

**Entwicklung
einer rotierenden Bearbeitungsoptik zur
Lasermikrobearbeitung**

von

Diplom-Ingenieur Norbert Müller

aus Koblenz

der Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften

- Dr. - Ing. -

genehmigte Dissertation

Tag der wissenschaftlichen Aussprache:

27.10.2011

Berlin 2011

D 83

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. - Ing. Henning Meyer (TU Berlin)

1. Gutachter: Prof. Dr. rer. nat. Heinz Lehr (TU Berlin)

2. Gutachter: Dr. - Ing. Alexander Binder (Ingenieurbüro Dr. Binder)

- für meinen Sohn Jannis -

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand neben meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Laser- und Medizin-Technologie GmbH Berlin und am Institut für Konstruktion Mikro - und Medizintechnik der Technischen Universität Berlin.

Herrn Professor Dr. rer. nat. Heinz Lehr möchte ich für die Aufnahme als Doktorand am Institut und für die Unterstützung und Betreuung meiner Arbeit danken. Ebenso denke ich gerne an die vielen interessanten und aufschlussreichen Gespräche, die auch abseits des Fachlichen entstanden. Frau Helena Lehr gilt mein Dank für die ausführlichen Korrekturen des Manuskripts und vor allem für ihre Erfahrung und Unterstützung bei allen verwaltungstechnischen Abläufen. Als Externer fühlte ich mich in der sehr angenehmen Atmosphäre des Instituts besonders wohl, was mich auch immer wieder motivierte.

Die Laser- und Medizin-Technologie GmbH Berlin gab mir die Möglichkeit, mich mit diesem Thema zu beschäftigen und auf diesem Gebiet zu arbeiten. Mein besonderer Dank gilt hier der Arbeitsgruppe Angewandte Lasertechnik, die durch ihre konstruktive und unermüdliche Unterstützung den Erfolg erst möglich machte.

An dieser Stelle sei hier Herrn Dr. David Ashkenasi und Herrn Dipl.-Phys. Andreas Lemke für die zahlreichen Diskussionen zu physikalischen Problemstellungen gedankt. Herrn Dipl. - Ing. Tristan Kaszemaikat danke ich für die Unterstützung und die Geduld bei der Montage, Inbetriebnahme und der Durchführung erster Applikationen. Herrn Reinhardt Dietrich möchte ich für seine fachlich wertvollen Anregungen und die Realisierung der elektronischen Steuer- und Regelkomponenten danken.

Auch danke ich Herrn Daniel Jahns, der während seiner Bachelorarbeit viele hervorragende Applikationsergebnisse erzielte.

Ein besonderer Dank gilt Frau Dipl.-Kfr. Anja Baum für die Durchsicht und die redaktionelle Unterstützung während der Entstehung dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Stand der Forschung und Technik	7
2.1	Mikromaterialbearbeitung	7
2.1.1	CO ₂ - Laserschneiden	8
2.1.2	Feinstanzen	8
2.1.3	Ultraschallschwingläppen	8
2.1.4	Sandstrahlen (Powder Blasting)	9
2.2	Grundlagen der Strahlentechnik	9
2.2.1	Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Materie	14
2.2.2	Bearbeitungsprozess am Beispiel einer Laserbohrung	15
2.3	Bearbeitungsverfahren	17
2.4	Strahlrotationssysteme	19
2.4.1	Scannersysteme	21
2.4.2	Außermittig rotierende Linsen	22
2.4.3	Rotierende Keilplatten (Diffraktiv - Scanner)	23
2.4.4	Rotierende Keilplatten mit Anstellwinkel	24
2.4.5	Bildrotationssysteme	24
2.4.6	Strahleinstellung vor der Fokussierung	25
2.4.7	Strahleinstellung nach der Fokussierung	26
3	Das optische System	28
3.1	Anforderungen an das optische System	28
3.2	Komponenten und Bewegungsoptionen	29
3.3	Funktionsweise und Einstellparameter	30
3.4	Optische Fehler und Fokusqualität	31
3.4.1	Sphärische Aberration	32
3.4.2	Koma	32
3.4.3	Astigmatismus	33
3.4.4	Wellenoptische Betrachtung	33
3.4.5	Bildfeldwölbung	35
3.4.6	Auswahl optischer Gläser für den Strahlengang	37
3.5	Kompensation der optischen Fehler durch Rotation	38
3.6	Vibration des optischen Systems	38
3.7	Erreichbare Strahlwerte	40
4	Konstruktion und Aufbau der Bearbeitungsoptik	42
4.1	Anforderungen an die Konstruktion	42
4.2	Konstruktion und Aufbau von System 1	43
4.2.1	Technische Daten System 1	46
4.3	Konstruktion und Aufbau von System 2	46
4.3.1	Konstruktion und Aufbau des Messsystems	49
4.3.2	Technische Daten System 2	51
4.4	Ansteuerung der Systeme	52

5	Applikation	55
5.1	Versuchsbeschreibung.....	55
5.2	Systemtechnik	56
5.3	Transparente Werkstoffe	59
5.3.1	Einfluss der Wellenlänge	61
5.3.2	Bearbeitungsstrategie und Wirkungsweise	63
5.3.3	Abtragspur und Kantenqualität.....	66
5.3.4	Puls - zu Puls - Verteilung.....	67
5.3.5	Pulsdauereinfluss.....	68
5.4	Keramische Werkstoffe.....	71
5.4.1	Eigenschaften keramischer Werkstoffe.....	72
5.4.2	Polarisationseigenschaften	75
5.4.3	Herstellung definierter Bohrlochgeometrien.....	76
5.4.4	Bohrwandqualität	79
5.4.5	Erreichbare Bohrlochgeometrien	80
6	Zusammenfassung.....	84
7	Ausblick.....	86
8	Literaturverzeichnis.....	87
9	Symbolverzeichnis.....	91
10	Veröffentlichungen und Vorträge im Verlauf dieser Arbeit.....	94
11	Aus dieser Arbeit hervorgegangene Patente.....	96
12	Anhang	97
12.1	Systementwicklung	97
12.2	Bearbeitungsbeispiele transparenter Werkstoffe.....	99
12.3	Bearbeitungsbeispiele keramischer und anderer Werkstoffe	102

