

Laserbearbeitung von Zirkonoxid Zahimplantaten

Johannes Gysel

Masterarbeit

HS 2016 / FS 2017

Prof. Dr. Konrad Wegener

Maximilian Warhanek

Josquin Pfaff

Norbert Ackerl

Zusammenfassung

Bei der Fertigung von Zahnimplantaten aus Keramik ist die Bearbeitung mittels ultrakurz gepulsten Lasern eine Alternative im Vergleich zur konventionellen Schleifbearbeitung. Gerade bei der Prototypenfertigung ergibt sich durch die hohe geometrische Flexibilität ein erheblicher Vorteil. Die verschiedenen Möglichkeiten zur Fertigung von Implantaten aus Zirkonoxid durch Laserbearbeitung wurden im Rahmen dieser Arbeit untersucht. Dazu wurde ein Femtosekundenlaser mit einem Mehrachsensystem mit fünf mechanischen sowie zwei optischen Achsen verwendet.

Um die Bearbeitung zu realisieren wurde ein Computer Aided Manufacturing (CAM) Programm für tangentiale Laserbearbeitung erstellt. Damit können aus der Geometrie des abzutragenden Volumens die Laserbahnen und der Numerical Control (NC) Code für die Fertigung komplexer Werkstücke berechnet werden. Dieses neuartige CAM Programm ermöglicht die synchrone Laserbearbeitung mit bis zu sieben Achsen. Damit wurde die Funktionalität des Mehrachsensystems voll ausgereizt.

In einer Parameterstudie wurde das Abtragsverhalten des Femtosekundenlasers auf Aluminiumoxid verstärktem Zirkonoxid untersucht. Es wurde eine Studie für radiale sowie tangentiale Laserbearbeitung durchgeführt. Aus jeder Parameterstudie wurden je zwei Parametersätze hergeleitet, mit welchen eine geeignete Laserbearbeitung möglich ist.

Sowohl mit radialer als auch tangentialer Laserbearbeitung wurden Zahnimplantate hergestellt. Durch die radiale Fertigung wurde eine raua, poröse Oberfläche erzielt, die für die Verwachsung mit dem Gewebe eine geeignete Struktur darstellen kann. Bei der tangentialen Bearbeitung wurde im Vergleich zur radialen Laserbearbeitung eine erhöhte Masshaltigkeit und Oberflächen mit geringen Rauheitswerten erreicht, die mit jenen von geschliffenen Implantaten vergleichbar sind. Aufgrund der erhöhten Wärmeeintragung haben sich jedoch Risse und teilweise Schmelzsichten gebildet. Diese konnten durch radiale Nachbearbeitung jedoch wieder entfernt werden.

Um die Osseointegration der Implantate durch vergrösserte Oberfläche und erhöhte Rauheit zu verbessern wurden verschiedene Versuche zur Mikrostrukturierung durchgeführt. Dabei wurden einzelne Laserspots und Rillen auf tangential geschlitzte Implantate aufgebracht.

Durch Ramanspektroskopie wurde festgestellt, dass durch die Laserbearbeitung des Zirkonoxids keine Zunahme der monoklinen Phase erfolgt und die vorwiegend tetragonale Phase erhalten blieb. Es konnte sogar gezeigt werden, dass die monokline Phase im Gegensatz zur geschliffenen Oberflächenbehandlung des Rohlings reduziert wurde.

Abstract

Machining of dental ceramic implants with ultrashort pulsed lasers is an alternative production process to conventional grinding. Especially, the high geometrical flexibility is a big advantage in the development of new prototypes. Different production possibilities of zirconia implants were implemented in this thesis. For that purpose a femtosecond laser with a multi axis system consisting of five mechanical and two optical axes was used.

To realise the production, a Computer Aided Manufacturing (CAM) program for tangential laser machining of cylindrical workpieces was implemented. With a given geometry of the ablated volume, it can calculate the laser trajectories and the Numerical Control (NC) code for production of complex workpiece shapes. This new CAM program makes synchronous laser machining with up to seven axes possible. Thereby a maximal use of all functionalities of the multi axis system was achieved.

In a parameter study the ablation behaviour of the femtosecond laser on alumina toughened zirconia was analysed. Studies for radial and tangential laser machining were carried out. Two sets of parameters for suitable production were derived from each study.

Dental implants were produced with radial and tangential laser machining. Through radial processing a rough porous surface was obtained, which might improve bone and soft tissue attachment. With tangential laser machining a better dimensional accuracy and a smoother surface was achieved compared to radial machining. Due to a higher heat input cracks and molten layers were detected. They could be removed through radial laser machining.

To improve osseointegration of the implants different micro structures were applied on the surface with single laser spots and as well laser trajectories.

Raman spectroscopy has shown that there was no increase in the monoclinic phase through laser machining and that the predominant tetragonal phase of zirconia was preserved. Compared to the grinded surface a reduction of the monoclinic phase has been revealed.

Laserbearbeitung von ZrO₂ Zahnimplantaten

Masterarbeit

Motivation

Heutzutage werden bei der konventionellen Keramikverarbeitung Schleifprozesse verwendet. Diese stellen eine grosse Herausforderung sowohl an die Maschinen, als auch an die Prozessführung dar. Der Schleifprozess erfolgt unter Aufbringung von Kräften und Einwirkung von Wärme, was das Werkstück stark belastet. Dabei verschleist die Schleifscheibe, was zusätzlich die Präzision vermindert. Ein Konkurrenzverfahren zum konventionellen Schleifen stellt die Bearbeitung mittels ultrakurz gepulsten Lasern dar. Sie erlauben eine kräfte- und verschleissfreie und sehr schädigungsarme Bearbeitung verschiedenster ultraharter Werkstoffe. Neben der hohen Präzision weist die Laserbearbeitung eine hohe geometrische Flexibilität auf. Neuste Steuerungssysteme erlauben die synchrone Anwendung von optischen und mechanischen Achsen (Abbildung 1). Durch diese Kombination sind neue Laserbearbeitungsverfahren möglich. Zur Umsetzung dieser Prozesse sind entsprechende CAM Systeme notwendig.

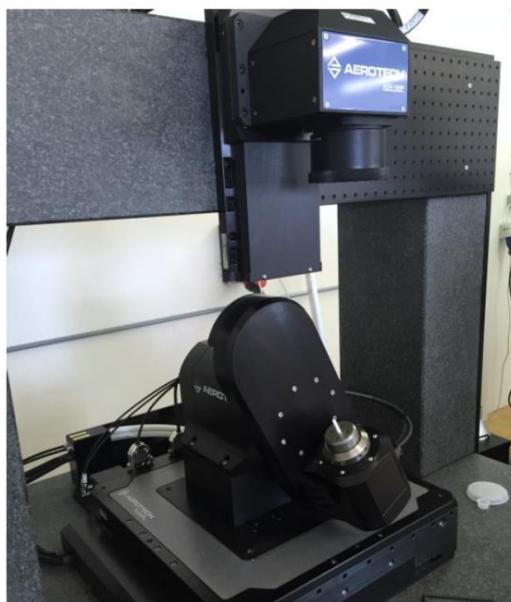


Abbildung 1: Scankopf – CNC Kombination



Abbildung 2: Zahnimplantat aus Keramik [Dentalpoint AG]

Aufgabenbeschreibung

In dieser Arbeit soll ein Mehrachsensystem mit fünf mechanischen und zwei optischen Achsen und einem Femtosekundenlaser verwendet werden, um komplexe Geometrien aus Zirkonoxid zu fertigen. Dazu soll ein CAM Programm erstellt werden, welches eine optimierte Laserbearbeitung ermöglicht. Der Materialabtrag und die erzeugten Oberflächen, sowie die Materialeigenschaften sollen analysiert und mit konventionell geschliffenen verglichen werden. Die Arbeit erfolgt in Zusammenarbeit mit der Firma Dentalpoint AG. Diese ist auf die Produktion von Zahnimplantaten aus Keramik spezialisiert (Abbildung 2). Bestandteile der Arbeit sind:

- Literaturrecherche
- Parameterstudie für die Laserbearbeitung von Zirkonoxid
- CAM-Entwicklung für die Laserbearbeitung komplexer Geometrien
- Untersuchung der Oberflächenstrukturierung
- Analyse der Materialeigenschaften von bearbeitetem Zirkonoxid
- Dokumentation und Präsentation der Arbeit

Kontakt

Maximilian Warhanek	Technopark, PFA H43	044 633 78 40	warhanek@iwf.mavt.ethz.ch
Norbert Ackerl	Technopark, PFA H43	044 633 73 50	ackerl@iwf.mavt.ethz.ch
Pascal Wettstein	Hohlstrasse 614, Zürich	044 388 36 30	pascal.wettstein@zeramex.com
Philip Bolleter	Hohlstrasse 614, Zürich	044 388 36 36	philip.bolleter@zeramex.com

Danksagung

Ich bedanke mich bei meinen Betreuern Maximilian Warhanek, Norbert Ackerl und Josquin Pfaff. Vor allem im Bereich der Materialuntersuchungen konnte mir Norbert Ackerl mit seinem kompetenten Fachwissen weiterhelfen und mich bei der Aufbereitung der Schliffbilder und bei der Ramanspektroskopie stark unterstützen. Ich danke Maximilian Warhanek, dass er sich auf Anfrage bereit erklärte diese Arbeit zu betreuen obwohl er bereits in viele andere Tätigkeiten, Pflichten und Projekte eingebunden war. Ohne seine Unterstützung und sein enormes Wissen im Bereich der Laserbearbeitung wäre diese Arbeit nicht zu Stande gekommen.

Ein weiterer Dank geht an Philip Bolleter und Pascal Wettstein von der Firma Zeramex. Durch ihre Bereitstellung des Versuchsaufbaus, des Elektronenmikroskops und weiteren Einrichtungen sowie ihrer Hilfestellung bei der Benutzung dieser Geräte wurde es erst möglich diese Arbeit zu realisieren. Durch sein grosses Wissen über Implantate und deren Fertigungsverfahren konnte mich Philip Bolleter hervorragend unterstützen. Bei jeglichen Fragen bezüglich der Keramiken und des Versuchsaufbaus konnte mir Pascal Wettstein stets weiterhelfen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Abstract	iii
Danksagung	vii
Inhaltsverzeichnis	ix
Abbildungsverzeichnis	xii
Tabellenverzeichnis	xvii
Zeichen und Einheiten	xix
1. Einleitung	1
2. Stand der Technik	3
2.1 Laser	3
2.1.1 Funktionsprinzip des Lasers	3
2.1.2 Betriebsarten	4
2.1.3 Wechselwirkung von Strahl und Materie	4
2.2 Technische Keramik	5
2.2.1 Herstellung von Keramiken	6
2.2.2 Keramikbearbeitung durch Schleifen	8
2.2.3 Zirkonoxid	9
2.2.4 Aluminiumverstärktes Zirkonoxid	10
2.2.5 Oberflächenbehandlung von Zirkonoxid	10
2.2.6 Laserbearbeitung von Zirkonoxid	11
2.3 Zahnimplantate	12
2.3.1 Anwendung von Zahnimplantaten	12
2.3.2 Laserstrukturierung von Zahnimplantaten	13
2.3.3 Mikrostrukturierung von Zahnimplantaten	15
2.4 Raman Spektroskopie	15
2.4.1 Funktionsprinzip	15
2.4.2 Aufbau	16
2.4.3 Raman Spektroskopie von Zirkonoxid	17
2.5 CAM Programme	18
2.5.1 CAM Programm für kartesische Laserbearbeitung	18
2.5.2 CAM Programm für zylindrische Laserbearbeitung	18
2.5.3 Helitronic Tool Studio	19
2.5.4 Simulation tangentialer Laserbearbeitung	20
2.6 Radiale und tangentiale Laserbearbeitung	20

2.6.1	Anwendungen von radialer Laserbearbeitung	21
2.6.2	Anwendungen von tangentialer Laserbearbeitung.....	21
3.	Versuchsaufbau und Messinstrumente.....	23
3.1	Versuchsaufbau.....	23
3.2	Optische Lichtmikroskope	24
3.3	Elektronenmikroskop	25
3.4	Einstell- und Messgerät.....	26
3.5	Ramanspektroskop	26
4.	CAM Programmierung	27
4.1	Grundkonzept des CAM Programms	27
4.2	Übersicht	28
4.3	Konstruktion der Werkstückgeometrie	28
4.4	Stl-Datei importieren	29
4.5	Überprüfen der Stl-Datei.....	30
4.6	Abrollen der Geometrie	30
4.6.1	Transformation einer einzelnen Dreiecksfläche.....	31
4.6.2	Kombination der Umfangssegmente.....	31
4.7	Berechnung der Bahnlinie.....	32
4.7.1	Berechnung der Bahnlinie bei helixförmigen Geometrien	32
4.7.2	Berechnung der Bahnlinie beim Umfangsabtrag	33
4.8	Berechnung des Schattenwurfs	34
4.8.1	Bestimmung der Schattenwurfkanten	34
4.8.2	Bestimmung der Schattenkontur	35
4.9	Berechnung der Konturoffsets	37
4.9.1	Berechnung der Winkelhalbierenden.....	38
4.9.2	Abstandberechnung zum Edge Event Punkt	38
4.9.3	Aufrücken der Eckpunkte	40
4.10	Anpassen der Hatchenden.....	40
4.11	Kurze Konturkanten entfernen.....	41
4.12	Zusammenfassen der Hatchlinien	42
4.13	Berechnung des Vorschubes	42
4.14	Orientierung der Laserbahnen.....	43
4.15	Die Benutzeroberfläche.....	43
4.15.1	Aufbau der Benutzeroberfläche	43
4.15.2	Parameter zur Bahnberechnung	44
4.15.3	Erstellen des NC-Codes	45
5.	Versuchsdurchführung und Ergebnisse.....	47
5.1	Bestimmung der Schwellfluenz	47
5.2	Parameterstudien auf Zirkonoxid.....	48
5.2.1	Radiale Parameterstudie.....	48
5.2.2	Tangentielle Parameterstudie	51
5.2.3	Vergleich der Parameterstudien	53
5.3	Das Implantat T16308.....	53
5.4	Fertigung des Implantats durch radiale Laserbearbeitung	55
5.4.1	Erstellung des NC-Codes	56
5.4.2	Radiale Laserbearbeitung.....	56
5.4.3	Das radial bearbeitete Implantat.....	57
5.4.4	Masshaltigkeit des radialen Implantats	58
5.5	Fertigung eines Implantats durch tangentielle Laserbearbeitung.....	59
5.5.1	Umfangabtrag.....	59
5.5.2	Die Grundgeometrie des Umfangabtrags.....	60
5.5.3	Schruppen der Gewindenut	61
5.5.4	Die geschruppte Gewindenut	62
5.5.5	Schlitten der Gewindenut	62

5.5.6	Polieren der Gewindenut	63
5.5.7	Masshaltigkeit der tangential bearbeiteten Implantate	64
5.6	Schliffbilder der Implantate.....	65
5.7	Radialer Abtrag der Schmelzschicht	67
5.8	Oberflächenstrukturierung.....	67
5.8.1	Laserspots.....	68
5.8.2	Axiale Rillen.....	68
5.8.3	Rillen in Nutrichtung	69
5.9	Tetragonale und monokline Phasenanteile der Implantate	69
5.10	Verfärbungen durch die Laserbearbeitung	71
6.	Schlussfolgerung und Ausblick	73
Anhang	75
A.1	Ausrichten der Maschine vor der Bearbeitung	75
A.2	Anleitung zum Ausführen des NC-Codes	76
A.3	Beschleunigungsfilter	77
A.4	Daten auf der beigelegten CD	78
A.5	Materialkennwerte	78
Literaturverzeichnis	81
Plagiatserklärung	85

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Grundlegende Funktionsweise eines Lasers [3]	4
Abbildung 2.2:	Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Materie [6].....	5
Abbildung 2.3:	Fertigungskette bei der Herstellung von Keramiken	6
Abbildung 2.4:	Methoden der Formgebung von Keramikobjekten [11]	7
Abbildung 2.5:	Zahnbrücke aus Zirkonoxid und diamantbestückte Schleifstifte [15]	8
Abbildung 2.6:	Verschiedene Phasen von Zirkonoxid [16].....	9
Abbildung 2.7:	Yttriumoxid stabilisiertes Zirkonoxid mit 20 vol% und 40 vol% Aluminumoxid [17]	10
Abbildung 2.8:	Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenbehandlung [18]	11
Abbildung 2.10:	Laserbearbeitung von Yttriumoxid stabilisiertem Zirkonoxid [22].....	12
Abbildung 2.11:	Werkzeuge für die Implantation [24]	12
Abbildung 2.12:	Implantat einschrauben und verschliessen [24]	13
Abbildung 2.13:	Aufsetzen des Abutments und der Krone [24]	13
Abbildung 2.14:	Zahnimplantat vor der Laserbearbeitung [25]	14
Abbildung 2.15:	Oberflächenstrukturierung mit Poren und Kerben [25].....	14
Abbildung 2.16:	Laserstrukturierung des Implantats und des Abutments [26]	15
Abbildung 2.17:	Streuungsmechanismen der Raman Spektroskopie	16
Abbildung 2.18:	Aufbau des Raman Spektroskops [27]	16
Abbildung 2.19:	Monoklines und tetragonales Raman Spektrum von Zirkonoxid [27]	17
Abbildung 2.20:	CAM Programm für kartesische Laserbearbeitung [29]	18
Abbildung 2.21:	CAM Programm für zylindrische Laserbearbeitung [30].....	19
Abbildung 2.22:	Helitronic Tool Studio von Walter Maschinenbau GmbH [31]	19
Abbildung 2.23:	Simulation der tangentialer Laserbearbeitung [32]	20
Abbildung 2.24:	Radiale, tangentiale und axiale Laserbearbeitung [33].....	20
Abbildung 2.25:	Durch radiale Laserbearbeitung gefertigte Werkzeuge [35] [36].....	21
Abbildung 2.26:	Durch tangentiale Laserbearbeitung gefertigte Werkzeuge [13] [14]	22
Abbildung 3.1:	Darstellung des Versuchsaufbaus mit 1 Laser, 2 Teleskop, 3 Scankopf, 4 mechanische Z-Achse, 5 Drehachse, 6 Schwenkachse und 7 Kreuztisch.....	23
Abbildung 3.2:	Fokusdurchmesser gemessen mit BeamGage	24
Abbildung 3.3:	Leica M80, Leica DCM 3D und Alicona Infinite Focus	25
Abbildung 3.4:	Phenom ProX der Firma PhenomWorld [41]	25
Abbildung 3.5:	Das Messsystem Zoller Venturion 450 [42]	26
Abbildung 4.1:	Konzept des CAM Programms für tangentiale Laserbearbeitung	27
Abbildung 4.2:	Übersicht CAM Programmierung	28

Abbildung 4.3:	Geometrie des Werkstücks, des Rohlings und des Negativs	29
Abbildung 4.4:	Berechnung des Normalenvektors	29
Abbildung 4.5:	Defekte in der Oberfläche der Stl-Datei.....	30
Abbildung 4.6:	Abrollen der Geometrie	31
Abbildung 4.7:	Transformation einer Dreiecksfläche	31
Abbildung 4.8:	Bestimmung der zusammenhängenden Geometrie	32
Abbildung 4.9:	Berechnung der Bahnlinie bei helixförmigen Geometrien	32
Abbildung 4.10:	Bahnberechnung beim Umfangsabtrag	34
Abbildung 4.11:	Berechnung des Schattenwurfs	35
Abbildung 4.12:	Bestimmung der Schattenkontur	35
Abbildung 4.13:	Herleitung des Intersektionspunktes	36
Abbildung 4.14:	Auswahl der korrekten Anschlusskante	36
Abbildung 4.15:	Bestimmung des Zwischenwinkels zweier Vektoren.....	37
Abbildung 4.16:	Berechnung der Konturoffsets mit und ohne Edge Event.....	37
Abbildung 4.17:	Berechnung der Winkelhalbierenden	38
Abbildung 4.18:	Beim Edge Event treffen zwei Eckpunkte aufeinander	39
Abbildung 4.19:	Aufrücken der Eckpunkte	40
Abbildung 4.20:	Verlängerung der Hatchenden.....	40
Abbildung 4.21:	Berechnung der neuen Start- und Endpunkte einer Kontur	41
Abbildung 4.22:	Überspringen von sehr kurzen Konturkanten	41
Abbildung 4.23:	Schruppstrategie links und Schlichtstrategie mittig und rechts	42
Abbildung 4.24:	Laserbahnen werden im Gegenuhrzeigersinn oder im Zickzack abgefahren.....	43
Abbildung 4.25:	Benutzeroberfläche des CAM Programms.....	44
Abbildung 4.26:	Darstellung der Eingabeparameter für die Bahnberechnung	44
Abbildung 4.27:	Anpassung der NC-Befehle.....	45
Abbildung 5.1:	Abtragsspots auf Zirkonoxid und Diagramm zur Bestimmung der Schwellfluenz.....	47
Abbildung 5.2:	Parameterabhängigkeit der radialen Parameterstudie	49
Abbildung 5.3:	Dimensionen der radialen Parameterstudie.....	49
Abbildung 5.4:	Parameterabhängigkeit der tangentialen Parameterstudie.....	51
Abbildung 5.5:	Dimensionen bei der tangentialen Parameterstudie	52
Abbildung 5.6:	Das geschliffene Implantat.....	54
Abbildung 5.7:	Konturverlauf und Abweichungen des geschliffenen Implantats	54
Abbildung 5.8:	Das sandgestrahlte und thermisch geätzte Implantat	55
Abbildung 5.9:	Verrundeter Konturverlauf des behandelten Implantats	55
Abbildung 5.10:	Fertigung des Implantats durch radiale Laserbearbeitung	56
Abbildung 5.11:	Geometrie des Negativs und den Laserbahnen aus einer Schicht	56
Abbildung 5.12:	Die schwarzen Einbrände und Materialablagerungen in der Nut.....	57
Abbildung 5.13:	Radial bearbeitetes Implantat.....	57
Abbildung 5.14:	Oberfläche auf dem Nutgrund des radial Bearbeiteten Implantats	58
Abbildung 5.15:	Masshaltigkeit des radialen Implantats	58
Abbildung 5.16:	Zylinderrohling, Grundgeometrie und Zielgeometrie des Implantats....	59
Abbildung 5.17:	Laserbahnberechnung für den Umfangsabtrag	59
Abbildung 5.18:	Gefertigte Grundgeometrie durch Umfangsabtrag.....	60
Abbildung 5.19:	Kleine Risse, die aus dem Umfangsabtrag resultieren	60
Abbildung 5.20:	Schruppen der Gewindenut	61
Abbildung 5.21:	Bahnberechnung für das Schrappen der Gewindenut	61
Abbildung 5.22:	Implantat mit geschruppter Gewindenut.....	62
Abbildung 5.23:	Oberfläche der geschruppten Gewindenut	62
Abbildung 5.24:	Bahnberechnung für das Schlichten der Gewindenut	63
Abbildung 5.25:	Implantat mit geschlichteter Gewindenut	63
Abbildung 5.26:	Implantat mit polierter Gewindenut	64
Abbildung 5.27:	Rissbildung durch das Polieren.....	64

Abbildung 5.28:	Masshaltigkeit des tangential geschlichteten Implantats	65
Abbildung 5.29:	Schliffbilder des geschlichteten Implantats	65
Abbildung 5.30:	Aufschliff des tangential bearbeiteten Implantathalses	66
Abbildung 5.31:	Schliffbilder des radial bearbeiteten Implantats	66
Abbildung 5.32:	Radial nachbearbeitetes Implantat.....	67
Abbildung 5.33:	Übergang der tangential geschlichteten zur radial bearbeiteten Oberfläche	67
Abbildung 5.34:	Mikrostrukturierung durch Laserspots	68
Abbildung 5.35:	Mikrostrukturierung durch axiale Laserbahnen.....	69
Abbildung 5.36:	Mikrostrukturierung durch Laserbahnen in Nutrichtung.....	69
Abbildung 5.37:	Raman Spektren von unterschiedlichen Implantaten	70
Abbildung 5.38:	Positionsabhängige Phasenanteile des sandgestrahlten und geätzten Implantats	71
Abbildung 5.39:	Parameterprobe vor und nach dem Erwärmen.....	71
Abbildung 5.40:	Laserbearbeitete Implantate nach der Wärmebehandlung.....	72
Abbildung A.1:	Bestimmung der Abweichungen des Fokus zum Drehschwenkpunkt....	75
Abbildung A.2:	Fokustest zur Bestimmung der Abweichung in Z-Richtung	76
Abbildung A.3:	Bestimmung der Abweichung in X und Z-Richtung	76
Abbildung A.4:	Einstellungen im Configuration Manager von Aerotech	77
Abbildung A.5:	Benutzeroberfläche des Motion Composer von Aerotech	77
Abbildung A.6:	Materialkennwerte des verwendeten Keramiks.....	79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Anwendungen von technischen Keramiken [7] [8] [9]	6
Tabelle 2.2:	Peaks der monoklinen und tetragonalen Phase [28]	17
Tabelle 5.1:	Messergebnisse der radialen Parameterstudie	50
Tabelle 5.2:	Parametersätze aus der radialen Parameterstudie	51
Tabelle 5.3:	Messergebnisse der tangentialen Parameterstudie.....	52
Tabelle 5.4:	Parametersätze der tangentialen Parameterstudie.....	53

Zeichen und Einheiten

Abkürzungen

CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CCD	Charge Coupled Device
CNC	Computer Numerical Control
CSZ	Cubic Stabilized Zirconia
IR YVO ₄	Infrared Yttrium Orthovanadate
ISO	International Organization for Standardization
NC	Numerical Control
Nd:YAG	Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet
PSZ	Partially Stabilized Zirconia
TZP	Tetragonal Zirconia Polycrystals

Formelzeichen

ν	Frequenz des Lichts	[Hz]
ω	Wellenzahl	[1/cm ²]
λ	Wellenlänge	[nm]
c	Lichtgeschwindigkeit	[m/s]
h	Plancksches Wirkungsquantum	[-]
F	Fluenz	[J/cm ²]
F_0	Spitzenfluenz	[J/cm ²]
F_{thr}	Schwellfluenz	[J/cm ²]
E_{thr}	Schwellwert der Pulsenergie	[μJ]

w	Strahlradius	[mm]
w_0	Taillenradius	[mm]
w_{thr}	Ablationsradius	[mm]
\vec{v}	Richtungsvektor	
\vec{n}	Normierter Richtungsvektor	
α	Winkel zwischen Kante und Winkelhalbierender	[°]
β	Berechneter Schwenkwinkel	[°]
γ	Winkel zwischen zwei Richtungsvektoren	[°]
φ	Abrollwinkel	[°]
I	Intersektionspunkt	
S	Startpunkt einer Kante	
E	Endpunkt einer Kante	
A	Abstand	
w	Zwischenwinkel zweier Kanten	
l_b	Bahnabstand	[mm]
l_e	Erster Konturoffsetabstand	[mm]
l_k	Konturoffset Zwischenabstand	[mm]
l_e	Letzter Konturoffsetabstand	[mm]
l_v	Verlängerung der Hatchenden	[mm]
l_p	Pulsabstand	[mm]
U_p	Pulsüberlappung	[mm]
U_b	Bahnüberlappung	[mm]
v_s	Scangeschwindigkeit	[mm/s]
d_s	Spotdurchmesser	[mm]
l_z	Schichtdicke	[mm]
l_r	Radiale Zustellung	[mm]
Δw	Winkelschritt	[°/Radius/Scan]
Q	Abtragsrate	[mm ³ /min]
P	Laserleistung	[W]
f_P	Pulsfrequenz des Lasers	[Hz]
τ_p	Pulsdauer eines Laserimpulses	[fs]
E_p	Pulsenergie	[μJ]
Ra	Mittlere Rauheit	[μm]
Rz	Gemittelte Rautiefe	[μm]
λ_c	Grenzwellenlänge	[μm]

1

Einleitung

Die Firma Dentalpoint AG wurde im Jahr 2005 gegründet und vermarktet unter der Produktlinie ZERAMEX zweiteilige Keramikimplantate aus Zirkonoxid. Diese bieten im Vergleich zu herkömmlichen Titanimplantaten einen metallfreien Zahnersatz [1].

Heutzutage erfolgt die Herstellung der Implantate vorwiegend durch Schleifbearbeitung. Bei dieser konventionellen Bearbeitung werden hohe Prozesskräfte aufgebracht, damit die Schleifscheibe ausreichende Anpresskraft erreicht und genügend Zerspanung erfolgt. Diese hohen Kräfte sind mit einer grossen Wärmeentwicklung und einem starkem Verschleiss der Schleifscheibe verbunden. Damit die Schleifscheiben ihre Formgenauigkeit behalten, müssen diese in einem aufwendigen Verfahren regelmässig abgerichtet werden. Die grosse Wärmeentwicklung im Prozess kann das Werkstück stark belasten und erfordert meist eine gute Kühlung.

Gerade im Bereich der Prototypenfertigung von neuen Implantaten stellt die Bearbeitung mittels ultrakurz gepulsten Lasern ein alternatives Verfahren zum konventionellen Schleifen dar. Hier ist eine Bearbeitung ohne Prozesskräfte und ohne Verschleiss möglich. Durch Anpassen der Laserbahnen mit entsprechendem NC-Code erreicht man bei der Bearbeitung eine grosse Flexibilität. Im Gegensatz zum Schleifen ist man nicht an fixe Geometrien von Schleifscheiben gebunden, die durch einen aufwendigen Herstellungsprozess gefertigt werden müssen.

Durch die Verwendung von hochdynamischen Spiegelachsen werden bei der Laserbearbeitung hohe Markiergeschwindigkeiten erreicht. Diese liegen bis um den Faktor 100 höher als bei mechanischen Achsen [2]. Werden optische Achsen kombiniert mit mechanischen Achsen, welche erhöhte Präzision und längere Verfahrenswege aufweisen, können optimierte Mehrachssysteme ausgelegt werden. Neue Steuerungssysteme erlauben es, die optischen Achsen synchron zu den mechanischen Achsen anzusteuern. Mit diesen Maschinensystemen können neue Laserbearbeitungsstrategien umgesetzt und komplexe Geometrien gefertigt werden.

Aufgrund der Neuheit dieser Bearbeitungsstrategien gibt es heutzutage kein CAM Programm, welches die Bahnberechnung für synchrone Laserbearbeitung mit bis zu sieben Achsen gleichzeitig beherrscht. Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb ein neuartiges CAM Programm entwickelt, um die volle Funktionalität dieser Mehrachssysteme auszureißen. Damit ist es unter anderem möglich, die Aussengeometrie von Zahnimplantaten aus Keramik herzustellen.

2

Stand der Technik

2.1 Laser

Die Funktionsweise von Lasern basiert auf dem Phänomen der stimulierten Emission. Daraus leitet sich auch der Name LASER her. Dieser steht für Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Laser finden in sehr vielen Anwendungsbereichen Verwendung. Dies ist vor allem auf die besonderen Eigenschaften des Laserlichts zurückzuführen [3]:

- Monochromatisch: Das Licht besitzt nur eine Wellenlänge.
- Kohärent: Alle Photonen des Laserstrahls haben dieselbe Phase.
- Polarisiert: Das Licht hat eine gerichtete Polarisation.
- Räumlich gerichtet: Der Laserstrahl breitet sich in eine Richtung mit definiertem Intensitätsprofil aus.

2.1.1 Funktionsprinzip des Lasers

Die Interaktion von Licht und Materie findet quantenmechanisch auf der Ebene einzelner Teilchen statt. In einem Atom kann ein Elektron ein Photon absorbieren oder emittieren. Dabei wird Energie und Impuls übertragen. Durch die Energieerhaltung nach Formel (2.1) kann ein Elektron ein Photon absorbieren oder emittieren, falls die Energie des Photons $h\nu$ genau der Differenz zwischen zwei erlaubten Energieniveaus E_1 und E_2 entspricht [4]. Die Energie des Photons ist das Produkt des planckschen Wirkungsquants h und der Frequenz ν des Lichts.

$$E_2 - E_1 = \pm h\nu \quad (2.1)$$

Wie auf Abbildung 2.1 links zu sehen ist, können bei einem Zweiniveau-System drei elementare Prozesse eintreten. Bei der Absorption wird ein Photon absorbiert und das Elektron geht aus dem Zustand tieferer Energie in den Zustand höherer Energie über. Bei der spontanen Emission geht das Elektron spontan von einem höheren Zustand in einen tieferen und emittiert dabei ein Photon. Bei der stimulierten Emission ist das Elektron im Zustand höherer Energie, absorbiert ein Photon und emittiert gleichzeitig zwei Photonen mit identischen Eigenschaften. Dabei geht das Elektron in den tieferen Energiezustand über.

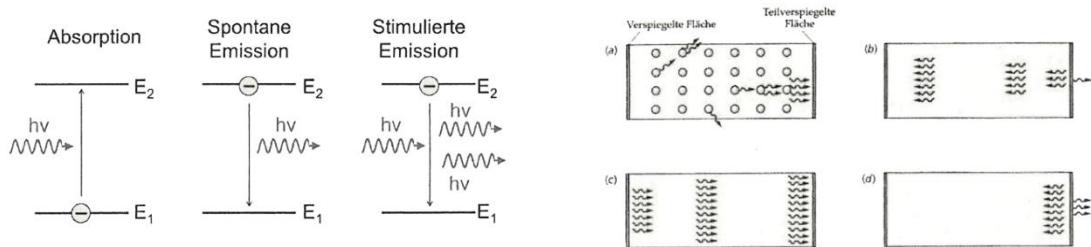


Abbildung 2.1: Grundlegende Funktionsweise eines Lasers [3]

Bei einem Laser findet die stimulierten Emission innerhalb des laseraktiven Mediums statt. Dieses besitzt mehrere geeignete Energieniveaus, zwischen denen die Elektronen wechseln können. Für einen funktionierenden Laser sind mindestens drei Energieniveaus nötig. Nur dann kann eine Inversion stattfinden bei der sich mehr als die Hälfte der Elektronen in höheren Energieniveaus über dem Grundzustand befinden. Aufgrund der spontanen Emission ist bei einem aktiven Medium mit nur zwei Energieniveaus der angeregte höhere Zustand nicht dauerhaft haltbar. Mit einer Pumpquelle werden Elektronen aus dem Grundniveau in höhere Energieniveaus versetzt. Das Pumpen kann durch Gasentladung, durch Photonen von Lichtquellen wie Blitzlampen oder Diodenlaser erfolgen. Wobei Diodenlaser direkt durch Gleichstrom gepumpt werden. Das laseraktive Medium befindet sich im Resonator, der im einfachsten Fall aus einem Vollspiegel und einem Teilspiegel besteht. Das Licht wird dabei kontinuierlich zwischen den beiden Spiegeln reflektiert und löst bei jedem Durchlauf durch das aktive Medium stimulierte Emissionen aus. Durch den Teilspiegel wird jeweils ein kleiner Teil des Lichtes ausgekoppelt. Dieses bildet den eigentlichen Strahl des Lasers. Abbildung 2.1 rechts zeigt wie sich im Resonator durch stimuliertes Emission lawinenartig eine Wellenfront ausbildet und zwischen den Spiegeln hin und her pendelt.

2.1.2 Betriebsarten

Entsprechend der Bauweise und dem Typ kann ein Laser auf unterschiedliche Arten betrieben werden. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen dem dauerstrich Betrieb, der im Englischen mit "continuous wave" (cw) bezeichnet wird, und dem gepulsten Betrieb. Dauerstrichlaser haben oft mehrere Kilowatt an Leistung und werden beispielsweise zum Schneiden oder Schweißen verwendet [5].

Eine Güteschaltung, die im Englischen auch Q-switch genannt wird, kann kurze Laserpulse im Nanosekundenbereich erzeugen. Hier ist der Resonator so gebaut, dass er vorerst die stimulierten Emission unterdrückt. Durch kontinuierliches Pumpen baut sich im aktiven Medium eine hohe Inversion auf. Wird die Unterdrückung aufgehoben, entsteht ein kurzer, intensiver Laserpuls. Kurzpulsgeräte können sowohl mit niedriger Repetitionsrate gepulst oder bei hohen Pulswiederholraten kontinuierlich betrieben werden.

Noch kürzere Pulse werden durch Modenkopplung erreicht. Dabei wird durch Phasenkopplung von longitudinalen Moden entlang des Resonators eine Schwebung erzeugt, die zu sehr kurzen intensiven Laserpulsen führt. Diese Laser werden als Ultrakurzpuls-Laser bezeichnet und erzeugen Pulse von einigen Femtosekunden bis einigen hundert Pikosekunden.

2.1.3 Wechselwirkung von Strahl und Materie

Abbildung 2.2 links zeigt wie verschiedene Intensitäten des Laserstrahls unterschiedlich mit dem Material wechselwirken. Für eine abtragende Bearbeitung ist es notwendig, dass die Intensitäten oberhalb einer bestimmten materialabhängigen Schwelle liegen. Unterhalb dieser Schwelle wird das Material lediglich erwärmt oder aufgeschmolzen und es wird kein Abtrag erreicht. Oberhalb der Schwelle verdampft das Material ganz oder teilweise und wird durch den Druck des expandierenden Gases aus der Wechselwirkungszone befördert [6].

Beim Laser können sich abhängig vom Resonator unterschiedliche longitudinale oder transversale Moden ausbilden. Diese haben einen massgeblichen Einfluss auf das Intensitätsprofil des Strahls und damit auf das Abtragsverhalten bei der Laserbearbeitung. Folgend wird nur der Mode TEM₀₀ betrachtet, der ungefähr eine gaussförmige Intensitätsverteilung besitzt.

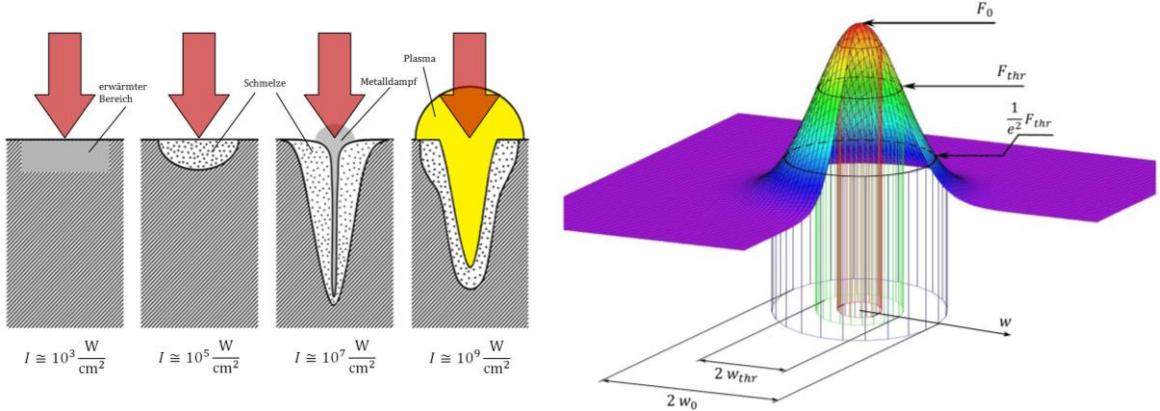


Abbildung 2.2: Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Materie [6]

In der Materialbearbeitung wird häufig der Begriff der Fluenz verwendet. Im Gegensatz zur Intensität, die durch Leistung pro Fläche angegeben wird, gibt die Fluenz die Energie pro Fläche bei konstanter Pulsdauer an. Die Fluenzverteilung kann in Abhängigkeit des Strahlradius w , dem Taillenradius w_0 und der Spitzenfluenz F_0 nach Formel (2.2) angegeben werden [6]. Mithilfe dieser Formel wurde die dreidimensionale Fluenzverteilung in Abbildung 2.2 rechts erstellt, die sich proportional zur Intensitätsverteilung des Laserstrahls verhält.

$$F(w) = F_0 e^{-2\frac{w^2}{w_0^2}} \quad (2.2)$$

Der Taillenradius w_0 gibt an bei welchem Strahlradius w die Spitzenfluenz F_0 auf den Wert $1/e^2$ abgefallen ist. Nach dieser Definition gelangen 86 % der Laserleistung durch den Flächenkreis, der durch den Taillenradius w_0 aufgespannt wird.

Überall dort, wo die Fluenz F grösser als die Schwellfluenz F_{thr} ist, findet ein Materialabtrag statt. Aus Formel (2.2) kann damit direkt auf den Zusammenhang der Schwellfluenz F_{thr} und dem Ablationsradius w_{thr} nach Formel (2.3) geschlossen werden [6].

$$F_{thr} = F_0 e^{-2\frac{w_{thr}^2}{w_0^2}} \quad (2.3)$$

Mit dieser Beziehung kann durch Messen des Ablationsradius w_{thr} die Schwellfluenz F_{thr} experimentell bestimmt werden.

2.2 Technische Keramik

Horst-Dieter Tietz hat ein informatives Werk [10] zum Aufbau, den Eigenschaften und der Herstellung von technischen Keramiken verfasst. Im Gegensatz zu traditionellen Töpferr- und Keramikwaren, die aus Ton geformt werden, basiert die Herstellung technischer Keramiken auf synthetischen Werkstoffen. Dadurch werden reproduzierbare Zusammensetzungen und besonders günstige Materialeigenschaften erreicht. Verglichen mit Metallen oder Hochleistungskunststoffen sind bei technischen Keramiken Korrosionsbeständigkeit, Härte und Verschleissbeständigkeit erhöht, und sie besitzen eine gute Hitzebeständigkeit. Das macht sie zu einem beliebten Werkstoff im Bereich der Maschinen-, Flug-, Automobil-, Elektronik-, Medizin- und Chemieindustrie. Die meist verbreiteten technischen Keramiken sind Aluminiumoxid (Al_2O_3), Zirkonoxid (ZrO_2), Siliziumnitrid (Si_3N_4) und Siliziumkarbid (SiC). Angelehnt an [7], [8] und [9] wurde Tabelle 2.1

erstellt. Diese gibt eine Übersicht verschiedener Anwendungen von technischen Keramiken und welche besonderen Eigenschaften dabei genutzt werden.

Keramiken	Anwendungen	Grund der Anwendung
SiC, Al ₂ O ₃	Verschleissteile, Dichtungen, Lager, Ventile, Düsen	Hohe Härte, Geringe Reibung
Si ₃ N ₄ , Al ₂ O ₃	Schneidwerkzeuge	Hohe Festigkeit und Härte
ZrO ₂ , SiC, Si ₃ N ₄	Wärmekraftmaschinen: Komponenten im Dieselmotor oder in Gasturbinen	Thermische Isolation, Hitzebeständigkeit, Treibstoffreduktion
Al ₂ O ₃ , ZrO ₂	Medizinische Implantate: Hüft, Schulter, Knie, Dental	Biokompatibel, Korrosionsbeständig, Verwachsung mit dem Gewebe

Tabelle 2.1: Anwendungen von technischen Keramiken [7] [8] [9]

Diese Eigenschaften sind aus der starken chemischen Bindung der Keramikwerkstoffe zu deuten. Es liegt bei den Oxidkeramiken eine überwiegende Ionenbindung vor, bei den Nichtoxidkeramiken herrscht die Atombindung vor. Beide Bindungskräfte sind stark, so dass daraus eine hohe Festigkeit, ein hoher Elastizitätsmodul und ein kleiner thermischer Ausdehnungskoeffizient resultieren. Diese durch den ungestörten Gitteraufbau charakterisierenden Eigenschaften werden durch Herstellungsbedingungen wie Porosität und Sinterzusätze beträchtlich beeinflusst.

