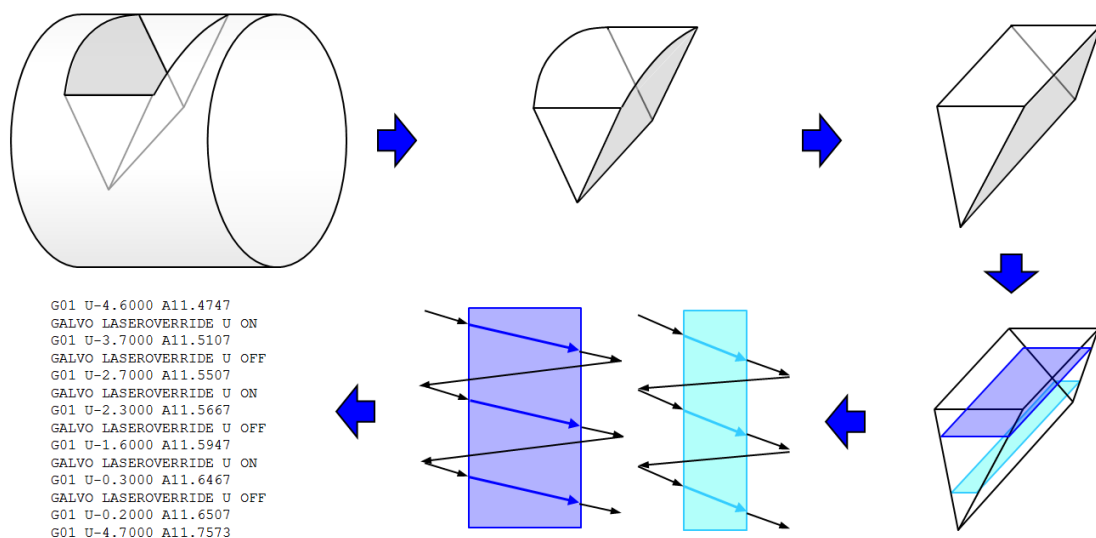
# 5

## CAM Programmierung

Bei der Programmierung des CAMs wurde primär die Bahnberechnung nach Laserstrategie 3 verfolgt, weil diese die zweitschnellste Bearbeitungszeit aufweist. Laserstrategie 6 wurde nicht näher betrachtet, weil diese komplex ist und gewisse Unsicherheiten aufweist, die in Kapitel 4.6 näher beschrieben sind. Bei der Erstellung des CAM Programms für die Bahnberechnung zylindrischer Werkstück, konnte auf dem bestehenden Code aus der Bachelorarbeit „Entwicklung eines CAM-Systems für 2D und 2.5D Laserbearbeitung“ aufgebaut werden [3].

### 5.1 Übersicht

Abbildung 5.1 gibt einen guten Überblick der einzelnen Schritte, die notwendig sind, um aus der Geometrie des Werkzeugs den NC-Code zu berechnen.



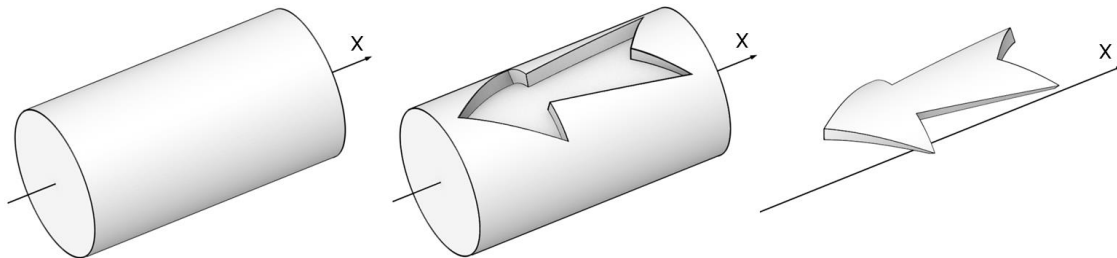
**Abbildung 5.1:** Bahnlinien und Parameter von Laserstrategie 5

Von der Geometrie des gewünschten Werkzeugs wird im ersten Schritt ein Negativ erzeugt. Dieses wird beim Abrollen von einer zylindrischen in eine kartesische Geometrie transformiert.

Beim Slicing werden mithilfe der kartesischen Geometrie die Schnittkonturen berechnet. Aus diesen können wiederum die Schraffuren berechnet werden. Diese werden auch Hatches genannt. Im letzten Schritt erfolgt das Postprocessing. Dabei wird aus den Schraffuren der NC-Code erstellt. Dieser kann von der Maschine interpretiert und ausgeführt werden um das gewünschte Werkstück zu fertigen.

### 5.2 Konstruktion der Modellgeometrie

Die Geometrie des gewünschten Werkstücks wird mithilfe eines CAD Programms konstruiert. Eine mögliche Werkstücksgeometrie ist in Abbildung 5.2 mittig dargestellt. Für die Bearbeitung muss bekannt sein, welches Volumen von der Ausgangsgeometrie abgetragen wird. Die Ausgangsgeometrie hat die Form des Rohlings, also meistens ein Zylinder. Dieser ist in Abbildung 5.2 links dargestellt. Im CAD Programm wird die Werkstückgeometrie von der Ausgangsgeometrie subtrahiert. Dadurch erhält man ein Negativ. Dieses Volumen ist in Abbildung 5.2 rechts dargestellt und muss bei der Laserbearbeitung abgetragen werden.



**Abbildung 5.2:** Geometrie des Rohlings, des Werkstücks und des Negativs

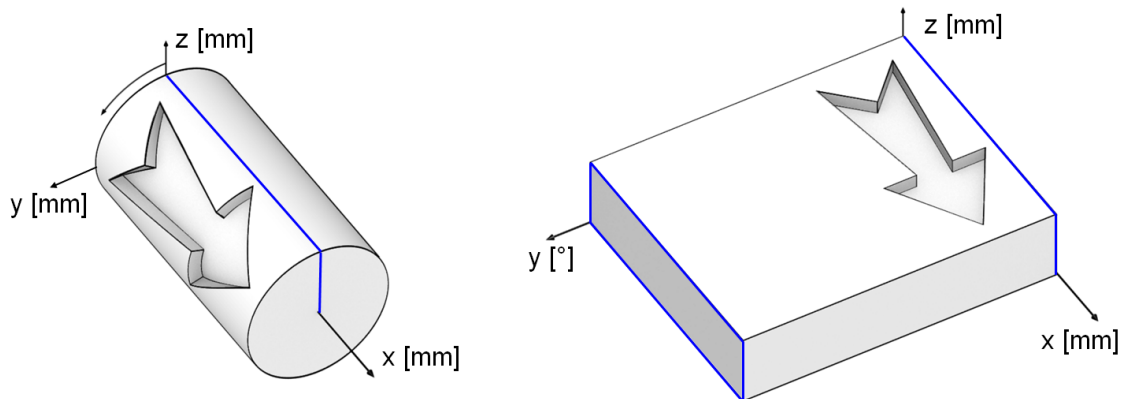
Mit welchem CAD Programm die Geometrie des Negativs erstellt wird, steht einem frei. Wichtig ist nur, dass diese als Stl-Datei abgespeichert wird, da nur dieses Dateiformat im CAM Programm importiert werden kann. Bei der Stl-Datei wird die Oberfläche der Geometrie durch ein geschlossenes Netz von Dreiecken repräsentiert. Die einzelnen Eckpunkte jedes Dreiecks liegen exakt auf der Oberfläche der Geometrie. Durch Verbinden dreier Eckpunkte erhält man die Kanten und Flächen eines Dreiecks. Diese liegen nicht zwingend auf der Oberfläche der Geometrie. Die Oberfläche der Geometrie wird durch eine Stl-Datei also nur approximiert. Je mehr Dreieckflächen verwendet werden, desto besser ist diese Approximation.

Im CAD Programm muss darauf geachtet werden, dass die axiale Achse der Werkstücksgeometrie genau auf der X-Achse liegt. Damit wird die Geometrie auch richtig im CAM Programm orientiert und die Laserbahnen können korrekt berechnen.

### 5.3 Abrollen der zylindrischen Geometrie

Beim Abrollen wird eine zylindrische Geometrie in eine kartesische transformiert. Dank dieser Transformation wird der Folgeschritt zur Berechnung der Schnittkonturen wesentlich vereinfacht. Die direkte Berechnung der Schnittkonturen aus der zylindrischen Geometrie wäre schwierig. In Abbildung 5.3 wird das Abrollen veranschaulicht. Zuerst wird die Zylindergeometrie im positiven Z-Bereich der X-Z-Ebene aufgeschnitten. Diese Stelle ist in Abbildung 5.3 blau markiert. Durch diesen Schnitt kann die zylindrische Geometrie aufgefalt und entlang der Y-Achse abgerollt werden. Das Abrollen der Zylindergeometrie erfolgt im mathematischen Gegenuhrzeigersinn um die X-Achse. Damit ist die Abrollrichtung identisch mit der positiven Drehrichtung der Bearbeitungsmaschine.