1 Einleitung

Eine der ersten Applikationen der Lasermaterialbearbeitung betraf in den frühen siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts das Bohren von synthetischen Rubin-Lagersteinen für die Uhrenindustrie mittels gepulstem Rubinlaser. Die eingebrachte Bohrung diente als Start einer Reihe von Bearbeitungsschritten, die zum fertigen Lagerstein mit Ölsenkung und polierter Lagerbohrung führte. Seitdem wurde durch intensive Forschung und Entwicklungsarbeit die Präzision, Oberflächenrauheit und Effizienz enorm verbessert. Heute werden in Bauteilen aus PKD (polykristalliner Diamant) Bohrungen mittels Laser in Fertigqualität eingebracht.

Im Mittelpunkt dieser Bemühungen standen lange die Laser, die durch die Entwicklung von Festkörpersystemen mit kurzer Pulsdauer, hoher Strahlqualität und kürzeren Wellenlängen einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der Bearbeitungsqualität lieferten. So konnte der Bohrungsdurchmesser beim Einzelpuls- und Perkussionsbohren in einen Bereich unterhalb 100 μm verringert werden [Rohd99] [Alve94]. Die Erarbeitung angepasster Prozessstrategien wie die Einzelpulsdiagnostik führten zu einer Qualitätsverbesserung der Bohrung [Bahm00], die Intensitätsmodulation zu einer gewissen Steuerbarkeit der Bohrgeometrie [Treu99]. Problematisch bei dieser Art der Bearbeitung ist der Abtransport des abgetragenen Materials.

Bei metallischen Werkstoffen überwiegt bis in den Bereich von mehreren hundert Nanosekunden Pulsdauer der schmelzförmige Anteil. Verkürzt man die Pulsdauer bis in den heute industriell verfügbaren Femtosekundenbereich, reduziert sich der Schmelzanteil erheblich, kann aber nicht vollständig eliminiert werden. Trotz Verwendung von Ultrakurzpulslasern, bei denen der Materialabtrag hauptsächlich dampfförmig stattfindet, wodurch sich die Rundheit von Bohrungen sowie die Rauigkeit der Bohrwand verbessern lassen, bestimmt die erstarrende Schmelze die Geometrie der Bearbeitung [Nolt99]. Bei nichtmetallischen Werkstoffen wie bestimmten Keramiken, Gläsern und Kristallen, bei denen keine Schmelze entsteht, muss dafür Sorge getragen werden, dass die aus dem Material ausgeschlagenen Partikel, deren geometrische Abmessungen bis ca. 100 μm betragen können und sehr scharfkantig sind, nicht den Bearbeitungskanal verstopfen und so zum Totalausfall des Bauteils führen. Bei dieser Art von Werkstoffen sind nicht nur die Laserparameter für eine erfolgreiche Bearbeitung von Bedeutung, sondern auch die Strahlführung, da die Energie so in das Werkstück eingebracht werden muss, dass ein lokaler thermischer Stress vermieden, jedoch die notwendige Schwellenergie zum Abtrag erreicht wird.

Diese Art der Strahlführung muss einerseits eine hohe Dynamik in der Verteilung der Laserpulse aufweisen, andererseits über die nötige Präzision verfügen, um Kanäle und Bohrungen in gewünschter Form und Qualität auszuführen. Etabliert haben sich hier Trepanieroptiken oder auch eine Sonderform der Trepanieroptiken: die Wendelbohroptiken. Bei dieser Art von Strahlführungssystemen wird der Laserstrahl von einem rotierenden Linsensystem in die gewünschte Position gelenkt und führt eine Kreisbewegung um die optische Achse aus. Dies ermöglicht einen schonenden Abtrag bei Werkstoffen mit schmelzfreier Bearbeitung, wobei in Strahlrichtung die Fokusslage je nach Bearbeitungsfortschritt nachgestellt wird. Verläuft die Nachstellung wendelförmig, z. B. über die Helixsteuerung einer CNC-Maschine, und wird der

Durchbruch erst nach einer Vielzahl von Umläufen erreicht, spricht man von einer Wendelbohroptik. Zusätzlich lässt sich das Werkstück bewegen, um Formbohrungen oder Kanäle in Keramiken oder Gläsern herzustellen. Bei aufschmelzenden Materialien ähnelt das Trepanierbohren dem Laserschneiden. Während der Bearbeitung wird der Schmelzaustrieb durch Rotation zur Außenseite realisiert. Hierdurch wird, anders als bei der Perkussions- und Einzelpulsbohrung die Schnittkante geglättet und die Schmelzschichtdicke minimiert. Das Wendelbohren ähnelt in seinem Ablationsmechanismus dem Laserstrahl-Abtragen. Wird hierzu das Werkstück bewegt, um Formbohrungen einzubringen, spricht man vom Laser-Erodieren [Daus99]. Die Pulsdauer für Trepanierbohrungen bzw. Wendelbohrungen liegen je nach Applikation der verwendeten Materialien und Anforderungen im Bereich von ns bis ps. Diese Bearbeitungsart zeichnet sich besonders durch eine hohe Geometrietreue und gute Wandqualität aus.