Ein besonderes Problem bei Keramikwerkstoffen ist die grosse Sprödigkeit, welche durch die Bruchzähigkeit charakterisiert wird. Ursache der hohen Sprödigkeit ist die fehlende Makroplastizität bei der Keramik, so dass Spannungsspitzen an äusseren und inneren Kerben sowie Fehler nicht abgebaut werden. Die Spannungskonzentration am Fehlerrand, vor allem bei Rissen oder Bearbeitungsriefen, führt zum Aufreissen des Gitters und damit zur Vergrößerung des Risses. Dieses Verhalten ist schon bei kleinen Fehlerabmessungen um 0.1 mm zu beobachten. Deshalb müssen die Herstellungsverfahren einen hohen technischen Stand haben, damit derartige Fehler vermieden werden. Aus diesem Grund hat die Herstellungstechnologie einschliesslich der verwendeten Ausgangspulver High-tech-Niveau. Da ein offener Fehler auf Zugspannungen wesentlich empfindlicher reagiert als auf Druckspannungen, ist die Druckfestigkeit bis um den Faktor 10 grösser als die Zugfestigkeit. Deshalb wird auch die Festigkeit meist im Biegeversuch ermittelt, weil hier Zug- und Druckspannungen auftreten. Reine Zugspannungen sind in Konstruktionen aus Keramikwerkstoffen zu vermeiden.

2.2.1 Herstellung von Keramiken

Die Eigenschaften der gefertigten Keramiken, insbesondere das mechanische Verhalten, hängt stark vom Herstellungsprozess ab. Die einzelnen Teilschritte die bei der Herstellung durchlaufen werden sind in Abbildung 2.3 dargestellt und werden durch [10] und [11] detailliert beschrieben.

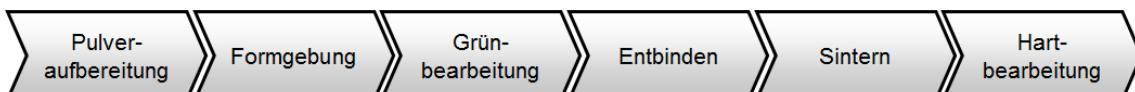


Abbildung 2.3: Fertigungskette bei der Herstellung von Keramiken

Pulveraufbereitung

Der erste Schritt in der Teilefertigung ist die Pulveraufbereitung. Um eine konstante und genau definierte chemische Zusammensetzung zu erreichen werden technische Keramiken synthetisch hergestellt. Die Pulver müssen so aufbereitet sein, dass die notwendige Kornfeinheit, Korngleichmässigkeit und Kornform erreicht wird und eine möglichst gute Vorverdichtung des

Pulvers möglich ist. Für technische Keramiken werden besonders feine Pulver mit Korndurchmessern bis unter 2 µm verwendet. Diese werden in einem Mahlprozess aufbereitet und aktiviert. Beim Mahlen ist darauf zu achten, dass kein Abrieb der Mahlkörper in das Pulver gelangt, da dieser die Festigkeit der Keramik negativ beeinflusst. Je nach Formgebungsverfahren werden dem Pulver entsprechende Additive zugesetzt. Findet die Formgebung im flüssigen Zustand statt, werden Hilfsmittel wie beispielsweise Carbonsäureester zugesetzt, um das Fliessverhalten der herzustellenden Schlicker zu optimieren. Erfolgt die Formgebung durch Pressen im Trockenen wird ein Binder zugegeben. Dieser verklebt die Einzelkörner an deren Grenzflächen miteinander.

Formgebung

Bei der Formgebung wird das Pulver verdichtet und in die gewünschte Geometrie gebracht. Das Resultat ist ein sogenannter Grünkörper. Dieser besitzt nur eine geringe Festigkeit, da seine verdichteten Keramikpartikel nur schwach durch den Binder verbunden sind. Um dem Schrumpfen beim Sintern entgegenzuwirken hat der Grünkörper 15 % bis 30 % Übermass. Einige Möglichkeiten zur Formgebung sind in Abbildung 2.4 dargestellt.

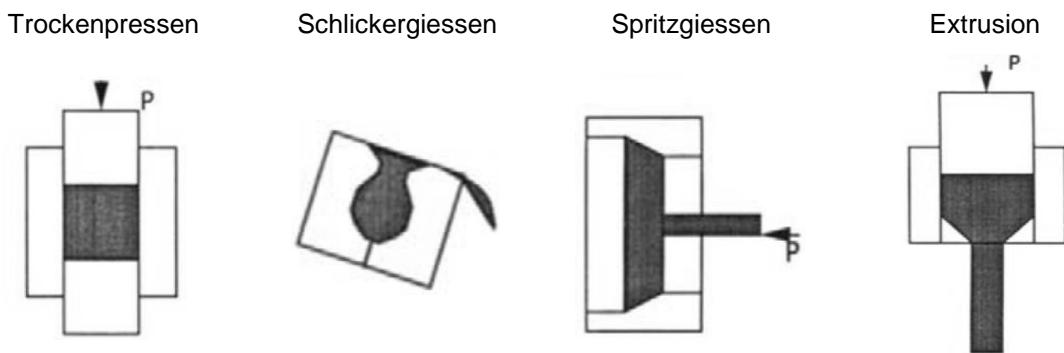


Abbildung 2.4: Methoden der Formgebung von Keramikobjekten [11]

Beim Trockenpressen erfolgt die Verdichtung des Pulvers unter Druck in Pressformen. Die Pressung kann einachsig oder mehrachsig erfolgen. Danach wird der Grünkörper aus der Pressform gelöst und entnommen. Aufgrund der inneren Reibung des Pulvers beim Pressen ist darauf zu achten, dass die Verdichtung über den Querschnitt und vor allem über die Länge des Presslings gleichmäßig bleibt.

Beim Schlickergießen wird eine poröse Form, meistens aus Gips, mit flüssigem Schlicker gefüllt. Dieser enthält typischerweise weniger als 5 % Festkörper. Durch die Poren kann das Wasser aus der Form entweichen und die Keramikpartikel lagern sich an der Wand der Form ab. Durch Trocknung schrumpft und löst sich der Grünkörper von der Form.

Das Spritzgießen bietet sich für hohe Stückzahlen an. Hier wird eine flüssigfeste Keramikpaste in eine mehrteilige Spritzgussform gepresst. Danach wird die Form geöffnet und der Grünkörper entfernt. Um das Pressen durch die Düse zu verbessern liegt der Anteil an organischen Hilfsstoffen bei 40 % bis 50 %. Diese sind nach der Formgebung wieder auszubrennen.

Bei der Extrusion wird die keramische Paste durch eine Austrittsdüse gedrückt und dadurch ein kontinuierlicher Strang mit entsprechendem Querschnitt erzeugt. Mit einem Draht oder Messer wird der Strang in periodischen Abständen in einzelne Teilstücke unterteilt.

Grünbearbeitung

Bei der Grünbearbeitung werden am Grünkörper jene Änderungen vorgenommen, die durch die Formgebung schwierig zu realisieren sind. Das können tiefe Löcher, Hinterschneidungen oder feine Strukturen sein. Fertigungsverfahren wie Fräsen, Bohren und Drehen nutzen den weichen Werkstoffzustand und erreichen hohe Spanvolumen. Der hohe Verschleiss durch die Keramikpartikel muss bei der Wahl der Schneidwerkzeuge berücksichtigt werden.

Dass die Grünbearbeitung auch mit dem Laser möglich ist, haben Forscher an der Tsinghua Universität in Beijing gezeigt [12]. Dabei wurde durch Laserbearbeitung der organische Binder zersetzt und mit Stickstoffgas die überschüssige Hitze und das Pulver ausgeblasen.

Entbinden

Die Binder und Additive, die benutzt wurden um den Grünkörper zu fertigen und zu festigen, müssen ausgebrannt werden. Diese können die Qualität der Keramik reduzieren und einen negativen Einfluss auf das Sintern haben. Das Ausbrennen erfolgt bei Temperaturen zwischen 300 °C und 700 °C und kann mehrere Stunden dauern.

Sintern

Beim Sintern wird der Grünkörper auf sehr hohe Temperaturen erhitzt, die nahezu an den Schmelzpunkt der Keramiken reichen. Dadurch verschmelzen die einzelnen Keramikpartikel und das poröse Netzwerk zwischen den Partikeln bricht in einzelne Poren auf. Die Verringerung der Porosität führt zur Schrumpfung und einer Erhöhung der Dichte. Mit abnehmender Porosität findet eine Gefügevergrößerung durch Kornwachstum statt.

Hartbearbeitung

Nach dem Sintern hat das Keramik an Härte gewonnen. Es besteht aus zufällig angeordneten polykristallinen Körnern. Weil durch das Sintern kleine Verformungen auftreten muss das Keramik durch Hartbearbeitung auf die gewünschten Masse und entsprechende Oberflächenqualität gebracht werden.

Diese mechanische Bearbeitung erfolgt zum grossen Teil mit geometrisch unbestimmter Schneide durch die Feinbearbeitungsverfahren Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Neben diesen Verfahren bietet die Bohr- und Fräsbearbeitung durch laserbearbeitete Werkzeuge aus polykristallinem Diamant eine attraktive Alternative, wie Arbeiten von Warhanek zeigen [13] [14]. In Kapitel 2.6.2 wird diese Thematik näher erläutert.

2.2.2 Keramikbearbeitung durch Schleifen

Nicolas Jochum beschäftigte sich in seiner Dissertation mit der Schleifbearbeitung von Zirkonoxid [15]. In dieser Arbeit wurde durch Koordinatenschleifen eine vereinfachte dreiteilige Zahnbrücke hergestellt. Diese ist in Abbildung 2.5 links dargestellt. Ausgangsmaterial war Aluminiumoxid verstärktes Zirkonoxid, das durch Yttriumoxid verstärkt wurde (TZP-A). Detaillierte Materialkennwerte sind der Abbildung A.6 im Anhang zu entnehmen. Die Bearbeitung erfolgte mittels Diamantwerkzeugen mit Hybridbindung und Durchmessern von 1 mm bis 6 mm. Diese sind in Abbildung 2.5 rechts zu sehen.



Abbildung 2.5: Zahnbrücke aus Zirkonoxid und diamantbestückte Schleifstifte [15]

Materialuntersuchungen haben gezeigt, dass der Materialabtrag 91 % bis 98 % duktil erfolgte. Dadurch wurden Schädigungen wie Risse oder Ausbrüche reduziert. Diese würden die Festigkeit

der Keramik stark beeinträchtigen und treten vor allem bei sprödem Materialabtrag auf. Zudem wurde bestätigt, dass hohe Schnittgeschwindigkeiten und reduzierte Zustellung zu geringeren Spanungsdicken führen, was das duktile Abtragsverhalten begünstigt. Ein positiver Einfluss hatte die Verwendung von ausreichend Kühlsmiermittel. Dadurch wurde der Wärmeeintrag in Werkstück und Werkzeug und damit die Schädigung an der Werkstückoberfläche respektive auf das Verschleissverhalten der Diamantkörner reduziert.

Durch Röntgenbeugungsanalysen wurde gezeigt, dass das unbearbeitete Material nur in der tetragonalen Phase vorliegt. Nach der Bearbeitung konnte durch die prozessbedingte Phasenumwandlung auf der Oberfläche ein monokliner Phasenanteil von 1.9 % bis 3.9 % nachgewiesen werden.

2.2.3 Zirkonoxid

Zur Herstellung von Zirkonoxid werden die Rohstoffe Baddeleyit auf Basis von ZrO_2 oder Zirkon auf der Basis Zirkonsilikat ZrSiO_4 verwendet. Durch Auflösung von Baddeleyit oder Zirkon bei Reaktion mit Natriumhydroxid wird reines Zirkonoxid gewonnen.

Abhängig von der Temperatur liegt reines Zirkonoxid in den Phasen monoklin, tetragonal oder kubisch vor. Unterhalb der Schmelztemperatur von 2680°C ist es in der kubischen Phase. Bei 2370°C findet eine Phasenumwandlung von kubisch zu tetragonal statt. Durch Abkühlung aus der tetragonalen Phase findet zwischen 1050°C und 680°C eine diffusionslose Umwandlung zur monoklinen Phase statt, wobei eine Volumenvergrößerung von 3 % bis 5 % auftritt. Durch diese Volumenzunahme kommt es zur Rissbildung, sodass grössere Bauteile aus Zirkonoxid nicht realisierbar sind. In Abbildung 2.6 sind die Übergangstemperaturen, Gitterstrukturen und Dichten der verschiedenen Phasen zu erkennen.

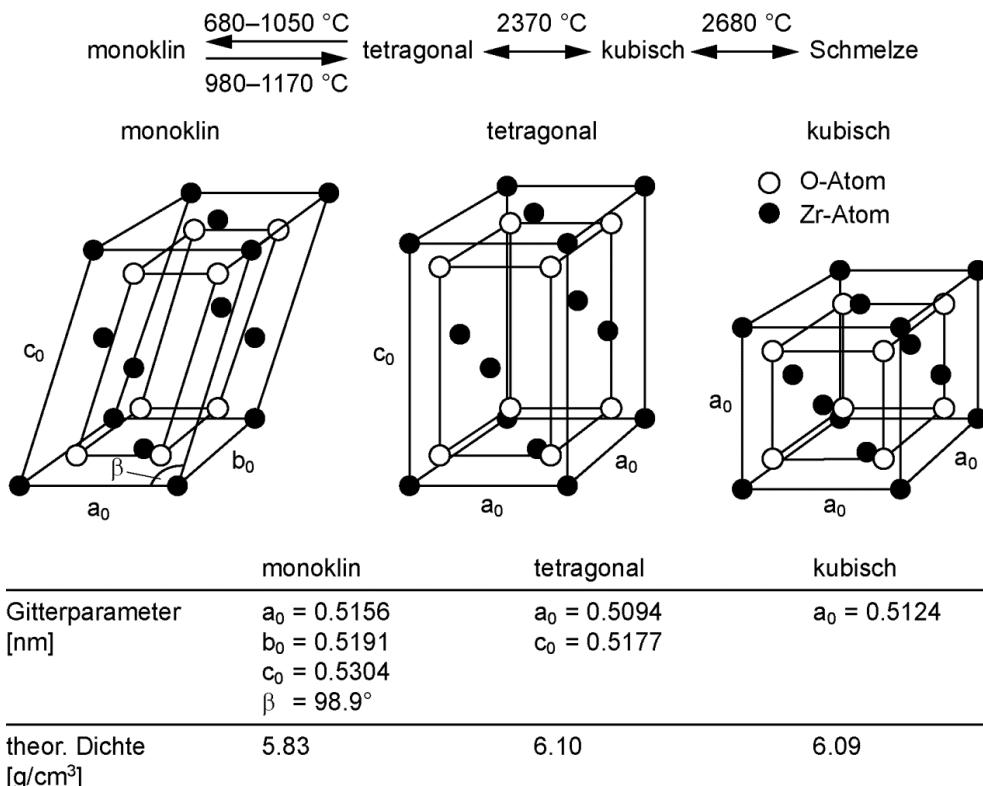


Abbildung 2.6: Verschiedene Phasen von Zirkonoxid [16]

Um das Zirkonoxid zu stabilisieren gibt man Oxide wie MgO , CaO oder Y_2O_3 hinzu. Dadurch bleibt die kubische Phase beim Abkühlen erhalten. Dieser Zustand wird auch Cubic Stabilized

Zirconia kurz CSZ genannt. Werden nicht genügend Oxidzusätze verwendet erfolgt nur eine Teilstabilisierung zum sogenannten Partially Stabilized Zirconia kurz PSZ. Dabei wird bei der Abkühlung die Phasenumwandlung von tetragonal zu monoklin durchlaufen und die resultierende Volumenvergrößerung muss durch das Material aufgenommen werden. Falls die Materialausdehnung durch Druck verhindert wird, findet keine Phasenumwandlung statt und die tetragonale Phase verbleibt in einem metastabilen Zustand. In diesem Fall spricht man von Tetragonal Zirconia Polycrystals kurz TZP.

2.2.4 Aluminiumverstärktes Zirkonoxid

Wird dem ZrO_2 zusätzlich Al_2O_3 beigemischt, nennt man das Mischoxid Aluminiumoxid verstärktes Zirkonoxid. Im Englischen wird es Alumina Toughened Zirconia oder kurz ATZ genannt. Dieses Material ist attraktiv für Biomedizinische Implantate und andere technische Anwendungen, die hohe Festigkeiten und Verschleissbeständigkeit benötigen.

Am Institut für Fertigungstechnologie keramischer Bauteile in Stuttgart wurde das Materialverhalten von Zirkonoxid mit 2.5 vol% Yttriumoxid untersucht [17]. Es wurde festgestellt, dass durch Zugabe von 20 vol% bis 40 vol% Aluminiumoxid die metastabile tetragonale Struktur weiter stabilisiert und die Zuverlässigkeit und Härte erhöht wird. Weil das Aluminiumoxid auf das tetragonale Zirkonoxid Druckkräfte ausübt wird eine volumenvergrößernde Phasenumwandlung zu monoklin unterdrückt.

Abbildung 2.7 zeigt das thermisch geätzte Gefügebild von Yttriumoxid stabilisiertem Zirkonoxid mit 20 vol% und 40 vol% Aluminiumoxid. Alle drei wurden eine Stunde lang bei 1400 °C und 50 MPa gesintert. Sowohl das Zirkonoxid als auch das dunklere Aluminiumoxid hat eine Korngrösse von ungefähr 500 nm.

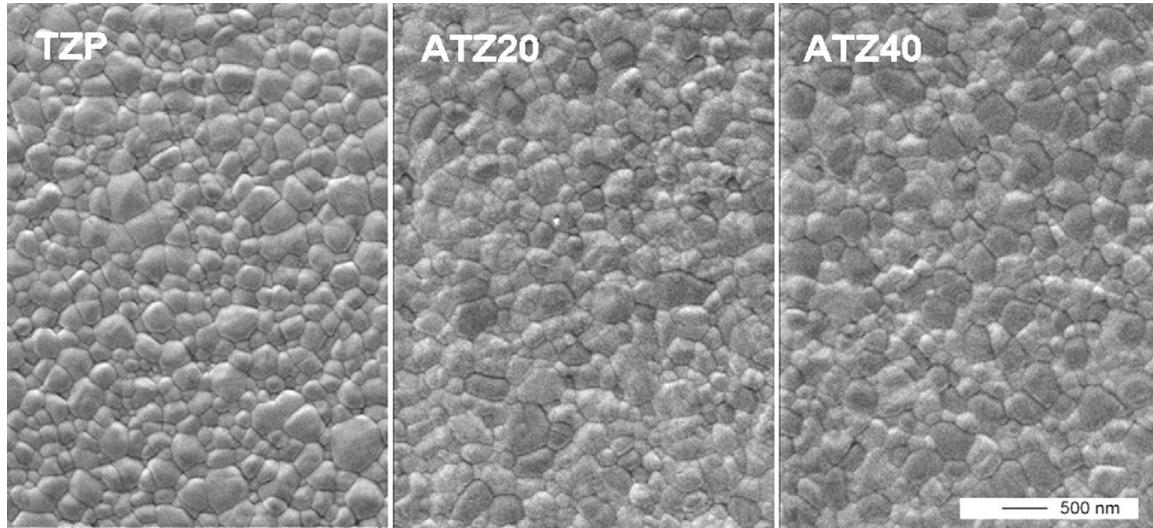


Abbildung 2.7: Yttriumoxid stabilisiertes Zirkonoxid mit 20 vol% und 40 vol% Aluminiumoxid [17]

2.2.5 Oberflächenbehandlung von Zirkonoxid

Um den Einfluss des Sandstrahlens und anderer Oberflächenbehandlungen auf die Biegefestigkeit von Zirkonoxid zu beurteilen haben Jenni Hjerpe et al. eine Studie durchgeführt [18]. Ausgangsmaterial war Y-TZP mit 97 mol% ZrO_2 und 3 mol% Y_2O_3 . Die Behandlung der Proben erfolgte durch Sandstrahlen mit 50 µm Aluminiumpartikeln, 30 µm Rocatec soft Partikeln sowie 105 µm Rocatec Partikeln, Trockenschleifen mit Mikromotor, Umfangsschleifen mit Wasserkühlung, Schleifen mit Siliziumkarbidschleifpapier, Polieren mit Diamantpaste und

Dampfreinigen. Rocatec ist dabei eine Produktbezeichnung für einen Strahlsand aus Aluminiumoxidpartikeln [19]. Die Biegefestigkeit wurde durch einen 3-Punkt-Biegeversuch von jeweils acht Stäben mit 2 mm Dicke, 2 mm Höhe und 25 mm Länge bei Raumtemperatur gemessen. Zusätzlich erfolgten jeweils acht Biegeversuche durch einen biaxialen Biegetest von jeweils acht Scheiben mit 19 mm Durchmesser und 1.6 mm Dicke. Dabei wurden die runden Proben symmetrisch auf drei Kugeln platziert und durch mittige Krafteinwirkung auf der Oberseite bis zum Bruch beansprucht. Die gemessenen Werte sind in Abbildung 2.8 dargestellt.

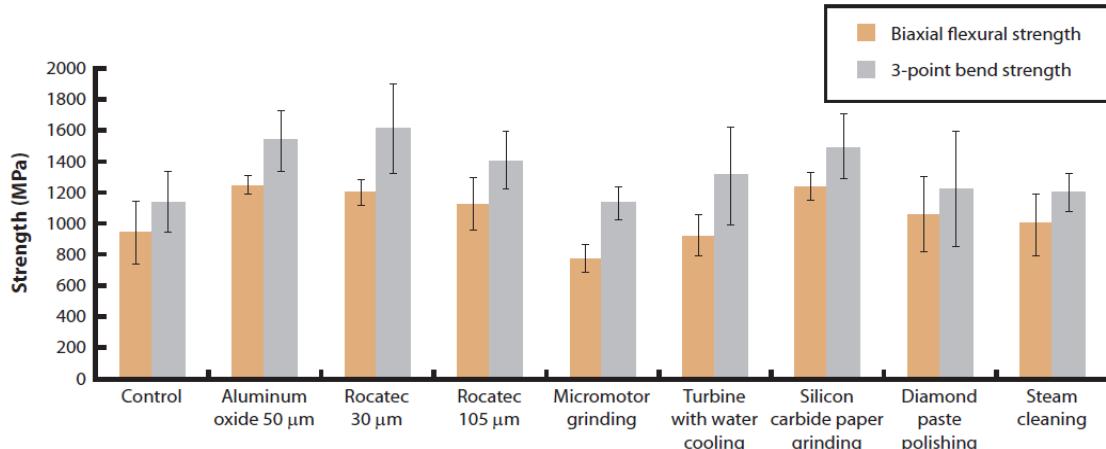


Abbildung 2.8: Biegefestigkeit in Abhängigkeit der Oberflächenbehandlung [18]

Der 3-Punkt Biegetest ergab 20 % bis 30 % höhere Biegefestigkeitswerte verglichen mit dem biaxialen Test. Trotzdem ist zwischen den Tests eine starke Korrelation erkennbar. Durch das Sandstrahlen und Schleifen mit Schleifpapier konnte die Biegefestigkeit erhöht werden.

Untersuchungen in weiteren Arbeiten [20] [21] haben ergeben, dass vor allem durch Sandstrahlen aber auch durch Schleifbearbeitung von Y-TZP eine Phasenumwandlung von tetragonal zu monoklin stattfindet. Durch die lokale mechanische Belastung auf der Oberfläche findet diese Umwandlung nur in der Randschicht des Zirkonoxids statt. Weil monokline Körner mehr Volumen einnehmen, resultieren Druckspannungen. Diese könnten beim Biegetest den Zugkräften entgegen wirken und somit die Rissbildung verzögern.

2.2.6 Laserbearbeitung von Zirkonoxid

Aufgrund der anspruchsvollen Hartbearbeitung von Keramik haben sich Xin Wang et al. mit der alternativen Laserbearbeitung von tetragonal polykristallinem Zirkonoxid, das durch Yttriumoxid stabilisiert wurde (Y-TZP) auseinandergesetzt [22]. In seinen Versuchen verwendeter er einen Nanosekundenlaser und kombinierte verschiedene Parameter wie Laserleistung und Pulsfrequenz um eine optimale Materialabtragsrate von bis zu $2 \text{ mm}^3/\text{min}$ zu erreichen. Verwendet wurde ein Nd:YAG Laser mit 1064 nm oder 532 nm Wellenlänge, Pulsfrequenzen von 15 kHz bis 100 kHz und Pulsweiten von 60 ns. Es wurde festgestellt, dass erst ab einer Schwellintensität von 150 MW/cm^2 ein geeigneter Materialabtrag möglich ist und dass der Pulsüberlapp in Abhängigkeit von Scangeschwindigkeit, Spotgrösse und Pulsfrequenz einen grossen Einfluss auf die Effizienz des Abtragprozesses hat. Aufgrund des hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von $10^{-5}/^\circ\text{C}$ besteht bei Y-TZP die Gefahr der Rissbildung bei grossen Temperaturgradienten. Auf Abbildung 2.9 links ist die erstarnte Schmelze einer Laserbahn zu erkennen. Diese ist von Rissen durchzogen und weist Schmelzspritzer auf. Abbildung 2.9 rechts zeigt eine durch Laserabtrag gefertigte Geometrie aus Y-TZP.

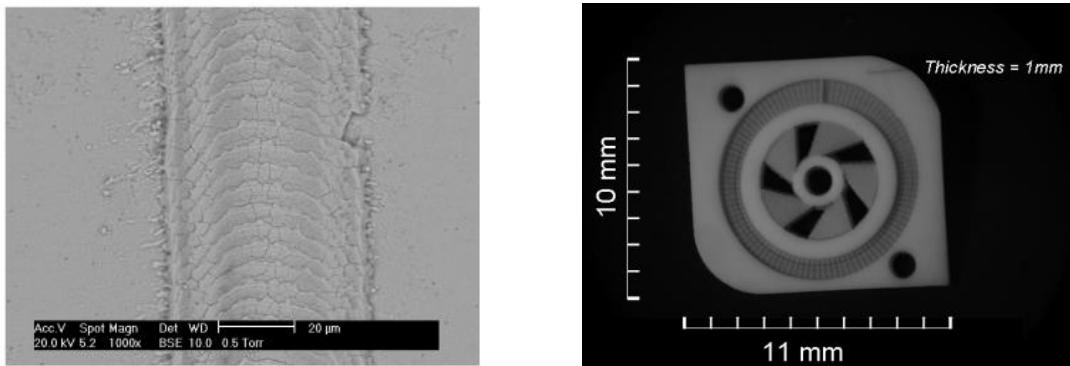


Abbildung 2.9: Laserbearbeitung von Yttriumoxid stabilisiertem Zirkonoxid [22]

2.3 Zahnimplantate

Zahnimplantate ermöglichen es fehlende Zähne zu ersetzen. Das Implantat selbst wird dabei in den Kieferknochen eingesetzt und bildet die künstliche Wurzel des neuen Zahns. Nach einer erfolgreichen Verwachsung des Implantats mit dem Knochen kann die Zahnlkrone aufgesetzt werden. Neben Titan oder Titanlegierungen finden auch Implantate aus Keramiken wie Zirkonoxid oder Aluminiumoxid Anwendung [23].

2.3.1 Anwendung von Zahnimplantaten

Eine Anwenderanleitung der Firma Dentalpoint gibt einen guten Überblick wie Zahnimplantate beim chirurgischen Eingriff eingesetzt werden [24]. Beim Setzten richtet sich die Länge und der Durchmesser des Implantats nach den Röntgenbildern. Grundsätzlich wird immer der grösstmögliche Durchmesser gewählt. Die Wandstärke im Knochen muss mindestens 1 mm betragen, damit eine gute Durchblutung gewährleistet ist.

Abbildung 2.10 zeigt welche Werkzeuge von links nach rechts für den chirurgischen Eingriff verwendet werden um ein Implantat mit 4.1 mm Durchmesser und 11.8 mm Länge zu setzen.

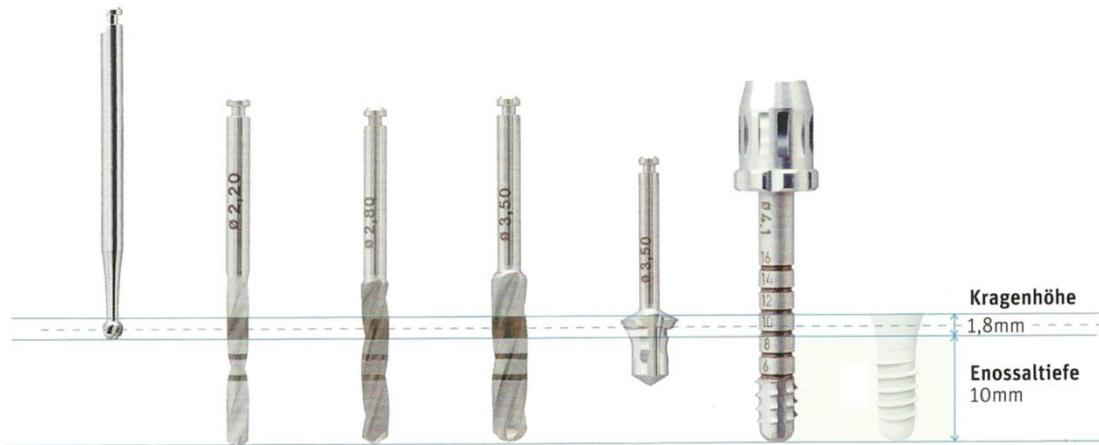


Abbildung 2.10: Werkzeuge für die Implantation [24]

Zuerst wird mithilfe eines Kugelfräisers der Kieferknochen freigelegt. Danach wird das Führungsloch gebohrt und mit zwei weiteren Bohrern mit erhöhtem Durchmesser ausgeweitet. Durch die Markierungen und eine Tiefenlehre kann fortlaufend überprüft werden, ob die Enossaltiefe der Bohrung im Knochen erreicht ist. Entlang dem oberen Rand wird mit einem

Profilbohrer eine Fase eingebbracht. Anschliessend wird in die Bohrung ein Gewinde geschnitten. Da bei einer Hitzeentwicklung von mehr als 42 °C eine Veränderung der Knochenstruktur und damit negative Einflüsse auf die Verwachsung drohen, muss während der Implantation ständig gekühlt werden.

Abbildung 2.11 zeigt die wichtigsten Schritte beim Einsetzen des Implantats in den Knochen. Es wird empfohlen das Implantat von Hand einzudrehen. Dabei ist darauf zu achten, dass eine Drehgeschwindigkeit von 15 Umdrehungen pro Minute nicht überschritten wird. Das benötigte Eindrehmoment ist abhängig von der Knochenqualität und Implantatlänge und darf nie den maximalen Wert von 35 Ncm überschreiten. Das Implantat wird nicht bis auf Knochenhöhe eingeschraubt, denn die Implantatschulter muss für das Verschrauben des Abutments nach der Einheilphase gut zugänglich sein. Für eine gute Verheilung ist es wichtig, dass das Implantat fest im Knochen sitzt. Nach dem Aufschrauben des Healing-Caps wird das Zahnfleisch vernäht und über dem Implantat verschlossen. Die minimale Einheilzeit beträgt im Unterkiefer drei Monate und im Oberkiefer sechs Monate.



Abbildung 2.11: Implantat einschrauben und verschliessen [24]

Abbildung 2.12 zeigt eine Möglichkeit, wie das Abutment und die Zahnkrone nach erfolgreicher Einheilung aufgebracht werden. Dabei wird die Schraube im Abutment platziert und mithilfe einer Abutmenthalterung, einem Protetikschlüssel und einer Drehmomentschraube mit dem Implantat verschraubt. Danach kann die passend gefertigte Krone auf das Abutment zementiert werden.



Abbildung 2.12: Aufsetzen des Abutments und der Krone [24]

2.3.2 Laserstrukturierung von Zahnimplantaten

Delgado-Ruiz et al. haben für die Oberflächenstrukturierung von Zahnimplantaten aus Zirkonoxid Versuche durchgeführt [25]. Ziel der Strukturierung ist die Verwachsung zwischen Knochen und Implantat zu verbessern, damit eine feste Verbindung entsteht. Ausgangsmaterial der Versuche waren Zahnimplantate der Firma Bredent medical GMBH & Co mit einem Durchmesser von 4 mm und einer Länge von 8 mm. Diese wurden durch Sintern aus tetragonalem Zirkonoxid mit 3 mol% Yttrium hergestellt. Durch einen Schleifprozess wurde das Gewinde und der Kopf des Implantats gefertigt. Eine Aufnahme des Implantats ist in Abbildung 2.13 links zu sehen. Der

Bereich b und c wurde mit Partikeln aus Aluminiumoxid sandgestrahlt. Abbildung 2.13 rechts zeigt eine vergrösserte Aufnahme des Bereichs, der in Abbildung 2.13 links mit b beschriftet ist. Der Übergang zwischen der rauen, sandgestrahlten Oberfläche und der geschliffenen ist klar zu erkennen.

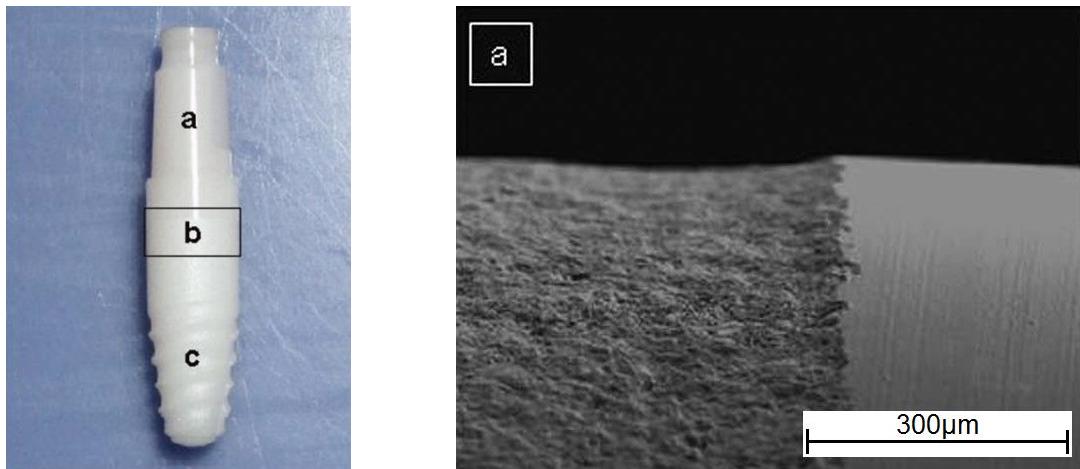


Abbildung 2.13: Zahnimplantat vor der Laserbearbeitung [25]

Die Laserstrukturierung des Implantats erfolgte mit dem Ti:Sapphire Laser Tsunami und dem regenerativen Verstärkungssystem Spitfire der Firma Spectra Physics. Das System produziert Pulse von 120 fs mit einer Wellenlänge von 795 nm. Bei einer Pulsfrequenz von 1 kHz wurde die Strahlleistung so eingestellt, dass die Pulsennergie 1.1 mJ erreicht. Mithilfe von mechanischen X-, Y-, und Z-Achsen sowie einer Drehachse konnte das Implantat relativ zum Fokuspunkt des Lasers bewegt werden. Es wurde darauf geachtet, dass der Laserstrahl immer senkrecht auf die Oberfläche gerichtet war. Im ersten Versuch wurden 3780 Poren mit je einem Durchmesser von 30 μm entlang einer Helix mit 70 μm Steigung in 20 Umdrehungen abgetragen. Im zweiten Versuch wurde entlang derselben Helix eine durchgehende Kerbe mit 30 μm Breite abgetragen. Aufnahmen der entsprechenden Oberflächen sind in Abbildung 2.14 zu sehen.

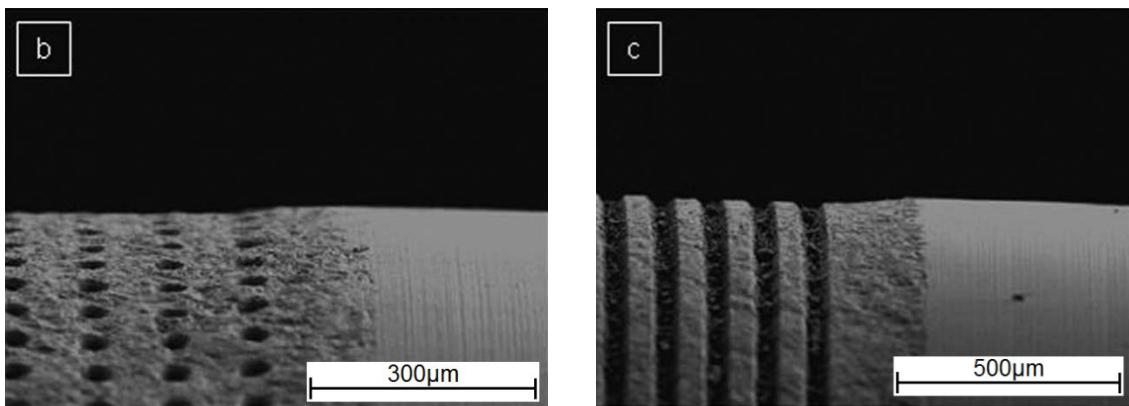


Abbildung 2.14: Oberflächenstrukturierung mit Poren und Kerben [25]

Durch die Laserstrukturierung konnte die Rauheit der Oberfläche bei den Poren um den Faktor 1.2 und bei den Kerben um den Faktor 6 gesteigert werden. Eine energiedispersive Röntgenspektroskopie zur Analyse der Zusammensetzung der Oberfläche hat gezeigt, dass Verunreinigungen auf der Oberfläche durch vorangehende Bearbeitungsschritte, wie Carbon oder Aluminium, durch die Laserbearbeitung abgetragen und somit reduziert wurden. Eine Röntgenbeugungsanalyse hat verdeutlicht, dass durch die Laserbearbeitung keine kritische Phasenumwandlung von tetragonaler zu monokliner Struktur auftritt. Im Gegenteil, der Anteil von monokliner Struktur auf der Oberfläche wurde durch den Laser abgetragen und die darunterliegende tetragonale Struktur freigelegt.

2.3.3 Mikrostrukturierung von Zahnimplantaten

Die Idee der Mikrostrukturierung von Implantaten durch Laserbearbeitung ist im amerikanischen Patent US 2014/0093842 A1 festgehalten [26]. Dabei handelt es sich um kleine Rillen und Furchen, die von der Oberfläche abgetragen werden und eine Tiefe von 2 µm bis 25 µm erreichen. Auf Abbildung 2.15 sind diese auf dem Implantathals, der durch Nummern 20 beschriftet ist, zu erkennen und reichen über die angewinkelte Fläche, die durch Nummer 22 gekennzeichnet ist. Wie Beschriftungsnummer 30 zeigt, ist auch die Kragenfläche des Abutment mit Rillen versehen. Durch die Strukturierung wird die Verheilung und Verwachsung des Knochen und des Zahnfleischs begünstigt. Die Rillen entlang des Umfangs auf dem Implantat weisen Ähnlichkeiten zu den Strukturrillen in der Arbeit von Delgado-Ruiz et al auf [25]. Um den Halt zwischen dem Implantat und dem Abutment zu verbessern, sind zusätzlich radiale Rillen auf der Kontaktfläche, die durch Nummer 25 beschriftet ist, eingebracht.

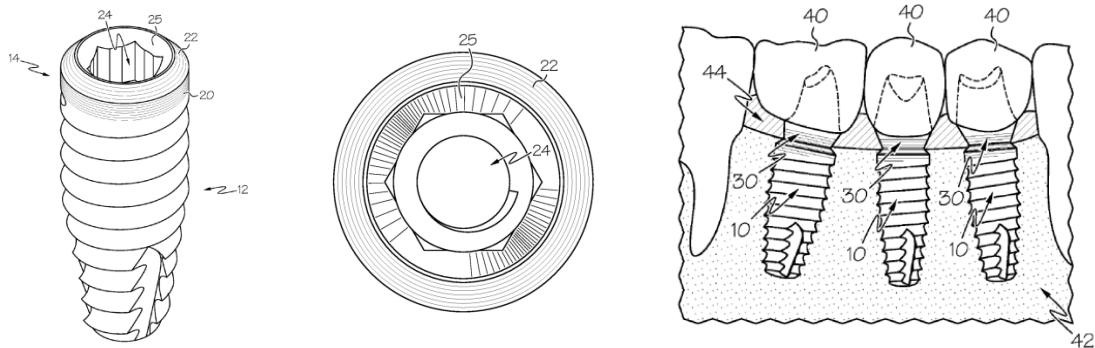


Abbildung 2.15: Laserstrukturierung des Implantats und des Abutments [26]

Eine Besonderheit des Implantates ist das selbstschneidende Gewinde. Dieses besitzt mehrere axiale Schneidkerben und ist in Abbildung 2.15 mit Nummer 10 und 12 beschriftet.

2.4 Raman Spektroskopie

Die Raman Spektroskopie ermöglicht die zerstörungsfreie Materialanalyse. Entsprechend dem Material erhält man ein charakteristisches Raman Spektrum, durch das man Rückschlüsse auf die Zusammensetzung und Molekülstruktur ziehen kann. Xin Wang gibt in [27] einen informativen Überblick zur Raman Spektroskopie und der Möglichkeiten zur Analyse von Zirkonoxid.

2.4.1 Funktionsprinzip

Durch die Bestrahlung der Materialprobe mit monochromatischem Laserlicht werden einzelne Moleküle und Atome in bestimmte Schwingungszustände versetzt. Dadurch können diese wiederum Licht emittieren, das abhängig von drei verschiedenen Mechanismen eine unterschiedliche Wellenlänge besitzt. Alle drei Streuungsmechanismen, die bei der Raman Spektroskopie auftreten, sind in Abbildung 2.16 dargestellt.

Bei der elastischen Rayleigh Streuung absorbiert ein Molekül ein Photon mit der Wellenlänge λ_0 und wird in einen höheren Energiezustand versetzt. Das angeregte Molekül kehrt in den Grundzustand zurück und emittiert Licht derselben Wellenlänge λ_1 . Über 99 % des gestreuten Lichts beruht auf diesem Mechanismus und bringt keine Information für die Materialanalyse.

Bei der innelastischen Stokes Raman Streuung wird ein Photon der Wellenlänge λ_0 absorbiert und hebt das Molekül aus dem Grundzustand auf ein virtuelles Energieniveau. Fällt das Molekül aus dem virtuellen Energieniveau auf einen angeregten Vibrationszustand zurück wird ein geringerer Teil von der angeregten Energie wieder frei. Dadurch hat das emittierte Licht eine grösere

Wellenlänge λ_1 als die absorbierte Wellenlänge λ_0 . Dieser Mechanismus wird bei der Raman Spektroskopie am häufigsten genutzt.

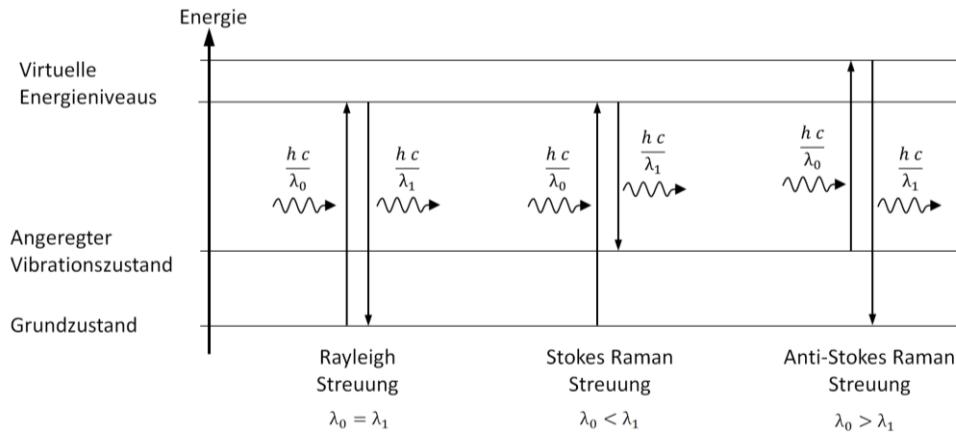


Abbildung 2.16: Streuungsmechanismen der Raman Spektroskopie

Die innelastische Anti-Stokes Raman Streuung wird nur in speziellen Forschungsbereichen benutzt. Ein Photon mit Wellenlänge λ_0 hebt das Molekül aus einem angeregten Vibrationszustand auf ein virtuelles Energieniveau. Fällt es zurück in den tieferen Grundzustand wird mehr Energie frei als durch die Absorption aufgewendet wurde. Deshalb hat das emittierte Licht auch eine kürzere Wellenlänge λ_1 als die absorbierte Wellenlänge λ_0 .