**Abbildung 5.3:** Abrollen der zylindrischen Geometrie

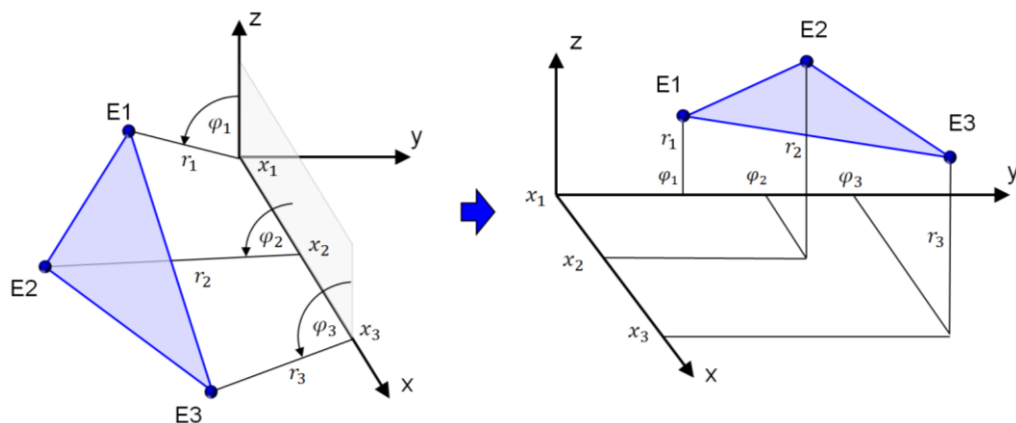
Bei der Transformation wird für jeden Eckpunkt jedes Dreiecks, aus dem die Oberfläche der zylindrischen Geometrie aufgebaut ist, eine neue Y- und Z-Koordinate nach den Formeln (5.10) und (5.12) berechnet. Mit Formel (5.10) wird verdeutlicht, dass bei der Transformation die X-Koordinate jedes Eckpunktes gleich bleibt.

$$x' = x \quad (5.10)$$

$$y' = \varphi = \begin{cases} \arctan(z/y) + 90^\circ & \text{Falls } y \leq 0 \\ \arctan(z/y) + 270^\circ & \text{Falls } y > 0 \end{cases} \quad (5.11)$$

$$z' = r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (5.12)$$

Die neue Y-Koordinate entspricht dem Abrollwinkel  $\varphi$  der zwischen der XZ-Ebene und dem entsprechenden Eckpunkt aufgespannt wird. Durch die Transformation wird diese Koordinate von Millimeter in Grad transformiert. Die neue Z-Koordinate entspricht dem Radius  $r$  von der X-Achse zum entsprechenden Eckpunkt. Abbildung 5.4 zeigt die Transformation eines einzelnen Dreiecks und wie die neu berechneten Koordinaten der einzelnen Eckpunkte interpretiert werden müssen.

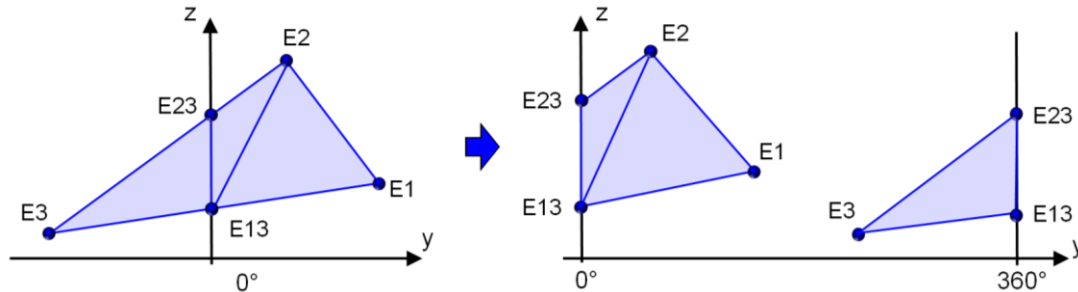


**Abbildung 5.4:** Transformation einer Dreiecksfläche

### 5.3.1 Spaltung eines Dreiecks

Falls ein Dreieck nach der Transformation die X-Y-Ebene durchdringt und positive Z-Koordinaten hat, muss dieses gespalten werden. Diese Spaltung ist nötig, damit nach der

Transformation sämtliche Y-Koordinaten immer zwischen  $0^\circ$  und  $360^\circ$  liegen. Bei der Spaltung eines Dreiecks entstehen drei neue Teildreiecke wie in Abbildung 5.5 links veranschaulicht wird. Die Eckpunkte E1, E2 und E3 sind dabei die originalen Eckpunkte. Das neu entstandene Teildreieck mit den Eckpunkten E3, E13 und E23 hat negative Y-Koordinaten. Addiert man  $360^\circ$  zu diesen Koordinaten wird dieses Teildreieck in positive Y-Richtung verschoben. Damit liegt auch dieses Teildreieck zwischen  $0^\circ$  und  $360^\circ$  wie in Abbildung 5.5 rechts dargestellt.



**Abbildung 5.5:** Spaltung einer Dreiecksfläche

Die Eckpunkte E13 und E23 liegen mit den Y-Koordinaten genau bei  $0^\circ$ . Die restlichen Koordinaten dieser Punkte können durch lineare Interpolation mit Formel (5.13) bis (5.18) berechnet werden. Die Indices geben die entsprechende Koordinate des jeweiligen Punktes an.

$$E13_x = E1_x + \frac{-E1_y \cdot (E3_x - E1_x)}{E2_y - E1_y} \quad (5.13)$$

$$E13_y = 0^\circ \quad (5.14)$$

$$E13_z = E1_z + \frac{-E1_y \cdot (E3_z - E1_z)}{E2_y - E1_y} \quad (5.15)$$

$$E23_x = E2_x + \frac{-E1_y \cdot (E3_x - E2_x)}{E3_y - E2_y} \quad (5.16)$$

$$E23_y = 0^\circ \quad (5.17)$$

$$E13_z = E2_z + \frac{-E2_y \cdot (E3_z - E2_z)}{E3_y - E2_y} \quad (5.18)$$

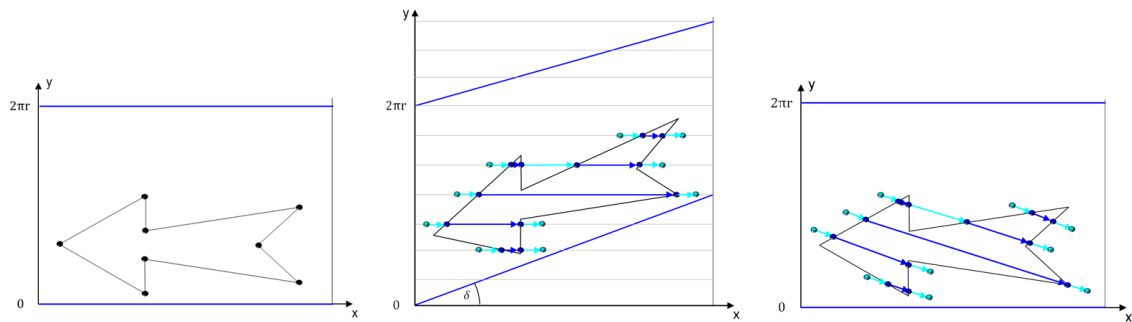
## 5.4 Berechnung der Schnittkonturen

Die Berechnung der Schnittkonturen gliedert sich in zwei Teilschritte. Im ersten Schritt werden einzelne Schnittpunkte auf den entsprechenden Schnitthöhen berechnet. Diese Schnittpunkte werden im zweiten Schritt zu Konturen verbunden. Für jede Schnitthöhe ergibt sich so eine Schnittkontur. Wie diese Berechnung im Detail funktioniert, ist ausführlich in der Bachelorarbeit „Entwicklung eines CAM-Systems für 2D und 2.5D Laserbearbeitung“ beschrieben [3].

## 5.5 Berechnung der Schraffuren

Abbildung 5.6 gibt einen Überblick wie die Schraffuren berechnet werden. Links ist eine abgerollte Mantelfläche mit der entsprechenden Schnittkontur dargestellt. Die blauen Linien sind

die obere und untere Kante der Mantelfläche. Wird die Mantelfläche aufgerollt, liegen diese übereinander. Um die Schraffurlinien mit entsprechendem Schraffurwinkel zu berechnen, nimmt man sich eine Verzerrungstransformation zu Hilfe. Diese ist in Abbildung 5.6 mittig veranschaulicht. Diese Transformation vereinfacht die Berechnung der Schraffur- und Skywritelinien, da diese nun auf horizontalen Linien mit konstanten Y-Koordinaten liegen. Nach der Berechnung der Schraffurlinien werden diese wieder rücktransformiert. Dadurch erhält man die benötigte Schraffur wie sie in Abbildung 5.6 rechts dargestellt sind.