In der Abbildung 1-1 sind die jeweiligen Prozessstrategien bildlich dargestellt. Beim Einzelpulsbohren (Single-Shot) werden durch hohe Pulsenergie und Pulsdauer Sacklöcher oder Durchbohrungen in das Material eingebracht. Der Abtrag wird durch die Wahl der Laserparameter sowie dessen Strahlqualität bestimmt.

Will man die Bohrung durch dickere Werkstücke (einige mm) führen, greift man zum Perkussionsbohren. Hierbei werden mehrere Laserpulse auf die gleiche Stelle im Material eingebracht, um so durch Ablation die Bohrung durch das Werkstück zu treiben.

Beim Trepanieren wird im Bohrmittelpunkt eingestochen, der Laserstrahl auf einer Spiralbahn zum Außendurchmesser gelenkt und dort entlang einer Kreiskontur geführt. Hierdurch kann die Präzision der Bohrung deutlich erhöht werden.

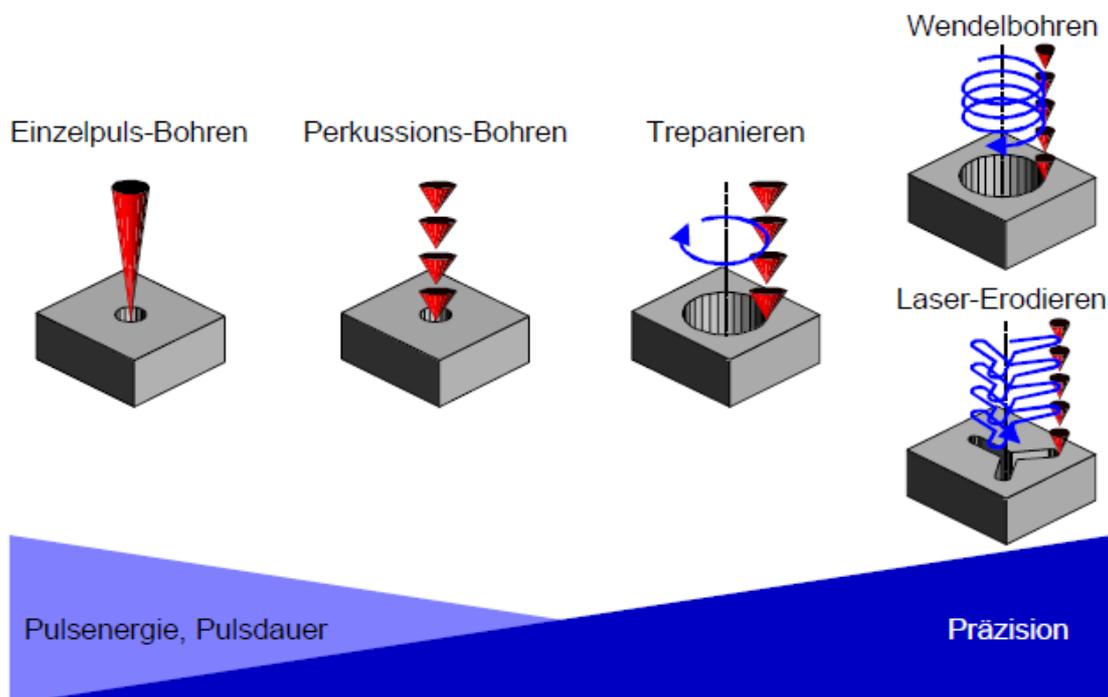


Abb. 1-1 Prozessstrategien zur Erzielung von Strukturen hoher Präzision [Daus99]

Diese Verfahren eignen sich nicht für Werkstoffe mit schmelzfreier Bearbeitung, hier würde ein großer Teil der eingebrachten Energie als Wärme in das Werkstück übergehen und durch thermischen Stress zum Bruch oder durch Abschattung und der damit verbundenen Leistungsminderung zum Abtragsstop führen.

Einzig beim Wendelbohren ist die Kontrolle über Energieeintrag und Verteilung der Einzelpulse ausreichend hoch, um eine schonende und präzise Bearbeitung in die Tiefe des Werkstücks und letztendlich eine Durchbohrung auszuführen.

Der Nachteil dieses Verfahrens gegenüber dem Einzelpuls-, Perkussions- und Trepanierverfahren ist die hohe Bearbeitungsdauer.

Das Laser-Erodieren lässt sich ebenso mit einem Trepaniersystem realisieren. Zusätzlich zur Helixbewegung wird das Werkstück unter dem Laserstrahl bewegt, um die gewünschte Form auszuarbeiten. Die Bearbeitungskontrolle ist mit der beim Wendelbohren vergleichbar.

Industriell nachgefragt werden immer mehr Werkstoffe, die aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften in die Produktherstellung einfließen. So sind Gläser, keramische und kristalline Werkstoffe in vielen Produkten zu Standardbauteilen avanciert, welche die Funktionalität und Qualität erhöhen. Hierzu zählt die Solarbranche, die Glas als preiswertes Basismaterial für Schichtsysteme verwendet und die Emitter-Wrap-Through-Zellen-Kontaktierung mit Mikrobohrungen nutzt. Ebenso dienen Gläser als Basisträger für Fluidsysteme in der Medizin- und Analysetechnik oder als Display sowie Gehäuseabdeckungen für mobile Geräte. Keramische und kristalline Werkstoffe finden ihre Anwendung bei der Herstellung von Werkzeugen, wie z.B. PKD in Verwendung mit Erodierstempeln oder bei Werkzeugen für die mechanische Glasbearbeitung. Andererseits lassen sich Keramiken mit ihren außergewöhnlichen elektrischen Eigenschaften auch als Träger hochbeanspruchter Schaltkreise oder als Isolationswerkstoff nutzen.