Beim Raman Spektrum wird die Differenz ω aus der eingehenden Wellenzahl des Lasers ω_0 und der Wellenzahl ω_1 des emittierten Lichts gegen die Intensität aufgetragen. Diese lässt sich nach Formel (2.4) berechnen. Die Wellenzahlen berechnen sich aus den Kehrwerten der Wellenlängen.

$$\omega = \omega_0 - \omega_1 = \frac{1}{\lambda_0} - \frac{1}{\lambda_1} \quad (2.4)$$

Dank dieser Umrechnung bleibt das Spektrum auch bei Verwendung einer anderen Laserquelle mit unterschiedlicher Wellenlänge immer gleich.

2.4.2 Aufbau

Ein typischer Aufbau der Raman Spektroskopie ist in Abbildung 2.17 zu sehen.

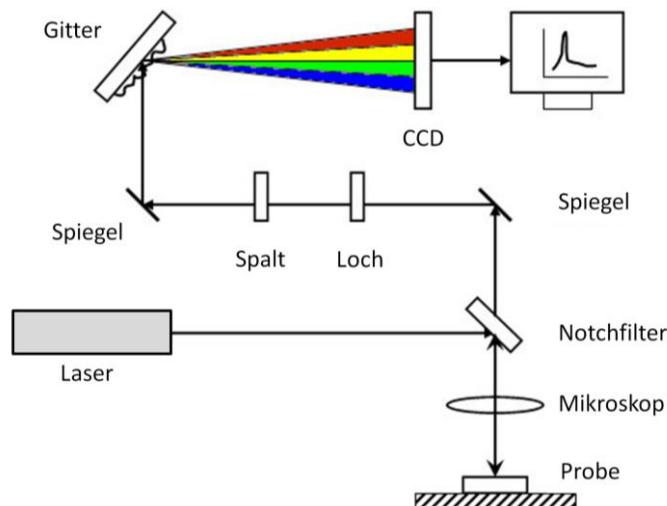


Abbildung 2.17: Aufbau des Raman Spektroskops [27]

Für die Anregung der Raman Streuung wird eine Laserquelle mit geeigneter Wellenlänge und Leistung gewählt. Normalerweise werden dafür Laser im sichtbaren Wellenspektrum wie Argon-, Krypton-, Helium-Neon- oder Diodenlaser verwendet. Mit einem Mikroskop wird das Laserlicht auf die Oberfläche der Probe fokussiert. Da nur ungefähr 0.001 % des inelastisch gestreuten Lichts für die Raman Spektroskopie brauchbar ist, muss dieses mit einem Notchfilter vom überwiegend elastisch gestreuten Licht getrennt werden. Mit einem Loch und einem Spalt wird das Licht so aufbereitet, dass es am Gitter in seine Spektralfarben gestreut werden kann. Diese werden von einem CCD Detektor gemessen und mit der entsprechenden Computersoftware ausgewertet.

2.4.3 Raman Spektroskopie von Zirkonoxid

Durch die Raman Spektroskopie ist die Detektion von Phasentransformationen bei Zirkonoxid möglich. Weil sich die Spektren der monoklinen und tetragonalen Phase stark unterscheiden, eignet sich dieses Verfahren zur Bestimmung des Verhältnisses zwischen diesen Phasen. Die typischen Spektren der monoklinen und tetragonalen Phase sind in Abbildung 2.18 zu sehen.

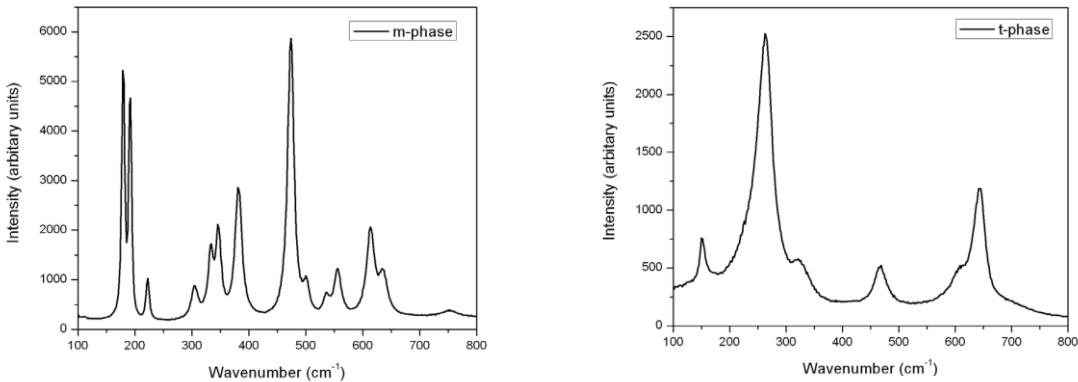


Abbildung 2.18: Monoklines und tetragonales Raman Spektrum von Zirkonoxid [27]

Dem monoklinen und tetragonalen Spektrum können unterschiedliche charakteristische Peaks zugewiesen werden. In einer Arbeit von Michael T. Dorn und Klaus G. Nickel wurden die Wellenzahlen der verschiedenen Peaks aus unterschiedlichen Quellen zusammengetragen [28]. In Tabelle 2.2 sind die Wichtigsten übersichtlich dargestellt. Zudem ist angegeben, wie ausgeprägt der entsprechende Peak im Spektrum ist.

Monoklin ω [cm ⁻¹]		Tetragonal ω [cm ⁻¹]	
102	Schwach	146	Mittel
179	Stark	270	Stark
190	Stark	318	Mittel
222	Schwach	458	Mittel
305	Schwach	602	Mittel
334	Mittel	648	Mittel
348	Mittel		
381	Mittel		
476	Stark		
500	Schwach		
534	Schwach		
556	Schwach		
615	Mittel		
638	Mittel		
748	Schwach		

Tabelle 2.2: Peaks der monoklinen und tetragonalen Phase [28]

2.5 CAM Programme

CAM steht für Computer Aided Manufacturing. Wie der Name andeutet sind es Programme, die einem in der Fertigung unterstützen. Sie berechnen aus der Werkstückgeometrie den NC-Code, der auf der Maschine ausgeführt werden kann.

2.5.1 CAM Programm für kartesische Laserbearbeitung

In der Bachelorarbeit „Entwicklung eines CAM-Systems für 2D und 2.5D Laserbearbeitung“ [29] wurde ein Programm zur Berechnung der Laserbahnen in kartesischen Koordinaten erstellt. Ein Screenshot der Benutzeroberfläche dieses Programms ist in Abbildung 2.19 links zu sehen. Durch einen Slicingprozess werden die Schnittkonturen mit konstanten Abständen der Schichtdicke durch die importierte Geometrie des abzutragenden Volumens berechnet. Aus diesen Konturen werden parallele Laserbahnen mit konstantem Linienabstand hergeleitet. In Abbildung 2.19 links sind diese als blaue Linien zu erkennen. Um einen erhöhten Materialabtrag entlang der Kontur durch die begrenzte Beschleunigung der optischen Achsen beim Abtrag zu vermeiden, können Skywritelinien eingefügt werden. Mit diesen wird die Laserbahn über die Kontur hinaus verlängert. Diese werden mit ausgeschaltetem Laser abgefahrt und geben den optischen Achsen Zeit zum Beschleunigen und Abbremsen. In Abbildung 2.19 links sind diese als rote und grüne Linien zu erkennen. Aus den Laserbahnen wird der NC-Code für die Bearbeitung erstellt.

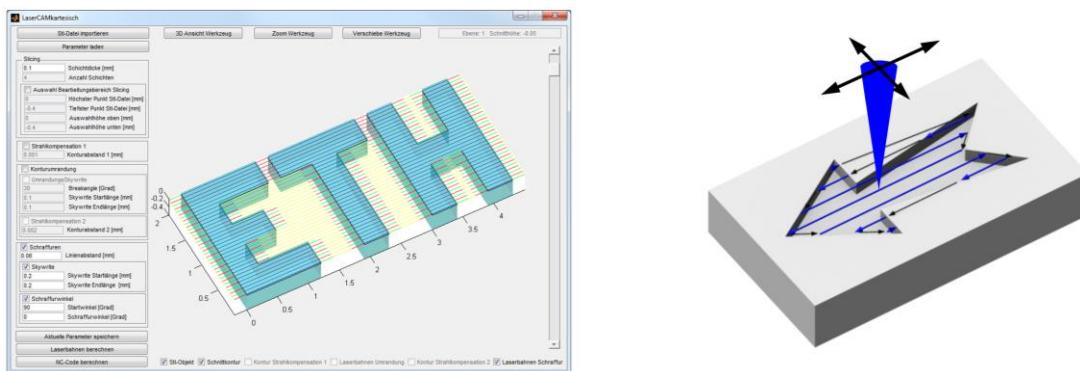


Abbildung 2.19: CAM Programm für kartesische Laserbearbeitung [29]

Bei der Bearbeitung wird der Fokus des Laserstrahls entlang den Bahnen über die Oberfläche des Werkstücks geführt. Durch die hohe Intensität des Lasers wird so das Material Schicht für Schicht abgetragen bis die gewünschte Zielgeometrie erreicht ist. Abbildung 2.19 rechts veranschaulicht wie die Laserbearbeitung für kartesische Werkstücke erfolgt. Für die Bearbeitung sind nur drei Bearbeitungssachsen nötig. Zwei Achsen, die den Strahl entlang der Bahnen in einer Schicht führen und eine Achse um den Fokus zwischen zwei Schichten um eine Schichtdicke nachzustellen.

2.5.2 CAM Programm für zylindrische Laserbearbeitung

In der Semesterarbeit mit dem Titel: „Strategie und CAM-Entwicklung für die zylindrische 2.5D Laserbearbeitung“ [30] wurde das vorangehende CAM Programm erweitert, damit auch zylindrische Werkstücke mit Hilfe einer Drehachse bearbeitet werden können. Um die Berechnungen der Laserbahnen zu vereinfachen wird die Geometrie des abzutragenden Volumens nach dem Importieren abgerollt. Auf der Benutzeroberfläche des zylindrischen CAM Programms in Abbildung 2.20 links ist die importierte Geometrie dunkelblau und die Abgerollte hellblau dargestellt. Mit der abgerollten Geometrie erfolgt wiederum die Berechnung der Schnittkonturen und Laserbahnen aus denen der NC-Code hergeleitet wird.

Abbildung 2.20 rechts zeigt wie die radiale Laserbearbeitung für zylindrische Werkstücke erfolgt. Wie bei der kartesischen Bearbeitung erfolgt der Abtrag in mehreren Schichten, die nacheinander abgetragen werden. Für den Abtrag einer Schicht führt das Werkstück eine volle Umdrehung aus. Synchron dazu wird der Fokus des Laserstrahls in axialer Werkstückrichtung mitgeführt und der Laser im richtigen Moment ein- und ausgeschaltet. Zwischen den abgetragenen Schichten wird der Fokus wiederum mittels einer Zustellachse tiefer gestellt.

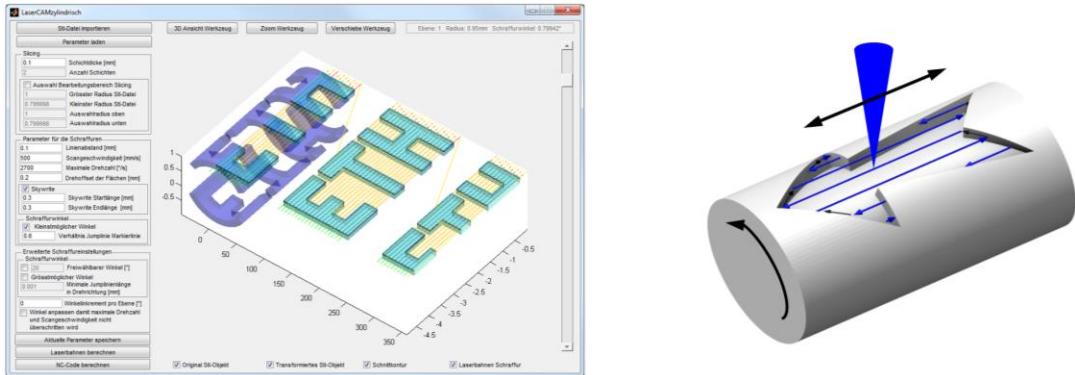


Abbildung 2.20: CAM Programm für zylindrische Laserbearbeitung [30]

Der Laserstrahl trifft bei der radialen Laserbearbeitung senkrecht auf das abzutragende Material. Dadurch sind die einzelnen Lichtimpulse und Bahnen des Lasers direkt auf der Oberfläche zu erkennen. Zudem können sich Defekte und Unebenheiten auf der Oberfläche bei der Bearbeitung fortsetzen. Deshalb resultiert durch die radiale Laserbearbeitung eine beschränkte Oberflächenqualität.

2.5.3 Helitronic Tool Studio

Das Programm Helitronic Tool Studio von Walter Maschinenbau GmbH ermöglicht das Design, die Programmierung und die Simulation der Schleifbearbeitung von rotationssymmetrischen Werkzeugen [31]. Um die Schleifbearbeitung zu simulieren, muss sowohl die Geometrie der Schleifscheibe als auch die Helixbahn, welche die fünfarmige Bewegung der Werkzeuggeometrie gegenüber der Schleifscheibe definiert, bekannt sein. Diese Eingaben erfolgen bei Helitronic Tool Studio durch einen Werkzeug-Wizard. Nach der Auswahl eines Werkzeugtyps wie Fräser, Kugelfräser, Bohrer oder Reibahle können schrittweise die Geometrieparameter zur Fertigung des Werkzeugs angegeben werden. Zur Definition der Helixbahn für die Spannute werden die Abmessungen des Werkzeugs und Parameter wie Steigungswinkel und Schneidenlänge angegeben. Mit diesen Angaben berechnet das Programm durch eine Simulation die resultierende Geometrie des Werkzeugs. Abbildung 2.21 zeigt wie die Parametereingabe über die Benutzeroberfläche erfolgt und wie damit durch eine Simulation die Werkzeuggeometrie hergleitet wird.

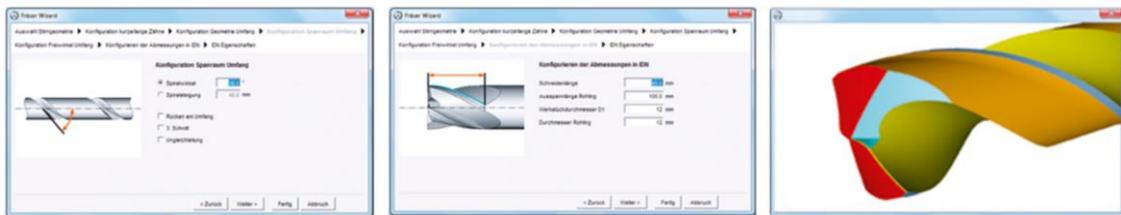


Abbildung 2.21: Helitronic Tool Studio von Walter Maschinenbau GmbH [31]

2.5.4 Simulation tangentialer Laserbearbeitung

Die tangentiale Laserbearbeitung ist mit der Schleifbearbeitung vergleichbar. Bei beiden Verfahren wird mit fünf mechanischen Achsen das Werkstück gegenüber der Schleifscheibe respektive dem Laserstrahl ausgerichtet. Der Vorteil der tangentialen Laserbearbeitung ist, dass man durch gezieltes Umlenken des Laserstrahls mit zwei optischen Achsen jede beliebige Schleifscheibengeometrie durch einen Laserhatch nachahmen kann und dadurch nicht an fixe Schleifgeometrien gebunden ist. Dadurch erreicht man eine erhöhte Flexibilität.

Benjamin Schaub hat in seiner Bachelorarbeit ein Programm geschrieben, mit dem man die tangentiale Laserbearbeitung simulieren kann [32]. In seinem Programm wird die zweidimensionale Hatchgeometrie, die mit dem Laserstrahl abgefahren wird, entlang der Strahlachse in die Länge gezogen und von der Rohlingsgeometrie, die entsprechend um die fünf Achsen gegenüber der Hatchgeometrie ausgerichtet ist, subtrahiert. Die Rohlingsgeometrie ist in Abbildung 2.22 links dunkelblau und die langgezogene Hatchgeometrie gelb eingefärbt. Auf Abbildung 2.22 mittig ist zu erkennen wie durch die Subtraktion ein Stück aus der Rohlingsgeometrie abgezogen wurde. Wird dieser Vorgang mehrmals wiederholt und die Geometrie zwischen den Subtraktionen ein Stück entlang der Helixbahn weiter bewegt, erhält man dadurch die simulierte Geometrie der Werkstückgeometrie mit abgetragener Spannut, wie sie in Abbildung 2.22 rechts zu sehen ist.

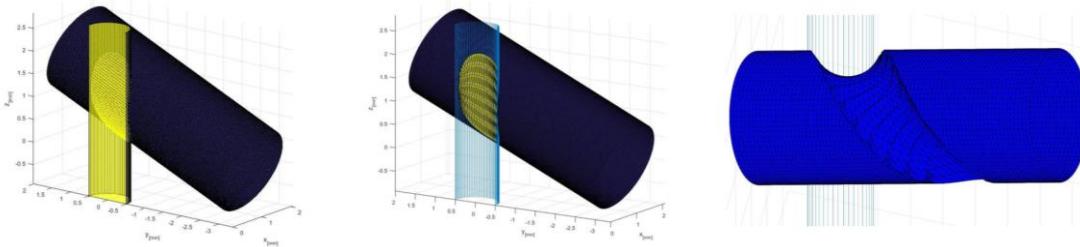


Abbildung 2.22: Simulation der tangentialen Laserbearbeitung [32]

2.6 Radiale und tangentiale Laserbearbeitung

Wie in Abbildung 2.23 dargestellt, unterscheidet man bei der Laserbearbeitung von zylindrischen Werkstücken zwischen radialer, tangentialer und axialer Bearbeitung.

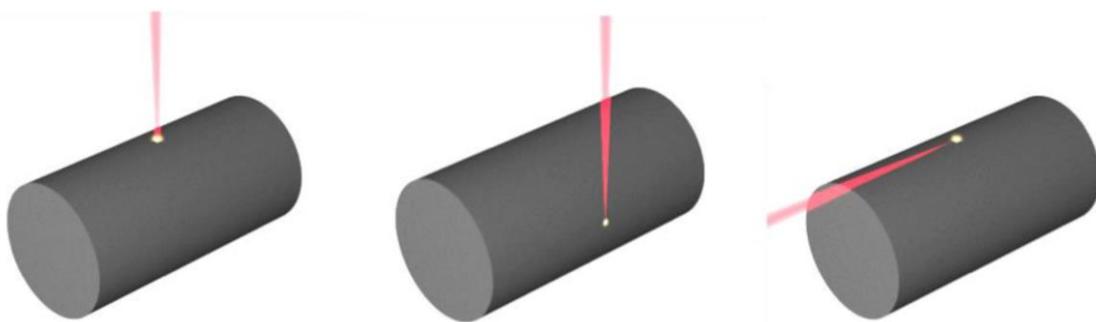


Abbildung 2.23: Radiale, tangentiale und axiale Laserbearbeitung [33]

Bei der radialen Laserbearbeitung trifft der Laserstrahl senkrecht auf das Werkstück. Dadurch erreicht man im Vergleich zur tangentialen Laserbearbeitung bei geringerer Laserleistung einen erhöhten Materialabtrag. Zudem können Taschen und feine Strukturelemente abtragen werden, die durch tangentiale Bearbeitung nicht realisierbar sind. Da die radiale Laserbearbeitung ein abbildendes Verfahren ist, sind die einzelnen Lichtimpulse und Bahnen des Lasers direkt auf dem

Werkstück zu erkennen. Zudem können sich Unebenheiten und Defekte auf der Oberfläche bei der Bearbeitung fortsetzen. Deshalb resultieren im Vergleich zur tangentialem Laserbearbeitung geringere Oberflächenqualitäten.

Die tangentiale Laserbearbeitung ist mit dem klassischen Drehprozess vergleichbar. Durch Quer- und Längsbewegung des Strahls zum drehenden Werkstück wird die gewünschte Kontur erzeugt. Da der Strahl das Werkstück tangential touchiert, wird im Vergleich zur radialen Laserbearbeitung ein erhöhter Teil des Laserstrahls reflektiert. Deshalb resultieren bei erhöhter Laserleistung geringere Abtragsraten. Dafür erreicht man bessere Oberflächen und erhöhte Genauigkeiten, weil überstehende und fehlerhafte Materialanhäufungen automatisch stärker abgetragen werden. Dieser selbstbegrenzende Ablationsprozess ist in einem Artikel von Tokarev et al. beschrieben und wurde von ihm benutzt, um die Ra-Werte auf Diamantoberflächen von 1.5 µm auf 0.03 nm zu reduzieren [34].

Die axiale Laserbearbeitung wird aufgrund der Verdeckung des Strahls durch das Werkstück nicht angewendet.

2.6.1 Anwendungen von radialem Laserbearbeitung

Abbildung 2.24 links zeigt ein Mikroschleifwerkzeug, das von Butler-Smith durch radiale Laserbearbeitung gefertigt wurde [35]. Die Schneiden wurden aus einer zylindrischen Scheibe aus polykristallinem Diamant mit 3 mm Durchmesser und 0.9 mm Dicke durch einen 2.5D Abtragsprozess realisiert. Dazu wurde das Schleifwerkzeug mit einer präzisen Drehachse 36 Mal um 10° gedreht und nach jedem Nachstellen mit einem gepulsten Nd:YAG Laser und zwei optischen Achsen gezielt Material von dem Diamanten abgetragen.

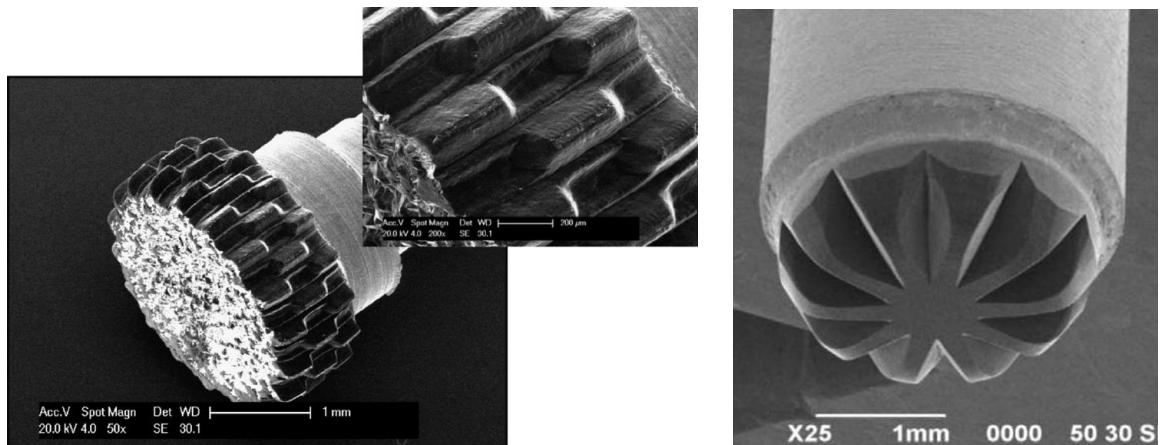


Abbildung 2.24: Durch radiale Laserbearbeitung gefertigte Werkzeuge [35] [36]

Der Mikrofräser in Abbildung 2.24 rechts wurde von Suzuki et al. für die duktile Zerspanung von Keramik entwickelt [36]. Die Spitze des Fräzers besteht aus monoklinem Diamant und wurde durch ein Silberlot auf einem Schaft aus Hartmetall aufgelötet. Die Schneiden auf der Stirnfläche wurden mit einem gepulsten IR YVO₄ Laser durch 2.5D Bearbeitung auf einem Aufbau mit zwei optischen Scannerachsen und drei mechanischen Achsen realisiert.

2.6.2 Anwendungen von tangentialem Laserbearbeitung

Warhanek ist es gelungen, durch tangentiale Laserbearbeitung komplexe Werkzeuggeometrien aus Rohlingen mit Stahlschaft und aufgelötetem polykristallinem Diamant zu fertigen [13] [14]. Abbildung 2.15 zeigt einen Spiralbohrer mit 2 mm Durchmesser und einen Torusfräser mit einem Durchmesser von 1.8 mm und einem Schneideckenradius von 0.1 mm. Die Fertigung der

Geometrieelemente erfolgte schrittweise durch tangentiale Ablationsprozesse auf einer Laser Line von EWAG mit fünf mechanischen und drei optischen Achsen. Durch die Bearbeitung wurde bei der Bohrgeometrie eine glatte, homogene Oberflächenqualität erreicht mit Ra-Werten im Bereich von 150 nm und Rz-Werten unterhalb 1 µm. Diese wurden nach ISO 4288 mit einer Grenzwellenlänge λ_c von 80 µm gemessen. Bei Abtragstudien auf Zirkonoxid erreichte der laserbearbeitete Bohrer im Vergleich zu erodierten oder durch chemische Gasphasenabscheidung beschichteten Bohrern eine erhöhte Standzeit.

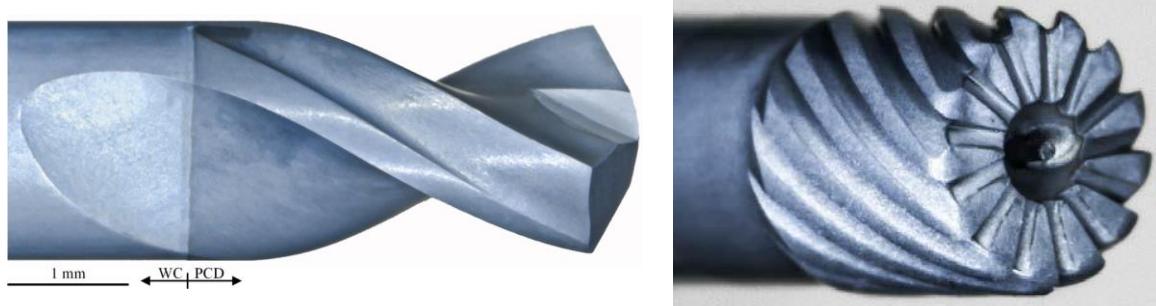


Abbildung 2.25: Durch tangentiale Laserbearbeitung gefertigte Werkzeuge [13] [14]

Wie der Torusfräser zeigt, sind durch die tangentiale Laserbearbeitung auch kleine Geometrieelemente möglich, die durch Schleifprozesse nur schwer zu realisieren sind. Dabei wurden Werkzeugoberflächen mit Ra-Werten kleiner 200 nm und Schneidkantenradien im Bereich von 5.5 µm bis 7.5 µm erreicht ($\lambda_c=0.8 \mu\text{m}$). Durch die duktile Bearbeitung von Zirkonoxid wurden beim Schlüchten glatte Oberflächen mit Ra-Werte kleiner 25 nm und Rz-Werte unter 150 nm erreicht ($\lambda_c=0.25 \mu\text{m}$).

Walter hat sich in seiner Dissertation mit dem Laserschärfen, Laserprofilieren und Laserstrukturieren von Schleifwerkzeugen aus kubischem Bornitrit befasst [37]. Durch das tangentiale Profilieren von verschiedenen Werkzeuggeometrien wurden hohe Genauigkeiten mit Abweichungen unter 3 µm erreicht. Gegenüber konventionellen mechanischen Abrichtprozessen zeigen sich vor allem die geometrischen Möglichkeiten und das Mikrostrukturieren von hochabrasiven Oberflächen als Vorteil.

3

Versuchsaufbau und Messinstrumente

3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau, der in dieser Arbeit verwendet wurde, besitzt drei mechanische Linearachsen, eine Dreh- und Schwenkachse und zwei optisch Achsen. Die Strahlerzeugung erfolgte durch einen Femtosekundenlaser. In Abbildung 3.1 sind die einzelnen Komponenten des Aufbaus übersichtlich dargestellt.

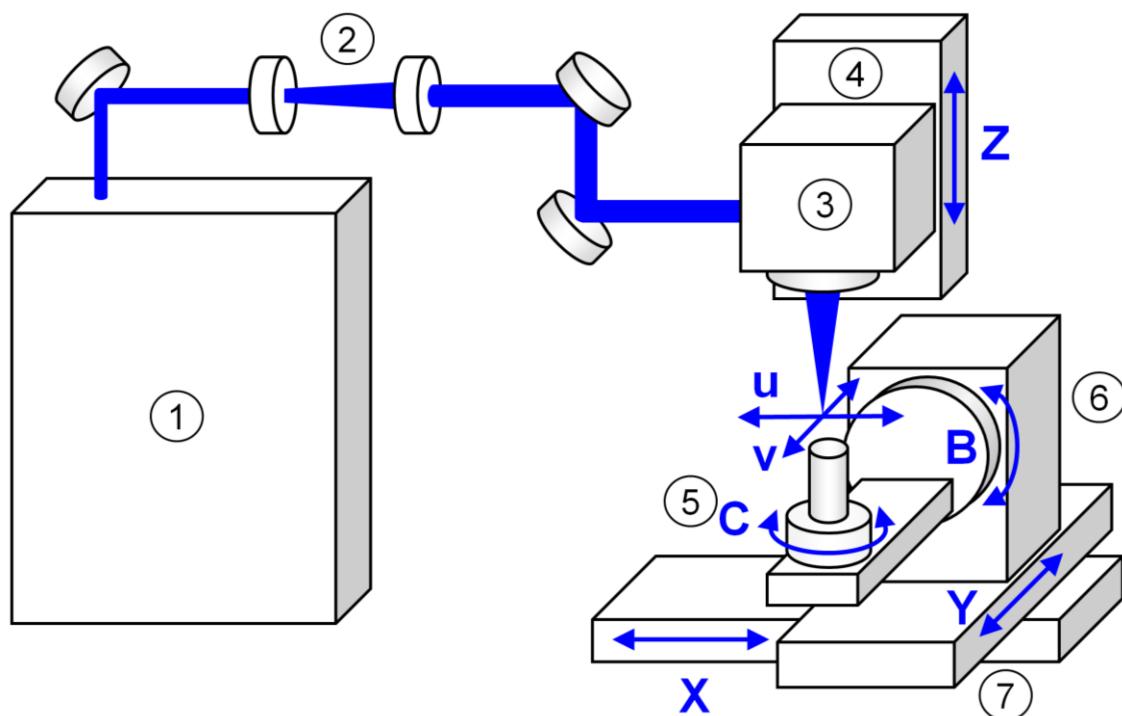


Abbildung 3.1: Darstellung des Versuchsaufbaus mit 1 Laser, 2 Teleskop, 3 Scankopf, 4 mechanische Z-Achse, 5 Drehachse, 6 Schwenkachse und 7 Kreuztisch

Der Femtosekundenlaser Spirit der Firma Spectra-Physics hat eine Pulsdauer von 400 fs und bei einer Wellenlänge von 1040 nm eine maximale durchschnittliche Laserleistung von 16 W. Mit einem eingebauten Second Harmonic Generator kann die Wellenlänge auf 520 nm halbiert werden. Dadurch halbiert sich auch die durchschnittliche Laserleistung auf 8 W. Die Pulsfrequenz liegt bei 200 kHz. Diese kann mit einem Pulspicker durch einen ganzzahligen Teiler geteilt werden. Die durchschnittliche Laserleistung wird dabei auch durch diesen Teiler geteilt und somit reduziert [38]. Vom Laser gelangt das Licht über das Teleskop und mehrere Umlenkspiegel zum Scankopf. Durch die vierfache Vergrösserung des Strahldurchmessers im Teleskop kann dieser mit der Fokusierlinse auf einen kleineren Fokuspunkt reduziert werden. Mit einer Strahlkamera und dem Programm BeamGage wurde der Strahldurchmesser im Fokus mit der D4σ Methode ermittelt. Diese ist in der Norm ISO 11146 definiert. Abbildung 3.2 links zeigt eine Darstellung der Strahlintensität im Fokus ohne das Teleskop im Strahlengang. Der Fokuspunkt beträgt etwa 44 μm. Wie in Abbildung 3.2 rechts zu erkennen ist, wird durch Verwendung des Teleskops und die Strahlaufweitung vor der Fokusierlinse der Strahldurchmesser im Fokus auf etwa 22.6 μm reduziert.

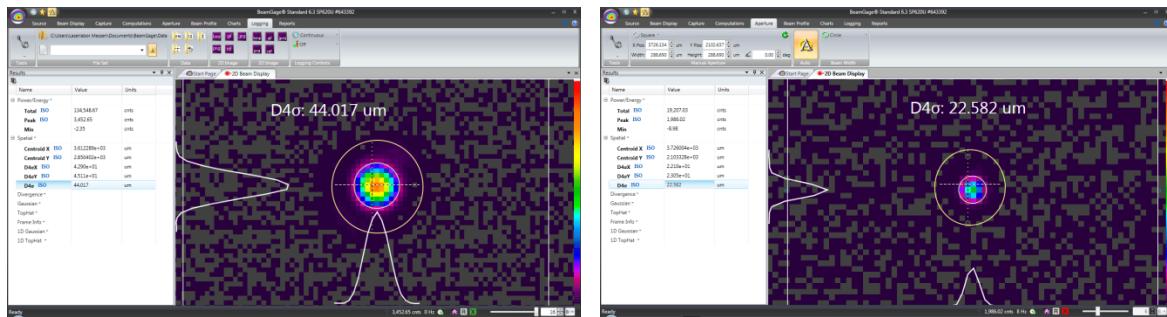


Abbildung 3.2: Fokuspunkt gemessen mit BeamGage

Im Scankopf wird der Laserstrahl durch zwei hochdynamische Galvomotoren mit Umlenkspiegeln in U- und V-Achsenrichtung umgelenkt. Am Scankopf ist eine telezentrische F-Theta Linse montiert. Damit bleibt der Laserstrahl unabhängig vom Auslenkungswinkel der Spiegel immer senkrecht auf die Oberfläche des Werkstücks gerichtet. Der Scankopf ist auf einer mechanischen Z-Achse montiert. Damit kann der Fokus des Lasers auf die Oberfläche des Werkstücks fokussiert werden. Der Zylinderrohling kann in der Drehachse eingespannt und so um die Rotationsachse C gedreht werden. Die Drehachse ist auf der Schwenkkachse befestigt und ermöglicht die Rotation des Werkstücks um die B-Achse. Diese ist wiederum auf einem Kreuztisch aus mechanischer X und Y-Achse montiert. Alle mechanischen Achsen und der Scanner sind von der Firma Aerotech. Von dieser ist auch die Steuerungssoftware A3200, mit der die ganze Konfiguration angesteuert wird und der NC-Code ausgeführt werden kann.

3.2 Optische Lichtmikroskope

Für die optische Analyse der gefertigten Werkstücke wurden drei Lichtmikroskope verwendet.

Das Leica M80 hat eine stufenlos einstellbare Vergrösserung um den Faktor 7.5 bis 60. Es dient zur einfachen optischen Überprüfung der Werkstücke. Mit dem Programm Leica Application Suite können digitale Aufnahmen erzeugt und bearbeitet werden. Das Mikroskop ist in Abbildung 3.3 links zu sehen.

Dank einem Kreuztisch mit zwei mechanischen Achsen können mit dem Leica DCM 3D automatisch mehrere Einzelaufnahmen zu einer grösseren Aufnahme zusammengefügt werden. Zudem gibt es die Möglichkeit durch mehrere konfokale Aufnahmen ein topografisches Oberflächenbild zu erstellen [39]. Anhand dieser Aufnahmen ist es möglich die Rauheitswerte der Oberfläche zu bestimmen. Dieses Mikroskop ist in Abbildung 3.3 mittig abgebildet.

Beim Alicona Infinite Focus kann zusätzlich zum Kreuztisch eine mechanische Drehachse montiert werden. Dadurch können rotationssymmetrische Werkstücke auf dem gesamten Umfang besser betrachtet werden. Durch Fokusvariation können aus mehreren lichtmikroskopischen Aufnahmen dreidimensionale Werkstückmodelle erstellt werden [40]. Im entsprechenden Programm Infinite Focus Measurement lassen sich diese vermessen und Oberflächenprofile erstellen. Zudem lässt sich die Oberflächenrauheit bestimmen. Das Alicona Infinite Focus ist in Abbildung 3.3 rechts zu sehen.



Abbildung 3.3: Leica M80, Leica DCM 3D und Alicona Infinite Focus

3.3 Elektronenmikroskop

Zur Analyse der bearbeiteten Oberflächenstruktur wurde das Elektronenmikroskop Phenom ProX der Firma PhenomWorld verwendet. Dieses ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Die Beschleunigungsspannung kann zwischen 5 kV und 15 kV eingestellt werden. Damit sind stufenlose Vergrößerungen um den Faktor 80 bis 130000 möglich [41]. Für nichtleitende, unbeschichtete Proben wird die maximale Vergrößerung nicht erreicht, liegt aber immer noch bei etwa 12000. Durch eine zusätzliche lichtmikroskopische Aufnahme ist die Navigation auf der Oberfläche sehr übersichtlich und benutzerfreundlich. Wird die Beschleunigungsspannung auf 15 kV gesetzt ist es möglich, die elementare Zusammensetzung der Probe durch energiedispersive Röntgenspektroskopie zu bestimmen.



Abbildung 3.4: Phenom ProX der Firma PhenomWorld [41]

3.4 Einstell- und Messgerät

Mit der Zoller Venturion 450 können Werkzeuge und Werkstücke vermessen und eingestellt werden. Dazu werden die Werkzeuge mit einer SK30 bis SK50 oder einer normgerechten HSK-A25 bis HSK-B125 Werkzeugaufnahme in die drehbare C-Achse eingespannt. Die Vermessung erfolgt über den Optikträger mittels LED Durchlicht und einer CCD-Kamera. Der Optikträger kann über zwei Linearachsen in X und Z gegenüber dem Werkzeug sowohl CNC gesteuert als auch manuell bewegt werden [42]. Es können Werkzeuge bis zu einer Länge von 450 mm und einem Durchmesser von 400 mm vermessen werden. Die Rundlaufgenauigkeit der Spindel beträgt 2 μm und die Wiederholgenauigkeit der Messungen $\pm 2 \mu\text{m}$ [43]. Abbildung 3.5 zeigt das gesamte Messsystem.



Abbildung 3.5: Das Messsystem Zoller Venturion 450 [42]

Über das Benutzerprogramm pilot 3.0 können verschiedene Messprogramme ausgeführt werden. Diese ermöglichen beispielsweise die automatische Vermessung von Durchmessern, Schneidengeometrien oder kompletten Werkzeugkonturen in mehreren Werkzeugpositionen.

3.5 Ramanspektroskop

Zur Bestimmung der tetragonalen und monoklinen Phasenanteile im Zirkonoxid wurde das konfokale Ramanspektroskop WITec alpha300 R verwendet. Für die optische Anregung stehen drei Laserquellen mit Wellenlängen von 457 nm, 532 nm und 633 nm zur Verfügung. Durch den Aufbau kann das Spektrometer auch als Lichtmikroskop verwendet werden. Dadurch wird die Positionierung des Laserfokus auf der Probe vereinfacht. Mit der Software WITec Control können die Ramanspektren analysiert und ausgewertet werden.

4

CAM Programmierung

Für die Programmierung des CAM Programms wurde Matlab verwendet. Der Vorteil von Matlab ist seine Benutzerfreundlichkeit. Der Code kann jederzeit gestoppt und die Variablen angezeigt werden. Diese Werkzeuge sind hilfreich bei der Analyse und Fehlersuche des Programmcodes. Zudem ist die Darstellung von dreidimensionalen Objekten, Punkten und Geraden durch die bereits vorhandenen Funktionen einfach zu realisieren.

Der Code für das CAM Programm für tangentiale Laserbearbeitung baut teilweise auf dem Code aus der Bachelorarbeit „Entwicklung eines CAM-Systems für 2D und 2.5D Laserbearbeitung“ [29] und der Semesterarbeit „Strategie und CAM-Entwicklung für die zylindrische 2.5D Laserbearbeitung“ [30] auf.

4.1 Grundkonzept des CAM Programms

Wie in Abbildung 4.1 links zu sehen ist, erfolgt bei der tangentialen Laserbearbeitung eine langsamere Ausrichtung des Werkstücks mit bis zu fünf mechanischen Achsen, damit durch die schnelle Strahlbewegung der optischen Achsen das Werkstück tangential touchieren werden kann. Diese Strategie wird auch in Patent EP 2 374 569 A2 „Laserbearbeitungsvorrichtung und Verfahren zur Herstellung eines rotationssymmetrischen Werkzeugs“ beschrieben, das der Laser Line der Firma EWAG zugrunde liegt [44].

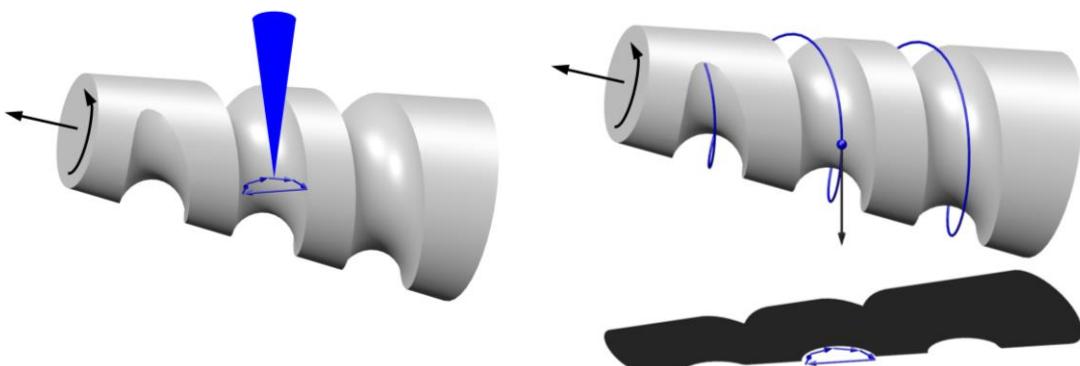


Abbildung 4.1: Konzept des CAM Programms für tangentiale Laserbearbeitung

Das Grundkonzept des CAM Programms ist, dass in einem ersten Schritt aus der gegebenen Nutgeometrie die Bahnlinie hergeleitet wird. Diese ist in Abbildung 4.1 rechts als blaue Linie zu erkennen. Entlang der Bahnlinie werden mehrere Bahnpunkte platziert und in jedem dieser Punkte ein an die Bahnlinie tangential anliegender Richtungsvektor erstellt. Anhand dieser Richtungsvektoren kann das Werkstück in jedem Bahnpunkt gegenüber dem Laserstrahl ausgerichtet werden. In einem zweiten Schritt können durch Berechnung der Schattenwürfe aus der Nutgeometrie in Richtung dieses Vektors die Laserbahnen für die optischen Achsen hergeleitet werden.

4.2 Übersicht

In Abbildung 4.2 sind die einzelnen Schritte, die bei dem CAM Programm durchlaufen werden übersichtlich dargestellt.