**Abbildung 5.6:** Übersicht der Schraffurberechnung

### 5.5.1 Umrechnung der Y-Koordinaten

Zu Beginn der Schraffurberechnung werden die Y-Koordinaten jeder Schnittfläche von Grad in Millimeter umgerechnet. Nach dieser Umrechnung hat die X- und Y-Koordinate dieselben Einheiten, was die Weiterverarbeitung erleichtert. Die Umrechnung erfolgt nach Formel (5.19). Diese ist abhängig vom Radius  $r$  auf dem sich die Schnittkontur befindet.

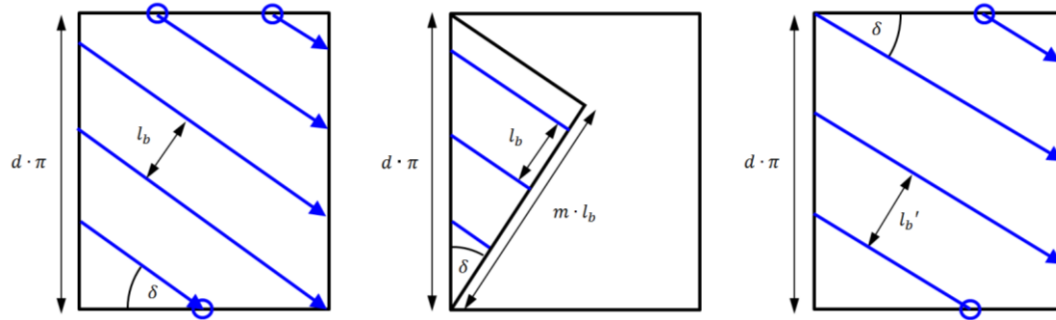
$$y' = \frac{2\pi r}{360^\circ} \cdot y \quad (5.19)$$

Ganz am Ende der Schraffurberechnung müssen die Y-Koordinaten wieder von Millimeter in Grad umgerechnet werden. Das erfolgt nach Formel (5.20).

$$y' = \frac{360^\circ}{2\pi r} \cdot y \quad (5.20)$$

### 5.5.2 Anpassung des Linienabstandes

Bei einer abgerollten Mantelfläche eines Zylinders ist die obere Kante der Fläche identisch mit der unteren. Das bedingt auch, dass die Bahnlinien auf denselben Punkten dieser Kanten ineinander übergehen müssen. Abbildung 5.7 links veranschaulicht diese Problematik. Hier sind die Bahnlinien, die auf der unteren Kante enden nicht bündig mit denen, die von der oberen Kante starten.



**Abbildung 5.7:** Anpassung des Linienabstandes

Dieses Problem kann nur behoben werden, wenn der Linienabstand  $l_b$  leicht angepasst wird, damit gerade eine ganzzahlige Anzahl an Bahnlagen in die linke Kante der Mantelfläche passt. Die Anzahl der Bahnlagen  $m$  kann mit der Formel (5.21) berechnet werden. Die mittige Darstellung in Abbildung 5.7 zeigt wie diese Formel (5.21) hergeleitet wurde.

$$m = \frac{\cos(\delta) \cdot d \cdot \pi}{l_b} \quad (5.21)$$

Der angepasste Linienabstand  $l_b'$  kann dann mit Formel (5.22) berechnet werden. Dazu muss die in Formel (5.21) berechnete Anzahl Bahnlagen  $m$  auf eine ganzzahlige Zahl auf- oder abgerundet werden. In Formel (5.22) wird das durch die Funktion „runden()“ verdeutlicht.

$$l_b' = \frac{\cos(\delta) \cdot d \cdot \pi}{\text{runden}(m)} \quad (5.22)$$

In Abbildung 5.7 rechts ist ersichtlich, dass mit dem neuen Linienabstand  $l_b'$  die obere Kante identisch ist mit der unteren und die Bahnlagen korrekt ineinander übergehen.

### 5.5.3 Verzerrungstransformation

Um die Schraffurlinien mit entsprechendem Schraffurwinkel zu berechnen, nimmt man sich eine Verzerrungstransformation zu Hilfe. Damit werden die nachfolgenden Berechnungen vereinfacht.

Bei dieser Transformation wird die Y-Koordinate jedes Eckpunktes der Schnittkontur nach Formel (5.23) in Y-Richtung verschoben. Je weiter entfernt dieser Eckpunkt von der Y-Achse liegt, umso stärker ist die Verschiebung. Die X-Koordinaten jedes Punktes bleiben bei dieser Transformation gleich.

$$y' = y + x \cdot \tan(\delta) \quad (5.23)$$

Nachdem die Schraffurlinien berechnet wurden, müssen diese wieder zurücktransformiert werden. Die Rücktransformation der Y-Koordinate jedes Punktes erfolgt nach Formel (5.24).

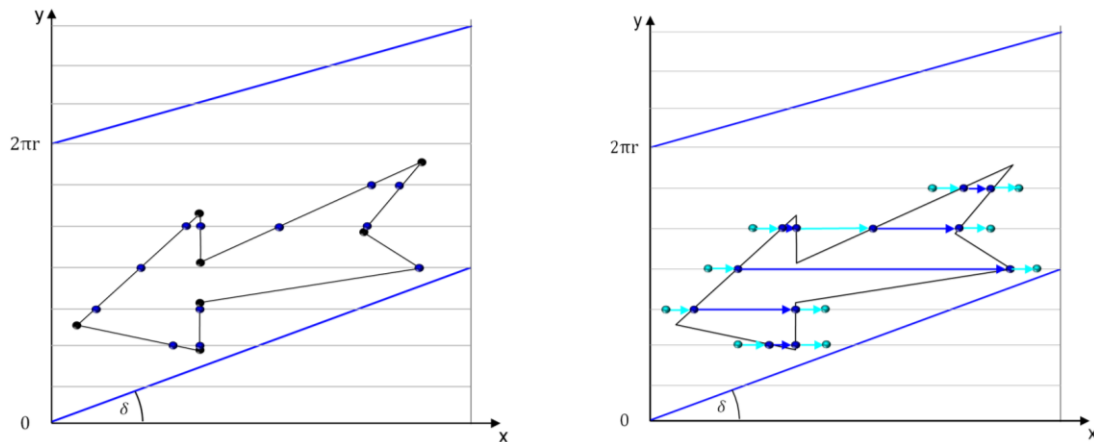
$$y' = y - x \cdot \tan(\delta) \quad (5.24)$$

### 5.5.4 Berechnung der Schraffurlinien

Bei der Berechnung der Schraffurlinien wird über die verzerrte Schnittkontur ein horizontales Linienraster gelegt. Diese Linien haben den konstanten Abstand  $l_b/\cos(\delta)$ . Dieser angepasste Linienabstand muss innerhalb der Verzerrungstransformation verwendet werden, damit nach der Rücktransformation die Schraffur wieder den korrekten Linienabstand  $l_b$  hat. Aus demselben

Grund muss auch die Länge der Skywritelinien angepasst werden. Die neue Skywritelänge nach der Verzerrungstransformation beträgt  $l_s \cdot \cos(\delta)$ .

Immer dort, wo sich eine Kante der verzerrten Schnittkontur mit einer Linie des Rasters schneidet, wird ein Schnittpunkt berechnet. In Abbildung 5.8 links ist dieses Konzept veranschaulicht. Die schwarzen Punkte sind die Eckpunkte der Schnittkontur die blauen die berechneten Schnittpunkte.



**Abbildung 5.8:** Berechnung der Schraffur- und Skywritelinien

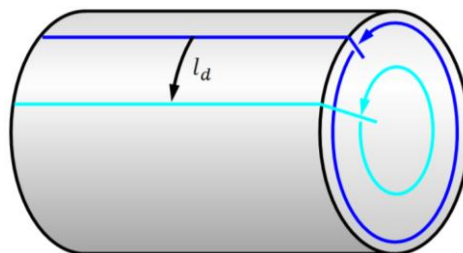
Mit Formel (5.25) lässt sich die X-Koordinate eines Schnittpunktes S durch lineare Interpolation anhand der Eckpunkte E, welche die Kante aufspannen, berechnen. Die Y-Koordinate des Schnittpunktes ist über die Y-Koordinate der Rasterlinie gegeben. Die Indices geben an um welche Koordinate es sich beim entsprechenden Punkt handelt.

$$S_x = E1_x + \frac{(E2_x - E1_x) \cdot (S_y - E1_y)}{E2_y - E1_y} \quad (5.25)$$

Anhand der Schnittpunkte können die Skywritelinien berechnet werden. Diese sind in Abbildung 5.8 als hellblaue Pfeile dargestellt. Wie die Skywritelinien im Detail berechnet werden, ist ausführlich in der Bachelorarbeit „Entwicklung eines CAM-Systems für 2D und 2.5D Laserbearbeitung“ beschrieben [3].