Allein dieser kleine Einblick lässt erahnen, welches Potential mit geeigneten Fertigungsmethoden umgesetzt werden kann. Bei diesen oft sehr speziellen Applikationsanforderungen reicht die Flexibilität der auf dem Markt befindlichen Bearbeitungsoptiken bezüglich Parameterraum, Handhabung und Robustheit nicht aus, um auf alle Anforderungen reagieren zu können. Allen gemeinsam ist, dass die Strahlmanipulation vor der eigentlichen Fokussierung stattfindet, und der aus der optischen Achse ausgelenkte Strahl im Nachgang auf die sphärischen Flächen der Fokussieroptik trifft. Die Parameterverstellung muss an die Sphären angepasst werden und erlaubt somit keine unabhängige Verstellung, da eine Durchmesseränderung immer eine Winkelverstellung nach sich zieht und umgekehrt. Dies erschwert die Parametersuche und Handhabung bei der Applikation erheblich. Außerdem muss die Fokussieroptik so ausgelegt sein, dass der außermittig auftreffende Strahl, der im Durchmesser und in der Winkelanstellung variabel ist, die entstehenden optischen Fehler korrigiert. Eine stationär feststehende Fokussieroptik kann diese nicht zur Bearbeitungsebene ausrichten wie unter Kapitel 3.5 beschrieben. Zwar sind auf den Markt Systeme mit Bildrotator erhältlich, jedoch drehen diese nur das Strahlprofil des einfallenden Laserstrahls, nicht jedoch die in der Bearbeitungsoptik entstehenden optischen Fehler. Will man die erreichbaren Durchmesser des Perkussionsbohrens mit der Qualität der Wendelbohrung erhalten, ist ein Eingangsstrahl mit

hoher Qualität und Rundheit notwendig, da auch ein Bildrotator das Strahlprofil nur um die Achse dreht und so bestenfalls die größte Achse eines elliptischen Strahls als Durchmesser projiziert, wobei die entstehenden optischen Fehler noch nicht berücksichtigt sind. Eine große Anzahl von optischen Elementen und damit lange Glaswege charakterisieren diese Systeme, die sie für Ultrakurzpulssysteme ungeeignet und teuer machen, da ihre Optiken aufgrund der Dispersion an diese Situation angepasst werden müssen.

In dieser Arbeit wird ein optisches System vorgestellt, das sowohl einen großen Parameter-
raum abdeckt, als auch den hohen Präzisionsansprüchen bei der Mikrobearbeitung gerecht wird. Außerdem erlaubt es, die Masse und die Geometrie der auf dem Markt erhältlichen Bearbeitungssysteme mehr als zu halbieren. Die Konstruktion kann somit auf die unterschiedlichen Anforderungen aus der Industrie reagieren und angepasste Lösungen anbieten. Hierzu werden zwei unterschiedliche Konstruktionsvarianten beschrieben und ihre Funktionsfähigkeit erläutert. Zur Überwachung der Stellparameter wird eine Onlinelösung präsentiert, welche die Reproduzierbarkeit der Applikation gewährleistet. Bei den Verfahrensuntersuchungen werden die unterschiedlichen Bearbeitungsstrategien für transparente, keramische und kristalline Werkstoffe gezeigt, die je nach Anforderung an Effizienz und / oder Präzision angepasst sind. Die aus dieser Arbeit hervorgegangenen Patente und Veröffentlichungen sind in Kapitel zehn und elf aufgelistet.

2 Stand der Forschung und Technik

2.1 Mikromaterialbearbeitung

Die Laserfertigungsverfahren finden sich nach DIN 8580 in der dritten Hauptgruppe „Trennen“ unter „Abtragen“ DIN 8590 in Teil 1 „Thermisches Abtragen“ wieder. Hierbei versteht man unter Trennen das Aufheben des Werkstoffzusammenhalts an der Bearbeitungsstelle. Zur Bearbeitung von spröden -, keramischen -, kristallinen - und Glaswerkstoffen scheiden Verfahren wie das elektrochemische oder das funkenrodierende Abtragen aus, da diese nur mit elektrisch leitenden Werkstoffen realisiert werden können. Die spanenden Verfahren üben eine gewisse Kraft auf das Werkstück aus, das bei dünnen, sensiblen Bauteilen problematisch werden kann. Außerdem unterliegen hier die Werkzeuge, aufgrund der Härte des Materials, einem großen Verschleiß. Das chemische Abtragen ist ein Verfahren, welches durch eine ganze Reihe von Fertigungsschritten gekennzeichnet ist. Hierbei werden Bauteile im Parallelprozess für die Massenproduktion hergestellt. Dieses Verfahren ist schwer in die Fertigungskette von makroskopischen Bauteilen zu integrieren, um Mikrostrukturen einzubringen. Dennoch soll hier auf einige Verfahren, wie das CO₂- Laserschneiden, das Feinstanzen, das Ultraschallschwinglappen sowie das Sandstrahlen, kurz eingegangen werden.