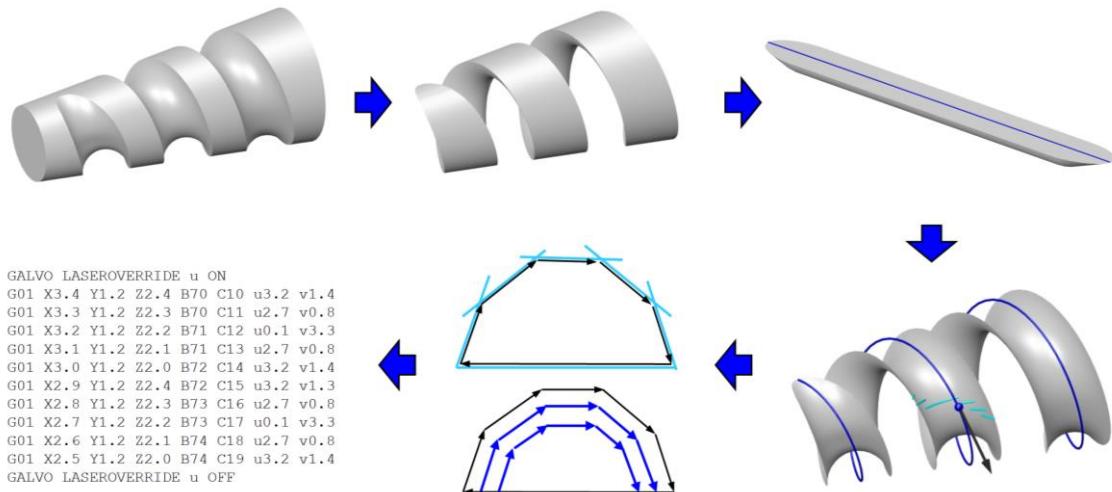


Abbildung 4.2: Übersicht CAM Programmierung

Zuerst wird aus der Geometrie des Werkstücks ein Negativ erzeugt. Dieses wird als Stl-Datei ins CAM Programm importiert. Durch eine Transformation von kartesischen in zylindrische Koordinaten kann die Geometrie des Negativs abgerollt werden. Dadurch vereinfacht sich die Berechnung der Bahnlinie, die in Abbildung 4.2 als blaue Linie zu erkennen ist. Auf der Bahnlinie werden in regelmässigen Abständen diskrete Bahnpunkte definiert. Über den Richtungsvektor, der in jedem Bahnpunkt tangential an der Bahnlinie anliegt, können aus der Nutgeometrie Übergangskanten bestimmt werden, die den Schattenwurf der Nut in Richtung des Vektors bilden. Die Übergangskanten sind in Abbildung 4.2 als hellblaue Linien zu erkennen. Durch Berechnung der Innenkontur aus den Übergangskanten lässt sich die Kontur des Schattenwurfs bestimmen. Mithilfe eines Konturoffsets werden zur Innenkontur um konstante Abstände verschobene Konturen erzeugt. Diese entsprechen den Bahnen, die mit den optischen Achsen abgefahrene werden, um den tangentialem Abtrag zu realisieren. Im letzten Schritt wird aus den Laserbahnen der NC-Code erstellt. Dieser kann von der Maschine interpretiert und ausgeführt werden.

4.3 Konstruktion der Werkstückgeometrie

Mithilfe eines CAD Programms wird die Geometrie des Werkstücks konstruiert. In Abbildung 4.3 links ist das Beispiel eines Werkstücks mit helixförmiger Rundnut dargestellt. Um dieses herzustellen muss bekannt sein, welches Volumen von der Ausgangsgeometrie abgetragen wird. Deshalb wird im CAD Programm zusätzlich die Rohlingsgeometrie gezeichnet. Diese ist in

Abbildung 4.3 mittig dargestellt. Durch Subtraktion der Werkstückgeometrie von der Rohlingsgeometrie erhält man ein Negativ. Dieses entspricht dem Volumen der Rundnut, das durch die Bearbeitung abgetragen wird. Zur Berechnung des NC-Codes im CAM Programm wird nur diese Geometrie benötigt. Das Negativ kann mit jedem beliebigen CAD Programm erstellt werden. Wichtig ist nur, dass die Geometrie im Stl-Dateiformat abgespeichert werden kann, da nur dieses Format vom CAM Programm unterstützt wird.

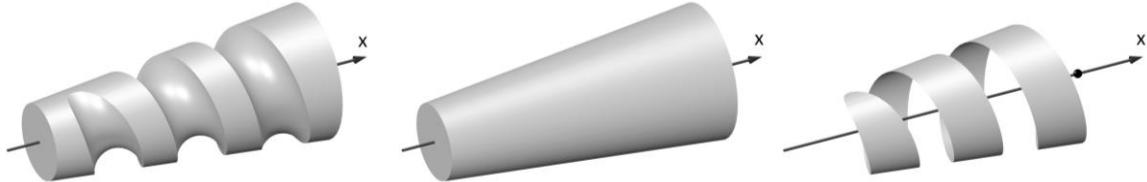


Abbildung 4.3: Geometrie des Werkstücks, des Rohlings und des Negativs

Damit die Berechnung der Laserbahnen im CAM Programm korrekt funktioniert, muss die Rotationsachse des Negativs auf der X-Achse liegen. Der Koordinatenursprung des Negativs ist in Abbildung 4.3 rechts durch einen schwarzen Punkt gekennzeichnet. Bei der Berechnung des NC-Codes wird die Geometrie des Negativs um diesen Koordinatenursprung um die X-Achse und Y-Achse gedreht, damit der Laserstrahl die Nut parallel zur Z-Achse tangential touchieren kann. Bei der Laserbearbeitung muss der Koordinatenursprung genau auf dem Drehschwenkpunkt der Maschine liegen, damit die Befehle des NC-Codes mit den Bewegungen der Maschine übereinstimmen. Geometrien mit Hinterschneidungen können nicht durch tangentiale Laserbearbeitung realisiert werden. Falls solche Geometrien ins CAM Programm importiert werden, können falsche Berechnungen resultieren. Zudem kann im CAM Programm jeweils nur eine geschlossene Geometrie verarbeitet werden. Falls zum Beispiel eine Negativegeometrie mit mehreren getrennten Spannuten importiert wird, entstehen Fehler.

4.4 Stl-Datei importieren

Bei einer Stl-Datei wird die Oberfläche der Geometrie durch ein geschlossenes Netz von Dreiecken approximiert. Beim Importieren jedes Dreiecks werden die X, Y, und Z-Koordinaten aller drei Eckpunkte kopiert und in einem Array abgespeichert. Die Stl-Datei bietet die Möglichkeit, zusätzlich die X, Y, und Z-Koordinate des Normalenvektors zu jedem Dreieck zu speichern [45]. Diese Funktion wird nicht von jedem CAD Programm genutzt. Sind keine Normalenvektoren gespeichert, müssen diese berechnet werden. Aus der Reihenfolge der abgespeicherten Eckpunkte lassen sich diese herleiten. Falls die drei Eckpunkte im Uhrzeigersinn abgespeichert sind, zeigt der Normalenvektor, wie in Abbildung 4.4 links dargestellt, nach vorne. Falls die drei Eckpunkte im Gegenuhrzeigersinn abgespeichert sind, zeigt der Normalenvektor, wie in Abbildung 4.4 rechts dargestellt, nach hinten.

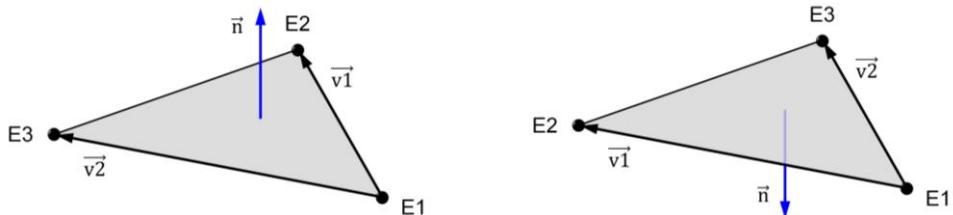


Abbildung 4.4: Berechnung des Normalenvektors

Die Berechnung des Normalenvektors erfolgt über das Kreuzprodukt von Vektor $\vec{v1}$ von Eckpunkt E1 zu Eckpunkt E2 mit dem Vektor $\vec{v2}$ von Eckpunkt E1 zu Eckpunkt E3 nach Formel (4.5).

$$\vec{n} = \vec{v1} \times \vec{v2} \quad (4.5)$$

4.5 Überprüfen der Stl-Datei

Damit alle Folgeschritte im CAM Programm fehlerfrei funktionieren ist es wichtig, dass die Oberfläche der Stl-Datei ein geschlossenes Netz aus Dreiecken bildet. Dies bedeutet, dass an jede Kante eines Dreiecks genau eine Nachbarkante eines anderen Dreiecks angrenzen muss. Gewisse Stl-Dateien weisen Defekte auf. Dies kann damit zusammenhängen, dass gewisse CAD Programme beim Erstellen der Stl-Dateien Fehler machen. In Abbildung 4.5 sind verschiedene Defekte aufgeführt, die in der Oberfläche der Dateien auftreten können. Das Aufspüren dieser Defekte erfolgt durch Suchen der angrenzenden Nachbarkanten. Kanten die keine Nachbarkante haben, weisen auf Fehler hin und sind in Abbildung 4.5 dunkelblau eingefärbt. In wenigen Fällen kommt es vor, dass eine Kante mehr als eine Nachbarkante aufweist. Dieser Defekt ist in Abbildung 4.5 hellblau eingefärbt.

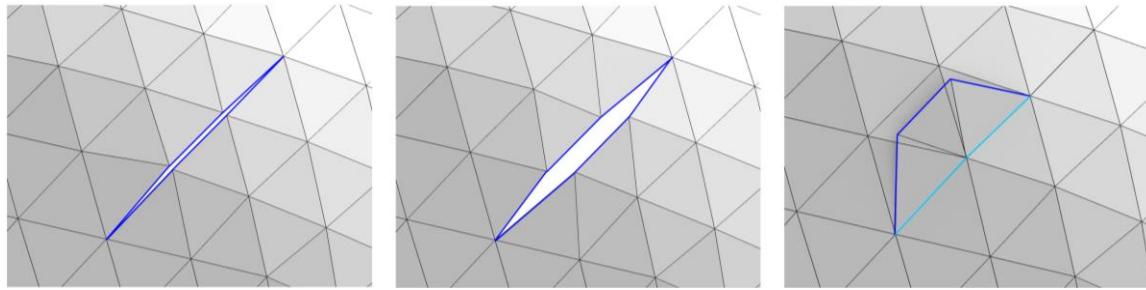


Abbildung 4.5: Defekte in der Oberfläche der Stl-Datei

Falls zwei Dreieckskanten ohne Nachbarkanten nur geringfügig voneinander abweichen, wie in Abbildung 4.5 links, kann durch Finden und Aufrücken der einzelnen Eckpunkte die Oberfläche geschlossen und der Defekt repariert werden. Falls ungeschlossene Dreieckskanten zu stark voneinander abweichen oder mehr als zwei Kanten aufeinander liegen, wie in Abbildung 4.5 mittig und rechts, muss die Stl-Datei zum Beispiel mit der Software Blender manuell überprüft werden.

4.6 Abrollen der Geometrie

Eine zylindrische Geometrie wird beim Abrollen in eine kartesische transformiert. Durch diese Transformation kommt eine helixförmige Nut ungefähr entlang einer Geraden zu liegen. Damit vereinfacht sich die Berechnung der Bahnlinie im Folgeschritt wesentlich. Das Abrollen einer Nutgeometrie wird in Abbildung 4.6 veranschaulicht.

Bei der Transformation kommen die einzelnen abgerollten Flächen, aus denen die zylindrische Nutgeometrie aufgebaut ist, nur auf einem Winkelbereich zwischen 0° und 360° zu liegen. Die kartesische Nutgeometrie wird dadurch in mehrere Umfangssegmente unterteilt. Diese werden in einem zweiten Schritt wieder zu einer gemeinsamen Nutgeometrie verbunden.

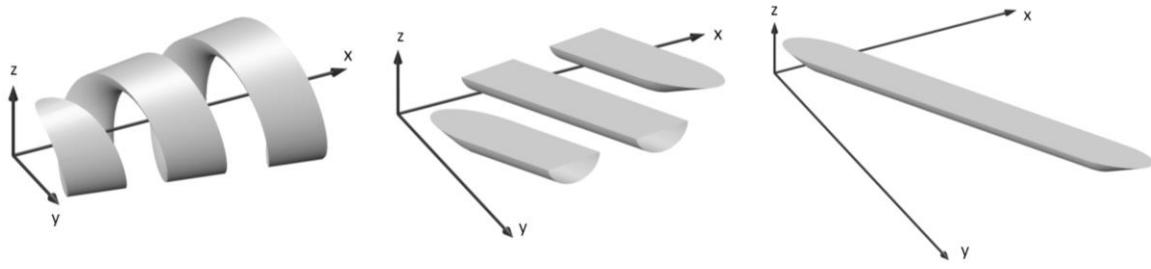


Abbildung 4.6: Abrollen der Geometrie

4.6.1 Transformation einer einzelnen Dreiecksfläche

Bei der Transformation wird für jede Y und Z-Koordinate der Eckpunkte einer Dreieckfläche ein neuer Wert berechnet. Abbildung 4.7 zeigt wie ein einzelnes Dreieck transformiert wird und wie die neuen Eckpunktkoordinaten zu interpretieren sind.

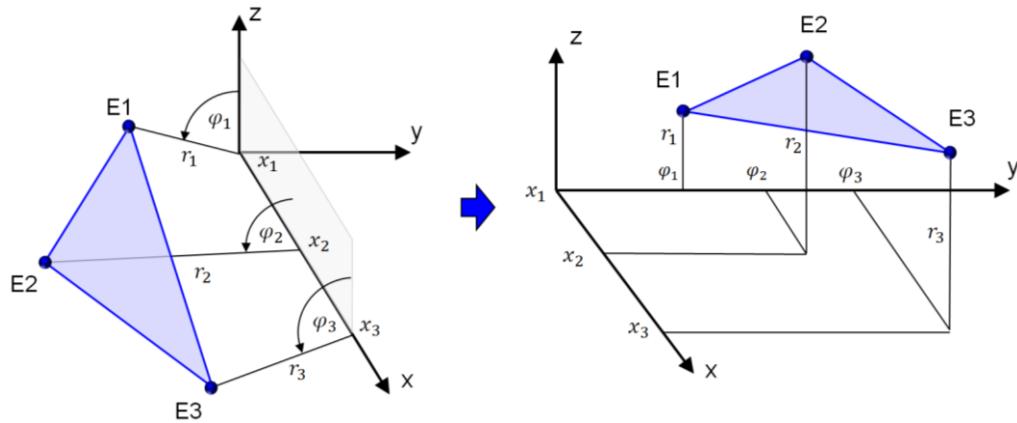


Abbildung 4.7: Transformation einer Dreiecksfläche

Die X-Koordinaten der Eckpunkte bleiben durch die Transformation unverändert. Dies wird auch durch Formel (4.6) verdeutlicht. Die neuen Y-Koordinaten entsprechen dem Abrollwinkel zwischen der XZ-Ebene und dem entsprechenden Eckpunkt. Dieser lässt sich nach Formel (4.7) berechnen. Durch diese Transformation ändern die Einheiten der Y-Achse von Millimeter zu Grad. Die neuen Z-Koordinaten entsprechen dem Radius und lassen sich nach Formel (4.8) durch den Abstand zwischen der X-Achse und dem entsprechenden Eckpunkt berechnen.

$$x' = x \quad (4.6)$$

$$y' = \varphi = \begin{cases} \arctan(z/y) + 90^\circ & \text{Falls } y \leq 0 \\ \arctan(z/y) + 270^\circ & \text{Falls } y > 0 \end{cases} \quad (4.7)$$

$$z' = r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4.8)$$

4.6.2 Kombination der Umfangssemente

Durch die Transformation liegen die einzelnen Dreiecksflächen zwischen 0° und 360° . Diese müssen wieder so zusammengefügt werden, dass eine zusammenhängende, abgerollte Geometrie mit einer geschlossenen Oberfläche entsteht. Im ersten Schritt werden aus den Dreiecksflächen

zusammenhängende Umfangssegmente gebildet. Im Beispiel von Abbildung 4.8 links sind drei solche Segmente abgebildet. Um diese zu berechnen werden von jeder Dreiecksfläche die angrenzenden Nachbareckpunkte gesucht. Weil diese identische Koordinaten haben kann durch sortieren aller Eckpunkte nach Koordinaten bestimmt werden, welche Punkte aneinander grenzen. Über angrenzende Eckpunkte wandert man von Dreieck zu Dreieck, bis alle zusammenhängenden Dreiecke gefunden und dadurch die Umfangssegmente gebildet sind.

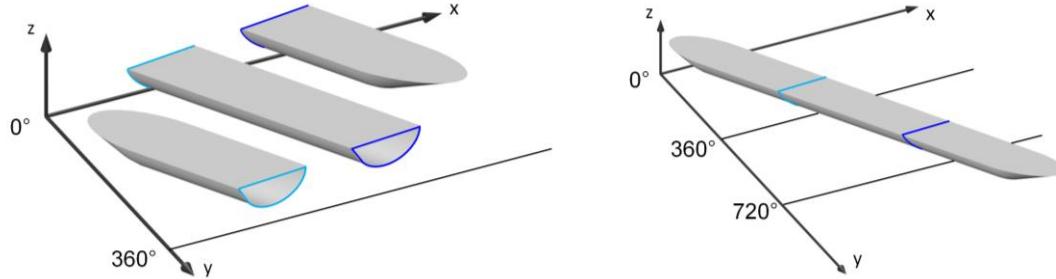


Abbildung 4.8: Bestimmung der zusammenhängenden Geometrie

Im zweiten Schritt werden die Segmente zu einer zusammenhängenden Geometrie kombiniert, wie es in Abbildung 4.8 rechts dargestellt ist. Dazu werden von jedem Segment die Kanten gesucht, die kein angrenzendes Nachbardreieck haben. Diese sind in Abbildung 4.8 blau eingefärbt. Über die offenen Kanten eines Segmentes bei 0° kann man über die identischen Kanten bei 360° auf das zugehörige, angrenzende Segment schliessen und die zusammenhängende Geometrie bilden.

4.7 Berechnung der Bahnlinie

Abhängig von der Geometrie des Negativs erfolgt die Berechnung der Bahnlinie auf unterschiedliche Weise. Dabei ist die Berechnung bei helixförmigen Nutgeometrien komplexer als bei Geometrien, die im Umfang geschlossen sind.

4.7.1 Berechnung der Bahnlinie bei helixförmigen Geometrien

Die Flächen der abgerollten Nutgeometrie können mithilfe der Normalenvektoren in zwei Flächenbereiche unterteilt werden. Die Flächen, die einen Normalenvektor mit positiver Z-Komponente haben, bilden den Nutdeckel während die Flächen, die einen Normalenvektor mit negativer Z-Komponente haben, den Nutgrund bilden. In Abbildung 4.9 links ist diese Trennung der Flächen anhand der blauen Normalenvektoren dargestellt.

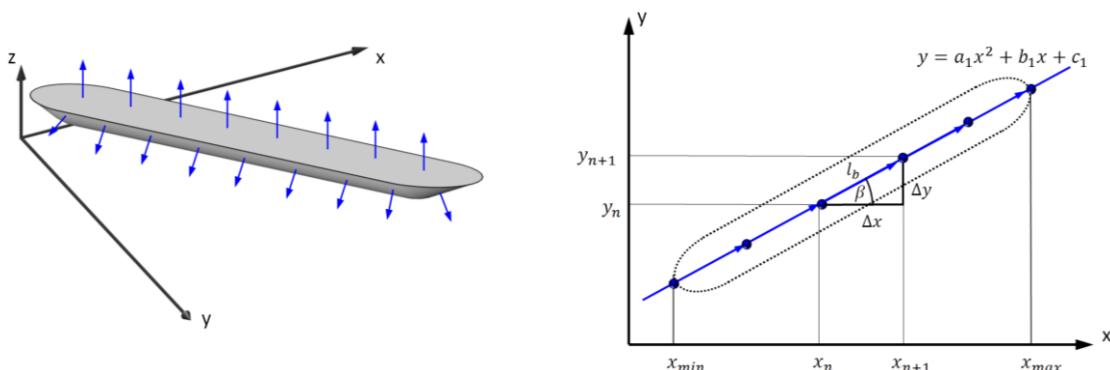


Abbildung 4.9: Berechnung der Bahnlinie bei helixförmigen Geometrien

Durch die Eckpunkte der Übergangskanten, die zwischen Nutdeckel und Nutgrund liegen, kann durch Ausgleichsrechnung ein Polynom zweiten Grades gelegt werden. Dieses bildet die Bahnlinie, die in Abbildung 4.9 rechts als blaue Linie zu erkennen ist.

Zur Berechnung eines Ausgleichspolynoms gibt es in Matlab die Funktion Polyfit. Dieser werden die X-Koordinaten und die Y-Koordinaten der Eckpunkte der Übergangskante übergeben. Polyfit berechnet daraus die Koeffizienten a_1 , b_1 und c_1 . Nach Formel (4.9) kann aus diesen für jeden beliebigen X-Wert ein entsprechender Y-Wert auf dem Ausgleichspolynom berechnet werden. Analog zu Y wird mit Polyfit ein Ausgleichspolynom mit den Koeffizienten a_2 , b_2 und c_2 für Z berechnet. Daraus können nach Formel (4.10) aus den X-Werten die entsprechenden Z-Werte auf der Bahnlinie hergeleitet werden.

$$y_n = a_1 x_n^2 + b_1 x_n + c_1 \quad (4.9)$$

$$z_n = a_2 x_n^2 + b_2 x_n + c_2 \quad (4.10)$$

Auf der Maschine werden nacheinander einzelne Bahnpunkte angefahren. Deshalb müssen entlang der Bahnlinie einzelne diskrete Bahnpunkte berechnet werden. Der Abstand zwischen zwei Punkten soll genau dem Bahnabstand l_b entsprechen. Die Berechnung erfolgt iterativ von x_{min} bis x_{max} . Über die Ableitung des Ausgleichspolynoms kann die Steigung anhand des X-Wertes in jedem Punkt nach Formel (4.11) berechnet werden.

$$dx/dy = \Delta y / \Delta x = 2a_1 x_n + b_1 \quad (4.11)$$

Aus der Steigung kann wiederum nach Formel (4.12) der Winkel β_n berechnet werden.

$$\beta_n = \arctan(\Delta y / \Delta x) = \arctan((2a_1 x_n + b_1) 2\pi z_n / 360^\circ) \quad (4.12)$$

Dieser Winkel, der auch in Abbildung 4.9 eingetragen ist, gibt an, um wie viel die Schwenkachse bei der Bearbeitung im entsprechenden Bahnpunkt geneigt werden muss. Mit dem Winkel β_n und dem Bahnabstand l_b lässt sich mit Formel (4.13) der X-Abstand Δx zum nächsten Bahnpunkt berechnen.

$$\Delta x = l_b \cos(\beta_n) \quad (4.13)$$

Die X-Koordinate des nächsten Bahnpunktes berechnet sich nach Formel (4.14). Aus dieser Koordinate können wiederum mit Formel (4.9) und Formel (4.10) die restlichen Koordinaten jedes Bahnpunktes hergeleitet werden.

$$x_{n+1} = x_n + \Delta x \quad (4.14)$$

Bei gewissen Geometrien wird die Bahnlinie besser approximiert, wenn das Ausgleichspolynom nicht bezüglich den X-Koordinaten der Übergangskanten berechnet wird, sondern aus den Y-Koordinaten und daraus mit Polyfit Polynome für die X und Z-Koordinaten hergeleitet werden. Die X und Y-Koordinaten der Übergangskanten werden vor der Berechnung also gewissermassen vertauscht. Die restliche Berechnung der Bahnlinie bleibt aber identisch.

4.7.2 Berechnung der Bahnlinie beim Umfangsabtrag

Bei einer geschlossenen Umfangsgeometrie, wie in Abbildung 4.10 links, vereinfacht sich die Berechnung der Bahnlinie. Bei dieser Bearbeitung hat die Helix konstante X und Z-Werte. Auch die Schwenkachse muss nur zu Beginn eingestellt werden und ändert sich bei der Bearbeitung nicht. Durch das Abrollen bildet sich nur ein Umfangssegment von 0° bis 360° . Dieses ist in Abbildung 4.10 mittig dargestellt.

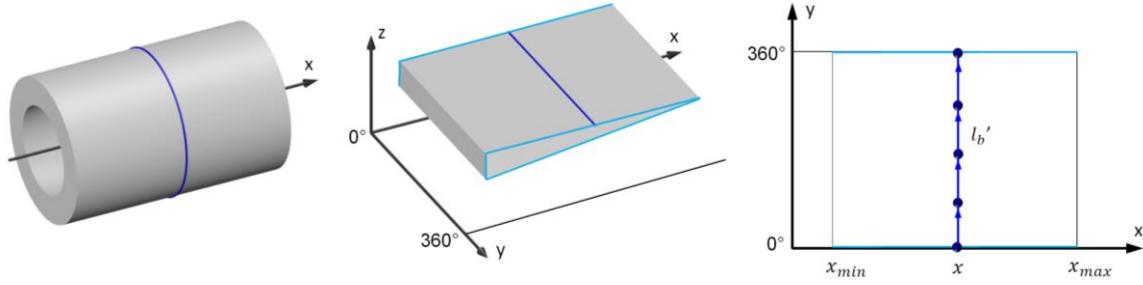


Abbildung 4.10: Bahnberechnung beim Umfangsabtrag

Die X-Koordinate der Bahnlinie lässt sich wie in Abbildung 4.10 rechts dargestellt durch Mittelung von x_{min} und x_{max} berechnen. Damit der erste Bahnpunkt genau bei 0° und der letzte gerade bei 360° zu liegen kommt, muss der Bahnabstand l_b durch Formel (4.15) zum neuen Bahnabstand l_b' leicht angepasst werden.

$$l_b' = 360^\circ / \text{runden}(2\pi z / l_b) \quad (4.15)$$

Danach lassen sich die Y-Koordinaten der Bahnpunkte y_n einfach mit Formel (4.16) berechnen.

$$y_n = n \cdot l_b' \quad (4.16)$$

4.8 Berechnung des Schattenwurfs

In jedem Bahnpunkt wird zur Berechnung des Schattenwurfs der Richtungsvektor \vec{v}_R benötigt. Diesen erhält man durch zweifaches Drehen des Einheitsvektors \vec{e}_x . Zuerst wird dieser um den Winkel β_n , der sich nach Formel (4.12) berechnet, um die Y-Achse gedreht. Anschliessend folgt eine Drehung um die X-Achse um den Winkel γ_n . Diesen erhält man direkt durch ablesen der Y-Koordinate des entsprechenden Bahnpunktes der Bahnlinie. In Formel (4.17) ist die Herleitung des Richtungsvektors \vec{v}_R ausgeschrieben.

$$\vec{v}_R = R_x R_y \vec{e}_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma_n) & \sin(\gamma_n) \\ 0 & -\sin(\gamma_n) & \cos(\gamma_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\beta_n) & 0 & -\sin(\beta_n) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\beta_n) & 0 & \cos(\beta_n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\beta_n) \\ \sin(\beta_n) \sin(\gamma_n) \\ \sin(\beta_n) \cos(\gamma_n) \end{pmatrix} \quad (4.17)$$

4.8.1 Bestimmung der Schattenwurfkanten

Mit dem Richtungsvektor können aus der Nutgeometrie die Übergangskanten berechnet werden, welche die Kontur des Schattenwurfs bilden. Eine Übergangskante liegt immer zwischen einer dem Richtungsvektor zugewandten und einer dem Richtungsvektor abgewandten Dreiecksfläche. In Abbildung 4.11 links ist diese Übergangskante blau dargestellt. Anhand des Normalenvektors der Fläche kann bestimmt werden, ob eine Fläche dem Richtungsvektor zu oder abgewandt ist. Dazu wird das Skalarprodukt nach Formel (4.18) und Formel (4.19) berechnet. Ist das Skalarprodukt kleiner Null ist die Fläche nach Formel (4.18) zugewandt. Falls das Skalarprodukt grösser Null ist, ist die Fläche nach Formel (4.19) abgewandt.

$$\text{Zugewandt: } \vec{n}_Z \cdot \vec{v}_R < 0 \quad (4.18)$$

$$\text{Abgewandt: } \vec{n}_A \cdot \vec{v}_R > 0 \quad (4.19)$$

In Abbildung 4.11 mittig sind alle vom Richtungsvektor abgewandten Flächen ausgeblendet. Dadurch kann man die Übergangskanten besser erkennen. Die Kanten, die im Nutdeckel liegen sind hellblau eingefärbt. Jene, die im Nutgrund liegen sind dunkelblau eingefärbt. Für die

Berechnung der Laserbahnen werden die Kanten des Nutgrundes getrennt von den Kanten des Nutdeckels benötigt, deshalb ist diese Unterscheidung nötig.

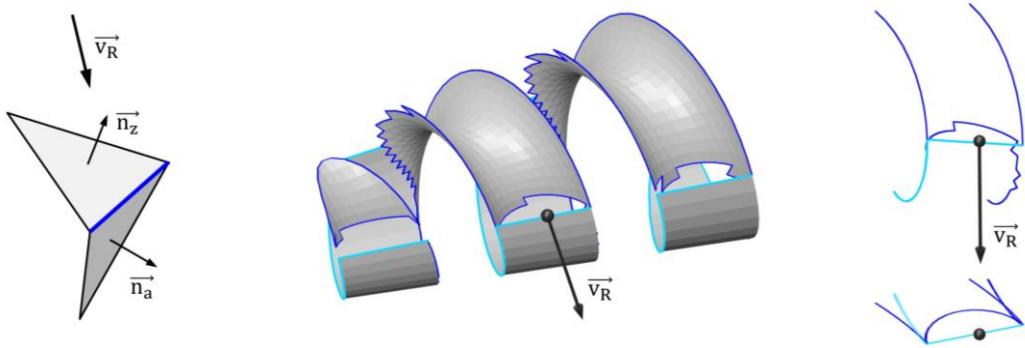


Abbildung 4.11: Berechnung des Schattenwurfs

Wie Abbildung 4.11 rechts zeigt werden die Übergangskanten, die in der Nähe des aktuellen Bahnpunktes liegen um den Richtungsvektor gedreht, bis dieser entgegen der Z-Richtung zu liegen kommt. Diese Kanten werden entlang des Richtungsvektors in die XY-Ebene projiziert und können für die zweidimensionale Berechnung der Schattenkontur verwendet werden. Um Rechenleistung zu sparen wird bewusst nur ein kleiner Teil der Übergangskanten gedreht und in die XY-Ebene projiziert.

4.8.2 Bestimmung der Schattenkontur

Die projizierten Schattenkanten liegen unstrukturiert übereinander. Bei der Bestimmung der Schattenkontur ist das Ziel eine möglichst einfache Innenkontur zu bilden. Dazu wandert man im Uhrzeigersinn von Kante zu Kante, bis die geschlossene Kontur gefunden ist. Abbildung 4.12 zeigt das Grundkonzept dieser Strategie.

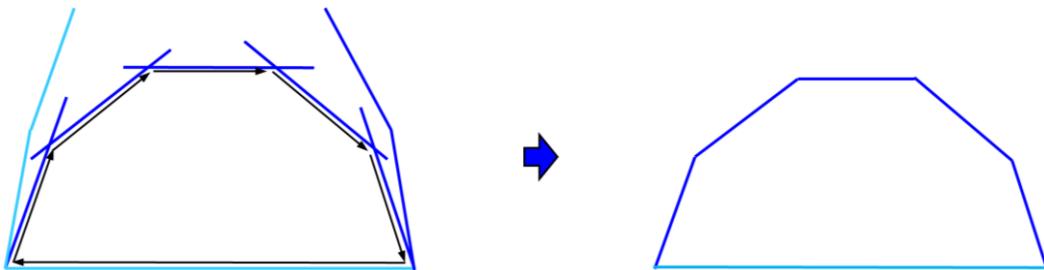


Abbildung 4.12: Bestimmung der Schattenkontur

Gestartet wird mit der untersten Deckkante, die in Abbildung 4.12 hellblau dargestellt ist. Um die richtige Anschlusskante zu finden wird durch alle anderen Kanten iteriert. Eine potenzielle Folgekante ist gefunden falls sich diese mit der aktuellen Kante überschneidet oder sie berührt. Diese Überprüfung erfolgt mit Formel (4.20). Diese berechnet einen k-Faktor aus dem Vektor \vec{v}_1 , der zwischen Startpunkt S1 und Endpunkt E1 von Kante1 liegt und aus Vektor \vec{v}_2 , der zwischen Startpunkt S2 und Endpunkt E2 von Kante2 liegt. Mit diesem kann nach Formel (4.21) der Intersektionspunkt I berechnet werden.

$$k = \frac{v_{2x}(S1_y - S2_y) + v_{2y}(S2_x - S1_x)}{v_{2y}v_{1x} - v_{2x}v_{1y}} \quad (4.20)$$

$$I = S1 + k \cdot \vec{v}_1 \quad (4.21)$$

Wie Abbildung 4.13 links verdeutlicht, überschneiden sich im Intersektionspunkt I die verlängerten Kanten.

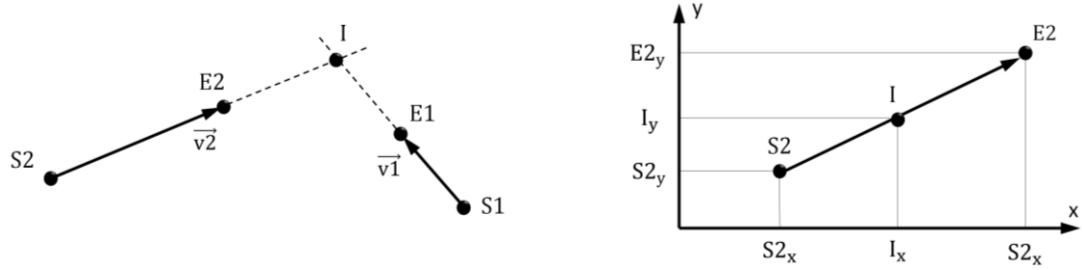


Abbildung 4.13: Herleitung des Intersektionspunktes

Falls der k-Faktor zwischen 0 und 1 liegt, befindet sich der Intersektionspunkt auf Kante1, also zwischen S1 und E1. Falls die X und Y-Koordinaten des Intersektionspunktes zwischen den entsprechenden X und Y-Koordinaten von S2 und E2 der Kante2 liegen, befindet sich der Intersektionspunkt auf Kante2. Diese Überprüfung wird durch Abbildung 4.13 rechts verdeutlicht. Nur falls beide Bedingungen erfüllt sind überschneiden oder berühren sich beide Kanten und Kante2 ist potenzielle Anschlusskante an Kante1.

Gibt es mehrere potentielle Anschlusskanten, die sich im selben Intersektionspunkt zur vorangehenden Kante berühren, wird jene Kante ausgewählt, die den grössten Zwischenwinkel w gegenüber der vorangehenden einschliesst. Dadurch ist gewährleistet, dass die Schattenkontur entlang dem inneren Rand aller Kanten verläuft. Abbildung 4.14 links zeigt, wie auf Kante1 mit Vektor $\vec{v1}$ die potentiellen Anschlusskanten mit Vektoren $\vec{v2}$, $\vec{v3}$ und $\vec{v4}$ existieren. Diese berühren sich alle im gemeinsamen Intersektionspunkt I. Als korrekte Anschlusskante der Innenkontur wird nur Kante4 mit Vektor $\vec{v4}$ gewählt, weil dieser mit $\vec{v1}$ den grössten Zwischenwinkel $w4$ einschliesst.

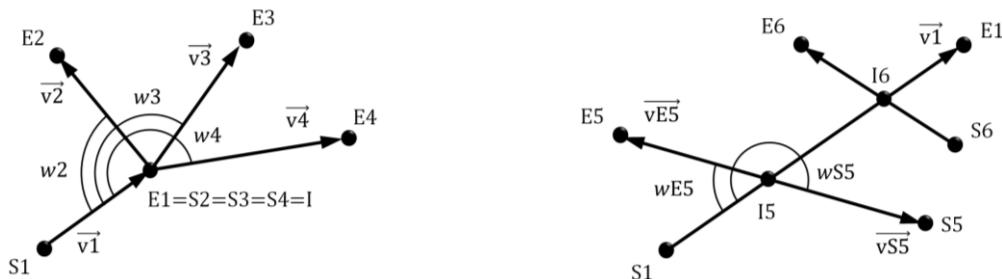


Abbildung 4.14: Auswahl der korrekten Anschlusskante

Falls es mehrere Überschneidungen von potentiellen Anschlusskanten mit Kante1 gibt, die nicht denselben Intersektionspunkt haben, wird jene Kante als Anschlusskante gewählt, die näher beim Startpunkt S1 von Kante1 liegt. Diese Überprüfung erfolgt mit dem k-Faktor. Der Intersektionspunkt I mit dem kleinsten k-Faktor liegt am nächsten bei S1. Abbildung 4.14 rechts zeigt, wie sich zwei potentielle Anschlusskanten mit Kante1 in den Intersektionspunkten I5 und I6 überschneiden. Hier wird Kante5 als Anschlusskante gewählt, weil der Intersektionspunkt I5 näher beim Startpunkt S1 liegt. Von Anschlusskante5 werden zwei Folgevektoren $\vec{vS5}$ und $\vec{vE5}$ gebildet. $\vec{vS5}$ zeigt vom Intersektionspunkt I5 zum Startpunkt S5 und $\vec{vE5}$ zeigt vom Intersektionspunkt I5 zum Endpunkt E5. Als korrekter Anschlussvektor wird $\vec{vS5}$ gewählt, weil dieser wiederum den grössten Zwischenwinkel $wS5$ mit Vektor $\vec{v1}$ einschliesst.

Wie der Zwischenwinkel w von Vektor $\vec{v1}$ und $\vec{v2}$ berechnet wird zeigt Abbildung 4.15.

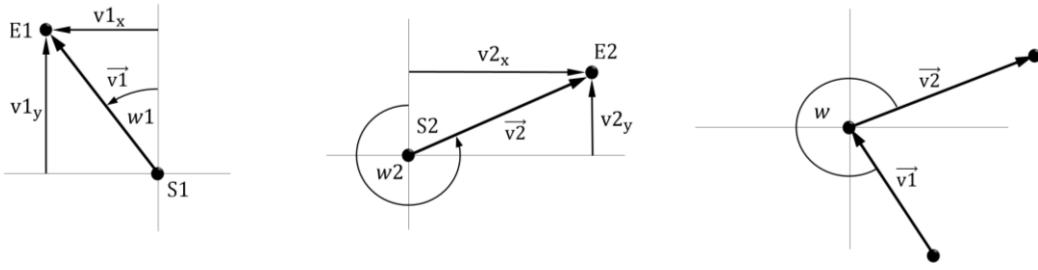


Abbildung 4.15: Bestimmung des Zwischenwinkels zweier Vektoren

Zuerst wird für Vektor \vec{v}_1 , der auf Kante 1 liegt nach Formel (4.22) der Winkel w_1 berechnet. Mit der gleichen Formel wird für Vektor \vec{v}_2 der Winkel w_2 berechnet.

$$w_1 = \arctan(v_{1y}/v_{1x}) + (v_{1x} > 0) 180^\circ + 90^\circ \quad (4.22)$$

Mit Formel (4.23) kann aus den Winkeln w_1 und w_2 der Zwischenwinkel w berechnet werden. Dieser liegt immer zwischen 0° und 360° . Die Modulusfunktion gibt den Restwinkel aus, der beim Teilen durch 360° übrig bleibt.

$$W = \text{modulus}(540^\circ + w_1 - w_2, 360^\circ) \quad (4.23)$$

4.9 Berechnung der Konturoffsets

Beim Konturoffset werden aus der Innenkontur des Schattenwurfs neue Konturen berechnet, die gegenüber der Schattenkontur einen fixen Konturabstand haben. Anhand dieser Konturen erfolgt bei der tangentialen Laserbearbeitung der Materialabtrag von aussen nach innen, bis die gewünschte Kontur des Schattenwurfs erreicht wird. Alle Konturoffsets zusammen werden gerne als Hatches bezeichnet.

Die Berechnung der Konturoffsets für geschlossene Konturen wird in einem Paper von Petr Felkel und Štěpán Obdržálek beschrieben [46]. Für offene Konturen, die keine Hinterschneidungen haben, vereinfacht sich die Berechnung wesentlich. Da bei der tangentialen Laserbearbeitung sowieso keine Hinterschneidungen realisierbar sind, kann man aus dieser Vereinfachung direkten Nutzen ziehen.

Eine oft angewandte falsche Berechnung der Konturoffsets geht davon aus, dass die einzelnen Eckpunkte der Ausgangskontur nur entlang der Winkelhalbierenden verschoben werden um die gewünschten Konturoffsets zu erhalten. Wie Abbildung 4.16 links zeigt resultieren nach dieser Strategie bei zunehmendem Konturabstand falsche Konturen.

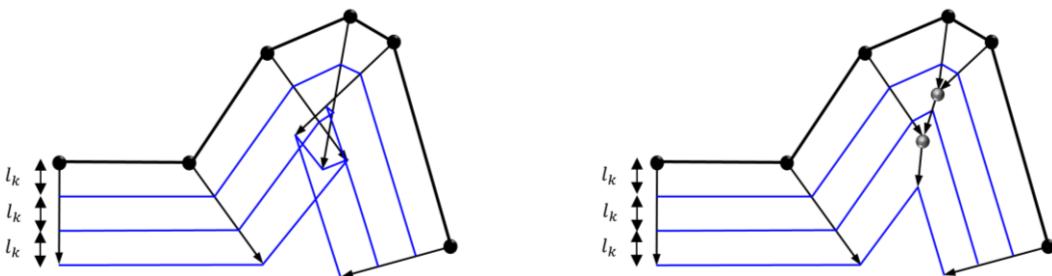


Abbildung 4.16: Berechnung der Konturoffsets mit und ohne Edge Event

Bei korrekter Berechnung müssen Edge Events berücksichtigt werden. Diese treten immer dann auf, wenn zwei Eckpunkte, die entlang der Winkelhalbierenden nach Innen wandern, aufeinander treffen und verschmelzen. Dabei verschwindet ein Eckpunkt und damit eine Kante der

ursprünglichen Kontur. In Abbildung 4.16 rechts werden die zwei Edge Events durch die grauen Punkte verdeutlicht. Durch Berücksichtigung der Edge Events resultieren auch bei grossen Konturabständen korrekte Konturoffsets. Die Abstände zwischen den Konturen sind durch die Offsetlänge l_k definiert.

4.9.1 Berechnung der Winkelhalbierenden

Die Eckpunkte der Schattenwurfkontur wandern bei der Berechnung des Konturoffsets entlang der Winkelhalbierenden. Diese lässt sich mit den Kanten, die an den Eckpunkt angrenzen berechnen. Abbildung 4.17 zeigt wie die Winkelhalbierende für einen einzelnen Eckpunkt E1 erstellt wird.