## 5.6 Drehoffset zwischen den Abtragsflächen

Zwischen den einzelnen abgetragenen Mantelflächen muss der Fokus nachgestellt werden. Dieses Nachstellen dauert wenige Mikrosekunden. Damit die Drehachse für dieses Nachstellen nicht anhalten muss, geschieht dies optimaler Weise bei kontinuierlicher Drehbewegung. Dazu wird eine Drehoffsetlänge  $l_d$  definiert. Um diese sind die einzelnen Abtragsflächen in Drehrichtung zueinander verschoben wie in Abbildung 5.9 dargestellt.



**Abbildung 5.9:** Drehoffset zwischen den Abtragsflächen  $l_d$

Mit dieser Optimierung wird vermieden, dass der Übergang der einzelnen Abtragsflächen immer auf demselben Drehwinkel geschieht. Dadurch wird verhindert, dass sich allfällige Übergangsfehler an dieser Stelle anhäufen und bei der Fertigung sichtbar werden.

### 5.7 Die Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche macht das Programm übersichtlicher und benutzerfreundlicher. Zudem kann die Darstellung der vielen einzelnen Bahnlinien verbessert werden. Da es in Matlab die Möglichkeit gibt, Benutzeroberflächen zu erstellen, wurden diese auch genutzt.

#### 5.7.1 Aufbau der Benutzeroberfläche

In Abbildung 5.10 ist die Benutzeroberfläche des CAM Programms abgebildet. Sie lässt sich in zwei Bereiche unterteilen. Im linken Bereich erfolgt die Eingabe der Parameter zur Berechnung der Laserbahnen. Der rechte Bereich dient der Visualisierung der Stl-Objekte, der berechneten Schnittkonturen und der berechneten Laserbahnen. Mit den Kästchen am unteren Rand der Benutzeroberfläche können diese selektiv ein- oder ausgeblendet werden.

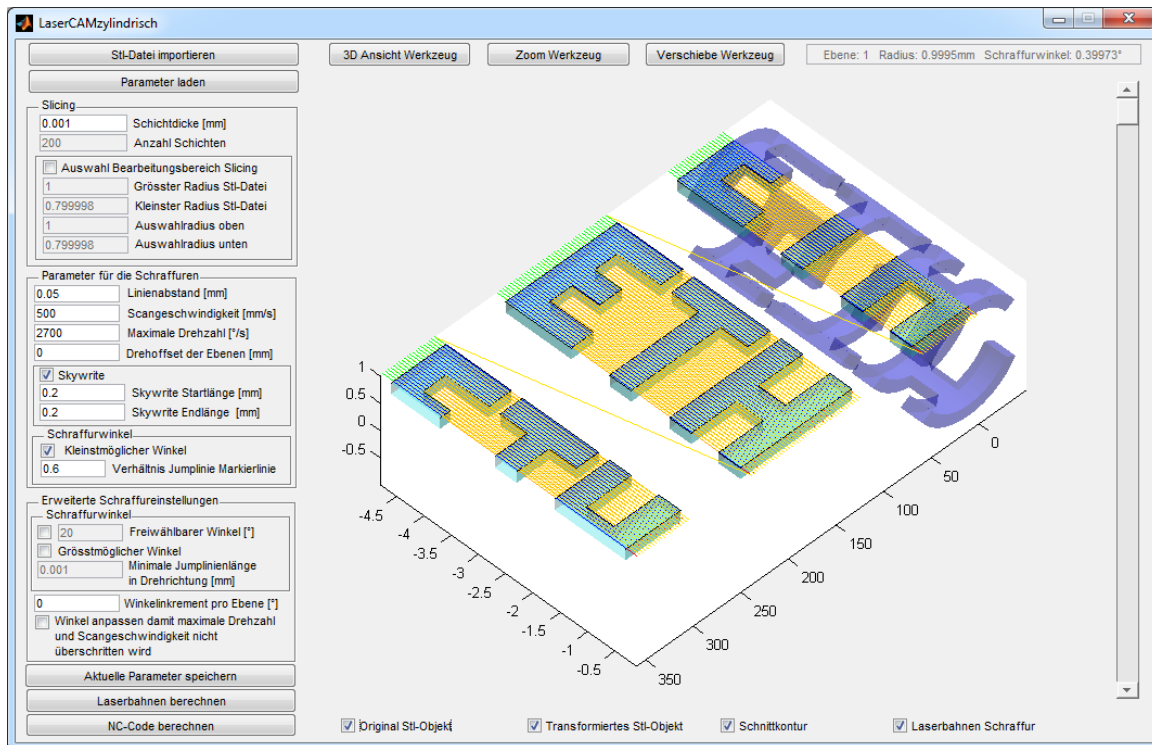


Abbildung 5.10: Benutzeroberfläche des CAM Programms

In der Grafik im rechten Bereich wird die zylindrische Originalgeometrie dunkelblau und die abgerollte, kartesische Geometrie hellblau dargestellt. Zur einfacheren Unterscheidung der verschiedenen Laserbahnen sind diese farbcodiert. Die blauen sind Abtragsbahnen, die mit eingeschaltetem Laser abgefahren werden. Die grünen Bahnlinien sind Skywrite Startlinien, die roten Skywrite Endlinien. Zwischen den blauen Abtragsbahnen befinden sich orange Zwischenlinien. Gelb dargestellt sind die Jumphöhenlinien auf denen die nächste Bearbeitungszeile anzufahren wird. Die orangen und die gelben Bahnlinien haben eine ähnliche Funktion und deshalb ähnliche Farben. Auf Beiden ist der Laser ausgeschaltet. Mit dem Slider am rechten Bildrand kann man auswählen, welche Schnittkontur angezeigt werden soll. Zusätzliche Informationen zu jeder Schnittkontur werden oben rechts angezeigt. Am oberen Rand der

Benutzeroberfläche sind drei Schalflächen angeordnet. Mit diesen kann die Ansicht der Grafik verändert werden.

### 5.7.2 Parametereingabe zur Bahnberechnung

In der linken Spalte der Benutzeroberfläche (siehe Abbildung 5.10), in der die Eingaben der Parameter zur Bahnberechnung getätigt werden, arbeitet man sich von oben nach unten durch. Die Parameter sind in einzelne Blöcke gegliedert, die jeweils separat umrandet sind.

Im obersten Block erfolgen die Eingaben bezüglich des Slicing. Mit der Option „Auswahl Bearbeitungsbereich Slicing“ können die Schnittkonturen in einem definierten Radienbereich berechnet werden. Die Eingabe des neuen Auswahlbereichs erfolgt über die Felder „Auswahlradius oben [mm]“ und „Auswahlradius unten [mm]“ und muss innerhalb den Werten „Grösster Radius Stl-Datei [mm]“ und „Kleinster Radius Stl-Datei [mm]“ liegen.

Falls die Auswahl „Kleinstmöglicher Winkel“ selektiert ist, erfolgt die Berechnung des Schraffurwinkels nach Laserstrategie 3 wie es in Kapitel 4.3 beschrieben ist. Bei dieser Winkelberechnung wird zusätzlich der Faktor  $k$  benötigt, der das Verhältnis von Markierlinie zu Jumplinie angibt. Dieser wird über das entsprechende Eingabefeld definiert.

Im untersten Block in der linken Spalte können erweiterte Schraffureinstellungen getätigt werden. Diese sind standardmässig ausgeblendet. Mit der Option „Freiwählbarer Winkel“ kann der Schraffurwinkel frei definiert werden. Der Materialabtrag erfolgt dann nach Laserstrategie 4 wie es in Kapitel 4.4 beschrieben ist. Wird die Option „Grösstmöglicher Winkel“ gewählt, erfolgt die Berechnung des Schraffurwinkels nach Laserstrategie 2 wie es in Kapitel 4.2 beschrieben ist. Über die Option „Winkelinkrement pro Fläche [°]“ kann definiert werden um wie viel der Schraffurwinkel von Schicht zu Schicht erhöht werden soll. Falls in diesem Eingabefeld eine 0 eingegeben wird, ist diese Funktion deaktiviert. Mit der Zusatzoption „Winkel anpassen damit die maximale Drehzahl und Scangeschwindigkeit nicht überschritten wird“ wird verhindert, dass ein zu grosser Schraffurwinkel berechnet wird, der durch die beschränkte Drehzahl gar nicht erreicht werden kann.