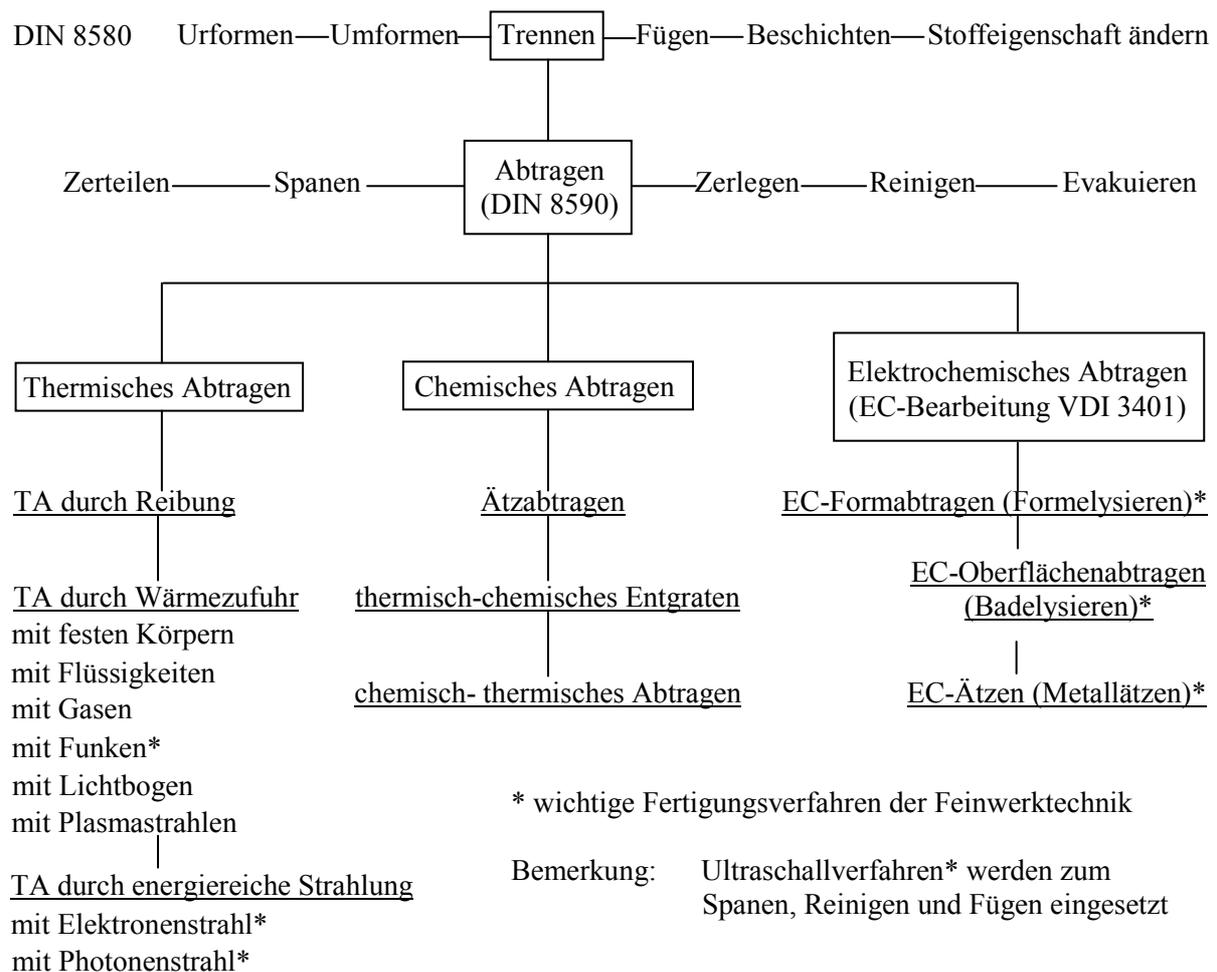


Abb. 2-1 Verfahrenseingliederung DIN 8580, nach [Dubb07]

2.1.1 CO₂ - Laserschneiden

Das CO₂ - Laserschneiden findet bei der Bearbeitung von Flachglas mit einigen Millimetern Dicke Anwendung. Unter Bestrahlung von CO₂ - Laserlicht wird das Glas lokal aufgeheizt, um im Nachgang mit Gas gekühlt zu werden. Der so entstehende thermische Stress lässt das Glas mit einer Schnittkante in optischer Qualität brechen. Um Konturen auszuschneiden, müssen Entlastungsschnitte eingebracht werden, damit Formteile entstehen. Außerdem ist das Ausarbeiten von Innenkonturen nur begrenzt möglich. Ein weiterer Nachteil ist, dass zum Schneiden genügend Material (einige Millimeter) überstehen muss, um den Prozess des thermischen Schocks einzuleiten. Somit ist man mit diesem Verfahren, trotz der hervorragenden Kantenqualität, geometrisch stark eingeschränkt [Herm09].

2.1.2 Feinstanzen

Das Feinstanzen findet unter anderem seine Anwendung in der Fertigung von Einspritzdüsen für den Benzinotomotor. Hier werden Bohrungen mit einem Aspektverhältnis (Durchmesser zu Materialstärke) bis zu 1,3 in Edelstahl mit höchster Präzision eingebracht. Die Bewertung der Bohrung findet an fluidtechnischen Kenngrößen, wie Abstrahlwinkel und Tröpfchengröße des versprühten Kraftstoffs statt, die dann auf die einzubringende Geometrie übertragen werden muss. Geometrische Änderungen im Submikrometerbereich wirken sich gravierend auf die Strahlqualität aus. Typische Kenngrößen sind hier Durchmesser von ca. 100 µm bei 40-80 µm Materialstärke und Taktzeiten von unter drei Sekunden. Die Grenzen dieses Verfahrens liegen bei Formbohrungen, Hartmetallen und höheren Aspektverhältnissen.