Abbildung 4.17: Berechnung der Winkelhalbierenden

Mit den angrenzenden Eckpunkten E0 und E2 an den aktuellen Eckpunkt E1 werden die Kantenvektoren \vec{v}_1 und \vec{v}_2 gebildet. Diese werden nach Formel (4.24) zu \vec{n}_1 und \vec{n}_2 auf Einheitslänge 1 normiert. Durch Vektoraddition dieser zwei normierten Vektoren nach Formel (4.25) erhält man die Winkelhalbierende \vec{v}_3 . Diese wird ebenfalls mit Formel (4.24) zu \vec{n}_3 normiert.

$$\vec{n} = \frac{\vec{v}}{|\vec{v}|} \quad (4.24)$$

$$\vec{v}_3 = \vec{n}_1 + \vec{n}_2 \quad (4.25)$$

Falls zwei Kantenvektoren zu einander parallel sind, wie es auf Abbildung 4.17 rechts zu sehen ist, funktioniert die Berechnung der Winkelhalbierenden durch Vektoraddition nicht mehr. In diesem Fall muss einer der angrenzenden Kantenvektoren \vec{v}_1 oder \vec{v}_2 um 90° gedreht werden um die Winkelhalbierende \vec{v}_4 zu erhalten. Mit Formel (4.26) wird ein Vektor 90° im Uhrzeigersinn und mit Formel (4.27) um 90° im Gegenuhrzeigersinn gedreht.

$$\vec{v}_{90^\circ} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \vec{v} = \begin{pmatrix} v_y \\ -v_x \end{pmatrix} \quad (4.26)$$

$$\vec{v}_{-90^\circ} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \vec{v} = \begin{pmatrix} -v_y \\ v_x \end{pmatrix} \quad (4.27)$$

Die Winkelhalbierende \vec{v}_4 muss wieder mit Formel (4.24) zu \vec{n}_4 normiert werden. Für den ersten und letzten Eckpunkt der Kontur wird ebenfalls nach diesem Verfahren eine senkrechte Winkelhalbierende gebildet.

4.9.2 Abstandberechnung zum Edge Event Punkt

Ein Edge Event trifft immer dann auf, wenn beim Konturoffset die Schattenwurfkontur genau um den Abstand A aufgerückt wird. Wie Abbildung 4.18 links zeigt, verschmelzen die Eckpunkte E0 und E1 im Edge Event Punkt EEP. Dadurch hat die neu aufgerückte graue Kontur einen Eckpunkt weniger.

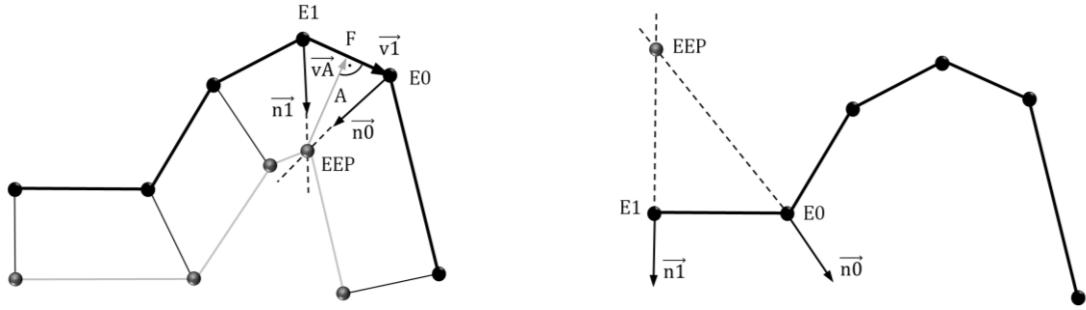


Abbildung 4.18: Beim Edge Event treffen zwei Eckpunkte aufeinander

Zur Berechnung der Position des Edge Event Punktes EEP, der durch Kollision von Eckpunkt E1 und dem vorangehenden Eckpunkt E0 entsteht, werden die entsprechenden Winkelhalbierenden \vec{n}_1 und \vec{n}_0 benötigt. Damit lässt sich nach Formel (4.28) der q-Faktor berechnen. Dieser gibt an, wie weit der Eckpunkt E1 in Richtung von \vec{n}_1 verschoben werden muss um nach Formel (4.29) die Position des Edge Event Punktes EEP zu berechnen.

$$q = \frac{n_{1x}(E_{0y} - E_{1y}) + n_{1y}(E_{1x} - E_{0x})}{n_{1y}n_{0x} - n_{1x}n_{0y}} \quad (4.28)$$

$$EPP = E1 + q \cdot \vec{n}_1 \quad (4.29)$$

Für die Berechnung des Abstandes A muss zuerst nach Formel (4.30) der r-Faktor berechnet werden. Dieser gibt an um wie viel der Vektor \vec{v}_1 skaliert werden muss um den Fußpunkt F zu erhalten. Mit dem r-Faktor kann nach Formel (4.31) der Abstand A berechnet werden. Dieser erhält man durch den Betrag des Vektors \vec{v}_A , der sich zwischen dem Edge Event Punkt EEP und dem Fußpunkt F aufspannt.

$$r = \frac{v_{1x}(EPP_x - E1_x) + v_{1y}(EPP_y - E1_y)}{v_{1x}^2 v_{1y}^2} \quad (4.30)$$

$$A = |\vec{v}_A| = |E1 + r \cdot \vec{v}_1 - EPP| = \sqrt{(E1_x + r v_{1x} - EPP_x)^2 + (E1_y + r v_{1y} - EPP_y)^2} \quad (4.31)$$

Für jeden Kontureckpunkt muss mit dem vorhergehenden Kontureckpunkt ein Edge Event Punkt EPP und der entsprechende Abstand A berechnet und gespeichert werden. Der erste Edge Event ereignet sich bei jenem Edge Event Punkt, der den geringsten Abstand A zur Schattenwurfkontur hat. Der zweite Edge Event ist bei jenem Edge Event Punkt mit dem zweitkleinsten Abstand und so weiter. So werden schrittweise neue Konturen berechnet, die immer weiter nach innen wandern.

Wie Abbildung 4.18 rechts zeigt, kann es vorkommen, dass der berechnete Edge Event Punkt auf der falschen Seite der Schattenwurfkontur liegt. Dieser Edge Event Punkt hat für das Konturoffset keine Bedeutung und muss nicht berücksichtigt werden. Die Überprüfung, ob ein Eckpunkt oberhalb oder unterhalb der Schattenwurfkontur liegt, erfolgt mit dem q-Faktor. Ist dieser positiv, liegt der Edge Event Punkt EEP unterhalb der Kontur. Ist er negativ, liegt der Edge Event Punkt EEP oberhalb der Kontur. Falls er oberhalb der Kontur liegt, muss der Abstand A nicht berechnet werden und wird einfach auf unendlich gesetzt. Damit wird dieser Edge Event Punkt bei der Berechnung von Konturoffsets nie einen Edge Event hervorrufen.

4.9.3 Aufrücken der Eckpunkte

Bei einem Edge Event oder bei der Berechnung eines Konturoffsets muss jeder Eckpunkt aus der Kontur um den Abstand A zum Edge Event Punkt oder um den Konturabstand aufgerückt werden. Abbildung 4.19 links zeigt, wie die Berechnung für einen einzelnen Kontureckpunkt E1 erfolgt.

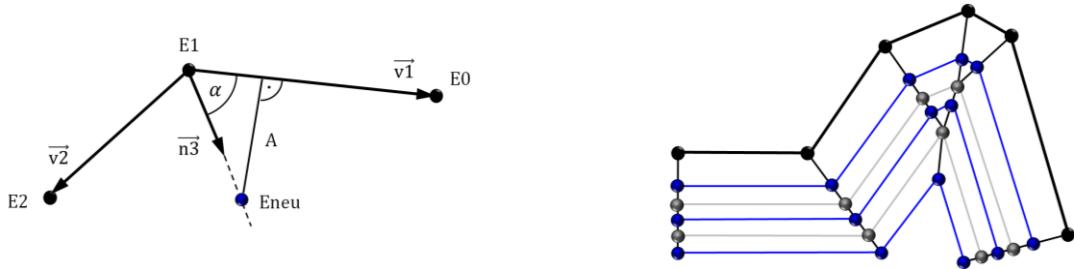


Abbildung 4.19: Aufrücken der Eckpunkte

Zuerst wird mit dem Kantenvektor \vec{v}_1 und der Winkelhalbierenden \vec{n}_3 der dazwischenliegende Winkel α mit Formel (4.32) berechnet. Mit diesem Winkel und dem Abstand A kann mit Formel (4.33) berechnen werden, um wie viel der Eckpunkt E1 verschoben werden muss, damit man den neuen Eckpunkt Eneu erhält.

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\vec{v}_1 \cdot \vec{n}_3}{|\vec{v}_1| \cdot |\vec{n}_3|} \right) \quad (4.32)$$

$$E_{\text{neu}} = E_1 + \vec{n}_3 \cdot A / \sin(\alpha) = E_1 + \vec{n}_3 \cdot A / \sqrt{1 - \left(\frac{\vec{v}_1 \cdot \vec{n}_3}{|\vec{v}_1| \cdot |\vec{n}_3|} \right)^2} \quad (4.33)$$

Abbildung 4.19 rechts zeigt wie durch das Konturoffset die Eckpunkte verschoben werden und neue Konturen entstehen. Die grauen Offsetkonturen resultieren aus einem Edge Event und die Blauen aus einem Konturoffset.

4.10 Anpassen der Hatchenden

Die Start- und Endpunkte der berechneten Konturoffsets werden rechtwinklig zur Schattenwurfkontur verschoben. Dadurch sind diese mit zunehmendem Konturabstand unterschiedlich gegenüber der Schattenwurfkontur verschoben. Um die Bearbeitung zu optimieren werden alle Start- und Endpunkte um die Hatchverlängerung l_v gegenüber der Deckkante ausgerichtet. Dadurch reichen die Laserbahnen immer mit einer konstanten und definierten Länge über die abzutragende Nut hinaus. In Abbildung 4.20 ist die Anpassung der Hatchenden dargestellt, wobei die Konturoffsets dunkelblau und die Deckkante hellblau eingefärbt sind.

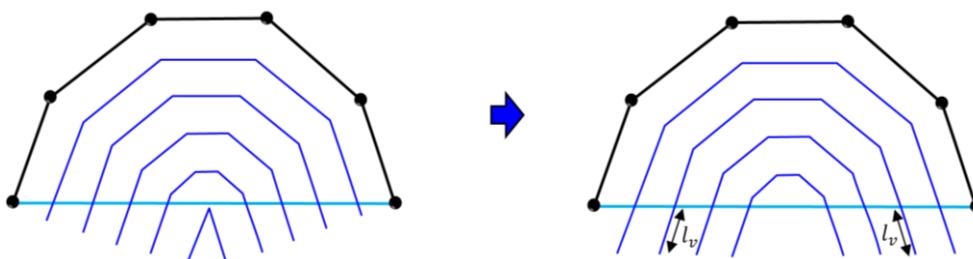


Abbildung 4.20: Verlängerung der Hatchenden

Zur Bestimmung der neuen Positionen der Start- und Endpunkte $S1'$ und $E2'$ werden für jede Kontur die Schnittpunkte $I1$ und $I2$ zwischen dem Konturoffset und der Deckkante berechnet. In Abbildung 4.21 sind diese als hellblaue Punkte zu erkennen.

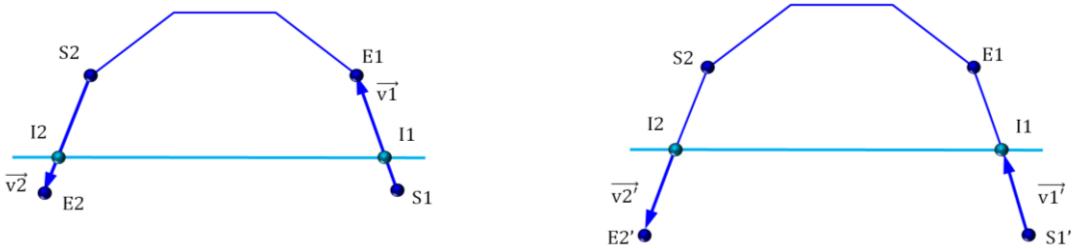


Abbildung 4.21: Berechnung der neuen Start- und Endpunkte einer Kontur

Mit den Konturkanten, auf denen die Schnittpunkte $I1$ und $I2$ zu liegen kommen, werden die Kantenvektoren $\vec{v1}$ und $\vec{v2}$ gebildet. Werden diese Vektoren normiert und um die Hatchverlängerung l_v skaliert, erhält man die Vektoren $\vec{v1}'$ und $\vec{v2}'$. Diese können nach Formel (4.34) und Formel (4.35) zu den Intersektionspunkten $I1'$ und $I2'$ subtrahiert oder addiert werden, um die neuen Start- und Endpunkte $S1'$ und $E2'$ zu erhalten.

$$S1' = I1 - \vec{v1}' = I1 - l_v \cdot \frac{\vec{v1}}{|\vec{v1}|} \quad (4.34)$$

$$E2' = I2 + \vec{v2}' = I2 + l_v \cdot \frac{\vec{v2}}{|\vec{v2}|} \quad (4.35)$$

4.11 Kurze Konturkanten entfernen

Für die Ansteuerung von jedem Eckpunkt auf der Kontur mit dem Laser wird eine Zeile NC-Code erstellt. Bei vielen kurz aufeinanderfolgenden Befehlen können in der Steuerung Bufferprobleme auftreten. Deshalb macht es Sinn, dicht aufeinanderliegende Eckpunkte aus der Kontur zu entfernen. Durch Definition einer Mindestlänge kann man die Konturkanten, die eine kürzere Länge haben, gezielt zusammenfassen und die entsprechenden Eckpunkte überspringen. Abbildung 4.22 zeigt wie diese Strategie funktioniert.

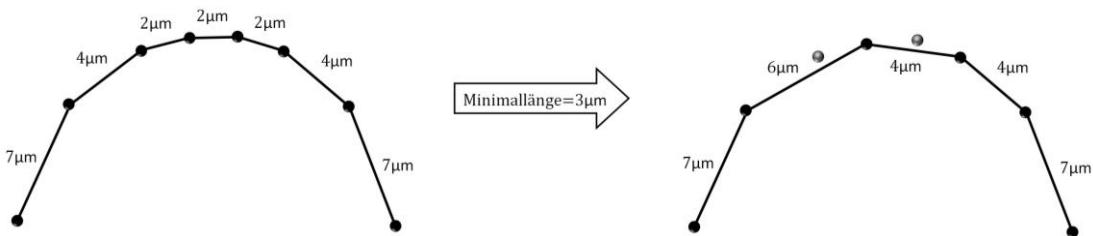


Abbildung 4.22: Überspringen von sehr kurzen Konturkanten

In der Schattenwurfkontur kommt es selten vor, dass Eckpunkte nahe aufeinanderliegen. Deshalb bleibt diese Kontur meist von der Löschung einzelner Eckpunkte verschont und behält so ihre Formgenauigkeit. Bei den Konturen, die durch das Konturoffset berechnet werden und bei welchen die Eckpunkte zueinander aufrücken, verringert sich der Abstand zwischen den Konturpunkten. Bei diesen Konturen gibt es mehr dicht aufeinanderfolgende Punkte, die entfernt werden. Dadurch wird die Form dieser Konturen verfälscht. Allerdings werden die Konturen des Konturoffsets sowieso meist geschruppt. Deshalb ist es hier nicht so gravierend, dass einzelne Eckpunkte entfernt werden.

4.12 Zusammenfassen der Hatchlinien

Bei der Laserbearbeitung können die Bahnen der berechneten Hatches auf zwei unterschiedliche Arten abgefahren werden. In Abbildung 4.23 werden beide Strategien veranschaulicht. Dabei sind die Bahnpunkte als schwarze Punkte zu erkennen. Die Schattenwürfe und die entsprechenden Konturoffsets, die in jedem Bahnpunkt berechnet werden, sind als dünne Linien zu erkennen. Nach der einen Strategie werden mehrere Laserbahnen zusammengefasst und von einem zum nächsten Bahnpunkt zusammen abgefahren. Diese Schruppstrategie ist in Abbildung 4.23 links dargestellt. Nach der zweiten Strategie wird von Bahnpunkt zu Bahnpunkt immer dieselbe Laserbahn abgefahren. Dafür wird die gesamte Bahnlinie mehrmals abgefahren, um alle Laserbahnen einmal zu erreichen. Diese Schlichtstrategie ist in Abbildung 4.23 mittig und rechts dargestellt. Um bei der Laserbearbeitung zwischen diesen Strategien unterscheiden zu können muss definiert sein, ab welchem Konturoffset die Laserbahnen zusammengefasst werden. In Abbildung 4.23 werden ab der Laserbahn 3 alle Konturen zusammengefasst und gemeinsam abgetragen. Die Nummerierung der Laserbahnen erfolgt dabei vom Schattenwurf ausgehend. Bei grossen Schattenwürfen, wie man sie bei der Durchmesserreduktion beim Umfangsabtrag hat, macht es Sinn, die einzelnen Laserbahnen nach der Schlichtstrategie abzufahren, das heisst den Parameter, ab welchem die Laserbahnen zusammengefasst werden, sehr hoch zu wählen.

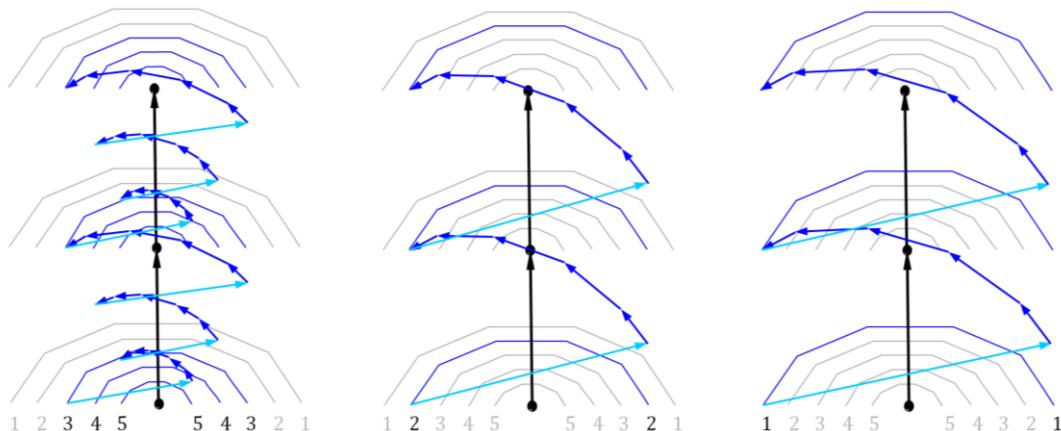


Abbildung 4.23: Schruppstrategie links und Schlichtstrategie mittig und rechts

Im CAM Programm werden die einzelnen Laserbahnen, die zusammen nach der Schruppstrategie abgefahrene werden, in dieselbe Hatchmatrix zusammengelegt. Die Laserjumplinien, welche die zusammenhängenden Laserbahnen verbinden und in Abbildung 4.23 hellblau eingefärbt sind, werden in dieser Matrix durch eine 0 gekennzeichnet. Die blauen Laserbahnen selbst werden durch eine 1 gekennzeichnet. Dadurch können die Laserjumplinien auch bei zusammengefasster Hatchmatrix von den normalen Laserbahnen unterschieden werden.

4.13 Berechnung des Vorschubes

Der Vorschub für die mechanischen Achsen, insbesondere der dominanten Drehachse, kann durch die gegebene Länge der Laserlinien und gegebene Scan- und Jumpgeschwindigkeit berechnet werden. Dazu wird für jedes Liniensegment die Länge l_n nach Formel (4.36) berechnet und entsprechend dem Linientyp durch die Scan- oder Jumpgeschwindigkeit v_n geteilt. Dadurch erhält man für jedes Liniensegment die Bearbeitungszeit t_n , die nötig ist um eine Linie abzufahren. Durch Aufsummieren der Bearbeitungszeiten t_n erhält man nach Formel (4.37) die gesamte Bearbeitungszeit t_{tot} , die nötig ist, um die Laserbahnen von einem gesamten Hatch abzufahren.

$$l_n = \sqrt{(x_{n+1} - x_n)^2 + (y_{n+1} - y_n)^2} \quad (4.36)$$

$$t_{tot} = \sum t_n = \sum \frac{l_n}{v_n} \quad (4.37)$$

Der Vorschub v_c für die dominante Drehachse C kann durch Teilen des Bahnwinkels w_c , der zwischen den zwei Bahnpunkten aufgespannt wird, durch die gesamte Bearbeitungszeit t_{tot} des Hatches nach Formel (4.38) berechnet werden.

$$v_c = \frac{w_c}{t_{tot}} \quad (4.38)$$

Falls der Vorschub v_c der dominanten Drehachse C die maximale Vorschubgeschwindigkeit v_{cmax} überschreitet, muss die Jumpgeschwindigkeit dieser ersten Jumplinie soweit reduziert werden, bis der Vorschub v_c genau der maximalen Vorschubgeschwindigkeit v_{cmax} entspricht.

4.14 Orientierung der Laserbahnen

Bei der Berechnung der Konturoffsets werden die Eckpunkte der Konturen so abgespeichert, dass der erste Eckpunkt auf der rechten Seite des letzten Eckpunkts zu liegen kommt. Folgt man den Eckpunkten in dieser Reihenfolge, werden die Laserbahnen im Gegenuhrzeigersinn abgefahren, wie es Abbildung 4.24 links zeigt. Dadurch entstehen zwischen den Laserbahnen lange Jumplinien, die in Abbildung 4.24 hellblau eingefärbt sind. Ändert man die Reihenfolge der Eckpunkte jeder zweiten Kontur ändert auch die Richtung, in der jede zweite Kontur abgefahren wird. Dadurch werden die Laserbahnen im Zickzack abgefahren und es entstehen kürzere Jumplinien, wie in Abbildung 4.24 rechts zu sehen ist.

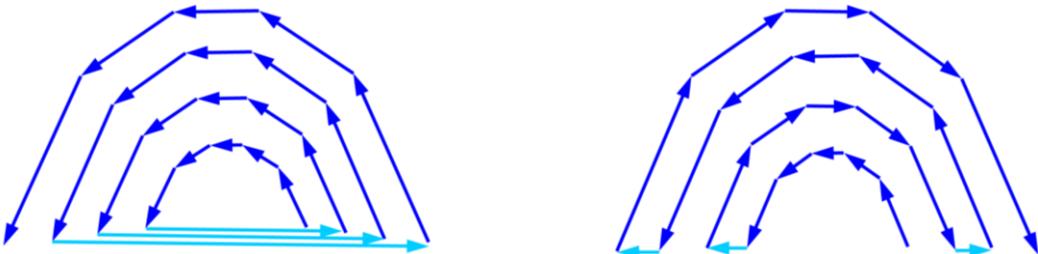


Abbildung 4.24: Laserbahnen werden im Gegenuhrzeigersinn oder im Zickzack abgefahren

4.15 Die Benutzeroberfläche

Um die Interaktion mit dem CAM Programm zu vereinfachen wurde eine Benutzeroberfläche erstellt. Dadurch ist die Eingabe der Parameter verständlicher und die Darstellung der berechneten Bahnlinie und Laserbahnen übersichtlich.

4.15.1 Aufbau der Benutzeroberfläche

Auf Abbildung 4.25 ist die Benutzeroberfläche des CAM Programms dargestellt. Diese kann in zwei Bereiche unterteilt werden. Die Eingabe der Parameter zur Berechnung der Laserbahnen erfolgt im linken Bereich. Der rechte Bereich dient der Darstellung der Stl-Datei, der Bahnlinie, dem Schattenwurf und den berechneten Laserbahnen. Mittels der Kästchen unterhalb der Grafik kann man auswählen, welche Geometrie dargestellt werden soll. Die Darstellung der abgerollten Geometrie ist hilfreich bei der Entscheidung, ob die Bahnlinie über die X oder Y-Koordinaten berechnet werden soll. Je nach dem folgt die Bahnlinie nach der einen oder der anderen Berechnung besser der abgerollten Geometrie.

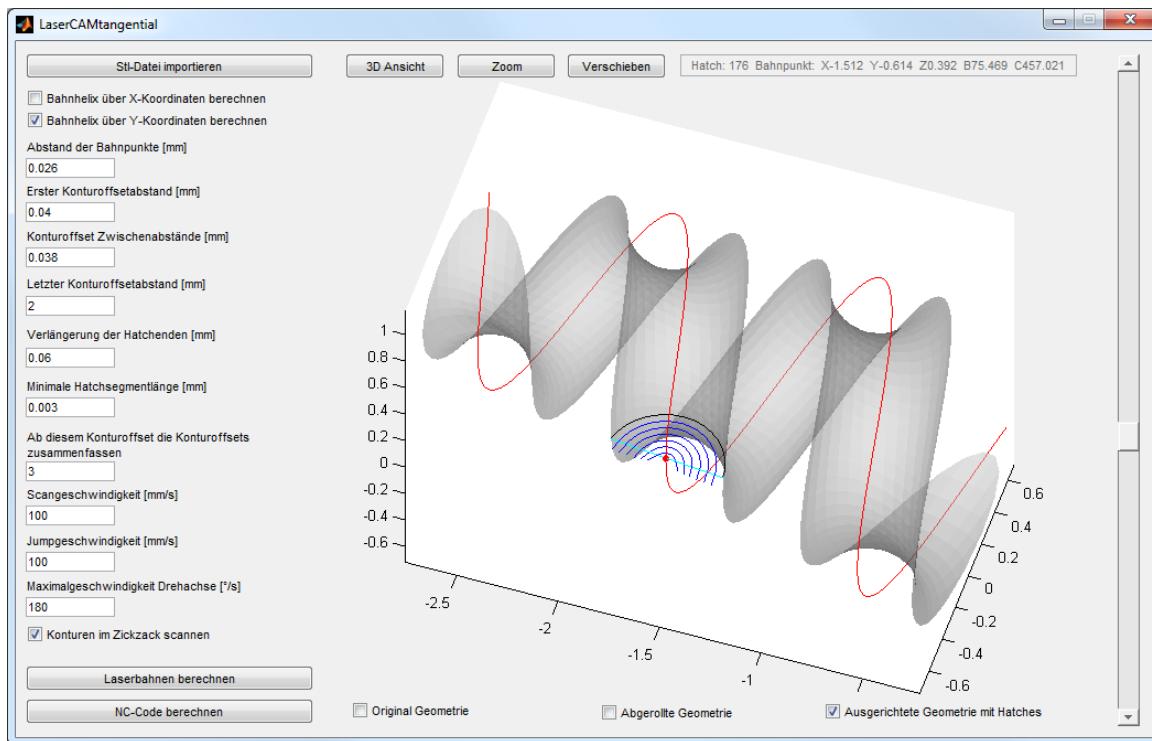


Abbildung 4.25: Benutzeroberfläche des CAM Programms

Die Geometrie der Stl-Datei wird in der Grafik grau dargestellt. Die berechnete Bahnlinie ist als rote Linie zu erkennen. Damit die Darstellung übersichtlich bleibt, werden immer nur die Laserbahnen eines Bahnpunktes angezeigt. Der aktuelle Bahnpunkt ist durch einen roten Punkt gekennzeichnet. Ausgehend von diesem Bahnpunkt wurde der schwarz dargestellte Schattenwurf mit der hellblauen Abschlusskante berechnet. Die daraus hergeleiteten Laserbahnen, die aus dem Konturoffset resultieren, sind blau eingefärbt. Mit dem Slider am rechten Rand der Benutzeroberfläche kann man durch alle Bahnpunkte der berechneten Schattenwürfe und Laserbahnen fahren. Auf dem Textfeld oben rechts wird angezeigt welcher Hatch gerade dargestellt wird und welches die Koordinaten des aktuellen Bahnpunktes sind. Zudem sind die Dreh- und Schwenkwinkel angegeben, um welche die Geometrie im aktuellen Bahnpunkt verdreht ist. Am oberen Rand der Benutzeroberfläche sind drei Schaltflächen angeordnet. Mit diesen kann die Ansicht der Grafik verändert werden.

4.15.2 Parameter zur Bahnberechnung

Im linken Bereich der Benutzeroberfläche erfolgt die Eingabe der Parameter zur Berechnung der Laserbahnen. In Abbildung 4.26 ist die Bedeutung der wichtigsten Parameter auf der Benutzeroberfläche nochmals mit Legende zusammengefasst.

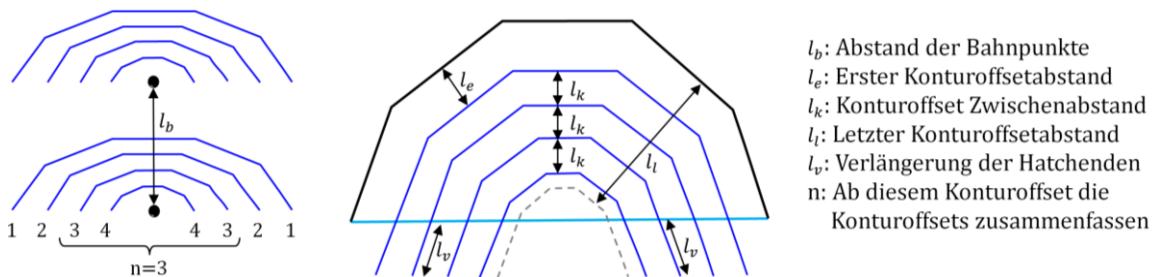


Abbildung 4.26: Darstellung der Eingabeparameter für die Bahnberechnung

4.15.3 Erstellen des NC-Codes

Durch Anklicken der Schaltfläche „NC-Code berechnen“ (siehe Abbildung 4.25) öffnet sich das in Abbildung 4.27 dargestellte Fenster. In diesem können die einzelnen NC-Befehle auf die Maschine angepasst werden.

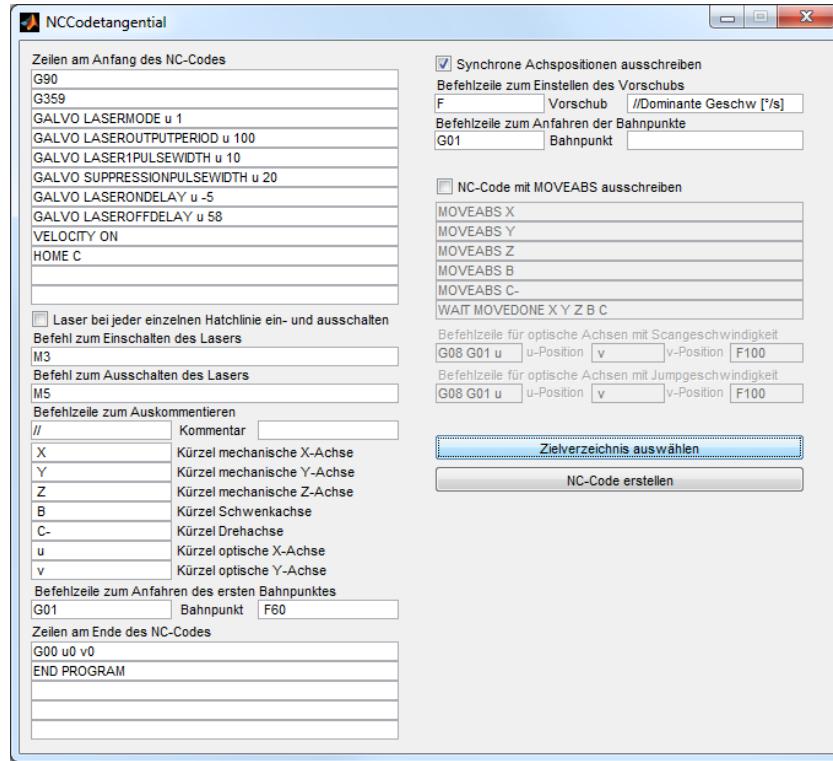


Abbildung 4.27: Anpassung der NC-Befehle

Der NC-Code kann auf zwei unterschiedliche Arten ausgeschrieben werden.

1. Wird ein Häkchen bei „Synchrone Achspositionen ausschreiben“ gesetzt, wird zu jeder optischen Bahnposition zusätzlich die interpolierte Bahnposition der mechanischen Achsen ausgeschrieben. Falls zwei aufeinanderfolgende Achspositionen identisch sind, wird dies nicht erneut ausgeschrieben. Grundsätzlich wird für alle Bearbeitungen diese Strategie empfohlen.
2. Selektiert man die Auswahl „NC-Code mit MOVEABS ausschreiben“ wird ein für Aerotech Steuerungen vereinfachter NC-Code ausgeschrieben. Durch die MOVEABS Befehle können den mechanischen Achsen die Zielpositionen und Vorschübe vorgegeben werden. Während die Achsen die Zielposition anfahren, können simultan die Befehle der optischen Achsen für die Laserbahnen ausgeführt werden. Mit dem Befehl WAIT MOVEDONE X Y Z B C wird nach den vollendeten optischen Laserbahnen gewartet, bis die mechanischen Achsen ihre Zielposition erreichen.

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

5

Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Um das Abtragsverhalten des Lasers auf Zirkonoxid zu untersuchen, wurde die Schwellfluenz bestimmt und eine radiale und eine tangentiale Parameterstudie durchgeführt. Aus diesen Versuchen konnte ermittelt werden, mit welchen Einstellungen und Parametern auf dem Versuchsaufbau eine geeignete Bearbeitung möglich ist. Mithilfe der CAM Programme wurden radiale und tangentiale Zahnimplantate durch Laserbearbeitung hergestellt. Bei allen Versuchen wurde Aluminiumoxid verstärktes Zirkonoxid (ATZ) verwendet. Dieses wurde vom Hersteller METOXIT bezogen und trägt den Markennamen ZIRALDENT®. Detaillierte Kennwerte des Materials sind der Abbildung A.6 im Anhang zu entnehmen.

5.1 Bestimmung der Schwellfluenz

Wie in [3] beschrieben und Kapitel 2.1.3 erläutert, ist der Durchmesser des Abtragsspots eines einzelnen Laserpulses von der Laserleistung abhängig. Durch Messen verschiedener Spotdurchmesser, die mit unterschiedlichen, bekannten Pulsennergien abgetragen wurden, lässt sich die Schwellfluenz herleiten. Dazu wurden 20 vertikale Laserbahnen mit einem Linienabstand von 100 µm und einer Schreibgeschwindigkeit von 1000 mm/s abgefahrene. Über den Puspicker wurde die Pulsfrequenz auf 10 kHz reduziert. Dadurch resultiert ein Pulsabstand von 100 µm. Die kreisförmigen Abtragsspots sind auf der Aufnahme in Abbildung 5.1 links zu erkennen.

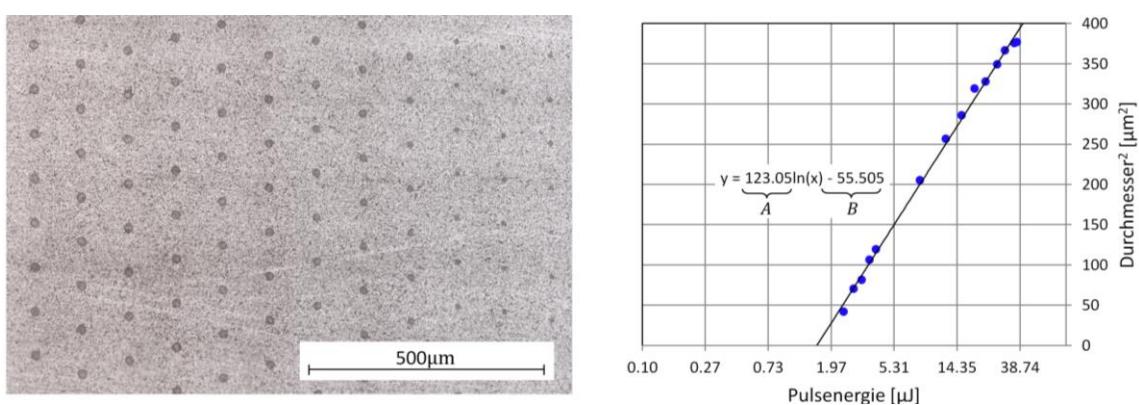


Abbildung 5.1: Abtragsspots auf Zirkonoxid und Diagramm zur Bestimmung der Schwellfluenz

Nach jeder vertikalen Laserbahn wurde von links nach rechts die Laserleistung reduziert. Deshalb sind die Spots auf der linken Seite grösser als jene rechts. Aus jeder Laserbahn wurden fünf Spotdurchmesser gemessen und gemittelt. Wenn man die Durchmesser im Quadrat logarithmisch über die Pulsennergie aufträgt, liegen diese auf einer Geraden. Dies ist auch in dem Diagramm auf Abbildung 5.1 rechts zu erkennen. Durch eine logarithmische Kurvenanpassung können die Koeffizienten A und B der Ausgleichsgerade berechnet werden. Dort wo sich die Ausgleichsgerade mit der Abszisse schneidet, liegt der Schwellwert der Pulsennergie E_{thr} . Dieser lässt sich nach Formel (5.39) aus den Koeffizienten berechnen und beträgt 1.57 µJ.

$$E_{thr} = e^{-\frac{B}{A}} = 1.57 \mu J \quad (5.39)$$

Über die Steigung der Ausgleichsgeraden mit Koeffizient A lässt sich mit Formel (5.40) den Strahlradius w_0 berechnen.

$$w_0 = \sqrt{\frac{A}{2}} = 7.8 \mu m \quad (5.40)$$

Mit dem Schwellwert der Pulsennergie E_{thr} und dem Strahlradius w_0 kann mit Formel (5.41) die Schwellfluenz F_{thr} berechnet werden.

$$F_{thr} = \frac{2 E_{thr}}{\pi w_0^2} = 1.63 J/cm^2 \quad (5.41)$$

Ein Materialabtrag auf Zirkonoxid durch einen einzelnen Laserpuls findet erst statt, wenn die Abtragsschwelle mit einer Schwellfluenz von 1.63 J/cm² überschritten wird.

5.2 Parameterstudien auf Zirkonoxid

Um bei der Laserbearbeitung einen optimalen Abtrag zu erreichen, ist es entscheidend, dass man geeignete Parametersätze bei der Bearbeitung verwendet. Diese sind vom verwendeten Versuchsaufbau und natürlich dem entsprechenden Material abhängig. Es wurden zwei Parameterstudien für Zirkonoxid durchgeführt. Eine für radiale Laserbearbeitung und eine für tangentiale Laserbearbeitung. Weil sich diese Strategien stark unterscheiden, wurden die Studien getrennt durchgeführt.

5.2.1 Radiale Parameterstudie

Bei der radialen Laserbearbeitung trifft der Laserstrahl senkrecht auf das abzutragende Material. Der Abtrag erfolgt in radialen Schichten von aussen nach innen. Um die Auswertung der radialen Parameterstudie zu vereinfachen wurden keine zylinderförmigen Rohlinge benutzt sondern eine Flachprobe aus Zirkonoxid. Auch hier trifft der Strahl senkrecht auf das Material und trägt dieses Schicht um Schicht entgegen der Z-Achse ab. Obwohl der Abtrag bei der Probe in kartesischen Koordinaten erfolgte ist diese Studie radiale Parameterstudie benannt, weil das Prinzip des Abtrages das gleiche ist.

Die wichtigsten Parameter, die man bei der radialen Laserbearbeitung variieren kann, sind die Laserleistung, die Pulsfrequenz, die Scangeschwindigkeit und der Bahnabstand. Die entsprechenden Parameterwerte, die in der Parameterstudie verwendet wurden, sind in Abbildung 5.2 zusammengefasst.

Die Pulsfrequenz des Femtosekundenlasers liegt herstellungsbedingt bei 200 kHz und wurde bei der Parameterstudie konstant auf diesem Wert belassen. Das Halbieren der Pulsfrequenz ist

technisch möglich, wurde aber nicht angewendet, weil dadurch der Pulsüberlapp und die Leistung deutlich reduziert werden.



Abbildung 5.2: Parameterabhängigkeit der radialen Parameterstudie

Aus der Laserleistung und der Pulsfrequenz kann die Pulsenergie nach Formel (5.42) berechnet werden.

$$E_P = \frac{P}{f_P} \quad (5.42)$$

Da die Pulsfrequenz konstant gehalten wird, ist die Pulsenergie nur abhängig von der Laserleistung und berechnet sich zu 2.5 μJ , 5 μJ und 10 μJ .

Bei der radialen Laserbearbeitung ist die Überlappung der einzelnen Laserpulse von entscheidender Bedeutung. Bei zu geringer Überlappung, bleibt zwischen den Pulsen unabgetragenes Material zurück und es resultiert eine geringere Oberflächenqualität. Bei zu starker Überlappung kann es zwei Arten von Überlappungen geben. Die Pulsüberlappung gibt an wie stark sich die Pulse in Bahnrichtung überlappen und ist abhängig von der Scangeschwindigkeit, der Pulsfrequenz und dem Spotdurchmesser. Sie lässt sich nach Formel (5.43) berechnen.

$$U_p = 1 - \frac{l_p}{d_s} = 1 - \frac{v_s}{d_s f_p} \quad (5.43)$$

Die Bahnüberlappung gibt an, wie stark sich die Pulse zwischen den Bahnen überlappen. Diese ist abhängig vom Bahnabstand und dem Pulsdurchmesser und lässt sich nach Formel (5.44) berechnen.

$$U_b = 1 - \frac{l_b}{d_s} \quad (5.44)$$

Abbildung 5.2 rechts veranschaulicht wie die Parameter der Überlappung zusammenhängen.

Die Parameterstudie wurde vollfaktoriell ausgeführt und jeder Parameter gegen jeden ausprobiert. Insgesamt wurden 27 Versuche durchgeführt. In jedem Versuch wurden sechs Taschen mit 1 mm Breite und 4 mm Länge abgetragen. Bei zwei Taschen wurde eine Schicht, bei zwei Taschen fünf Schichten und bei zwei Taschen 20 Schichten abgetragen. Abbildung 5.3 zeigt wie die abgetragenen Taschen bei jedem Versuch orientiert und dimensioniert sind.

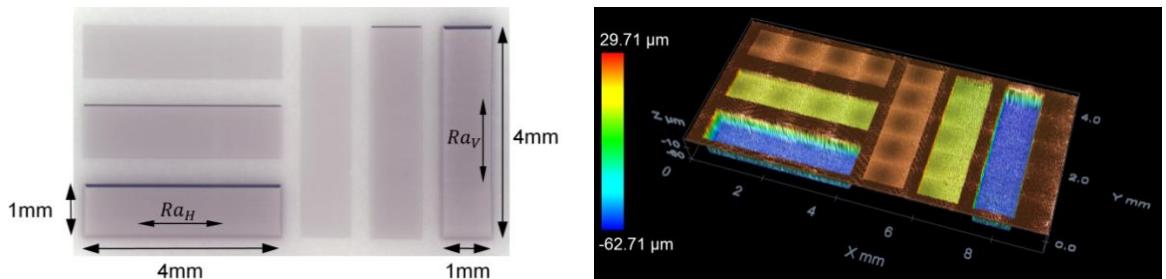


Abbildung 5.3: Dimensionen der radialen Parameterstudie

5 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Zur Beurteilung der Bearbeitungsqualität wurde der Rauheitswert Ra der beiden tiefsten Taschen einmal horizontal zur Bahnrichtung und einmal vertikal quer zur Bahnrichtung mit dem Mikroskop Leica DCM 3D gemessen und jeweils über fünf Messungen gemittelt. Dabei wurde eine Grenzwellenlänge von 0.8 mm und eine Gesamtstrecke von 4 mm verwendet. Zusätzlich wurde zu jedem Parametersatz die Tiefe beider Taschen mit 20 Abtragsschichten fünfmal gemessen und gemittelt. Aus der Taschentiefe und der Bearbeitungszeit wurde die Abtragsrate Q berechnet. Alle relevanten Parameter zur Beurteilung der Parametersätze sind in Tabelle 5.1 zusammengetragen.