Mit der Schaltfläche „Aktuelle Parameter speichern“ können sämtliche Parameter in eine Textdatei gespeichert werden. Über die Schaltfläche „Parameter laden“ können diese importiert werden.

### 5.7.3 Erstellen des NC-Codes

Durch Anklicken der untersten Schaltfläche „NC-Code berechnen“ (siehe Abbildung 5.10) öffnet sich das in Abbildung 5.11 dargestellte Fenster. In diesem können die einzelnen NC-Befehle auf die Maschine angepasst werden.

**NCCodezylindrisch**

Vorbereitung des NC-Codes

G90

G359

VELOCITY ON

AIR\_ON

Befehlszeile zum Einstellen des Vorschubs

F  Vorschub

Befehlszeile zur Ansteuerung der Bearbeitungshöhe

G08 G01 U  X-Position  A  Winkelposition Z(zFok+zA+  Radius  )

Befehlszeile zum Abfahren einer Ellipse Linie

G00 U  X-Position  A  Winkelposition

Befehlszeile zum Abfahren einer Zwischenlinie mit ausgeschaltetem Laser

G08 G01 U  X-Position  A  Winkelposition

Befehlszeile zum Abfahren einer Skywrite Startlinie

G08 G01 U  X-Position  A  Winkelposition

Befehlszeile zum Abfahren einer Linie mit eingeschaltetem Laser

G08 G01 U  X-Position  A  Winkelposition

Befehlszeile zum Abfahren einer Skywrite Endlinie

G08 G01 U  X-Position  A  Winkelposition

Befehl zum Einschalten des Lasers

GALVO LASEROVERRIDE U ON

Befehl zum Ausschalten des Lasers

GALVO LASEROVERRIDE U OFF

Befehlszeile zum Auskommentieren

//  Kommentar

Abschluss des NC-Codes

AIR\_OFF

END PROGRAM

**Abbildung 5.11:** Anpassung der NC-Befehle

Der Befehl zur Ansteuerung des ersten Bahnpunktes und zum Einstellen des Fokus gliedert sich in sieben Felder und wird zu einer NC-Codezeile zusammengesetzt. Der Test in den weißen Eingabefeldern kann frei angepasst werden. An der Stelle „Radius“ wird bei der Erstellung des NC-Codes automatisch der richtige Radius der entsprechenden Abtragsfläche eingefügt.

Die NC-Codezeilen der verschiedenen Bahnlinien setzen sich jeweils aus fünf Feldern zusammen. Die X- und Winkelposition entspricht der Zielposition der entsprechenden Bahnlinie und wird beim Erstellen des NC-Codes entsprechend eingefügt.

Nachdem ein Zielverzeichnis für den NC-Code ausgewählt wurde, kann dieser erstellt werden. Der NC-Code wird als Textdatei ausgegeben.



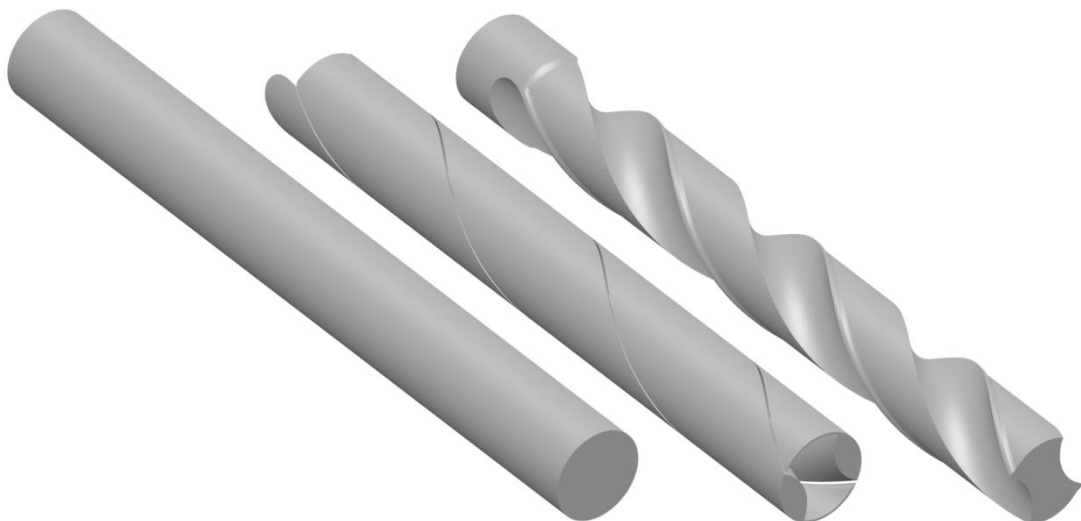
# 6

## Durchgeführte Versuche und Diskussion

Zur Validierung des programmierten CAMs wurden mehrere Tests durchgeführt. Zur Diskussion werden in diesen Kapitel zwei gefertigte Werkstücke genauer betrachtet. Das Ausgangswerkstück war in beiden Fällen ein Zylinder aus Hartmetall.

### 6.1 Spiralbohrer

Bei diesem Versuch wurde ein Spiralbohrer aus einem zylinderförmigen Rohling mit einem Durchmesser von 1.1 mm gefertigt. Dieser hat zwei Spannuten mit einer axialen Spannutenlänge von 10 mm. Der Seitenspanwinkel beträgt  $30^\circ$ . In Abbildung 6.1 links ist die Geometrie des Rohlings abgebildet. Von diesem wurde das Volumen abgetragen, das in Abbildung 6.1 mittig dargestellt ist. Die Zielgeometrie des Spiralbohrers ist in Abbildung 6.1 rechts dargestellt.



**Abbildung 6.1:** Zylinderrohling, das abgetragenen Volumen und die Zielgeometrie

Die Zielgeometrie ist keine optimierte Bohrgeometrie. Die Hauptschneiden an der Spitze des Bohrers wurden nicht betrachtet. Diese sind durch radiale Laserbearbeitung schwer zu realisieren. Die Geometrie des Negativs, das in Abbildung 6.1 mittig dargestellt ist, wurde im CAM

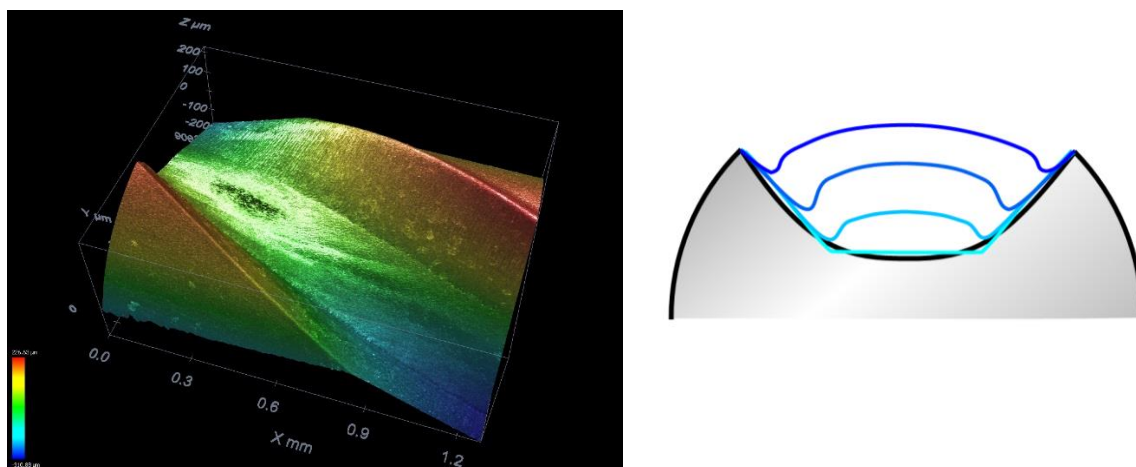
Programm verwendet um innerhalb von ungefähr 3 Minuten Berechnungszeit den NC-Code zu erstellen. Dieser wurde 69.2 Megabyte gross und beinhaltete 2'556'643 Zeilen. Der Abtrag erfolgte in 322 Schichten dauerte ungefähr 40 Minuten. Aufnahmen des gefertigten Spiralbohrers sind in Abbildung 6.2 ersichtlich.



**Abbildung 6.2:** Mikroskopaufnahmen des Spiralbohrers

In diesem ersten Versuch wurde die gewünschte Zielgeometrie des Spiralbohrers gut angenähert. Erfreulich ist, dass sich durch die axialen Abtragslinien kaum Rillen gebildet haben. Der Ra-Wert entlang der tiefsten Stelle der Spannuten beträgt rund  $1.8 \mu\text{m}$ . Dieser Wert wurde mit einer Grenzwellenlänge von  $0.8 \text{ mm}$  über drei Messstrecken mit  $1.1 \text{ mm}$  Länge gemittelt. Da nicht über eine Gesamtmessstrecke von  $4 \text{ mm}$  gemessen wurde, wie es bei diesem Ra-Wert nach DIN EN ISO 4288 nötig wäre, ist dieser mit Vorsicht zu betrachten.