2.1.3 Ultraschallschwingläppen

Beim Ultraschallschwingläppen werden metallische Abformwerkzeuge in Schwingungsresonanz (ca. 20 kHz) versetzt. Mit Hilfe einer abrasiven Schleifmittelsuspension (meist Borkarbid oder Siliziumkarbid) sowie dem physikalischen Effekt der Kavitation durch Ultraschall tritt eine Mikrozerspanung sowohl am Werkstück als auch am Werkzeug auf. Der Werkzeugverschleiß liegt hierbei je nach Art der zu bearbeitenden Werkstoffe zwischen 2-30 Prozent vom Zerspanungsvolumen. Präzision, Reproduzierbarkeit und Verschleißfestigkeit konnten durch den Einsatz von laserstrukturierten Diamantkörperstempeln erheblich verbessert werden. Beim Bohren von Al₂O₃ wurden Bearbeitungsgeschwindigkeiten von 3-5 µm / s erreicht [Gill00]. Obwohl im Labor mit dieser Technik Bohrungen mit 150 µm Durchmesser bei 500 µm Materialstärke in Borosilikatglas (Pyrex, Corning 7740) gezeigt wurden [Yan02], wird das Verfahren heute in der industriellen Fertigung bei Strukturen nur bis ca. 300 µm eingesetzt. Vorteile dieser Technik sind zylindrische Bohrungen, bzw. senkrechte Kanten im Seriellen- wie Parallelprozess. Außerdem lassen sich mit angepassten Stempeln beliebige Formen ausarbeiten.



Abb. 2-2 Bohrstempel aus PKD Ø 0,2 mm und Bohrungen in Al₂O₃ [Gill00]

2.1.4 Sandstrahlen (Powder Blasting)

Industriell findet das Powder Blasting seine Anwendung bei der Strukturierung von Gläsern zur Herstellung von Fluidsystemen und bei der Bearbeitung von Glaswafern. Bei diesem Verfahren werden Partikel aus Al_2O_3 mit einer Größe von 3-30 μm in den Luftstrom im Bereich der Düsengeometrie eingebracht und mit hoher Geschwindigkeit auf das Werkstück geschossen. Auf dem Werkstück befindet sich eine Maske, die dafür sorgt, dass nur die Stellen getroffen werden, die bearbeitet werden sollen. Die Partikel sorgen beim Auftreffen dafür, dass das Werkstück abgetragen wird. Beim weiteren Abtrag entsteht ein typischer Bohrtrichter wie in der Abbildung 2-3 dargestellt. Die Vorschubgeschwindigkeiten liegen hier bei 25 $\mu\text{m} / \text{min}$ und die Oberflächenrauheit bei unter 2,5 μm . Dieses Verfahren ist trotz seiner offensichtlichen Nachteile eine sehr preiswerte Alternative zum Einbringen von Mikrostrukturen in spröde Werkstoffe. Bei der Bearbeitung von sehr dünnen Targets und Bohrungen unter 100 μm Durchmesser werden die Grenzen dieser Technologie deutlich.

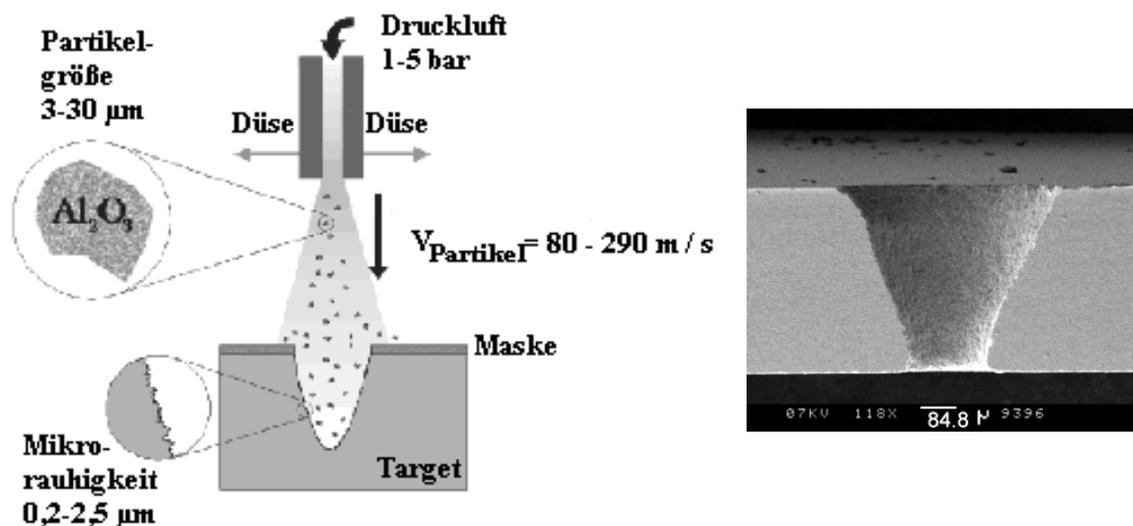


Abb. 2-3 Schematische Darstellung des Powder - Blastings - Fertigungsprozesses, links Bohrung in 500 μm starkes Pyrex bei einer Austrittsbohrung von \varnothing 200 μm , rechts [Wens02]

2.2 Grundlagen der Strahlentechnik

Zur Lasermikromaterialbearbeitung werden nicht nur Festkörperlaser, sondern auch Gaslaser eingesetzt. Zu nennen ist hier der Excimerlaser, der auf Grund seiner Intensitätsverteilung über Maskenabbildung zum Einsatz kommt. Diese Verfahren unterscheiden sich deutlich von den fokussierenden und werden in [Jasp02] beschrieben. Hier sollen jedoch nur die fokussierenden Verfahren betrachtet werden.