	$v_s=250 \text{ mm/s}$ $l_p=1.25 \mu\text{m}$ $U_p=94.3 \%$	$v_s=500 \text{ mm/s}$ $l_p=2.5 \mu\text{m}$ $U_p=88.6 \%$	$v_s=1000 \text{ mm/s}$ $l_p=5 \mu\text{m}$ $U_p=77.2 \%$
$l_b=2.5 \mu\text{m}$ $U_b=88.6 \%$	$E_p=2.5 \mu\text{J}$ $Ra_H=0.41 \mu\text{m}$ $Ra_V=0.73 \mu\text{m}$ $T_{20}=146 \mu\text{m}$ $Q=0.24 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra_H=0.41 \mu\text{m}$ $Ra_V=0.53 \mu\text{m}$ $T_{20}=70 \mu\text{m}$ $Q=0.23 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra_H=0.34 \mu\text{m}$ $Ra_V=0.38 \mu\text{m}$ $T_{20}=31 \mu\text{m}$ $Q=0.21 \text{ mm}^3/\text{min}$
	$E_p=5 \mu\text{J}$ $Ra_H=0.68 \mu\text{m}$ $Ra_V=1.4 \mu\text{m}$ $T_{20}=250 \mu\text{m}$ $Q=0.42 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra_H=0.81 \mu\text{m}$ $Ra_V=1.16 \mu\text{m}$ $T_{20}=158 \mu\text{m}$ $Q=0.53 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra_H=0.43 \mu\text{m}$ $Ra_V=0.66 \mu\text{m}$ $T_{20}=68 \mu\text{m}$ $Q=0.45 \text{ mm}^3/\text{min}$
	$E_p=10 \mu\text{J}$ $Ra_H=4.8 \mu\text{m}$ $Ra_V=8.87 \mu\text{m}$ $T_{20}=360 \mu\text{m}$ $Q=0.6 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra_H=1.31 \mu\text{m}$ $Ra_V=2.18 \mu\text{m}$ $T_{20}=215 \mu\text{m}$ $Q=0.72 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra_H=0.5 \mu\text{m}$ $Ra_V=0.95 \mu\text{m}$ $T_{20}=121 \mu\text{m}$ $Q=0.81 \text{ mm}^3/\text{min}$
	$E_p=2.5 \mu\text{J}$ $Ra_H=0.35 \mu\text{m}$ $Ra_V=0.54 \mu\text{m}$ $T_{20}=72 \mu\text{m}$ $Q=0.24 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra_H=0.28 \mu\text{m}$ $Ra_V=0.41 \mu\text{m}$ $T_{20}=34 \mu\text{m}$ $Q=0.23 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra_H=0.27 \mu\text{m}$ $Ra_V=0.27 \mu\text{m}$ $T_{20}=16 \mu\text{m}$ $Q=0.21 \text{ mm}^3/\text{min}$
	$E_p=5 \mu\text{J}$ $Ra_H=0.56 \mu\text{m}$ $Ra_V=1.15 \mu\text{m}$ $T_{20}=100 \mu\text{m}$ $Q=0.33 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra_H=0.49 \mu\text{m}$ $Ra_V=0.65 \mu\text{m}$ $T_{20}=74 \mu\text{m}$ $Q=0.49 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra_H=0.3 \mu\text{m}$ $Ra_V=0.47 \mu\text{m}$ $T_{20}=36 \mu\text{m}$ $Q=0.48 \text{ mm}^3/\text{min}$
	$E_p=10 \mu\text{J}$ $Ra_H=0.86 \mu\text{m}$ $Ra_V=2.13 \mu\text{m}$ $T_{20}=300 \mu\text{m}$ $Q=1 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra_H=0.76 \mu\text{m}$ $Ra_V=1.21 \mu\text{m}$ $T_{20}=144 \mu\text{m}$ $Q=0.96 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra_H=0.38 \mu\text{m}$ $Ra_V=0.88 \mu\text{m}$ $T_{20}=58 \mu\text{m}$ $Q=0.77 \text{ mm}^3/\text{min}$
$l_b=10 \mu\text{m}$ $U_b=54.5 \%$	$E_p=2.5 \mu\text{J}$ $Ra_H=0.38 \mu\text{m}$ $Ra_V=1.17 \mu\text{m}$ $T_{20}=40 \mu\text{m}$ $Q=0.27 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra_H=0.6 \mu\text{m}$ $Ra_V=1.55 \mu\text{m}$ $T_{20}=17 \mu\text{m}$ $Q=0.23 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra_H=0.34 \mu\text{m}$ $Ra_V=0.73 \mu\text{m}$ $T_{20}=9 \mu\text{m}$ $Q=0.24 \text{ mm}^3/\text{min}$
	$E_p=5 \mu\text{J}$ $Ra_H=0.51 \mu\text{m}$ $Ra_V=1.03 \mu\text{m}$ $T_{20}=85 \mu\text{m}$ $Q=0.57 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra_H=0.46 \mu\text{m}$ $Ra_V=1.3 \mu\text{m}$ $T_{20}=38 \mu\text{m}$ $Q=0.51 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra_H=0.46 \mu\text{m}$ $Ra_V=1.0 \mu\text{m}$ $T_{20}=18 \mu\text{m}$ $Q=0.48 \text{ mm}^3/\text{min}$
	$E_p=10 \mu\text{J}$ $Ra_H=0.55 \mu\text{m}$ $Ra_V=1.26 \mu\text{m}$ $T_{20}=148 \mu\text{m}$ $Q=0.99 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra_H=0.58 \mu\text{m}$ $Ra_V=1.11 \mu\text{m}$ $T_{20}=68 \mu\text{m}$ $Q=0.91 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra_H=0.56 \mu\text{m}$ $Ra_V=1.14 \mu\text{m}$ $T_{20}=30 \mu\text{m}$ $Q=0.8 \text{ mm}^3/\text{min}$

Tabelle 5.1: Messergebnisse der radialen Parameterstudie

Bei der radialen Parameterstudie wurde festgestellt, dass bei einem Bahnabstand von 10 μm Rillen zwischen den Bahnen zu erkennen sind. Diese sind auf die geringe Bahnüberlappung von 54.5 % zurückzuführen. In den Messergebnissen sind deshalb erhöhte Rauheitswerte quer zur Bahnrichtung zu erkennen. Zudem wurde festgestellt, dass bei einer Scangeschwindigkeit von 1000 mm/s Rillen in Bahnrichtung resultieren. Diese sind vermutlich auf die geringe

Pulsüberlappung von 77.2 % zurückzuführen. Außerdem lagert sich bei zu kleinem Bahnabstand oder erhöhter Pulsennergie und geringer Scangeschwindigkeit das abgetragene Material in der Tasche als weisse, pulverförmige Struktur ab. Dadurch wird der darunterliegende Materialabtrag erschwert und es findet kein kontrollierter Abtrag mehr statt. Diese Parametersätze sind in Tabelle 5.1 rot eingefärbt. Dieses Problem der Abführung des abgetragenen Materials aus der Tasche begrenzt die radiale Laserbearbeitung gewissermassen. Mit den restlichen, grün eingefärbten Parametersätzen wurden in einer zweiten Versuchsrunde nochmals Taschen mit jeweils 100 μm Tiefe abgetragen. Durch die einheitliche Tiefe konnten diese acht Parametersätze direkt untereinander verglichen werden. Es wurde wiederum die horizontale und vertikale Rauheit gemessen und die Abtragsrate berechnet. Daraus wurden die zwei Parametersätze, die in Tabelle 5.2 aufgeführt sind, ausgewählt. Der Parametersatz langsam hat eine geringere Abtragsrate, dafür eine bessere Oberflächenqualität. Der Parametersatz schnell hat eine geringere Oberflächenqualität dafür eine erhöhte Abtragsrate.

	Parametersatz langsam	Parametersatz schnell
Wellenlänge λ	520 nm	520 nm
Leistung P	0.5 W	2 W
Pulsfrequenz f_p	200 kHz	200 kHz
Pulsennergie E_p	2.5 μJ	10 μJ
Fluenz F	2.6 J/cm^2	10.4 J/cm^2
Scangeschwindigkeit v_s	500 mm/s	500 mm/s
Bahnabstand l_b	5 μm	5 μm
Schichtdicke l_z	1.3 μm	7.2 μm
Abtragsrate Q	0.18 mm^3/min	0.96 mm^3/min
Rauheit horizontal Ra_H	0.27 μm	0.58 μm
Rauheit horizontal Ra_V	0.64 μm	1.16 μm

Tabelle 5.2: Parametersätze aus der radialen Parameterstudie

5.2.2 Tangentiale Parameterstudie

Die tangentiale Laserbearbeitung ist nur bei Werkstückgeometrien möglich, die der Laserstrahl tangential touchieren kann. Deshalb wurden in der tangentialen Parameterstudie Zylinderrohrlinge mit 5 mm Durchmesser verwendet. Die wichtigsten Parameter, die man bei der tangentialen Laserbearbeitung variieren kann sind die Laserleistung, die Pulsfrequenz, die Scangeschwindigkeit, die radiale Zustellung und der Winkelschritt. Mit welchen Parameterwerten in der Parameterstudie gearbeitet wurde, ist der Abbildung 5.4 links zu entnehmen. Die entsprechenden Werte für die Pulsennergie die nach Formel (5.42) berechnet werden und die Werte für die Pulsüberlappung, die nach Formel (5.43) berechnet werden, sind ebenfalls aufgeführt.



Abbildung 5.4: Parameterabhängigkeit der tangentialen Parameterstudie

5 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Der Winkelschritt gibt an, um wie viel Grad das Werkstück beim Wiederholen eines Linienscans gedreht wird. Bei einem Winkelschritt von $1.5^\circ/\text{Radius}/\text{Scan}$ rotiert ein Werkstück mit 1mm Radius während einer Wiederholung des Scans beispielsweise um 1.5° . Der Winkelschritt lässt sich nach Formel (5.45) in den Bahnabstand umrechnen. Abbildung 5.4 rechts zeigt wie der Winkelschritt mit dem Bahnabstand zusammenhängt.

$$l_b = \frac{2 \pi \Delta w}{360^\circ} \quad (5.45)$$

Das Praktische am Bahnabstand ist, dass er durch seine Definition unabhängig vom Radius und der Dauer des Linienscans ist. Trotzdem kann mit ihm die Drehgeschwindigkeit über die gegebene Scangeschwindigkeit und die gegebene Länge des Linienscans berechnet werden.

Die tangentiale Parameterstudie wurde vollfaktoriell ausgeführt und insgesamt 24 Versuche durchgeführt. In jedem wurde von einem Zylinderrohling mit 5 mm Durchmesser eine Kerbe von 1mm Breite abgetragen. Bei jeder wurde radial bis zu einer Tiefe von 0.3 mm zugestellt. Abbildung 5.5 zeigt den Abtrag von sechs Kerben mit unterschiedlichen Parametern.

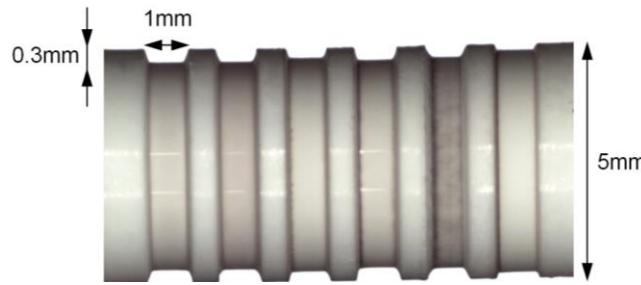


Abbildung 5.5: Dimensionen bei der tangentialen Parameterstudie

Zur Beurteilung der Parametersätze wurde von jeder Kerbe die erreichte Tiefe und der Rauheitswert Ra mit dem Alicona Infinte Focus gemessen und über fünf Messungen gemittelt. Es wurde eine Grenzwellenlänge von 0.8 mm und eine Gesamtmessstrecke von 1.5 mm verwendet. Durch die gemessene Tiefe und die Bearbeitungszeit konnte die Abtragsrate Q berechnet werden. Die zusammengetragenen Ergebnisse sind in Tabelle 5.3 aufgeführt.

		$E_p=40 \mu\text{J}$	$E_p=20 \mu\text{J}$	
		$l_b=13.1 \mu\text{m}$ $U_b=40.5 \%$	$l_b=26.2 \mu\text{m}$ $U_b=-19.1 \%$	$l_b=13.1 \mu\text{m}$ $U_b=40.5 \%$
$l_r=7.5 \mu\text{m}$	$v_s=100 \text{ mm/s}$ $l_p=0.5 \mu\text{m}$ $U_p=97.7 \%$	$Ra=0.13 \mu\text{m}$ $T=295 \mu\text{m}$ $Q=0.32 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra=0.17 \mu\text{m}$ $T=291 \mu\text{m}$ $Q=0.64 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra=0.13 \mu\text{m}$ $T=284 \mu\text{m}$ $Q=0.31 \text{ mm}^3/\text{min}$
	$v_s=200 \text{ mm/s}$ $l_p=1 \mu\text{m}$ $U_p=95.5 \%$	$Ra=0.136 \mu\text{m}$ $T=294 \mu\text{m}$ $Q=0.64 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra=0.176 \mu\text{m}$ $T=288 \mu\text{m}$ $Q=1.26 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra=0.162 \mu\text{m}$ $T=282 \mu\text{m}$ $Q=0.62 \text{ mm}^3/\text{min}$
	$v_s=400 \text{ mm/s}$ $l_p=2 \mu\text{m}$ $U_p=90.9 \%$	$Ra=0.16 \mu\text{m}$ $T=292 \mu\text{m}$ $Q=1.28 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra=0.64 \mu\text{m}$ $T=184 \mu\text{m}$ $Q=1.75 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra=0.5 \mu\text{m}$ $T=205 \mu\text{m}$ $Q=0.96 \text{ mm}^3/\text{min}$
$l_r=15 \mu\text{m}$	$v_s=100 \text{ mm/s}$ $l_p=0.5 \mu\text{m}$ $U_p=97.7 \%$	$Ra=0.17 \mu\text{m}$ $T=291 \mu\text{m}$ $Q=0.64 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra=0.18 \mu\text{m}$ $T=290 \mu\text{m}$ $Q=1.28 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra=0.19 \mu\text{m}$ $T=277 \mu\text{m}$ $Q=0.61 \text{ mm}^3/\text{min}$
	$v_s=200 \text{ mm/s}$ $l_p=1 \mu\text{m}$ $U_p=95.5 \%$	$Ra=0.18 \mu\text{m}$ $T=290 \mu\text{m}$ $Q=1.27 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra=0.5 \mu\text{m}$ $T=236 \mu\text{m}$ $Q=2.05 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra=0.534 \mu\text{m}$ $T=258 \mu\text{m}$ $Q=1.14 \text{ mm}^3/\text{min}$
	$v_s=400 \text{ mm/s}$ $l_p=2 \mu\text{m}$ $U_p=90.9 \%$	$Ra=0.5 \mu\text{m}$ $T=202 \mu\text{m}$ $Q=1.81 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra=0.51 \mu\text{m}$ $T=126 \mu\text{m}$ $Q=2.1 \text{ mm}^3/\text{min}$	$Ra=0.49 \mu\text{m}$ $T=132 \mu\text{m}$ $Q=1.2 \text{ mm}^3/\text{min}$

Tabelle 5.3: Messergebnisse der tangentialen Parameterstudie

Bei der tangentialen Parameterstudie wurde festgestellt, dass bei zu starker radialer Zustellung mit zu geringer Pulsleistung oder zu schneller Drehgeschwindigkeit eine zu geringe Abtragstiefe mit hoher Rauheit resultiert. Bei diesen rot eingefärbten Parametersätzen kann aufgrund der zu gross gewählten Zustellungsparameter kein kontrollierter Abtrag erfolgen. Bei den restlichen Parametersätzen sind bessere Rauheitswerte erreicht worden. Grundsätzlich kann man sagen, dass je langsamer der Abtrag erfolgt, umso geringer die Rauheit ist. Aus der tangentialen Parameterstudie wurden zwei Parametersätze ausgewählt. Ein langsamer Parametersatz mit guter Oberflächenqualität dafür geringer Abtragsrate und ein Parametersatz mit geringerer Oberflächenqualität dafür erhöhter Abtragsrate. Beide Parametersätze sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst.

	Parametersatz langsam	Parametersatz schnell
Wellenlänge λ	520 nm	520 nm
Leistung P	8 W	8 W
Pulsfrequenz f_P	200 kHz	200 kHz
Pulsenergie E_P	40 μ J	40 μ J
Fluenz F	41.8 J/cm ²	41.8 J/cm ²
Scangeschwindigkeit v_s	100 mm/s	100 mm/s
Winkelschritt Δw	0.75°/Radius/Scan	1.5°/Radius/Scan
Bahnabstand l_b	13.1 μ m	26.2 μ m
Radiale Zustellung l_r	7.5 μ m	15 μ m
Abtragsrate Q	0.32 mm ³ /min	1.28 mm ³ /min
Rauheit Ra	0.13 μ m	0.18 μ m

Tabelle 5.4: Parametersätze der tangentialen Parameterstudie

5.2.3 Vergleich der Parameterstudien

Wenn man die Parametersätze der radialen und tangentialen Parameterstudie vergleicht, stellt man fest, dass durch die tangentiale Bearbeitung wesentlich bessere Rauheitswerte trotz erhöhter Abtragsrate möglich sind. Aufgrund der erhöhten Qualität und Masshaltigkeit ist deshalb bei Geometrien, bei denen tangentiale Laserbearbeitung möglich ist, auch diese Strategie zu empfehlen. Die Ansammlung von abgetragenem Material behindert den Abtragsprozess bei der radialen Laserbearbeitung. Möglicherweise kann durch Ausblasen mit Druckluft während dem Prozess oder einer gezielten Absaugung dieses Problem verringert werden. Bei der tangentialen Laserbearbeitung ist die Abtragsrate durch die maximale Laserleistung begrenzt.

Eine weitere Einschränkung ist bei beiden Laserstrategien die begrenzte Genauigkeit der optischen Achsen mit zunehmender Markiergeschwindigkeit. Dies hängt vorwiegend mit der Steuerung zusammen, die bei schnellem und dichtem NC-Code zunehmend überlastet ist, ins Stocken gerät und falsche Positionssignale an den Scanner schickt. Aus diesem Grund wurden nur Markiergeschwindigkeiten bis 500 mm/s gewählt.

5.3 Das Implantat T16308

Das Implantat ZERAMEX® T ZERALOCK™ mit der Typennummer T16308 wurde als Vorlage zum Testen der verschiedenen Laserstrategien und CAM Programme verwendet. Dieses hat beim Hals einen Durchmesser von 4.2 mm und eine Gesamtlänge von 9.6 mm. Das Implantat besitzt eine gefräste Innengeometrie, mit der das Abutment über eine formschlüssige Verbindung aufgebracht werden kann. Diese Innengeometrie mit Hinterschneidungen kann mit dem Laser

5 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

nicht gefertigt werden. Ziel war es lediglich die Aussengeometrie des Implantats mit Gewindenut durch Laserbearbeitung herzustellen.

Die konventionelle Fertigung der Implantate erfolgt durch Schleifen mit Diamantwerkzeugen aus dem vollen und harten Rohling. Zur Verbesserung der Osseointegration werden die Implantate sandgestrahlt und thermisch geätzt [24].

In Abbildung 5.6 sind Aufnahmen des geschliffenen Implantats zu sehen. Durch das Schleifen wird eine glatte und glänzende Oberfläche mit geringer Rauheit erreicht. Der Ra-Wert beträgt $0.18 \mu\text{m}$ und der Rz-Wert $0.91 \mu\text{m}$. Diese Werte wurden mit einer Grenzwellenlänge von $0.8 \mu\text{m}$ über eine Messstrecke von 1.5 mm gemessen und über fünf Messungen gemittelt. Im Folgenden werden alle Rauheitswerte mit diesen Einstellungen gemessen. Damit sind sie direkt untereinander vergleichbar. Abbildung 5.6 rechts zeigt die vergrößerte Aufnahme der geschliffenen Oberfläche aus dem Grund der Gewindenut. Die einzelnen Schleifspuren der Diamantkörner sind klar zu erkennen.

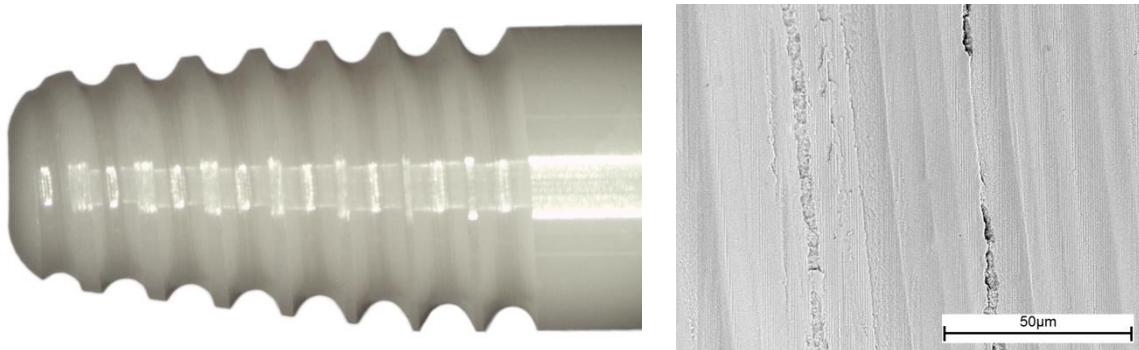


Abbildung 5.6: Das geschliffene Implantat

Mit dem Messgerät von Zoller wurde der Konturverlauf gemessen und mit der Sollkontur verglichen. In Abbildung 5.7 ist die Sollkontur braun und die gemessene Istkontur blau gepunktet dargestellt. Durch die elffache Überhöhungen sind die Abweichungen besser zu erkennen. Die violetten Stellen geben das Übermass an, das im Grund der Gewindenut gemessen wurde. Die roten Stellen geben das Untermass an, das auf dem Gewindegrat und der Spitze des Implantats gemessen wurde. Die maximale Abweichung beträgt $27 \mu\text{m}$ und die gesamte mittlere Abweichung $7 \mu\text{m}$. Der Durchmesser am Hals des Implantats wurde über drei Messungen auf verschiedenen Winkelpositionen gemittelt und beträgt 4.192 mm .

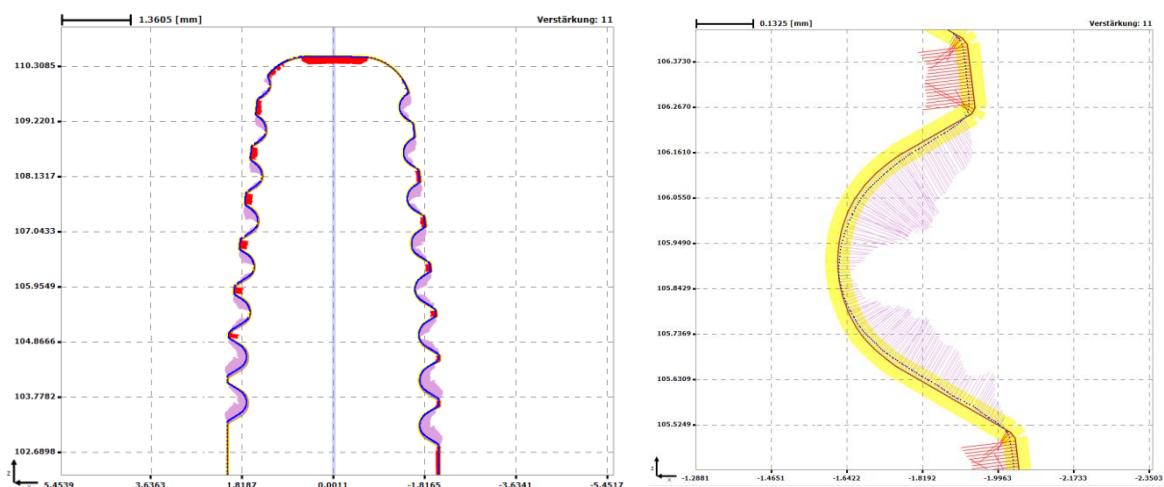


Abbildung 5.7: Konturverlauf und Abweichungen des geschliffenen Implantats

Durch das sandstrahlen und thermische Ätzen erhöht sich die Rauigkeit der Oberfläche auf einen Ra-Wert von $0.50 \mu\text{m}$ und einen Rz-Wert von $2.85 \mu\text{m}$. In Abbildung 5.8 links ist der Übergang

von der glänzenden, geschliffenen Oberfläche auf dem Hals zu der behandelten matten Oberfläche bei der Gewindenut zu erkennen. Zudem ist zu sehen, dass die scharfen Kanten durch das Strahlen abgerundet wurden. Abbildung 5.8 rechts zeigt die vergrösserte Mikrostrukturierung, die durch die Behandlung erreicht wurde.

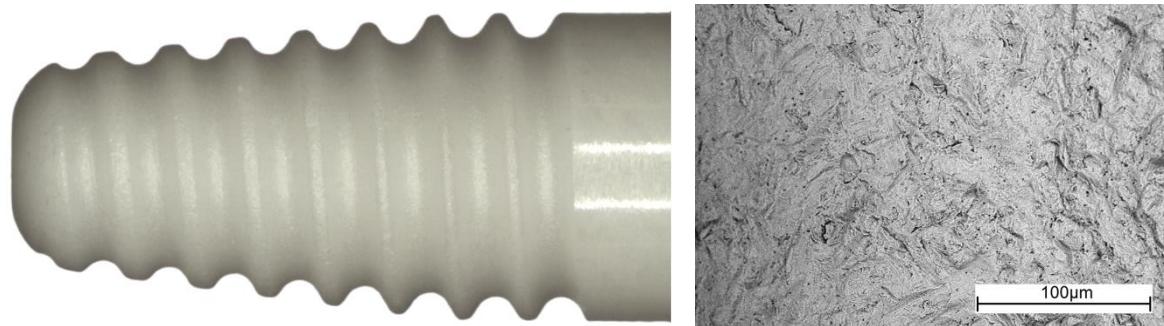


Abbildung 5.8: Das sandgestrahlte und thermisch geätzte Implantat

Abbildung 5.9 zeigt den Konturverlauf und die Abweichungen des behandelten Implantats gegenüber der geschliffenen Sollkontur. Durch den Abtrag und den Verrundungen der Kanten hat das Implantat durch die rot gekennzeichneten Stellen ein erhöhtes Untermass. Dieses erstreckt sich über den ganzen Grat der Gewindenut und nimmt zur Spitze des Implantats stetig zu. Die Gewindegänge am Hals des Implantats weisen nach wie vor ein Übermass auf.

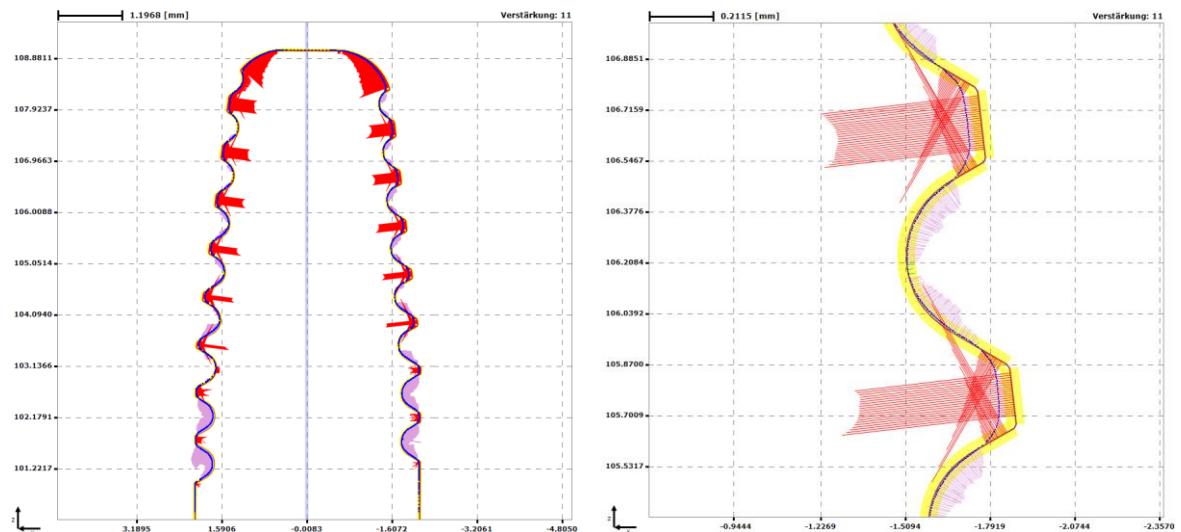


Abbildung 5.9: Verrundeter Konturverlauf des behandelten Implantats

5.4 Fertigung des Implantats durch radiale Laserbearbeitung

Zur radialen Laserbearbeitung wurden nur drei Bearbeitungssachsen verwendet. Mit der Drehachse wurde das Werkstück mit gleichmässiger Drehgeschwindigkeit gedreht, während die optische U-Achse synchron dazu den Laserstrahl in Achsrichtung positionierte. Nach jedem Abtrag einer Umfangsschicht wurde mit der mechanischen Z-Achse der Fokus um eine Schichtdicke zugestellt. Abbildung 5.10 veranschaulicht wie die radiale Bearbeitung erfolgte.

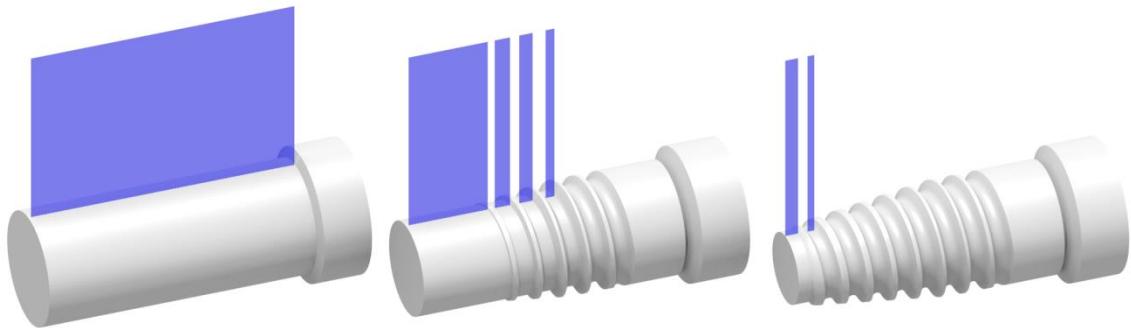


Abbildung 5.10: Fertigung des Implantats durch radiale Laserbearbeitung

5.4.1 Erstellung des NC-Codes

Für die Berechnung des NC-Codes wurde das CAM Programm aus der Semesterarbeit für radiale Laserbearbeitung [30] verwendet. Abbildung 5.11 links zeigt das Volumen, das durch die radiale Laserbearbeitung abgetragen werden muss. Diese Geometrie wurde zur Berechnung des NC-Codes ins CAM Programm geladen. Der NC-Code wurde mit den schnellen Parametern der radialen Parameterstudie aus Tabelle 5.2 rechts berechnet. Durch die Schichtdicke von 7.2 µm resultierten insgesamt 274 Abtragsschichten. Die abgerollte Geometrie des Negativs und die berechneten Laserbahnen einer Schicht sind in Abbildung 5.11 rechts dargestellt. Die Berechnung des NC-Codes dauerte 4 min. Dabei wurden 5.7 Millionen Zeilen NC-Code generiert.

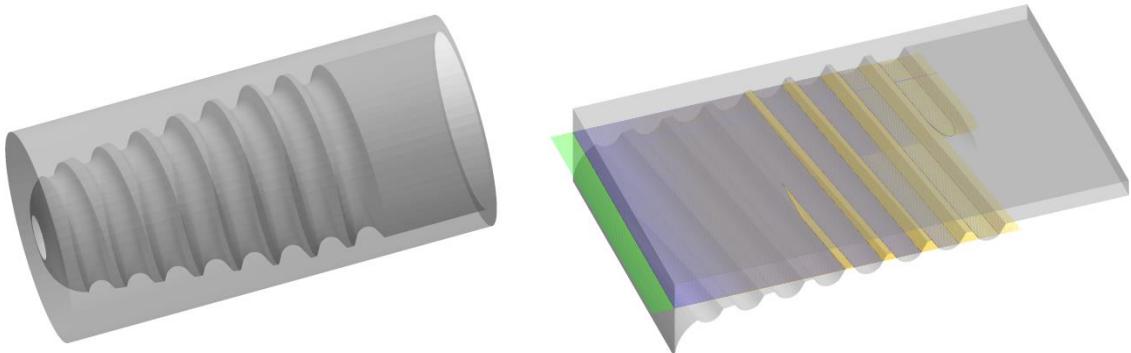


Abbildung 5.11: Geometrie des Negativs und den Laserbahnen aus einer Schicht

5.4.2 Radiale Laserbearbeitung

Die Laserbearbeitung erfolgte am einen Ende eines Zylinderrohlings mit 5 mm Durchmesser und einer Länge von 60 mm. Trotz dem Abtrag mit den schnellen Parametern mit erhöhter Schichtdicke dauerte der komplette Abtrag zweieinhalb Stunden.

Bei der Fertigung der ersten radialen Implantate bildeten sich auf dem Grund der Nut schwarze Einbrände. Diese sind in der Abbildung 5.12 links auf einem halb fertigen Implantat deutlich zu erkennen. Sie befinden sich an jenen Stellen, bei denen der Laser sehr schnell aufeinanderfolgend ein- und wieder ausgeschaltet werden musste. Da diese Befehle im NC-Code so dicht aufeinanderfolgten, geriet die Steuerung ins Stocken. Dabei verharrete der Fokus des Lasers für kurze Zeit auf derselben Stelle wodurch die Einbrände resultieren. Auf Abbildung 5.12 links sind zudem axiale Rippel auf der Oberfläche zu erkennen. Diese sind auf Stellen zurückzuführen, wo der Laser sehr schnell aufeinanderfolgend aus- und wieder eingeschaltet werden musste. Da die

Steuerung auch hier überlastet war, blieb der Laser nach dem Ausschalten zu lange aus und es erfolgte an diesen Stellen kein Materialabtrag. Durch Anpassen des CAM Programms wurden sehr kurze Laserbahnen aus dem NC-Code entfernt. Mit diesem Workaround wurden diese Probleme bei der Fertigung weiterer Implantate vermieden.

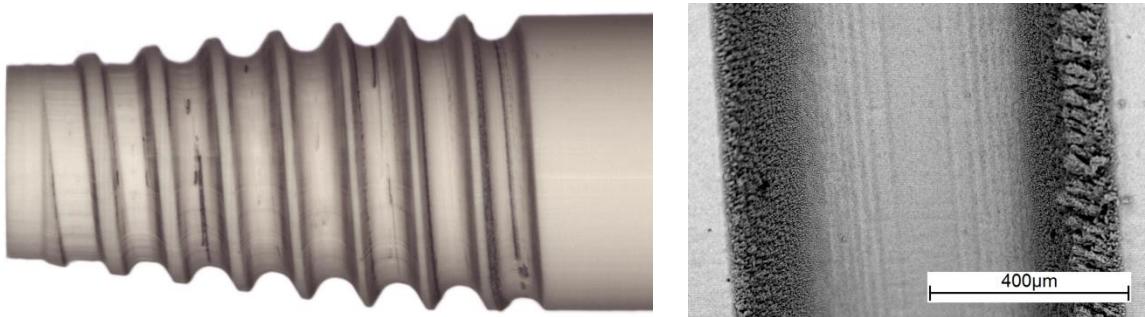


Abbildung 5.12: Die schwarzen Einbrände und Materialablagerungen in der Nut

Bei der Laserbearbeitung bildeten sich entlang der steilen Nutwände Ablagerungen des abgetragenen Materials. Diese sind in der Abbildung 5.12 rechts deutlich zu erkennen. Durch Reinigen der Probe konnten diese entfernt werden, hinterliessen aber schwarz verfärbte Stellen. Im Nutgrund auf Abbildung 5.12 rechts ist zudem das treppenartige Abtragsprofil zu sehen. Da die radiale Laserbearbeitung ein abbildendes Verfahren ist, sind die abgetragenen Schichten direkt auf dem gefertigten Werkstück zu erkennen.

5.4.3 Das radial bearbeitete Implantat

Abbildung 5.13 zeigt Aufnahmen des radial gefertigten Implantats. Durch die Bearbeitung hat sich das Implantat rötlich verfärbt. Klar zu erkennen sind auch die schwarzen Verfärbungen entlang der Nutwände, die auch nach dem Reinigen verblieben sind.

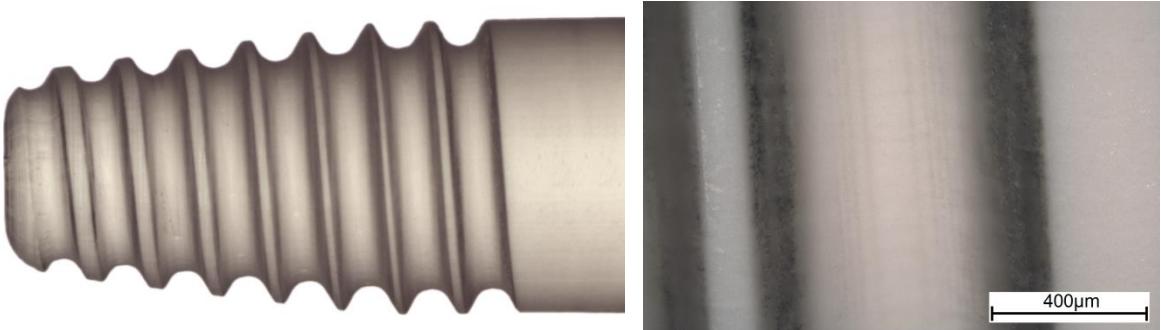


Abbildung 5.13: Radial bearbeitetes Implantat

Der Ra-Wert auf dem Hals des Implantats beträgt $0.37 \mu\text{m}$, der Rz-Wert $1.86 \mu\text{m}$. Mit zunehmender Abtragstiefe steigt die Rauheit der Oberfläche. Dies hängt damit zusammen, dass Fehler auf der Oberfläche bei jedem Schichtabtrag auf die folgende Oberfläche übertragen werden und sich so die Fehler über die Schichten aufsummieren. Der Ra-Wert im Nutgrund beträgt $0.71 \mu\text{m}$, der Rz-Wert $3.72 \mu\text{m}$.

Die zwei Aufnahmen des Elektronenmikroskops auf Abbildung 5.14 zeigen die Oberfläche im Nutgrund des Implantats. Auf der Linken ist wiederum das treppenartige Abtragsprofil gut zu erkennen. Die horizontalen Linien sind direkt durch die einzelnen Laserbahnen entstanden und weisen den konstanten Linienabstand von $5 \mu\text{m}$ auf.

5 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

In der stark vergrößerten Aufnahme in Abbildung 5.14 rechts ist die raue und poröse Oberflächenstruktur zu erkennen, die aus der radialen Laserbearbeitung resultiert. Für eine gute Verwachsung von Gewebe mit dem Implantat kann diese Oberfläche von Vorteil sein.

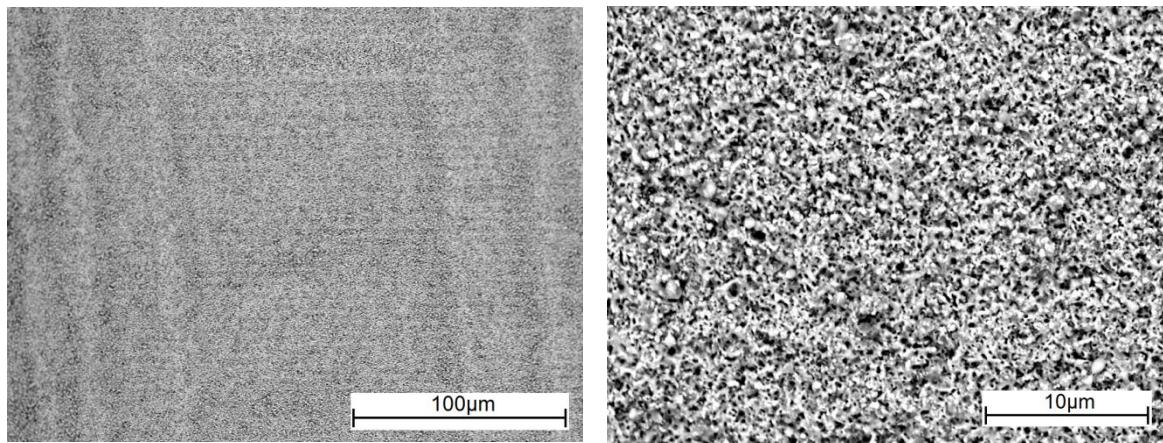


Abbildung 5.14: Oberfläche auf dem Nutgrund des radial Bearbeiteten Implantats

5.4.4 Masshaltigkeit des radialen Implantats

Zur Überprüfung der Masse des radialen Implantats wurde eine Konturaufnahme erstellt und diese mit der Sollkontur verglichen. In Abbildung 5.15 ist die Sollkontur wiederum braun und die Istkontur blau gepunktet dargestellt. Durch die sechsfache Überhöhung der Abweichungen zwischen Soll- und Istkontur sind die kritischen Stellen besser ersichtlich. Allgemein ist zu erkennen, dass das Implantat überall Untermass hat. Dieses nimmt mit zunehmendem Abtrag zur Spitze hin zu. Beim letzten Gewindegang an der Spitze wurde deshalb auch die maximale Abweichung von 52 µm erreicht. Das Untermass ist auf eine zu hohe Laserleistung bei der radialen Bearbeitung zurückzuführen. Bereits geringe Leistungsänderungen können einen grossen Einfluss auf die resultierende Abtragstiefe haben. Der Durchmesser am Hals des Implantats wurde an drei Positionen gemessen und gemittelt. Er liegt mit 4.19 mm leicht unter dem Sollmass von 4.2 mm. Die vergrösserte Aufnahme in Abbildung 5.15 rechts zeigt die variierenden Abweichungen, die unter anderem auf das treppenartige Abtragsprofil zurückzuführen sind. Mit einer mittleren Abweichung von 18 µm ist die Präzision des radialen Implantates geringer als beim geschliffenen Implantat.

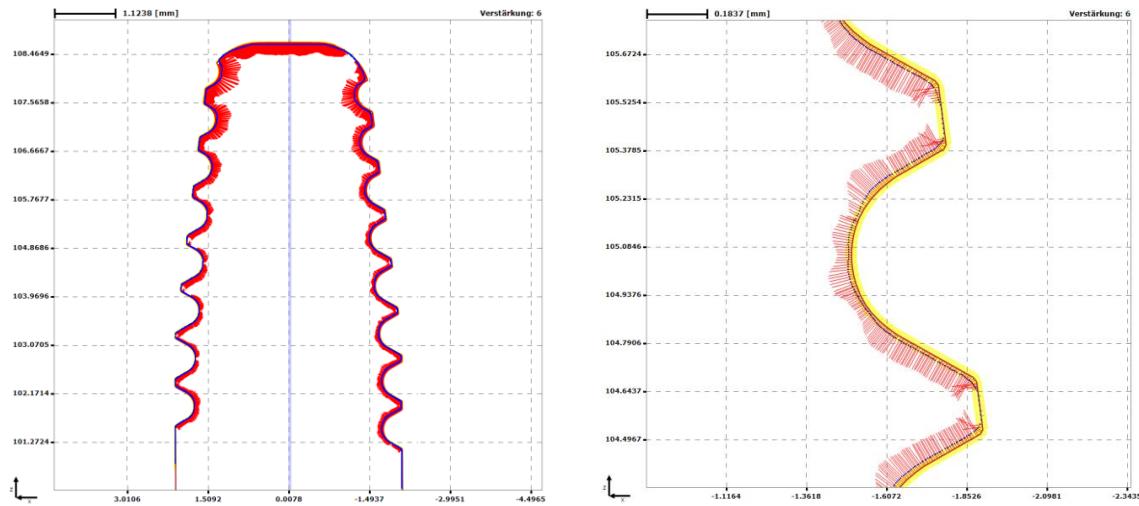


Abbildung 5.15: Masshaltigkeit des radialen Implantats

5.5 Fertigung eines Implantats durch tangentiale Laserbearbeitung

Bei der tangentialen Laserbearbeitung wurde wiederum die Aussengeometrie eines ZERAMEX® T ZERALOCK™ Implantats mit der Typennummer T16308 hergestellt. Die Bearbeitung erfolgte in zwei Schritten und wird durch Abbildung 5.16 veranschaulicht. Zuerst wurde vom Zylinderrohling durch Umfangabtrag die Grundgeometrie des Implantats gefertigt. Diese ist in Abbildung 5.16 mittig dargestellt. Zur leichteren Abtrennung des Implantats vom Zylinderrohling wurde zusätzlich eine Kerbe eingebracht. Im zweiten Schritt wurde durch Schruppen und Schlichten die Gewindenut abgetragen, um die Zielgeometrie zu erhalten, die in Abbildung 5.16 rechts dargestellt ist.