Das gefertigte Profil der Spannute ist durch die Laserbearbeitung nicht wie gewünscht halbkreisförmig sondern trapezförmig. Auf der vergrösserten Topologieaufnahme der Spannute in Abbildung 6.3 links ist dieser Fehler erkennbar. Dieser Fehler liegt nicht an falsch berechneten Abtragsschichten oder an falschem NC-Code des CAM Programms. Vermutlich ist das eckige Profil darauf zurückzuführen, dass beim Abtrag steiler Flanken der Laserstrahl an diesen reflektiert wird und unterhalb der Flanken mehr Material abträgt. Daraus folgen die unerwünschten Kanten in der Spannute. Abbildung 6.3 rechts veranschaulicht wie diese entstehen. Das Profil der gewünschten Sollgeometrie ist dabei schwarz und der fortschreitende Abtrag blau visualisiert.



**Abbildung 6.3:** Trapezförmiges Profil der Spannute

Tabelle 6.1 gibt einen Überblick über die Parameter, die bei der Laserbearbeitung des Spiralbohrers verwendet wurden. Diese lehnen sich an jene der Semesterarbeit von Pascal Gilgen

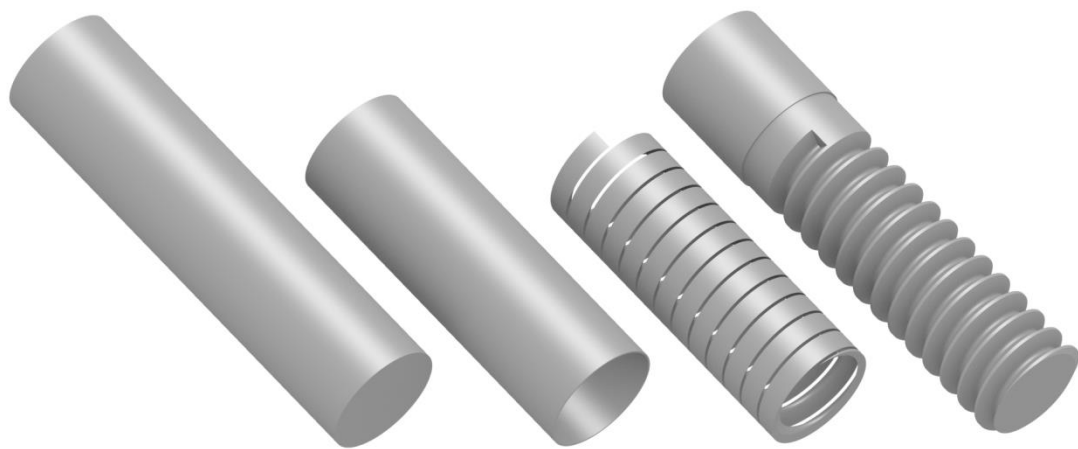
[9] an. Wird die Impulsfrequenz des Lasers verringert, ist am Ende des Strahlengangs eine erhöhte durchschnittliche Laserleistung zu messen. Um bei der Bearbeitung eine durchschnittliche Leistung von 3 Watt zu erreichen wurde deshalb die Impulsfrequenz reduziert. Die resultierende Pulsenergie ist damit nicht auf dem Wert, den Pascal Gilgen in seiner Semesterarbeit verwendet hat. Zudem hat Pascal Gilgen in seiner Arbeit nicht mit einer Wellenlänge von 532 nm sondern mit 1064 nm gearbeitet. Die verwendeten Parameter aus Tabelle 6.1 sind nicht optimiert. Um die Funktionalität des CAM Programm zu überprüfen bieten sie eine funktionierende Basis.

Scangeschwindigkeit	1000mm/s
Linienabstand	5 $\mu\text{m}$
Schichtdicke	1 $\mu\text{m}$
Skywrite Startlänge	0.1 mm
Skywrite Endlänge	0.1 mm
Drehoffset zwischen den Flächen	0.2 mm
Verhältnis Markierlinie zu Jumpline	0.6
Laser on Delay	190 $\mu\text{s}$
Laser off Delay	210 $\mu\text{s}$
Impulsfrequenz des Lasers	336 kHz
Durchschnittliche Laserleistung	3 W
Pulsenergie	9 $\mu\text{J}$
Wellenlänge	532 nm

**Tabelle 6.1:** Verwendete Parameter für die Fertigung

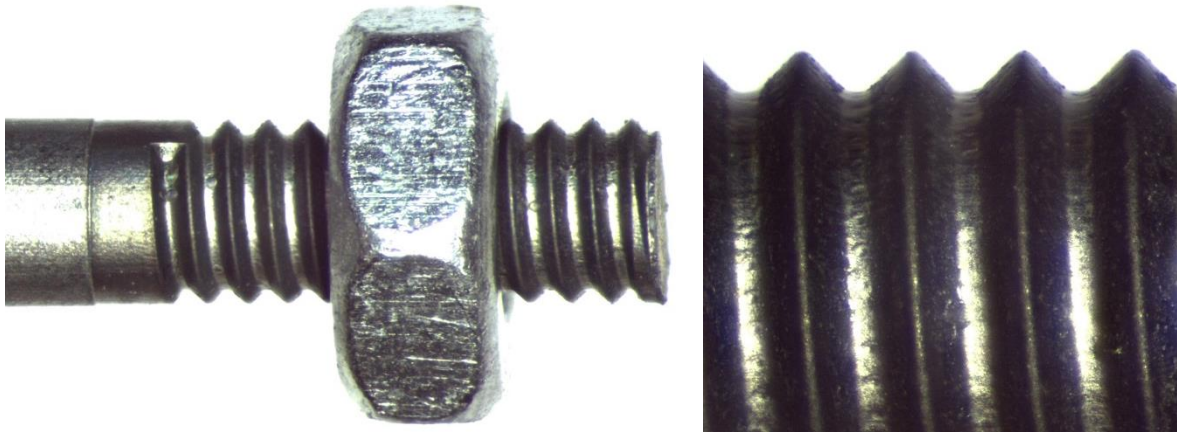
## 6.2 Gewinde

In diesem Versuch wurde ein Gewinde gefertigt. Dieses hat mit einer Steigung von 0.4 mm dieselbe wie ein M2 Gewinde. Der Nenndurchmesser des Gewindes liegt nicht bei 2 mm wie bei einem M2 Gewinde sondern bei 1.8 mm. Damit hat dieses etwas mehr Spiel. Der Zylinderrohling hatte einen Durchmesser von 1.85mm und ist in Abbildung 6.4 links dargestellt. In einem ersten Schritt wurde der Durchmesser um 50  $\mu\text{m}$  reduziert. Anschliessend wurde die Gewindenut abgetragen. Die abgetragenen Volumina sind in Abbildung 6.4 mittig abgebildet. Die Zielgeometrie des Gewindes ist in Abbildung 6.4 rechts dargestellt.



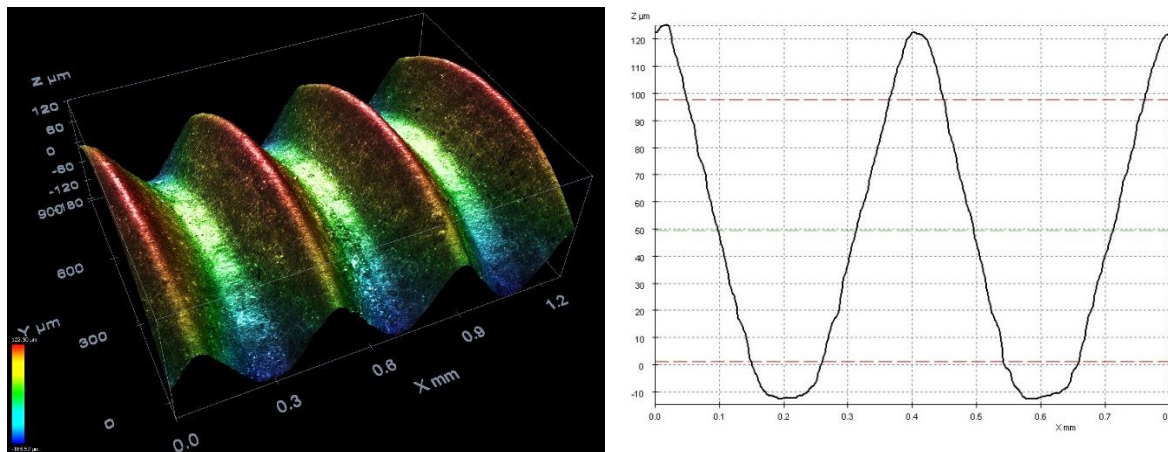
**Abbildung 6.4:** Zylinderrohling, die abgetragenen Volumina und die Zielgeometrie

Mit den beiden Abtragsgeometrien, die in Abbildung 6.4 mittig sichtbar sind, konnte mit dem CAM Programm der NC-Code erstellt werden. Dieser beinhaltet insgesamt 12'457'800 Zeilen und war 335 Megabyte gross. Die Berechnung des Codes dauerte ungefähr sieben Minuten. Bei der Laserbearbeitung erfolgte der Abtrag in 270 Schichten und dauerte rund 50 Minuten. Bei der Fertigung des Gewindes wurden dieselben Parameter benutzt wie bei der Fertigung des Spiralbohrers aus Tabelle 6.1. Abbildung 6.5 links zeigt eine Mikroskopaufnahme des gefertigten Gewindes mit einer aufgeschraubter M2 Mutter. Abbildung 6.5 rechts zeigt eine vergrösserte Aufnahme der Gewindenut.