Für den Abtragprozess wird die Laserstrahlung durch ein optisches System auf das Werkstück fokussiert. Neben der Art der Fokussierung und den Eigenschaften des Materials ist dabei die Charakteristik der Laserstrahlung von entscheidender Bedeutung für das Abtragsergebnis. Diese lässt sich nach [Herz94] durch folgende Parameter beschreiben:

- Wellenlänge
- örtliche Intensitätsverteilung
- Strahlage, Strahlabmessung, Strahlausbreitung
- Strahlqualitätskennzahl, Beugungsmaßzahl
- Strahlleistung
- Polarisationszustand
- Pulsdauer, Pulsform, Repetitionsrate

Einer der Festkörperlaser, der am häufigsten eingesetzt wird, ist der Nd:YAG-Laser mit einer Wellenlänge von 1.064 nm, andere auf Neodym-dotierte Kristalle basierende Systeme sind Nd:YVO₄, Nd:YLF, Nd:YTR und Nd:YER, die je nach Anforderung an die Systeme wegen ihrer thermischen Linsenwirkung, ihrer Doppelbrechung oder ihrer Polarisations-eigenschaft Verwendung finden. Allen gemein ist ihre Grundwellenlänge bei rund 1.000 nm. Abhängig vom Absorptionsgrad der zu bearbeiteten Materialien lässt sich die Wellenlänge durch Frequenzverdopplung (Nd:YAG 532 nm) oder Frequenzverdreifung (Nd:YAG 355 nm) bzw. -vervierfachung (Nd:YAG 266 nm) in den gewünschten Wellenlängenbereich bringen. Kürzere Wellenlängen finden nicht nur aufgrund ihrer höheren Absorption (z.B. bei Gold, Silber und Kupfer) eine immer größere Nachfrage, sondern auch durch ihre bessere Fokussierbarkeit gegenüber langwelligen Systemen. Dies lässt sich aus dem Produkt Taillenradius und Öffnungswinkel ableiten und wird auch als Strahlparameterprodukt SPP bezeichnet, Gleichung (2-6), [Hodg92].

In der Abbildung 2-4 ist das Absorptionsverhalten der gängigsten Metalle aufgezeigt. Besonders interessant sind die Metalle Kupfer und Gold, da sie bei der Herstellung von Elektronikbauteilen eine große Rolle spielen. Mit der Grundwellenlänge des Nd:YAG-Lasers ($\lambda = 1.064$ nm) lassen sich kaum befriedigende Ergebnisse bei diesen Metallen erzielen. Deutlich verbessert wird dies durch Frequenzverdopplung ($\lambda = 532$ nm).

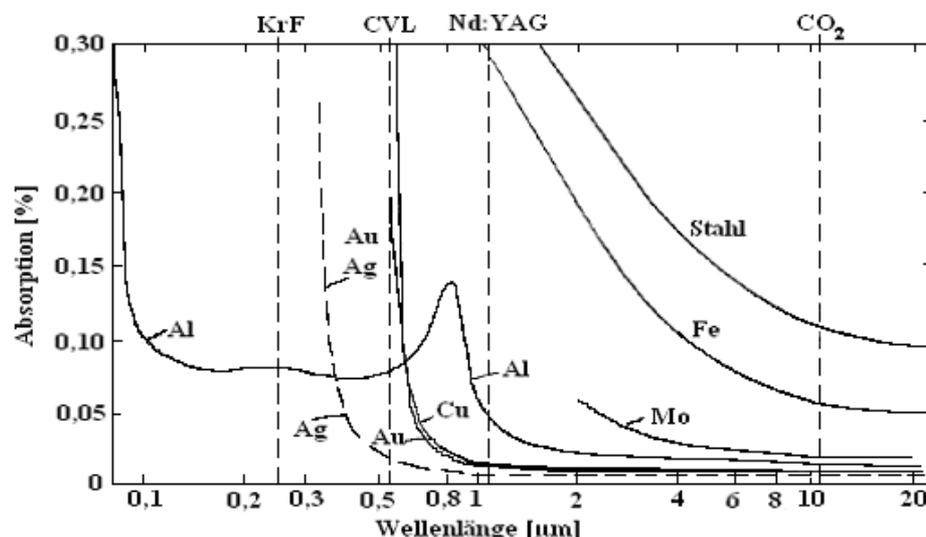


Abb. 2-4 Absorption in Abhängigkeit der Wellenlänge für ausgewählte Metalle, nach [Bimb91]

Die Fokussierbarkeit der Laserstrahlung nach der ISO-Norm 11146 wird durch die Beugungsmaßzahl M^2 beschrieben. Diese gibt den Divergenzwinkel eines Laserstrahls im Verhältnis zur Divergenz eines idealen Gaußstrahls mit gleichem Durchmesser an der Strahltaile an. Der Grundmode TEM_{00} besitzt eine gaußförmige Intensitätsverteilung, die als Funktion der Ausbreitungsrichtung z wie folgt lautet:

$$I(r,z) = I_0 \left(\frac{w_0}{w(z)} \right)^2 \exp \left[-2 \left(\frac{r}{w(z)} \right)^2 \right] \quad (2-1)$$

Hierbei ist w der Abstand, bei dem die Intensität um den $1/e^2$ -fachen Wert abgefallen ist. Die Berechnung des Strahlradius $w(z)$ in Abhängigkeit der Ausbreitungsrichtung z ergibt sich aus:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2} \quad (2-2)$$

Hier steht z_R für die Rayleighlänge, die als Abstand von der Strahltaile, bei der sich der Strahldurchmesser um den Faktor $\sqrt{2}$ vergrößert hat, definiert ist. Diese errechnet sich aus:

$$z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda} \quad (2-3)$$

Im Fernfeld ($z \gg z_R$) wächst der Strahlradius linear mit der Entfernung z , und es ergibt sich der Divergenzwinkel θ_0

$$\theta_0 = \frac{w_0}{z_R} = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0} \quad (2-4)$$