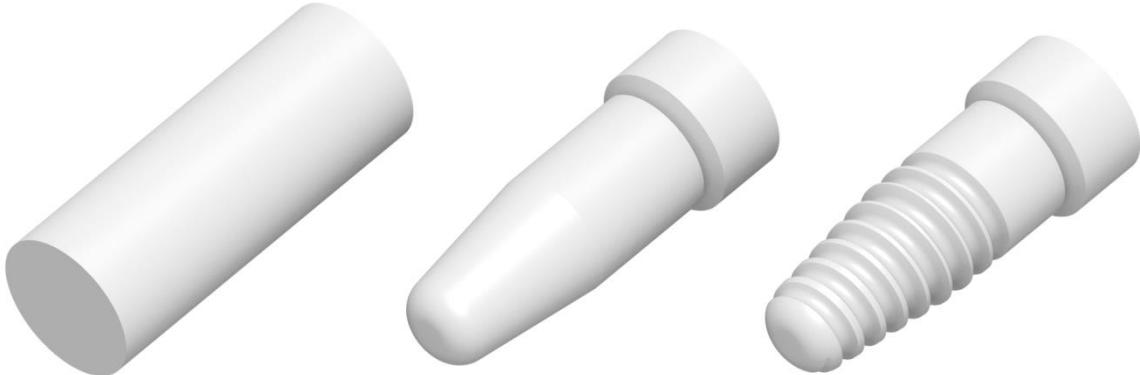


Abbildung 5.16: Zylinderrohling, Grundgeometrie und Zielgeometrie des Implantats

5.5.1 Umfangabtrag

Zur Berechnung des NC-Codes wurde das CAM Programm für tangentiale Laserbearbeitung verwendet. In Abbildung 5.17 links ist die Negativgeometrie abgebildet, die ins CAM Programm importiert wurde um den Umfangabtrag zu realisieren. Falls eine im Umfang geschlossene Geometrie ins Programm geladen wird, die genau von 0° bis 360° reicht, wird automatisch eine entsprechende Bahnlinie berechnet, die einmal über den Umfang reicht und ebenfalls in sich geschlossen ist. Diese ist in Abbildung 5.17 links als rote Linie dargestellt.

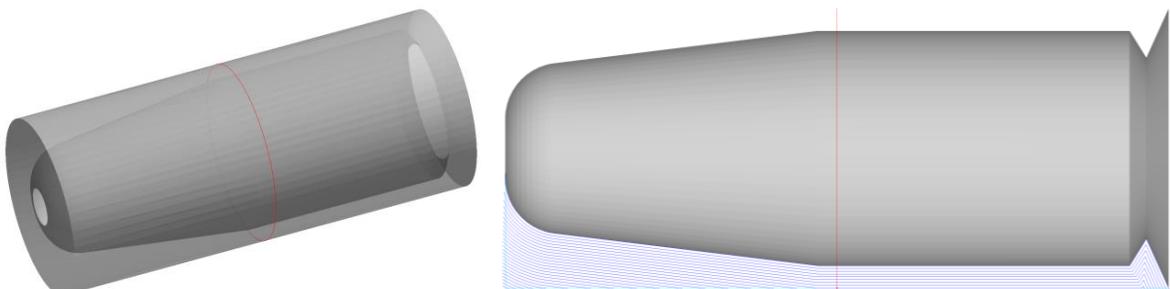


Abbildung 5.17: Laserbahnberechnung für den Umfangabtrag

Zur Berechnung der Laserbahnen und Bearbeitung durch Umfangsabtrag wurden die schnellen Parameter aus der tangentialen Parameterstudie verwendet. Diese sind in Tabelle 5.4 in der rechten Kolonne aufgelistet. Im CAM Programm wurde der Parameter beim Eingabefeld „Ab diesem Konturoffset die Konturoffsets zusammenfassen“ gezielt auf einen grossen Wert 1000 gesetzt. Damit wird verhindert, dass mehrere Konturoffsets im selben Bahnpunkt zusammen abgetragen werden. Beim Umfangabtrag soll schliesslich nur eine Schicht pro Umdrehung abgetragen werden und dafür der gesamte Abtrag über mehrere Umdrehungen erfolgen. Abbildung 5.17 rechts zeigt die berechneten Laserbahnen von einem Bahnpunkt. Bei einem

Bahnabstand von 26 µm wurden über den gesamten Umfang insgesamt 605 solcher Laserbahnberechnungen durchgeführt, die gleichmäßig über verschiedene Winkelpositionen verteilt sind. Durch die Geometrie des Negativs ist dem CAM Programm bekannt wie die Außenkontur des Rohlings aussieht. Diese ist in Abbildung 5.17 als hellblaue Linie zu erkennen. Dadurch werden die Laserbahnen kurz gehalten, damit der Abtrag nur dort stattfindet wo auch Material vorhanden ist. Die Berechnungszeit für den NC-Code dauerte 3 min.

Um die Bearbeitungszeit zu verkürzen wurden die Laserbahnen im Zickzack abgetragen. Insgesamt dauerte der Abtrag 49 min.

5.5.2 Die Grundgeometrie des Umfangsabtrags

Abbildung 5.18 zeigt die gefertigte Grundgeometrie. Durch den tangentialen Umfangsabtrag wurde eine weiße glatte Oberfläche erreicht. Der gemessene Rauheitswert liegt bei 0.21 µm und ist mit dem Rauheitswert der geschliffenen Oberfläche des Zylinderrohlings von 0.23 µm vergleichbar.



Abbildung 5.18: Gefertigte Grundgeometrie durch Umfangsabtrag

Auf der Elektronenmikroskopaufnahme in Abbildung 5.19 sind feine axiale Risse auf der Oberfläche zu sehen. Diese sind mit dem optischen Lichtmikroskop kaum zu erkennen. Sie stimmen mit der Richtung der Laserbahnen überein und resultieren somit aus dem Bearbeitungsprozess. Vermutlich sind es Erstarrungsrisse, die durch das Schwinden des erwärmten Materials entstanden sind.

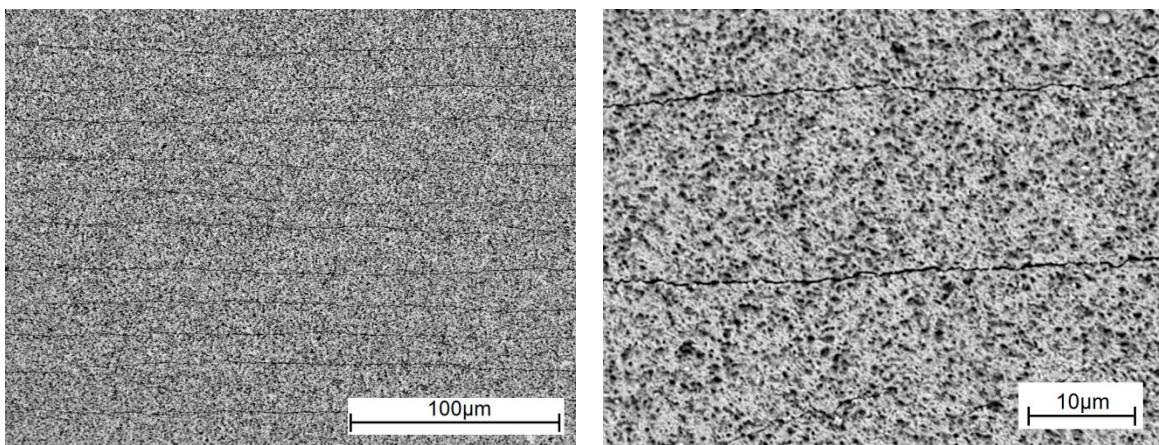


Abbildung 5.19: Kleine Risse, die aus dem Umfangsabtrag resultieren

5.5.3 Schruppen der Gewindenut

Um die Gewindenut herzustellen, müssen bei der tangentialen Laserbearbeitung alle sieben Achsen synchron zueinander bewegt werden. Da die Steigung der Gewindenut mit zunehmendem Radius sinkt, muss die Schwenkachse über den Verlauf des Gewindes langsam angepasst und entsprechend geschwenkt werden. Mit den drei mechanischen Linearachsen wird das Werkstück so positioniert, dass die abzutragende Nut immer unterhalb der optimierten Laserbahnen liegt. Diese werden mit den zwei optischen Achsen abgefahren. Die Nut wird von der Spitze des Implantats zum Hals hin abgetragen. Abbildung 5.20 zeigt wie durch das Schruppen die Gewindenut fortlaufend abgetragen wird. Die Darstellung zeigt, wie das Werkstück wegen der erhöhten Steigung beim Einlauf der Nut stärker geschwenkt ist als beim Gewindeauslauf.

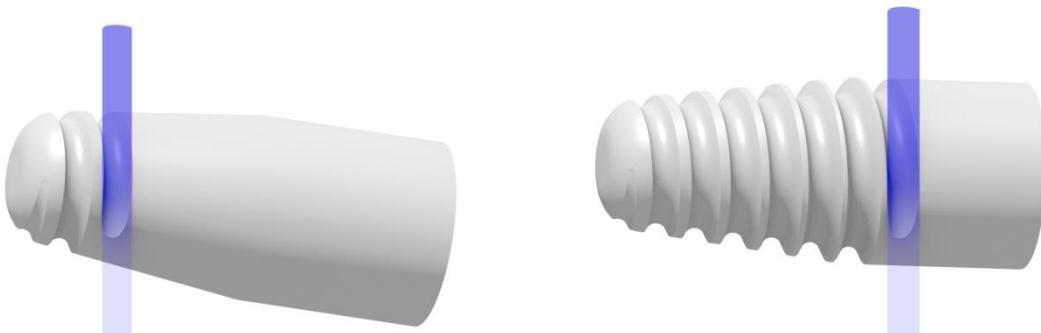


Abbildung 5.20: Schruppen der Gewindenut

Um diese komplexen Bahnbewegungen zu berechnen, konnte die Funktionalität des CAM Programms voll ausgereizt werden. Für das Schruppen wurde im Programm das Negativ der Gewindenut auf Abbildung 5.21 links importiert. Die rote Linie zeigt die berechnete Bahnlinie, die entlang der Nut verläuft und nach der die fünf mechanischen Achsen bei der Bearbeitung verfahren. Für die Berechnung und Bearbeitung wurden wieder die schnellen Parameter aus der Parameterstudie aus Tabelle 5.4 verwendet. Beim Schruppen wurde nicht das gesamte Material bis auf den Nutgrund abgetragen. Der erste Konturoffsetabstand wurde im CAM Programm gezielt auf 22.5 µm gesetzt. Damit hat die erste Laserbahn einen Abstand von 22.5 µm zum Schattenwurf und beim Abtrag wird Material mit dieser Dicke zum Nutgrund stehen gelassen. Der Abtrag dieses Restmaterials erfolgt beim Schlichten. Der Parameter „Ab diesem Konturoffset die Konturoffsets zusammenfassen“ wurde beim Schruppen der Nut auf 1 gesetzt. Damit werden alle Laserbahnen aus einer Schattenwurfberechnung zusammen abgetragen.

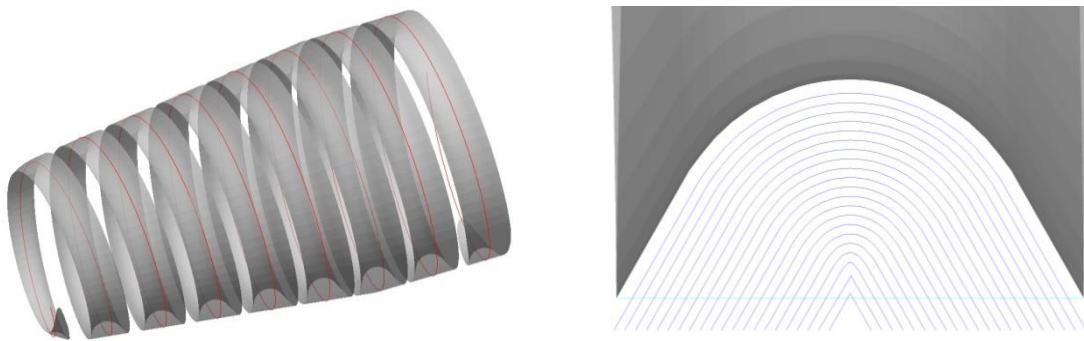


Abbildung 5.21: Bahnberechnung für das Schruppen der Gewindenut

Auf der Abbildung 5.21 rechts sind die berechneten Laserbahnen von einem Bahnpunkt dargestellt. Bei einem Bahndistanz von 26 µm wurden über die gesamte Bahnlänge 3694 solcher Hatches berechnet. Dabei ist jeder, abhängig vom entsprechenden Schattenwurf, unterschiedlich. Der Schattenwurf ist durch die schwarze Linie gekennzeichnet und wird durch die hellblaue Linie

abgeschlossen. Die gesamten Berechnungen inklusive Erstellung des NC-Codes dauerten 5 min. Das Schruppen der Nut benötigte 13 min.

5.5.4 Die geschruppte Gewindenut

Auf Abbildung 5.22 sind Aufnahmen des Implantats mit geschruppter Gewindenut dargestellt. Durch das Schruppen hat sich die Nut leicht gräulich verfärbt. Zudem resultiert eine Oberfläche mit erhöhter Rauheit. Der Ra-Wert im Nutgrund beträgt $0.38 \mu\text{m}$ der Rz-Wert $1.97 \mu\text{m}$. Wie immer wurde über eine Messstrecke von 1.5 mm mit einer Grenzwellenlänge von $0.8 \mu\text{m}$ gemessen und über fünf Messungen gemittelt.

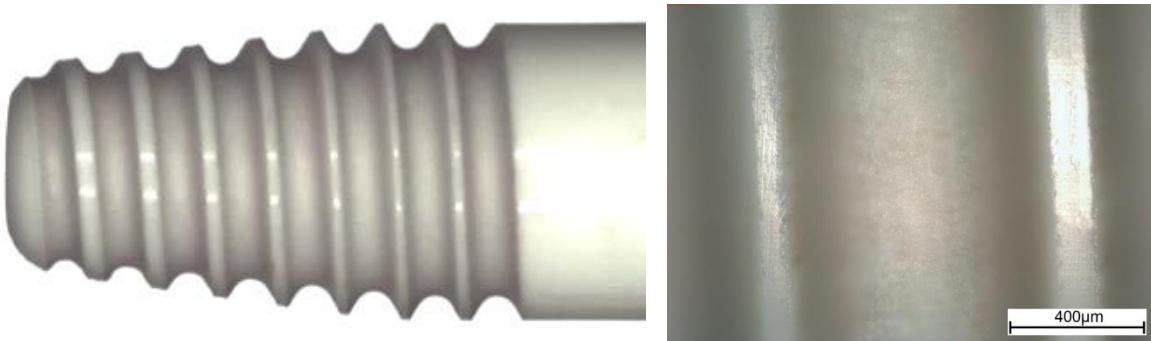


Abbildung 5.22: Implantat mit geschruppter Gewindenut

Abbildung 5.23 zeigt vergrösserte Aufnahmen der geschruppten Gewindenut. Durch das Schruppen haben sich auf der Oberfläche Schmelzspritzer abgelagert. Dadurch resultiert auch die erhöhte Rauigkeit. Die Schmelzspritzer überdecken den Grund der Nut, der wiederum kleine Risse aufweist. Die dunklen Verfärbungen in den Abbildungen sind auf Verschmutzungen zurückzuführen.

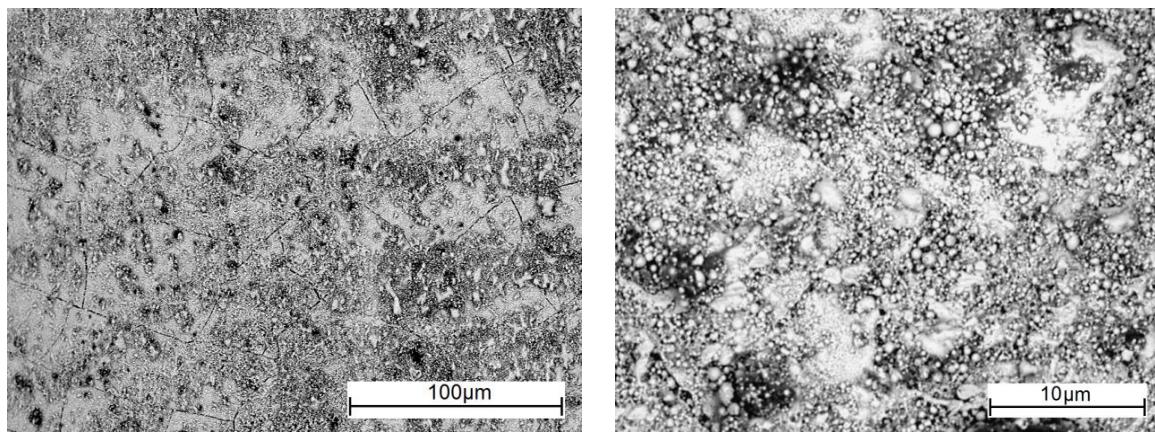


Abbildung 5.23: Oberfläche der geschruppten Gewindenut

5.5.5 Schlichten der Gewindenut

Beim Schlichten wird das Restmaterial auf dem Grund der Gewindenut abgetragen. Dazu wurden die Schlichtparameter aus der linken Kolonne von Tabelle 5.4 verwendet. Für die Berechnung wurde dieselbe Geometrie der Gewindenut verwendet wie beim Schruppen. Diese ist in Abbildung 5.24 links mit der entsprechenden Bahnlinie dargestellt. Beim Schlichten wurde die gesamte Bahnlinie dreimal abgefahren und jedes Mal eine dünne Schicht abgetragen. Zur Berechnung dieser Laserbahnen wurde im CAM Programm der erste Konturoffsetabstand auf

$0 \mu\text{m}$ und der letzte Konturoffsetabstand auf $15 \mu\text{m}$ gesetzt. Mit einem Zwischenkonturabstand von $7.5 \mu\text{m}$ resultierten dabei genau die drei Laserbahnen entlang dem Grund der Nut. Die berechneten Laserbahnen von einem Schattenwurf sind in Abbildung 5.24 rechts dargestellt. Die Berechnungszeit für die Laserbahnen und inklusive NC-Code dauerte 5 min. Der Abtrag erfolgte in 15 min.

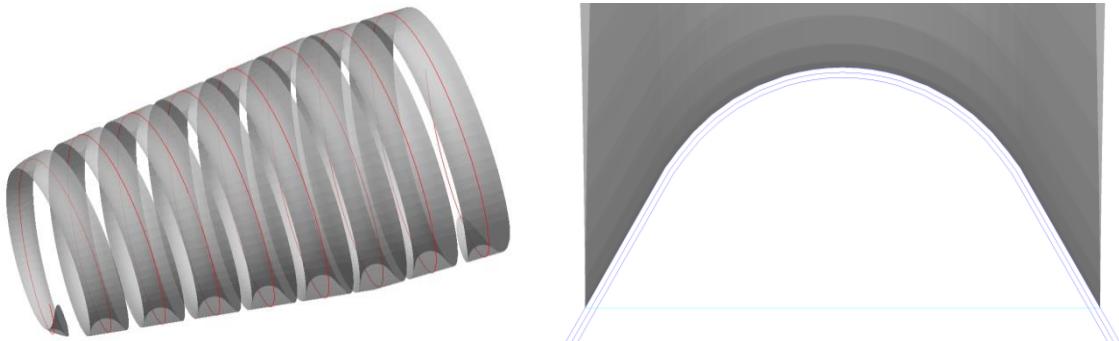


Abbildung 5.24: Bahnberechnung für das Schlichten der Gewindenut

Wie auf Abbildung 5.25 links zu erkennen ist, hat sich die Gewindenut durch das Schlichten noch stärker grau verfärbt. Zudem sind leichte Rillen zu erkennen, die aus dem Schlichtprozess resultieren und mit der Richtung der Laserbahnen übereinstimmen. Entlang dieser Rillen haben sich wiederum kleine Risse gebildet. Diese sind in der Aufnahme des Elektronenmikroskops in Abbildung 5.25 rechts deutlich zu sehen. Weil auf der Oberfläche weniger Schmelzspritzer vorhanden sind als beim Schruppen wurde die Rauheit reduziert. Der Ra-Wert auf dem Grund der Nut beträgt $0.24 \mu\text{m}$ und der Rz-Wert $1.10 \mu\text{m}$.

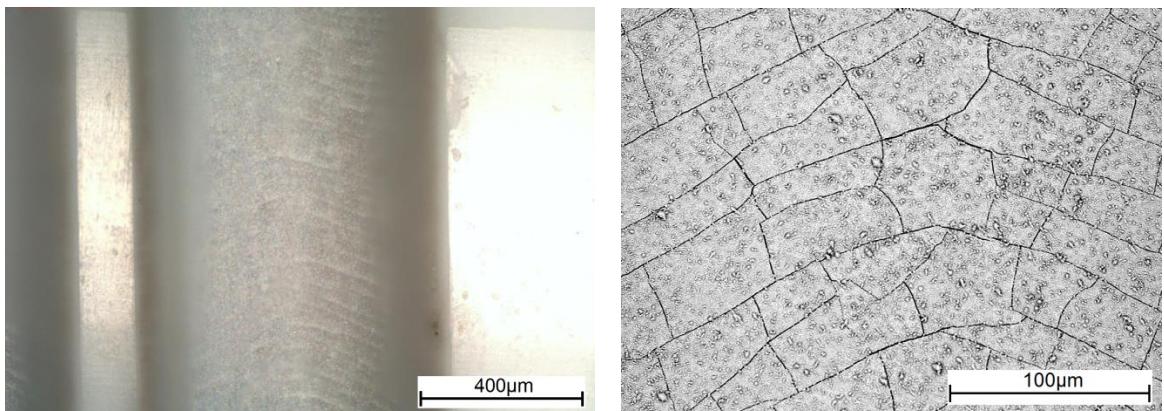


Abbildung 5.25: Implantat mit geschlichteter Gewindenut

5.5.6 Polieren der Gewindenut

Das Polieren der Gewindenut erfolgte ähnlich dem Schlichten. Dabei erfolgte aber keine weitere Zustellung. Es wurden lediglich die Laserbahnen, die auf der Schattenkontur liegen und genau entlang der Oberfläche verlaufen dreimal über die gesamte Bahnlinie abgefahren.

Auf Abbildung 5.26 sind Aufnahmen des Implantats mit polierter Gewindenut zu sehen. Durch das Polieren hat sich die Nut dunkel verfärbt. Dafür wurde eine glatte Oberfläche mit geringer Rauheit erreicht. Der Ra-Wert auf dem Nutgrund liegt bei $0.21 \mu\text{m}$ und der Rz-Wert bei $0.93 \mu\text{m}$. Da beim Polieren keine Zustellung erfolgt und kaum Material abgetragen wird, erwärmt der Laser die Oberfläche stärker als bei der radialen Bearbeitung. Das Material auf der Oberfläche wird lokal aufgeschmolzen und durch die Oberflächenspannungen geglättet.

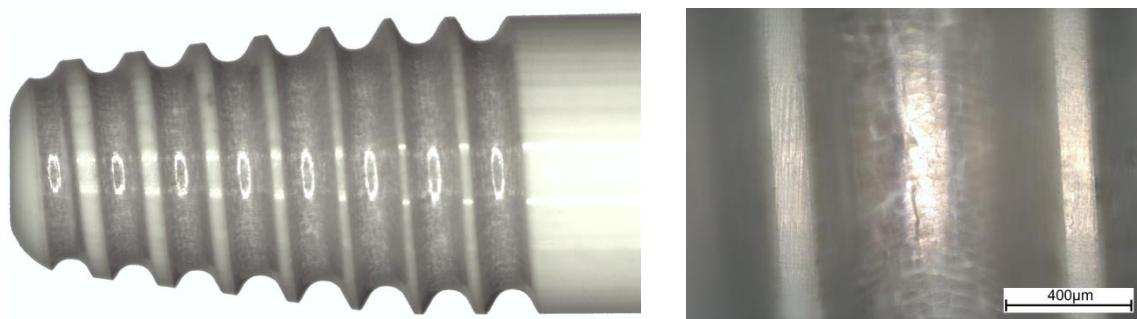


Abbildung 5.26: Implantat mit polierter Gewindenut

Wie die Aufnahmen in Abbildung 5.27 zeigen, hat sich durch das Polieren die Rissbildung verstärkt. Dies ist vermutlich auf den erhöhten Wärmeeintrag zurückzuführen. Vor allem die Breite der Risse hat im Vergleich zu den Rissen beim Schlichten zugenommen.

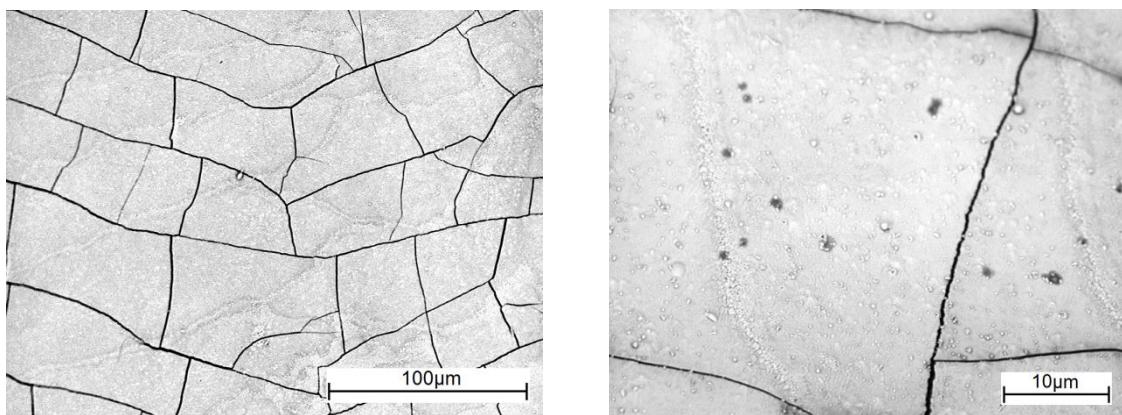


Abbildung 5.27: Rissbildung durch das Polieren

Aufgrund der erhöhten Rissbildung, den dunklen Verfärbungen und nur einer geringen Steigerung der Oberflächenqualität gegenüber dem Schlichten, wurde die Strategie des Polierens bei der Fertigung weiterer Implantate nicht angewendet.

5.5.7 Masshaltigkeit der tangential bearbeiteten Implantate

Mit dem Messgerät von Zoller wurde der Konturverlauf eines geschliffenen Implantats aufgenommen und mit der Sollkontur verglichen. Auf Abbildung 5.28 sind dank der 16fachen Überhöhung die Abweichungen leicht zu erkennen. Die roten Stellen zeigen, dass das Implantat im Gewindegang beim Hals und vor allem bei der Spitze ein Untermaß aufweist. Vermutlich wurde der Rohling etwas zu kurz eingespannt. An den steilen Wänden der Gewindenut weist das Implantat jeweils ein Übermaß auf. Dies ist auch an den violetten Linien in Abbildung 5.28 rechts zu entnehmen. Das maximale Übermaß beträgt $15 \mu\text{m}$ und wurde auf dem Gewindegrat gemessen. Der Durchmesser am Hals des Implantats beträgt 4.201 mm und liegt damit sehr nahe am Sollwert von 4.2 mm . Dieser wurde wieder über drei Messungen auf verschiedenen Winkelpositionen gemittelt. Mit einer mittleren absoluten Abweichung von $4 \mu\text{m}$ wurde im Vergleich zum geschliffenen Implantat eine erhöhte Masshaltigkeit erreicht. Da bei der tangentialem Laserbearbeitung fehlerhafte und zu stark über die Laserbahnen reichende Materialanhäufungen automatisch stärker abgetragen werden, sind grundsätzlich bessere Genauigkeiten erreichbar als bei der radialen Laserbearbeitung.

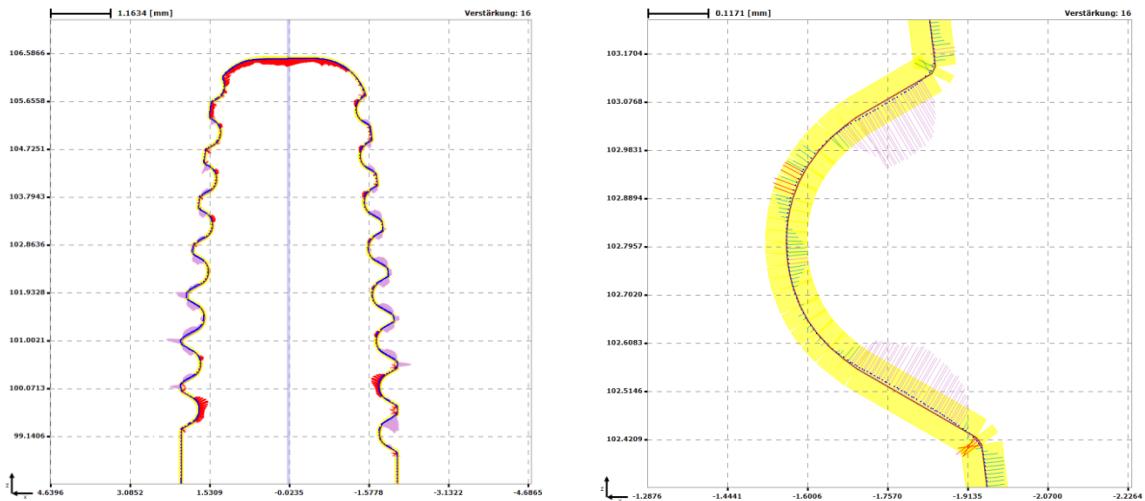


Abbildung 5.28: Masshaltigkeit des tangential geschlichteten Implantats

5.6 Schliffbilder der Implantate

Um das Problem der Rissbildung zu untersuchen wurden von einem tangential geschlichteten und einem tangential polierten sowie einem radial bearbeiteten Implantat Schliffbilder erzeugt. Dazu wurden diese mit schwarzem Duroplast Granulat von ATM bei 180 °C und 300 bar für 5 min warm eingebettet und danach 4 min gekühlt. Da dieses Granulat leitfähig ist, eignet es sich besonders für Untersuchungen mit dem Elektronenmikroskop.

Das Schleifen der Implantate erfolgte mit einer SAPHIR 520 von ATM. Zuerst wurden Schleifpapiere mit einer Körnung von 120 und einem Anpressdruck von 80 N verwendet. Für das grobe Schleifen der Proben wurde jeweils nach 10 min ein neues Schleifpapier verwendet und dieser Prozess dreimal wiederholt. Danach wurde der Anpressdruck auf 30 N reduziert und alle 5 min ein feineres Schleifpapier benutzt. Das Schleifen erfolgte bis zu einer Körnung von 4000. Dabei wurde ständig mit Wasser gekühlt.

In Abbildung 5.29 sind Schliffbilder des Nutgrunds eines geschlichteten Implantats zu sehen. Durch das Elektronenmikroskop erscheinen die Körner des Aluminiumoxids dunkel und heben sich vom hellen Yttrium verstärkten Zirkonoxid ab.

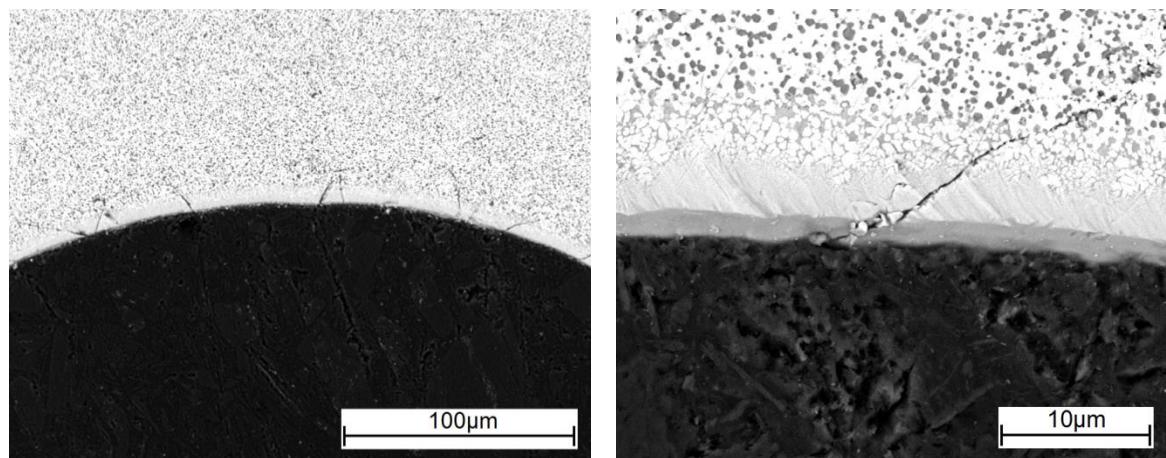


Abbildung 5.29: Schliffbilder des geschlichteten Implantats

5 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Die Schmelzschicht, die sich durch die Wärmeeinwirkung bei der tangentialen Laserbearbeitung gebildet hat, ist deutlich zu erkennen. Durch die Verschmelzung der Körner weist sie eine veränderte, gleichmässigere Gefügestruktur auf. Die Schmelzschicht hat eine Dicke von 8 µm und ist von Rissen durchzogen. Diese reichen bis zu 30 µm in das Implantat ein.

Die Schliffbilder der tangential polierten Implantate sehen ähnlich aus und sind deshalb nicht aufgeführt. Die Schmelzschicht und die Risse sind dort noch ausgeprägter.

Abbildung 5.30 links zeigt das Schliffbild vom Hals des geschlichteten Implantats. Dieser wurde durch tangentialen Umfangabtrag gefertigt. Hier ist keine Schmelzschicht oder starke Veränderung der Gefügestruktur im Randbereich zu erkennen. Der graue Bereich beim Übergang kommt daher, dass das weichere Einbettmittel beim Schleifen stärker abgetragen wurde und man ein Stück seitlich auf die Oberfläche des Implantats sieht. Die Topologieaufnahme in Abbildung 5.30 rechts verdeutlicht dieses Phänomen.

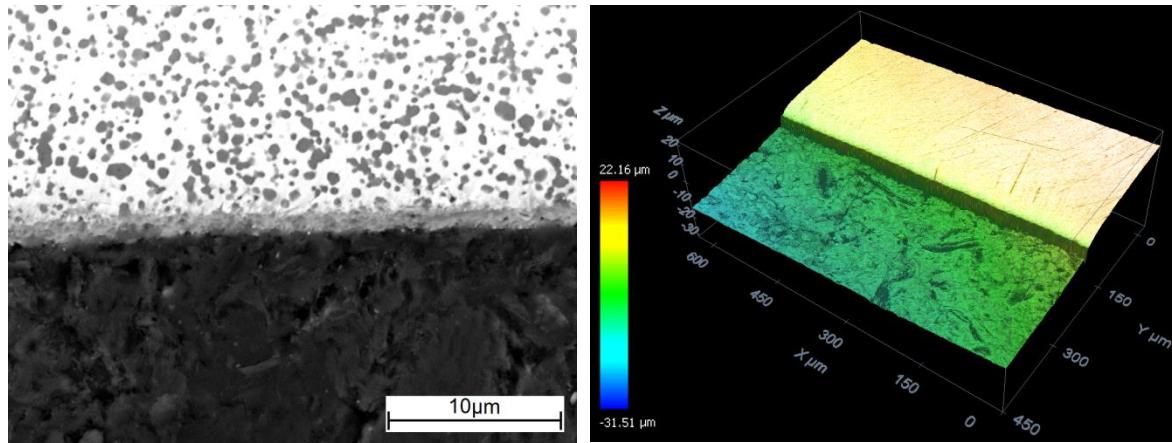


Abbildung 5.30: Aufschliff des tangential bearbeiteten Implantathalses

In Abbildung 5.31 sind Schliffbilder des radial bearbeiteten Implantats zu sehen. Das treppenartige Profil durch den Schichtabtrag ist auf dem Grund der Nut klar zu erkennen. Auch hier ist keine Schmelzschicht oder veränderte Gefügestruktur zu erkennen. Im Randbereich ist lediglich die poröse Oberflächenstruktur zu erkennen, die bei der radialen Laserbearbeitung entsteht.

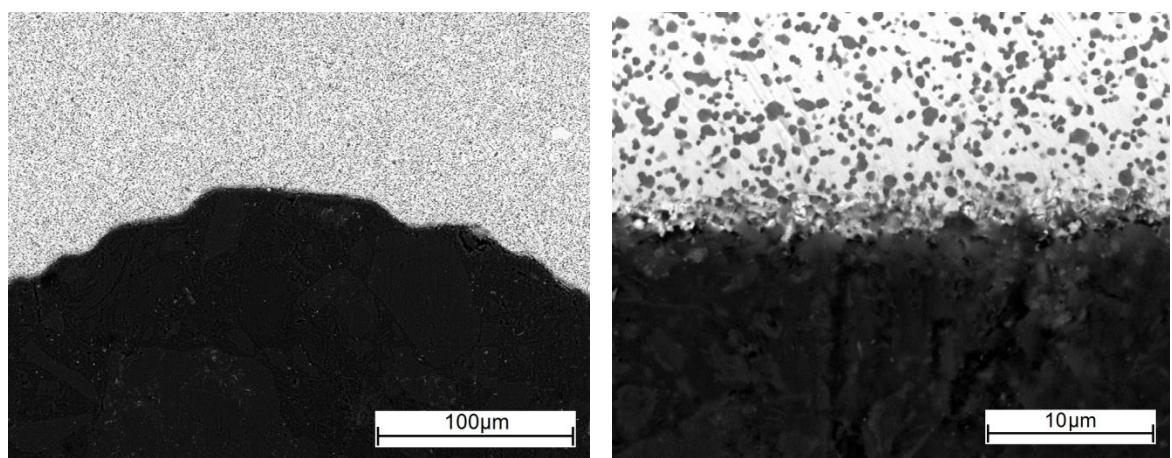


Abbildung 5.31: Schliffbilder des radial bearbeiteten Implantats

5.7 Radialer Abtrag der Schmelzschicht

Um die wärmebeeinflusste Zone im Randbereich mit der Schmelzschicht und den gebildeten Rissen zu entfernen, wurde ein Versuch durchgeführt, bei dem ein tangential geschlichtetes Implantat radial nachbearbeitet wurde. Auf vier Sektorflächen, die über die ganze Länge des Implantats reichen, wurden drei Schichten radial abgetragen. Für die Laserbearbeitung wurden bis auf die Laserleistung, die auf 1 W eingestellt wurde, die schnellen Parameter aus der radialen Parameterstudie aus Tabelle 5.4 verwendet. Daraus resultiert eine Schichtdicke von 4 µm. Über drei Schichten wurden somit 12 µm an Material abgetragen. Auf Abbildung 5.32 sind die abgetragenen Sektorflächen durch die matte Oberfläche klar zu erkennen.



Abbildung 5.32: Radial nachbearbeitetes Implantat

Abbildung 5.33 zeigt Aufnahmen aus dem Nutgrund beim Übergang der tangential geschlichteten und der radial nachbearbeiteten Oberfläche. Durch die radiale Nachbearbeitung wurde die Schmelzschicht und ein grosser Teil der Risse abgetragen und wiederum die typisch poröse Oberfläche der radialen Laserbearbeitung erzeugt. Da einzelne Risse aber weiter als 12 µm unter die Oberfläche reichen, wurden diese nicht komplett entfernt. Auf Abbildung 5.33 links ist die durch die radiale Bearbeitung entstandene rötliche Verfärbung zu erkennen.

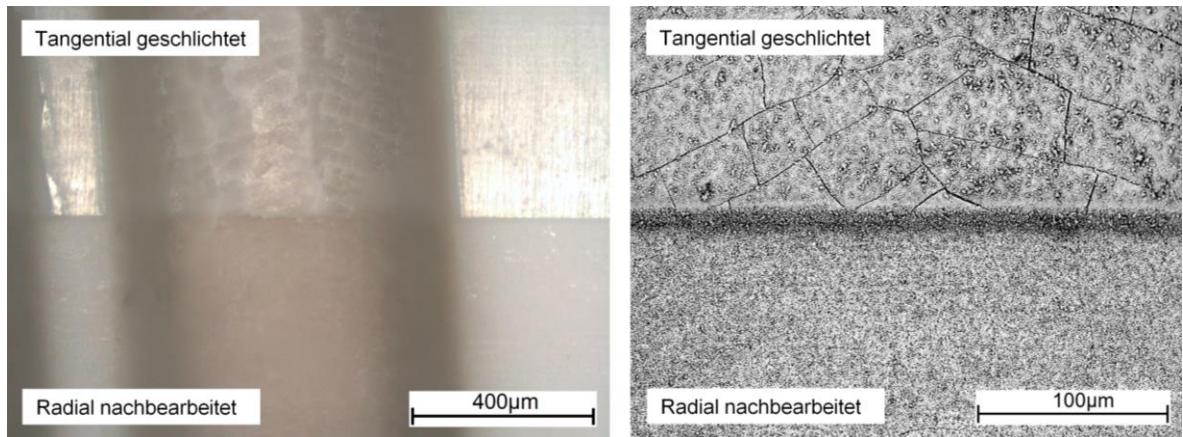


Abbildung 5.33: Übergang der tangential geschlichteten zur radial bearbeiteten Oberfläche

5.8 Oberflächenstrukturierung

Da die Verwachsung von Gewebe und Implantat durch eine grössere Oberfläche mit erhöhter Rauheit begünstigt wird, wurden Versuche zur Mikrostrukturierung der Implantatoberfläche durchgeführt. Dabei sind die erreichbaren Strukturgrößen primär durch den Fokusdurchmesser

des Lasers begrenzt. Die begrenzte Geschwindigkeit bei der Ausführung von NC-Befehlen durch die Steuerung kann bei sehr feinen Strukturen auch ein Limit darstellen.

Bei der Oberflächenstrukturierung wurden einzelne Laserspots sowie axiale Rillen und Rillen in Nutrichtung auf ein tangential geschlichtetes Implantat aufgebracht. Die Berechnung der Laserbahnen und dem NC-Code erfolgte mit dem radialen CAM Programm aus der Semesterarbeit [30].

5.8.1 Laserspots

Bei der Mikrostrukturierung durch Laserspots wurden axiale Laserbahnen mit einer Scangeschwindigkeit von 400 mm/s und einem Linienabstand von 40 μm abgefahren. Durch Reduktion der Pulsfrequenz auf 10 kHz wurde ein Pulsabstand von 40 μm erreicht. Die Laserleistung wurde so angepasst, dass eine Pulsennergie von 40 μJ erreicht wurde.