**Abbildung 6.5:** Mikroskopaufnahmen des gefertigten Gewindes

Abbildung 6.6 links zeigt eine Topologieaufnahme vom Gewinde. Der Ra-Wert entlang der tiefsten Stelle der Gewindenut liegt bei  $1.9 \mu\text{m}$ . Dieser Wert wurde mit einer Grenzwellenlänge von  $0.8 \text{ mm}$  über drei Messtrecken mit  $0.9 \text{ mm}$  Länge gemittelt. Da wiederum nicht über eine von der DIN EN ISO 4288 vorgeschriebene Gesamtmesstrecke von  $4 \text{ mm}$  gemessen wurde, wie es bei diesem Ra-Wert nötig wäre, ist dieser mit Vorsicht zu betrachten. Abbildung 6.6 rechts zeigt eine Profilaufnahme des Gewindes. Wie zu erkennen ist, wurde die Solltiefe der Gewindenut von  $245 \mu\text{m}$  mit  $130 \mu\text{m}$  nicht erreicht. Durch optimieren der Parameter bei der Laserbearbeitung kann dieser Fehler reduziert werden.



**Abbildung 6.6:** Topologie- und Profilaufnahme des Gewindes

## Schlussfolgerung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Laserstrategien für die Bearbeitung zylindrischer Werkstücke analysiert. Damit konnte die passende Laserstrategie für den gegebenen Versuchsaufbau gefunden und im CAM Programm umgesetzt werden.

Die Erstellung eines CAM-Systems für die Laserbearbeitung zylindrischer Werkstücke konnte erfüllt werden. Mit wenig Aufwand ist es möglich den NC-Code für die Fertigung komplexer Geometrien zu berechnen und auf der Maschine korrekt auszuführen.

In dieser Arbeit wurde das CAM Programm für die Bahnberechnung von axialen Laserbahnen mit kleinen Schraffurwinkeln (nach Laserstrategie 3) verwendet. Mit den erweiterten Einstellungen ist es möglich weitere Laserstrategien zu fahren. Diese Funktionen wurden in dieser Arbeit nicht verwendet und ausgiebig getestet. Wie bei jedem Programm kann es sein, dass Fehler enthalten sind. Diese werden erst bei intensiver Benutzung auftreten.

Durch Optimierung des Programmcodes erfolgt die Berechnung der Laserbahnen effizienter. Eine Verkürzung der Berechnungszeit könnte durch Aufteilen der Aufgaben auf mehrere Prozessorkerne erreicht werden.

Die Prozessparameter für die Laserbearbeitung, die in dieser Arbeit verwendet wurden, bieten eine funktionierende Grundlage. Zur Verkürzung der Bearbeitungszeit und für eine verbesserte Werkstückqualität können diese noch optimiert werden.

Mit der radialen Laserbearbeitung können keine Hinterschneidungen abgetragen werden. Vielleicht ist es möglich durch Anstellen des Laserstrahls diese mit dem bestehenden CAM Programm zu realisieren.

Durch den modularen Aufbau des CAM Programms kann dieses einfach an weitere Bedürfnisse und Prozesse angepasst werden. Hierfür steht der Programmcode jedem zur Verfügung.

Durch Anpassen des CAM Programms könnte es auch in der additiven Fertigung verwendet werden wie zum Beispiel beim Direct Metal Depositioning.



# A

## Anhang

### A.1 Anleitung zum Ausführen des NC-Codes

In dieser Anleitung ist beschrieben, wie der NC-Code, der mit dem CAM Programm erstellt wurde, auf der CNC-Steuerung von Aerotech ausgeführt werden kann.

Zuerst muss beim Configuration Manager die Drehachse als dominante und die U-, V- und Z-Achse als abhängige Achsen definiert werden. Mit dieser Einstellung kann der Vorschub der Drehachse im NC-Code über den F-Befehl in Grad pro Sekunde definiert werden. Die Geschwindigkeiten der U-, V- und Z-Achse werden dann auf die Geschwindigkeit der Drehachse abgestimmt. In Abbildung A.2 ist ein Screenshot der Benutzeroberfläche dargestellt.

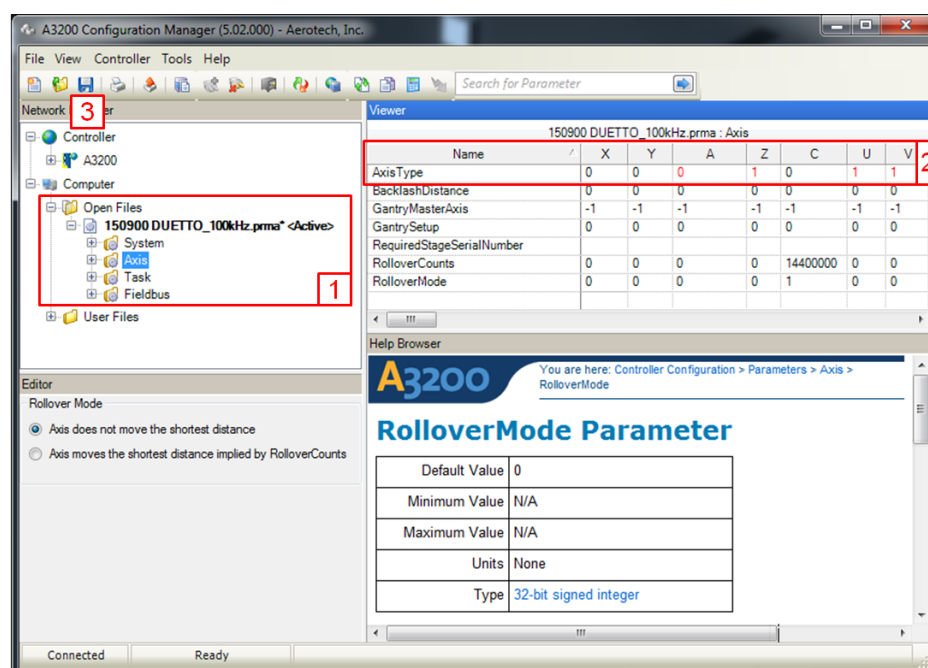


Abbildung A.1: Benutzeroberfläche des Configuration Manager von Aerotech



Um diese Einstellung zu tätigen muss auf der Benutzeroberfläche des Configuration Manager das entsprechende Verzeichnis ausgewählt werden, dass in Abbildung A.1 rot umrandet ist und durch die Nummer 1 gekennzeichnet ist. Danach können die Achsen über die Felder die auf Abbildung A.1 rot umrandet sind und durch die Nummer 2 gekennzeichnet sind als dominant oder abhängig eingestellt werden. Als letztes werden im Configuration Manager die Änderungen über die Schaltfläche die mit der Nummer 3 gekennzeichnet ist gespeichert. Vor dem Verlassen des Versuchsaufbaus müssen die Einstellungen wieder rückgängig gemacht werden.

Als nächstes wird der Motion Composer von Aerotech gestartet. Mit diesem Programm können die verschiedenen Achsen angesteuert werden. In Abbildung A.2 ist ein Screenshot der Benutzeroberfläche dargestellt.

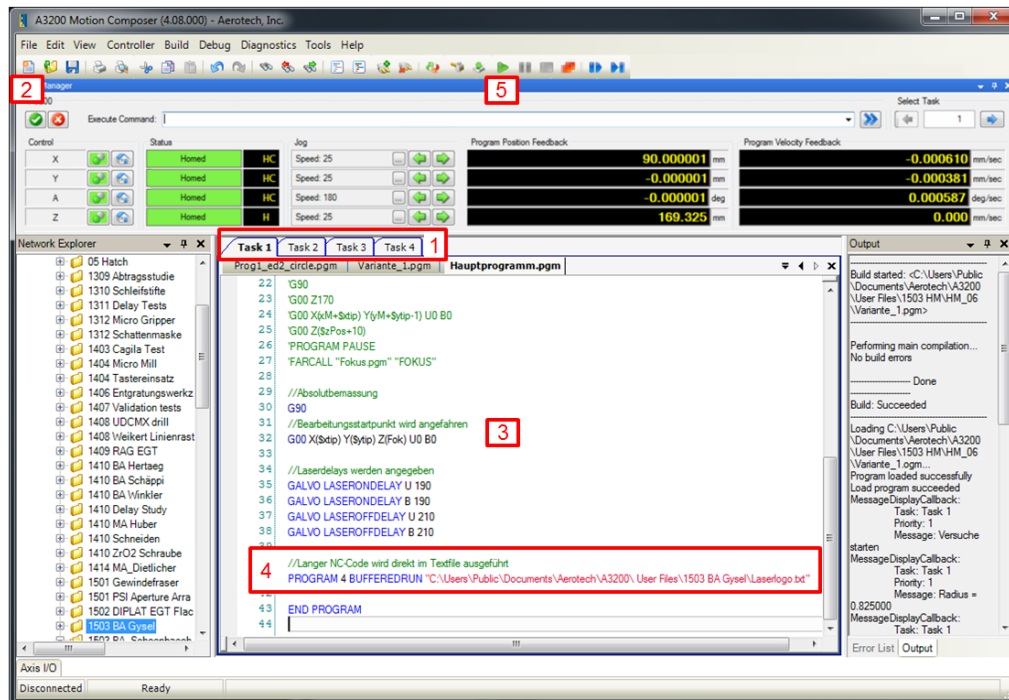


Abbildung A.2: Benutzeroberfläche des Motion Composer von Aerotech

Auf der Benutzeroberfläche gibt es vier Tasks. Diese sind in Abbildung A.2 rot umrandet und mit der Nummer 1 gekennzeichnet. Hier wird der Task 1 angewählt. Durch einen Klick auf die Schaltfläche, die in Abbildung A.2 mit der Nummer 2 gekennzeichnet ist, kann ein neues, leeres NC-Programm erstellt werden. In das Feld, das in Abbildung A.2 mit der Nummer 3 markiert ist, wird dann folgender Programmcode eingegeben:

```
DVAR $xtip
DVAR $ytip
```

```
WSa = 1 //TRUE, wenn Werkstück in A-Achse
WSl = 100 //Werkstück Länge (ab HSK nach rechts)
WSh = 1 //Werkstück Höhe / Radius
FARCALL "Safezone.pgm" "SAFE"
```

```
GALVO LASEROVERRIDE U AUTO
```

```
POSOFFSET CLEAR X Y Z U V A
// Offset von X zu U in Y-Richtung (radialer Offset) anfahren
G00 Y0.32
// Setze aktuelle Y-Position Null
POSOFFSET SET Y0
```



```

//Vorschub für mechanische Achsen definieren
XF25 YF25 ZF25
// Drehachse A auf Referenzposition fahren
HOME A

$xtip = -21
$ytip = 0

//Absolutbemassung
G90
//Bearbeitungsstartpunkt wird angefahren
G00 X($xtip) Y($ytip) Z(zFok+zA+1) U0 V0

//Laserdelays werden angegeben
GALVO LASERONDELAY U 190
GALVO LASEROFFDELAY U 210

//Langer NC-Code wird direkt im Textfile ausgeführt
PROGRAM 4 BUFFEREDRUN "C:\Users\Laserlabor1\Desktop\CAM \NCCode.txt"

`PROGRAM PAUSE

END PROGRAM

```

Dieser Programmcode ist zusätzlich auf der CD im Anhang gespeichert. Der Pfad, der auf die Textdatei verweist, die mit dem CAM Programm erstellt wurde, muss entsprechend angepasst werden. Dieser ist in Abbildung A.2 rot umrandet und mit der Nummer 4 gekennzeichnet. Danach kann das NC-Programm mit der Startschaltfläche (siehe Abbildung A.2 Nummer 5) ausgeführt werden.

## A.2 Daten auf der beigelegten CD

Auf der beigelegten CD sind diverse Daten zu dieser Arbeit gespeichert. Hier ein kurzer Überblick.

Im Ordner „Matlab LaserCAM“ ist sämtlicher Matlab Code enthalten, aus dem das CAM Programm aufgebaut ist. Es ist sowohl das kartesische CAM Programm der Bachelorarbeit als auch das neue CAM Programm dieser Semesterarbeit gespeichert.

Jeweils eine mit Matlab kompilierte Programmversion des CAM Programms ist im Ordner „LaserCAMkartesisch“ und im Ordner „LaserCAMzylindrisch“ enthalten. Diese Versionen können ausgeführt werden ohne dass Matlab installiert ist. Damit das funktioniert, muss der MatlabRuntimeCompiler installiert werden.

Im Ordner „Stl-Dateien“ sind verschiedene Modellgeometrien, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden. Diese können mit dem CAM Programm geöffnet werden.

Im Ordner „NC-Code“ befinden sich mehrere Textdateien. Die eine beinhaltet den NC-Code mit dem der Spiralbohrer gefertigt wurde. Der NC-Code, mit dem das Gewinde erstellt wurde, ist ebenfalls enthalten. Zudem ist in diesem Ordner der Programmcode mit dem von der CNC-Steuerung von Aerotech der NC-Code in den Textfiles ausgeführt werden kann.

Zur Verständlichkeit diese Arbeit habe ich viele Grafiken erstellt. Diese sind alle im Ordner „Grafiken“ enthalten und dürfen für weitere Zwecke verwendet werden.

Zwei kurze Videos, welche die spektakuläre Laserbearbeitung des Spiralbohrers und des Gewindes zeigen, sind ebenfalls auf der CD.



## Literaturverzeichnis

- [1] Renk, K., Basics of Laser Physics for Students of Science and Engineering, Springer, 2012
- [2] Schaeffer, R., D., Fundamentals of laser micromachining, CRC Press, 2012
- [3] Gysel, J., Entwicklung eines CAM-Systems für 2D und 2.5D Laserbearbeitung, Bachelorarbeit, 2015
- [4] Eberle, G., Dold, C., Wegener, K., Laser fabrication of diamond micro cutting tool related geometries using a high-numerical aperture micro scanning system, Institute of Machine Tools and Manufacturing (IWF), 2015
- [5] Jaeggi, B., Neuenschwander, B., Meier, T., Zimmermann, M., Hennig, G., High throughput laser micro machining on a rotating cylinder with ultra short pulses at highest precision, Bern University of Applied Sciences, 2013
- [6] Butler-Smith, P., W., Axinte, D., A., Daine, M., Solid diamond micro-grinding tools: From innovative design and fabrication to preliminary performance evaluation in Ti-6Al-4V, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012, p. 55-64
- [7] Suzuki, H., Okada, M., Fujii, K., Matsui, S., Yamagata, Y., Development of micro milling tool made of single crystalline diamond for ceramic cutting, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2013, p 59-62
- [8] Gilgen, P., Laserbearbeitung von PKD und Hartmetall: Erzeugung einer axialen Nut in einem Zwei-Komponenten-Zylinderrohling, Semesterarbeit, 2013
- [9] EWAG Körber Solutions, Laser Line Ultra – Ein Quantensprung in der Produktion ultraharter Werkzeuge, EWAG AG, 2014
- [10] Huber, S., Entwicklung von Ultrakurzpuls-Laserprozessen für das tangentiale Schlichten von Mikrogeometrien, Masterarbeit, 2015
- [11] Siemens PLM Software, Siemens NX, [www.siemens.com/plm](http://www.siemens.com/plm), [Abgerufen: 7.1.2016]
- [12] Köhler, A., CAGILA 2D und 3D Software, CAM-Service GmbH, 2015
- [13] Time-Bandwidth, DUETTO User Manual, 2010
- [14] SCANLAB AG, intelliSCAN, [www.scanlab.de](http://www.scanlab.de), [Abgerufen: 14.12.15]

- [15] Aerotech, Inc., APR Hardware Manual, [www.aerotech.com](http://www.aerotech.com), [Abgerufen: 14.12.15]
- [16] ISO 6983-1, Automation systems and integration – Numerical control of machines – Program format and definitions of address words, International Organization for Standardization, 2009
- [17] The MathWorks Inc., [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com), [Abgerufen: 26.5.2015]

# Plagiatserklärung

Ich erkläre mit meiner Unterschrift, das Merkblatt Plagiat zur Kenntnis genommen, die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und die im betroffenen Fachgebiet üblichen Zitiervorschriften eingehalten zu haben.

Merkblatt Plagiat: [http://www.ethz.ch/students/semester/plagiarism\\_s\\_de.pdf](http://www.ethz.ch/students/semester/plagiarism_s_de.pdf)

---

Ort, Datum

---

Unterschrift