Abbildung 5.34 zeigt Aufnahmen der strukturierten Oberfläche. Der Durchmesser der einzelnen Spots beträgt etwa 20 μm . Trotz maximaler Laserleistung erreichen die Spots nur eine Tiefe von ungefähr 200 nm. Tiefere Abtragsspots können durch Mehrfachpulse auf derselben Position erreicht werden. Dafür sind aber komplexere NC-Programme notwendig, bei denen jede einzelne Spotposition angefahren wird und eine bestimmte Anzahl Pulse ausgelöst werden. Auf der Elektronenmikroskopaufnahme in Abbildung 5.34 rechts sind zudem die axialen Rillen auf dem Hals des Implantats zu sehen, die ihren Ursprung aus dem Umfangsabtrag haben.

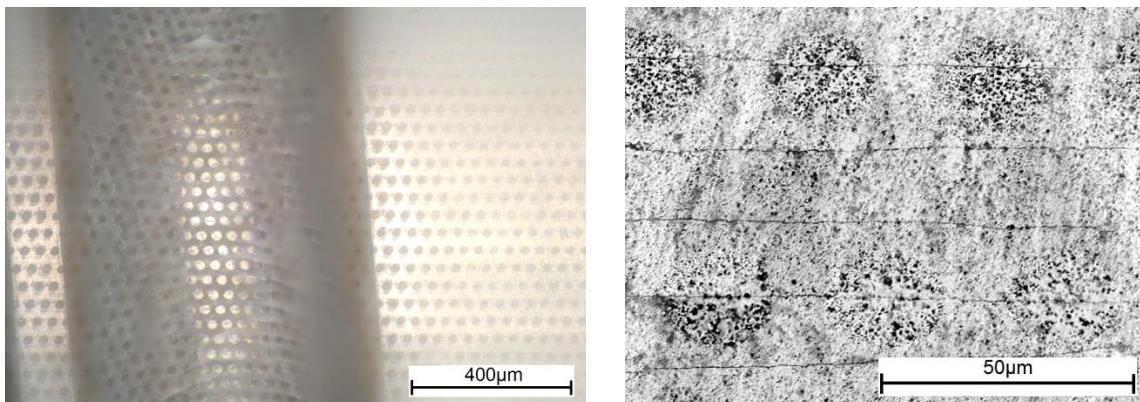


Abbildung 5.34: Mikrostrukturierung durch Laserspots

5.8.2 Axiale Rillen

Bei der Strukturierung durch axiale Rillen wurden Laserbahnen mit einem Linienabstand von 40 μm und einer Scangeschwindigkeit von 400 mm/s abgefahren. Die Pulsfrequenz wurde auf 200 kHz belassen und erzeugte bei einer Laserleistung von 0.8 W Pulsennergien von 4 μJ und einen Pulsabstand von 2 μm .

Auf Abbildung 5.35 sind die axialen Laserbahnen auf dem Implantat zu sehen. Diese haben eine Breite von 18 μm und eine Tiefe von ungefähr 2 μm . In der vergrößerten Aufnahme ist zu erkennen, dass die Laserbahnen eine poröse Oberfläche aufweisen, die für die radiale Bearbeitung typisch ist.

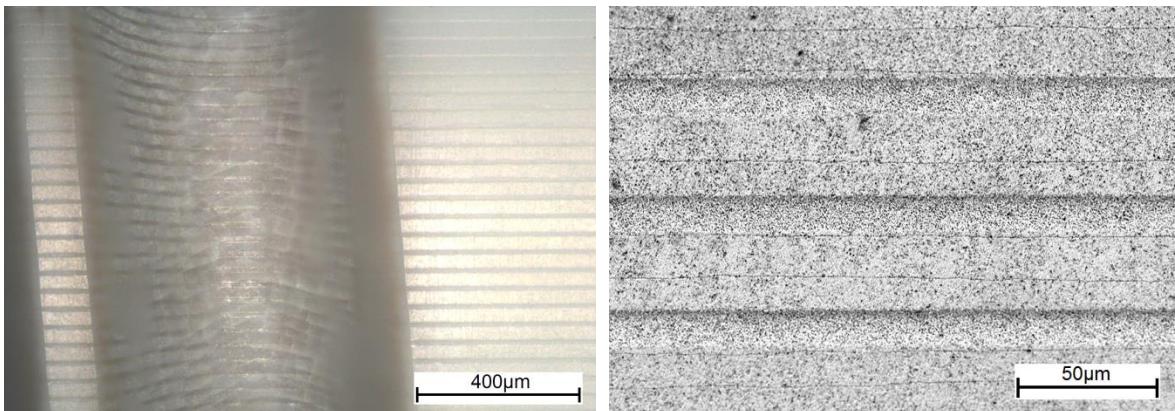


Abbildung 5.35: Mikrostrukturierung durch axiale Laserbahnen

5.8.3 Rillen in Nutrichtung

Bei der Mikrostrukturierung durch Rillen in Nutrichtung wurde nur eine Scangeschwindigkeit von 4 mm/s verwendet. Dies ist auf die beschränkte Drehgeschwindigkeit der Drehachse zurückzuführen. Damit wieder ein Pulsabstand von 2 μm resultiert wurde die Pulsfrequenz auf 2 kHz eingestellt. Die Pulsenergie betrug 4 uJ und der Linienabstand 40 μm .

Auf Abbildung 5.36 ist zu erkennen, dass durch die Wahl eines Steigungswinkels der Laserbahnen von 86.1° diese genau mit dem Verlauf der Nut übereinstimmen. Die Dimensionen der abgetragenen Rillen sind identisch mit denen der axialen Rillen.

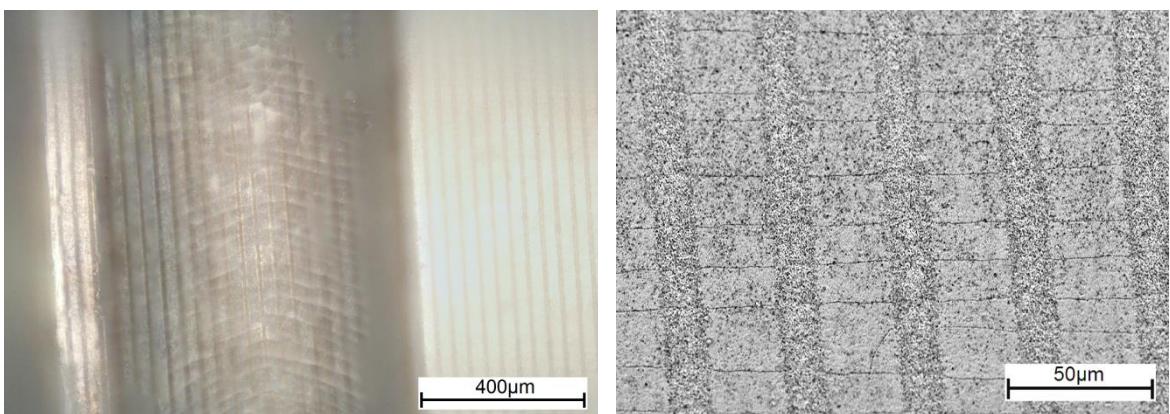


Abbildung 5.36: Mikrostrukturierung durch Laserbahnen in Nutrichtung

5.9 Tetragonale und monokline Phasanteile der Implantate

Mittels Raman Spektroskopie wurde von verschiedenen Implantaten das Verhältnis zwischen der tetragonalen und monoklinen Phase des Zirkonoxids analysiert. Gemessen wurde jeweils auf dem Grund der Nut mit einer Wellenlänge von 520 nm und einer Laserleistung von 10 mW. Ein Raman Spektrum wurde über vier Messungen von jeweils 15 s gemittelt. In Abbildung 5.37 sind die Spektren eines Zylinderrohlings, eines radial laserbearbeiteten Implantats, eines laserpolierten Implantats, eines geschliffenen Implantats und eines sandgestrahlten und geätzten Implantats dargestellt. Die wichtigsten Peaks, die auf die tetragonale Phase hinweisen sind grün und jene, die auf die monokline Phase hinweisen rot eingefärbt.

5 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

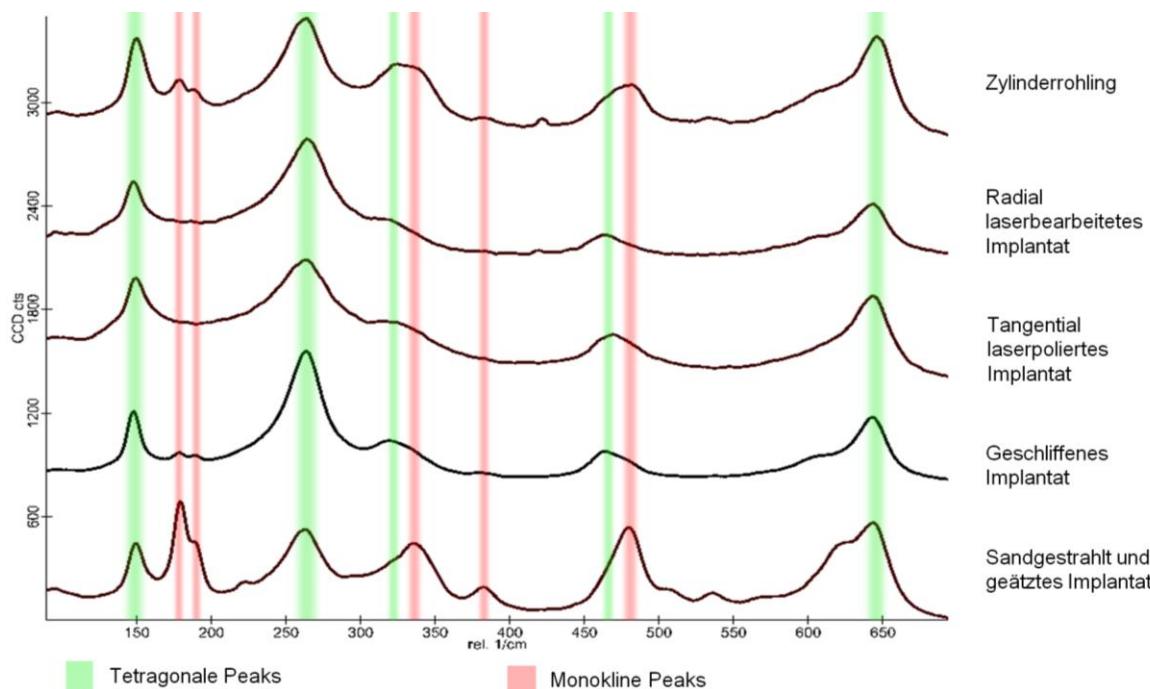


Abbildung 5.37: Raman Spektren von unterschiedlichen Implantaten

Aus dem Spektrum des Zylinderrohlings ist zu erkennen, dass die tetragonale Phase überwiegend ist. Ein kleiner Anteil der monoklinen Phase ist aber auch vorhanden. Wahrscheinlich ist dies auf die Schleifbearbeitung durch den Hersteller zurückzuführen. Diese wird angewendet, damit der Rohling die genauen Abmessungen erreicht.

Bei allen durch Laser bearbeiteten Implantaten ist in den Spektren nur die tetragonale Phase zu erkennen. Dies gilt sowohl für das radial bearbeitete Implantat als auch für das tangential laserpolierte Implantat. Die tangential geschruppten und geschlichteten Implantate weisen genau dasselbe Spektrum auf und sind deshalb nicht aufgeführt.

Im grünen Spektrum des komplett geschliffenen Implantats ist die tetragonale Phase dominierend. Anteile der monoklinen Phase sind aber auch erkennbar.

Beim sandgestrahlten und geätzten Implantat wurden die stärksten monoklinen Phasenanteile gemessen. Erstaunlicherweise variieren die Phasenanteile bei diesem Implantat erheblich und sind von Position zu Position unterschiedlich. Abbildung 5.38 zeigt sowohl die Messposition als auch das entsprechende Spektrum auf der Oberfläche des sandgestrahlten und geätzten Implantats. Es sind sowohl Spektren mit ausgeprägten tetragonalen als auch ausgeprägten monoklinen Phasenanteilen zu erkennen.

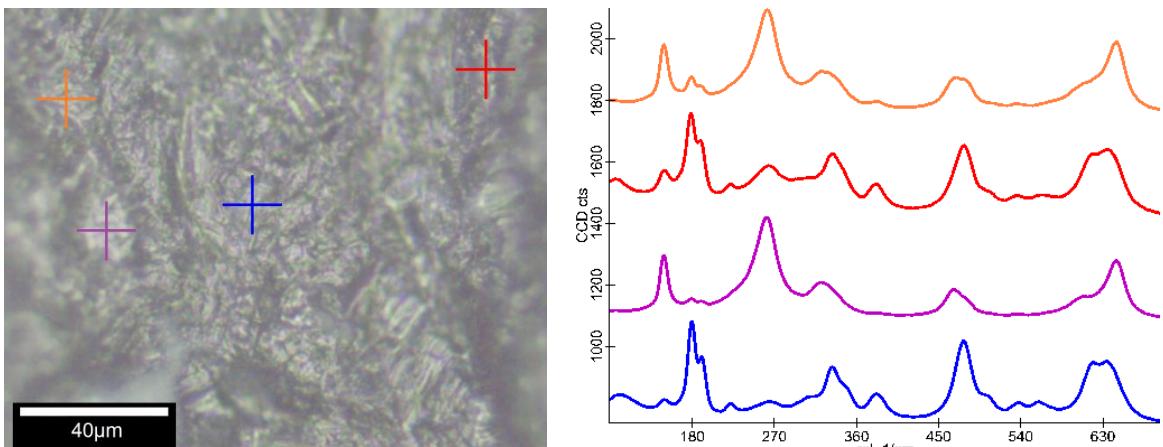


Abbildung 5.38: Positionsabhängige Phasenanteile des sandgestrahlten und geätzten Implantats

5.10 Verfärbungen durch die Laserbearbeitung

Bei der Laserbearbeitung von Zirkonoxid wurden zwei Arten von Verfärbungen festgestellt. Bei der radialen Bearbeitung sind es vermehrt rötliche Verfärbungen, wie sie in Abbildung 5.39 links auf der radial geschruppten und radial geschlichteten Kerbe am linken Ende der Zylinderprobe zu erkennen sind. Wie Abbildung 5.39 rechts zeigt, sind diese Verfärbungen nach dem Erwärmen der Probe für eine Stunde bei etwa 200 °C wieder verschwunden.



Abbildung 5.39: Parameterprobe vor und nach dem Erwärmen

Graue und schwarze Verfärbungen treten vermehrt an Stellen auf, bei denen der Laser eine geringe Scangeschwindigkeit hat und ein erhöhter Wärmeeintrag stattfindet. Die dritte Kerbe von links auf den Proben in Abbildung 5.39 wurde absichtlich mit schlecht gewählten Bearbeitungsparametern radial geschruppt. Aufgrund der langsamem Scangeschwindigkeit und dem geringem Bahnabstand hat sich das Zirkonoxid schwarz verfärbt. Schwarze Verfärbungen sind auch in den unteren Ecken der Kerben eins bis drei von rechts in Abbildung 5.39 zu erkennen. Von rechts nach links wurde die erste tangential geschruppt und dann poliert, die zweite tangential geschlichtet und die dritte tangential geschruppt. Da dieser Abtrag ohne Skywritelinien erfolgte blieb der Laserstrahl in den Ecken beim Beschleunigen und Abbremsen der optischen Achse etwas länger stehen und hat dadurch diese schwarzen Stellen hinterlassen. Wie Abbildung 5.39 zeigt, sind die schwarzen Verfärbungen nach dem Erwärmen der Probe für eine Stunde bei 200 °C nicht verschwunden.

Ein Artikel von Niko Bärsch beschreibt ebenfalls die dunklen Verfärbungen durch Laserbearbeitung auf Zirkonoxid [47]. Er geht davon aus, dass diese auf die erhöhte Rauheit der Oberfläche bei der Bearbeitung zurückzuführen sind. Nach seinen Angaben verschwinden die Verfärbungen nach Erwärmen der Probe für einige Minuten bei 300 °C.

In einem zweiten Versuch wurden deshalb alle laserbearbeiteten Implantate, die neben den rötlichen auch graue und schwarze Verfärbungen aufweisen einer Wärmebehandlung bei 300 °C für eine Stunde unterzogen. Wie Abbildung 5.40 zeigt, konnten durch die erhöhten Temperaturen

5 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

alle Verfärbungen entfernt werden. Möglicherweise handelt es sich bei den Verfärbungen um Farbzentren. Diese reversiblen Gitterdefekte in der Kristallstruktur können sichtbares Licht absorbieren.



Abbildung 5.40: Laserbearbeitete Implantate nach der Wärmebehandlung

6

Schlussfolgerung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein CAM Programm für die tangentiale Laserbearbeitung von zylindrischen Werkstücken erstellt. Mithilfe dieses Programms ist es möglich, den NC-Code für die Fertigung komplexer Geometrien zu berechnen und auf der Maschine mit synchroner Bearbeitung mit bis zu sieben Achsen gleichzeitig auszuführen. Da dieses CAM Programm das erste dieser Art ist und vieles von Grund auf neu programmiert wurde, kann es sein, dass das Programm noch Fehler enthält. Diese werden erst im Verlauf intensiver Benutzung durch neue komplexe Geometrien auftreten.

Um das Abtragsverhalten des Lasers auf Zirkonoxid zu untersuchen, wurde eine Parameterstudie für radiale sowie tangentiale Laserbearbeitung durchgeführt. Aus jeder Parameterstudie wurden je zwei Parametersätze hergeleitet, mit welchen eine geeignete Laserbearbeitung möglich ist. Bei den tangentialen Parametern wurde eine bessere Oberflächenqualität bei erhöhter Abtragsrate erzielt. Bei der radialen Bearbeitung wurde der Prozess durch Ablagerungen von abgetragenem Material behindert. Durch Ausblasen mit Druckluft oder durch eine gezielte Absaugevorrichtung könnte dies vermieden und dadurch die Abtragsrate weiter erhöht werden. Bei der tangentialen Laserbearbeitung wurde die Abtragsrate durch die Laserleistung begrenzt. Da in dieser Arbeit mit 520 nm Wellenlänge gearbeitet wurde, könnte durch den Wechsel auf 1040 nm die Laserleistung auf 16 W verdoppelt und dadurch die tangentiale Abtragsrate gesteigert werden.

Sowohl mit radialer als auch tangentialer Laserbearbeitung wurden diverse Implantate aus Zirkonoxid hergestellt. Durch die radiale Fertigung wurde eine raue, poröse Oberfläche erzielt, die für die Verwachsung mit dem Gewebe eine geeignete Struktur darstellen kann. Die erreichte Masshaltigkeit beim radialen Implantat ist mit einer mittleren Konturabweichung von 18 µm im Vergleich zum geschliffenen Implantat mit 7 µm gross. Beim tangentialen Implantat wurde eine glatte Oberfläche erreicht, die mit der geschliffenen vergleichbar ist und mit einer mittleren Konturabweichung von 4 µm dessen Masshaltigkeit übertrifft. Dafür haben sich durch die erhöhte Wärmeeintragung Risse und teileweise Schmelzsichten gebildet. Diese konnten durch radiale Nachbearbeitung wieder entfernt werden. Vielleicht ist es möglich, durch Erhöhen der Drehgeschwindigkeit und Reduzieren der Zustellung den Wärmeeintrag zu verringern, da die gesamt eingetragene Energie kontinuierlich auf der Oberfläche verteilt wird.

Da in dieser Arbeit tendenziell mit konservativen Parametern gearbeitet wurde, dauerte die Bearbeitung eines Implantats ungefähr zwei Stunden. Durch optimieren der Parameter oder der Laserstrategien könnte diese Zeit verkürzt werden.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Um die Osseointegration der Implantate zu erhöhen, wurden Versuche zur Mikrostrukturierung durchgeführt. Dabei wurden einzelne Laserspots und Rillen auf die Oberfläche aufgebracht.

Durch Ramanspektroskopie wurde bestätigt, dass durch die Laserbearbeitung keine Zunahme der monoklinen Phase erfolgt. Im Gegenteil, die monokline Phase wurde gegenüber der geschliffenen Oberfläche des Rohlings reduziert.

Die CAM Programme könnten durch straffen des Codes oder effizientere Algorithmen optimiert werden. Zusätzlich könnte durch Aufteilen der Berechnungsaufgaben auf mehrere Computer- oder Grafikprozessorkerne die Berechnungszeit verringert werden. Durch Umsetzen der CAM Programme durch frei verfügbare Programmiersprachen wie Python wären diese nicht mehr an die kostenpflichtige Matlabumgebung gebunden.

Um die Problematik des Anstellwinkels zu vermeiden, könnten die CAM Programme für radiale Laserbearbeitung durch neue Laserstrategien erweitert werden, damit auch senkrechte Abtragswände oder sogar Hinterschneidungen realisierbar sind.

A

Anhang

A.1 Ausrichten der Maschine vor der Bearbeitung

Das CAM Programm berechnet die Positionen der Laserbahnen bezüglich des Koordinatenursprungs der Stl-Datei. Drehungen und Schwenkungen bei der Bahnberechnung erfolgen ebenfalls um diesen Punkt. Deshalb muss bei der Bearbeitung der Ursprung der Stl-Datei genau mit dem Nullpunkt der Maschine im Drehschwenkpunkt übereinstimmen. Dazu wird vor der Bearbeitung der Fokuspunkt des Laserstrahls genau im Drehschwenkpunkt positioniert und mit dem Befehl „POSOFFSET SET X0 Y0 Z0“ ein neuer Nullpunkt auf der Maschine definiert.

Bei der Positionierung des Fokuspunktes zum Schwenkpunkt müssen die Abweichung um die X, Y, und Z-Achse minimiert werden. Dazu wird die Schwenkachse in die Ausgangsstellung gefahren und in die Drehachse ein kleiner Tisch eingespannt, wie es Abbildung A.1 links zeigt. Durch Lasermarkieren eines flachen Metallplättchens auf dem Tisch können die Abweichungen bestimmt werden. Die drei Abweichungen des Fokuspunkts gegenüber dem Drehschwenkpunkt sind in Abbildung A.1 rechts dargestellt. Der Fokuspunkt ist blau, der Drehschwenkpunkt schwarz eingefärbt.

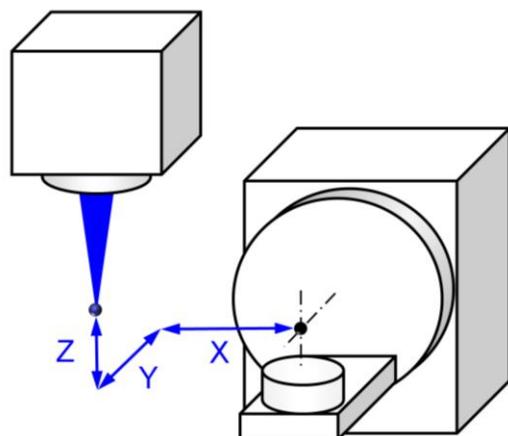
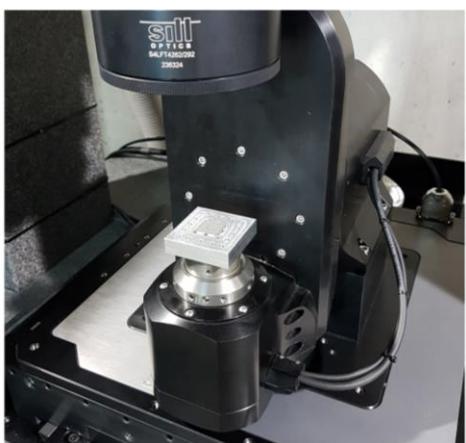


Abbildung A.1: Bestimmung der Abweichungen des Fokus zum Drehschwenkpunkt

Die Abweichung in Z-Richtung wird mit einem Fokustest korrigiert. Dazu werden mit dem Laser mehrere parallele Linien markiert. Zwischen den einzelnen Linien verfährt die Z-Achse ein kleines Stück nach unten. Damit wandert auch der Fokuspunkt des Laserstrahls von Linie zu Linie senkrecht von oben nach unten über die Oberfläche des Metallplättchens. Abbildung A.2 zeigt drei markierte Fokustests. Auf der linken Abbildung liegt der Fokuspunkt zu weit oberhalb der Oberfläche. Die markierten Linien sind deshalb etwas nach unten gegenüber der längeren Kontrolllinien verschoben. Auf der mittleren Abbildung liegt der Fokuspunkt genau auf der Kontrolllinie. Die Linien sind symmetrisch markiert. Bei der rechten Abbildung sind die Linien gegenüber den Kontrolllinien etwas nach oben verschoben. Der Fokuspunkt des Laserstrahls liegt also etwas zu weit unterhalb der Oberfläche.



Abbildung A.2: Fokustest zur Bestimmung der Abweichung in Z-Richtung

Zur Bestimmung der Abweichungen in X, und Y-Richtung gegenüber dem Drehschwenkpunkt werden mit dem Laser zwei Kreuze markiert. Nach dem markieren eines grossen Kreuzes wird die Drehachse um 180° gedreht und ein kleines Kreuz markiert. Durch die Abweichungen liegen die beiden markierten Kreuze zu einander versetzt wie es Abbildung A.3 links zeigt. Der Mittelpunkt der Drehachse liegt genau zwischen den beiden Kreuzen. Die Abweichung in X-Richtung entspricht der halben Versetzung der Kreuze in X-Richtung. Gleichermaßen gilt für die Y-Richtung wie es in Abbildung A.3 mittig dargestellt ist. Falls die Abweichungen sehr klein sind, liegen beide Kreuze direkt übereinander wie es Abbildung A.3 rechts zeigt.

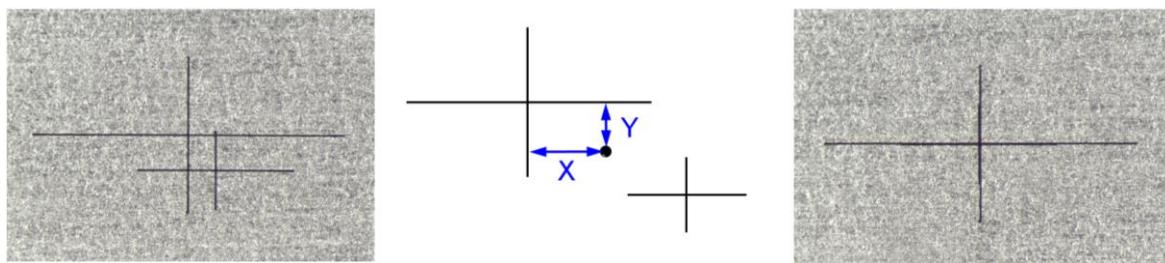


Abbildung A.3: Bestimmung der Abweichung in X und Z-Richtung

A.2 Anleitung zum Ausführen des NC-Codes

Für die Synchronbearbeitung wird durch das CAM Programm die Drehgeschwindigkeit der dominanten Drehachse in Grad pro Sekunde angegeben. Damit die restlichen Achsen ihre Vorschübe entsprechend anpassen, müssen diese auf dependent eingestellt sein. Diese Einstellung tätigt man im Configuration Manager unter dem Verzeichnis „Axis“ des aktuellen Parameterfiles wie es der Screenshot in Abbildung A.4 zeigt. Durch setzen einer 1 bei der Einstellung „Axis Type“ kann jede Achsen auf dependent geändert werden mit Ausnahme der Drehachse C. Diese muss durch Setzen einer 0 auf dominant eingestellt sein. Nach dem Speichern werden die Einstellungen übernommen.

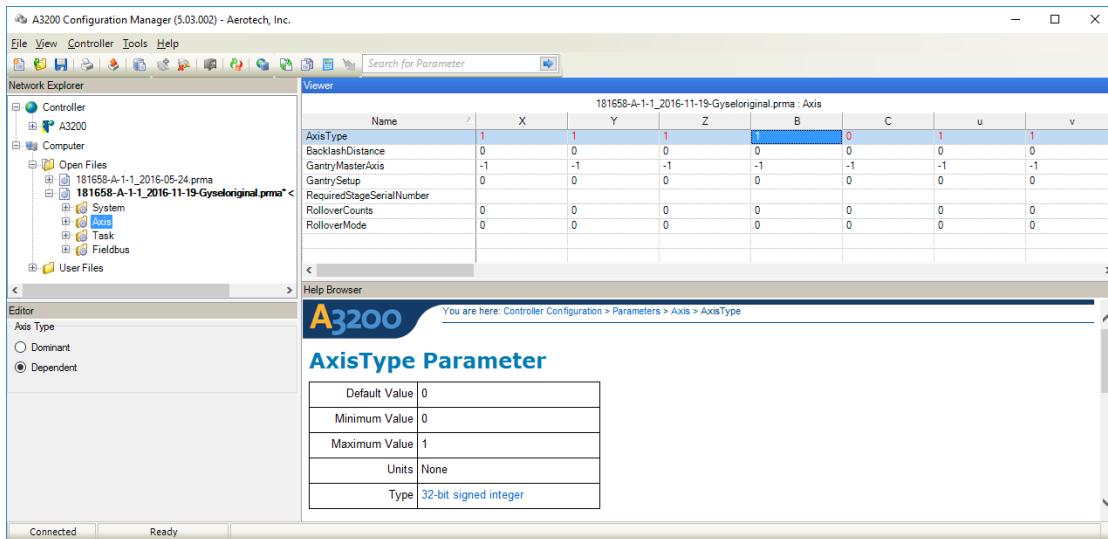


Abbildung A.4: Einstellungen im Configuration Manager von Aerotech

Sehr langer NC-Code kann mit dem Befehl „PROGRAM 1 BUFFEREDRUN“ direkt aus der Textdatei ausgeführt werden. Die Zahl 1 in diesem Befehl gibt an in welchem Task die Textdatei ausgeführt wird. Der Aufruf dieses Befehls muss aus einem anderen Task (zum Beispiel Task 2) erfolgen. Auf diesen Befehl folgt das Verzeichnis in dem sich die Textdatei befindet. Der Screenshot des Motion Composers in Abbildung A.5 zeigt wie die Eingabe erfolgt.

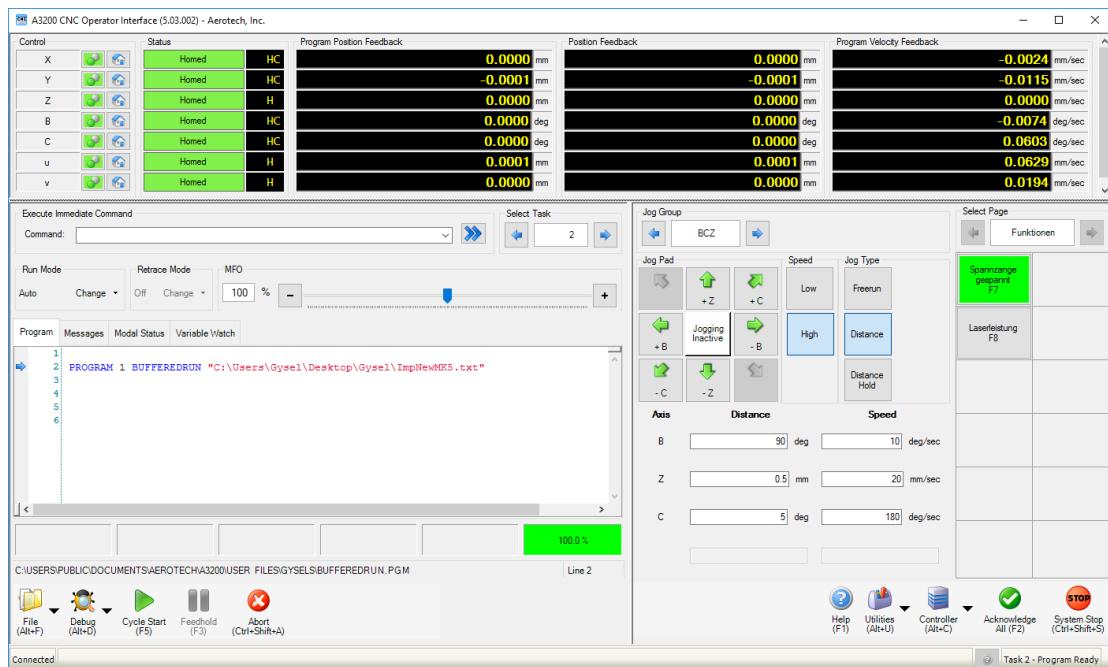


Abbildung A.5: Benutzeroberfläche des Motion Composer von Aerotech

A.3 Beschleunigungsfilter

Bei gewissen NC-Programmen wurde festgestellt, dass die mechanische X und Y-Achse knirscht. Mit den Befehlen „TrajectoryFIRFilter.X=48“ und „TrajectoryFIRFilter.Y=48“ kann dies vermieden werden. Diese Befehle verhindern abrupte Richtungsänderungen mit unendlich hohen Beschleunigungen für die X und Y-Achse und definieren Bewegungsfilter, die diese hohen

Beschleunigungen reduziert. Einziger Nachteil ist, dass dadurch die abgefahrene Kontur leicht verfälscht wird.

Wird der Wert 48 erhöht, werden die Beschleunigungen stärker reduziert. Bei Verringerung werden die Beschleunigungen erhöht. Die Befehle müssen nur einmal zu Beginn des Programmes ausgeführt werden. Für andere Achsen funktioniert der Befehl genauso.

A.4 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 zylindrische CAM Programm der Semesterarbeit sowie das tangential CAM Programm dieser Masterarbeit gespeichert.

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

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

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

A.5 Materialkennwerte

Die verwendeten Materialkennwerte des verwendeten Zirkonoxids (ATZ) sind in der rechten Spalte von Abbildung A.6 aufgeführt.



Zirkonoxidkeramik

Bezeichnung		TZP	TZP-A	FSZ	PSZ	ATZ*
Bestandteile		ZrO ₂ /Y ₂ O ₃	ZrO ₂ /Y ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	ZrO ₂ /Y ₂ O ₃	ZrO ₂ /MgO	ZrO ₂ /Al ₂ O ₃ /Y ₂ O ₃
Zusammensetzung	%	95/5	95/5/0.25	90/10	96.5/3.5	76/20/4
Dichte	g/cm ³	6.05	6.05	5.8	5.7	5.5
offene Porosität	%	0	0	0	0	0
Korngrösse (mli)	µm	0.4	0.35	10	20	0.4
Härte Vickers	Hv	1200	1200	1200	1500	1400
Härte Mohs		8	8	8	>8	8
Druckfestigkeit	MPa	2000	2000	2000	2000	2000
Biegefestigkeit	MPa	1000	1200	250	500	2000
Elastizitätsmodul	GPa	200	210	150	200	220
Bruchzähigkeit K _{1c}	MN/m ^{3/2}	8	8	-	10	8
Poissonkonstante	-	0.31	0.31	-	0.23	0.3
max. Anwendungstemperatur	°C	1000	1000	2000	1000	1000
Wärmeausdehnung (20-1000°C)	10 ⁻⁶ /K	10	10	10	10	9
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	2.5	2.5	2.5	2	6
Spezifische Wärme	J/kg K	500	500	500	550	600
Verarbeitungsmöglichkeiten:						
isostatisches Pressen		X	X	X	X	X
Formpressen		X	X		X	X
Schlickerguss				X		
HIP		X	X			X
Mögliche Anwendungen		Biokeramik, Präzisionsteile	Biokeramik Präzisionsteile	Sonden, Tiegel, Rohre	Rohre, Platten, Präzisionsteile	Biokeramik hochbelastete Verschleissteile

*ZIRALDENT® für dentale Anwendungen

Diese Angaben entsprechen dem aktuellen Stand unserer Kenntnisse und sollen über unsere Materialien und ihre Anwendungsmöglichkeiten informieren. Sie können darum keine bestimmten Eigenschaften eines Produkts oder dessen Eignung für einen konkreten Einsatzzweck zusichern. Etwaige gewerbliche Schutzrechte sind zu berücksichtigen. Unsere Qualitätssicherung ist in den Allgemeinen Verkaufsbedingungen formuliert.

METOXIT AG
Postfach 160
CH-8240 Thayngen
T: +41 52 645 01 01
F: +41 52 645 01 00
Internet www.metoxit.com
E-mail info@metoxit.com

© Metoxit AG 03/2015, Änderungen vorbehalten

Abbildung A.6: Materialkennwerte des verwendeten Keramiks

Literaturverzeichnis

- [1] Dentalpoint AG, <http://www.zeramex.com>, [Abgerufen: 21.4.2017]
- [2] Pfaff, J., Warhanek, M., Butler-Smith, P., DIPLAT – Diamond Integrated Pulsed Laser Ablation Technologies – 9th Newsletter, 2016, p. 3
- [3] Degen, C., Notizen zur Vorlesung – Physik 2 für Maschineningenieure Teil 3, ETH Zürich, 2014, p. 22-25
- [4] Schaeffer, R., D., Fundamentals of laser micromachining, CRC Press, 2012, p. 5
- [5] Hügel, H., Graf, T., Laser in der Fertigung – Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren, 2. neu bearbeitet Auflage, Vieweg+Teubner, 2009, p. 57
- [6] Kleiner, J., Huber, H., Lasermaterialbearbeitung – Praktikumsanleitung für den Lehrversuch, Version PAM, Laserzentrum Hochschule München, 2010, p 15-17
- [7] Ferraris, E., Vleugels, J., G., Yuebin, Bourell, D., Kruth, J., Pierre, Lauwers, B., Shaping of engineering ceramics by electro, chemical and physical processes, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2016, p. 762
- [8] Liang, Y., Dutta, S., P., Application trend in advanced ceramic technologies, Technovation 21, 2001
- [9] Riedel, R., Ionescu, E., Chen, I., W., Modern Trends in Advanced Ceramics, Ceramics Science and Technology, 2011, p. 3-38
- [10] Tietz, H., Technische Keramik – Aufbau, Eigenschaften, Herstellung, Bearbeitung, Prüfung, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994
- [11] Ring, T., A., Fundamentals of Ceramic Powder Processing and Synthesis, Academic Press, 1996
- [12] Yang, J., Juanli, Y., Yuanyuan, C., Yong, H., New laser machining technology of Al_2O_3 ceramic with complex shape, Ceramics International, 2012
- [13] Warhanek, M., Walter, C., Hirschi, M., Boos, J., Bucourt, J., F., Wegner, K., Comparative analysis of tangentially laser-processed fluted polycrystalline diamond drilling tools, Journal of Manufacturing Processes, 2016

- [14] Warhanek, M., Pfaff, J., Pablo., M., Schönbächler, L., Boos, J., Wegener, K., Geometry optimization of polycrystalline diamond tools for the milling of sintered ZrO₂, 7th HPC 2016- CIRP Conference on High Performance Cutting, 2016
- [15] Jochum, N., Zerspanung ultraharter Keramik am Beispiel einer dreigliedrigen Zahnbrücke, Doktorarbeit, ETH Zürich, 2013
- [16] Stevens, R., Zirconia and zirconia ceramics, Magnesium Elektron Publication No. 113, 1986
- [17] Kern, F., Gadow, R., Alumina toughened zirconia from yttria coated powders, Journal of the European Ceramic Society 32, 2012
- [18] Hjerpe, J., Närhi, T., O., Vallittu, P., K., Lippo, Lassila, L., V., J., Surface roughness and the flexural and bend strength of zirconia after different surface treatments, The journal of prosthetic dentistry, 2016
- [19] 3M ESPE, Rocatec Verbundsystem – Wissenschaftliches Produkt Profil, 2001
- [20] Güngör, M., B., Yilmaz, H., Nemli S., K., Bal, B., T., Aydin, C., Effect of surface treatments on the biaxial flexural strength, phase transformation, and surface roughness of bilayered porcelain/zirconia dental ceramics, The journal of prosthetic dentistry, 2015
- [21] Swain, M., V., Hannink, R., H., J., Metastability of the Martensitic Transformation in a 12 mol% Ceria-Zirconia Alloy: II, Grinding Studies, Journal of the American Ceramic Society, 1989
- [22] Wang, X., Shephard, J., D., Dear, F., C., Hand, D., P., Optimized Nanosecond Pulsed Laser Micromachining of Y-TZP, The American Ceramic Society, 2007
- [23] Ucer, C., Wright, S., Kelly, S., Drysdale, C., Feran, K., Friel, P., Henderson, S., Parker, C., Speechley, D., A dentist's guide to implantology, Association of Dental Implantology, 2012
- [24] Dentalpoint AG, Zeramex P6 - Anwenderanleitung
- [25] Delgado-Ruiz, R., A., Calvo-Guirado, J., L., Moreno, P., Guardia, J., Gomez-Moreno, G., Mate-Sánchez, J., E., Ramirez-Fernández, P., Chiva, F., Femtosecond laser microstructuring of zirconia dental implants, Wiley Online Library, 2010
- [26] Strong, J., T., Molz, F., J., Boggan, R., S., Peters, B., A., Dental implant with laser-etched platform switching beveled collar surface, Patent application publication, US 2014/009842 A1, 2014
- [27] Wang, X., Phase transformation in TZP-ZrO₂ under local stress and numerical simulation, Dissertation, Universität Tübingen, 2010, p. 41-45
- [28] Gogotsi, Y., Domnich, V., High pressure surface science and engineering, CRC Press, 2003
- [29] Gysel, J., Entwicklung eines CAM-Systems für 2D und 2.5D Laserbearbeitung, Bachelorarbeit, ETH Zürich, 2015
- [30] Gysel, J., Strategie und CAM-Entwicklung für die zylindrische 2.5D Laserbearbeitung, Semesterarbeit, ETH Zürich, 2015
- [31] Walter Maschinenbau GmbH, Helitronic Tool Studio – Die intelligente Lösung der Werkzeugbearbeitung, 2014
- [32] Schaub, B., Simulation tangentialer Laserbearbeitung von helixförmigen Spannuten, Bachelorarbeit, ETH Zürich, 2015
- [33] Warhanek, M., Tangential ultrashort pulsed laser processing for diamond tool finishing applications, DIPLAT Open Meeting, 2014

- [34] Tokarev, V., N., Wilson, J., I., B., Jubber, M., G., John, P., Milne, D., K., Modelling of self-limiting laser ablation of rough surfaces: application to the polishing of diamond films, Diamond and related materials, 1995
- [35] 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
- [36] 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
- [37] Walter, C., Conditioning of hybrid Bonded CBN Tools with Short and Ultrashort Pulsed Lasers, ETH Zürich, 2014
- [38] Spectra-Physics, Spirit – High repetition rate, high average power, ultrafast lasers, 2016
- [39] Leica Microsystems, Leica DCM 3D – Dual Core 3D Profiler combines Confocal Imaging and Interferometry, 2010
- [40] Alicona, Optical 3D Surface Metrology – Infinite Focus
- [41] PhenomWorld, Phenom ProX – the perfect all-in-one desktop SEM, 2015
- [42] Zoller, Originalbetriebsanleitung – Einstell- und Messgerät venturion 450-800, 2015
- [43] Zoller, Das Einstell- und Messgerät für Werkzeuge aller Art – venturion, 2014
- [44] Plüss, C., Laserbearbeitungsvorrichtung und Verfahren zur Herstellung eines rotationssymmetrischen Werkzeugs, Europäische Patentanmeldung, 2011
- [45] Hon Wah, W., Introduction to STL format, 1999
- [46] Felkel, P., Obdržálek, S., Straight Skeleton Implementation, 1998
- [47] Bärsch, N., Barcikowski, S., Baier, K., Ultrafast-Laser-Processed Zirconia and its Adhesion to Dental Cement, JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 3, No. 2, 2008, p. 80

Plagiatserklärung

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

Merkblatt Plagiat: http://www.ethz.ch/students/semester/plagiarism_s_de.pdf

Ort, Datum

Unterschrift