Für den Grundmode wird das Strahlparameterprodukt aus dem Tailenradius w_0 und dem Divergenzwinkel θ_0 wie folgt errechnet ($d_0 = 2 \cdot w_0$, $\theta = 2 \theta_0$):

$$SPP = \theta_0 \cdot w_0 = \frac{d_0 \cdot \theta}{4} = \lambda / \pi \quad (2-5)$$

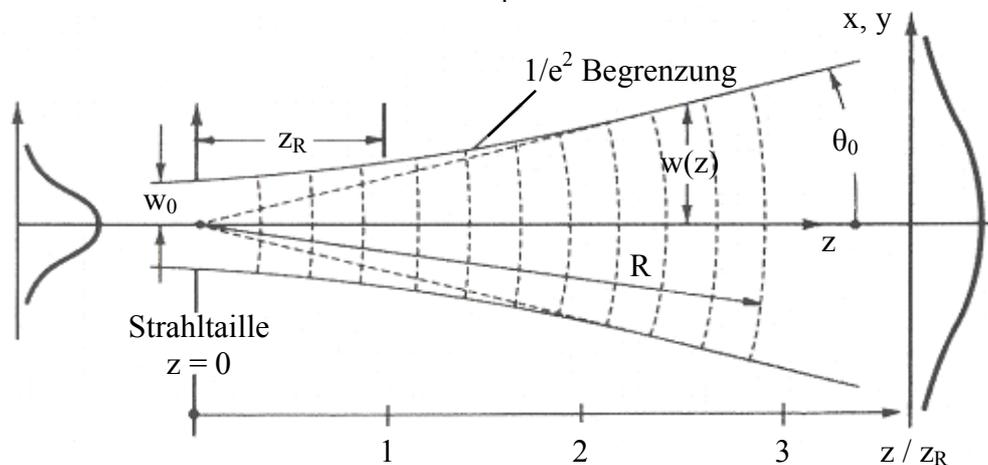


Abb. 2-5 Strahlausbreitung des Gaußstrahls [Lehr11]

Für höhere transversale Moden in einem Laserresonator oder Modengemische sind sowohl die Strahltaille (w_0 , d_0) als auch der Divergenzwinkel (θ_0 , θ) um den Faktor M größer als bei der Grundmode TEM_{00} . In diesem Fall erhält man somit für das Strahlparameterprodukt [Eich04]:

$$\theta_0 \cdot w_0 = \frac{d_0 \cdot \theta}{4} = M^2 \frac{\lambda}{\pi} \quad (2-6)$$

Das Strahlparameterprodukt SPP und die Beugungsmaßzahl M^2 ändern sich bei der Ausbreitung durch aberrationsfreie, paraxiale Systeme nicht. In der Abbildung 2-6 sind zwei Gaußstrahlen mit unterschiedlichen M^2 dargestellt, dabei steht der innere Strahl für $M^2 = 1$, der äußere Strahl für $M^2 > 1$. Beide Strahlen haben die gleiche Tailenposition z_0 sowie den gleichen Durchmesser d_0 .

$$M^2 > 1$$

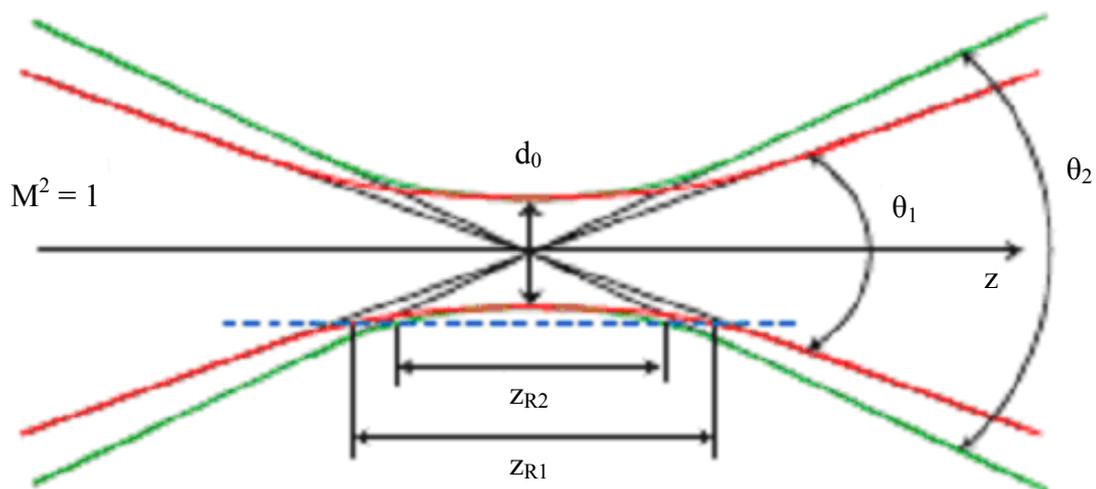


Abb. 2-6 Strahlausbreitung des Gaußstrahls für unterschiedliche M^2 [Eich04]

Für gaußförmige Strahlprofile entspricht der Varianzdurchmesser dem durch den $1/e^2$ -Abfall definierten Strahldurchmesser. Durch eine Blende mit der Breite des Varianzdurchmessers fallen 95,4 Prozent eines zentrierten Gaußprofils. Das Besondere am Varianzdurchmesser ist, dass nur für diese Strahldurchmesserdefinition ein allgemein gültiges Ausbreitungsgesetz formuliert werden kann.

Die Ausbreitung des Varianzdurchmessers beliebiger Strahlen lässt sich auf die Ausbreitung des Gaußstrahldurchmessers zurückführen: Der Varianzdurchmesser beträgt an allen Positionen das $\sqrt{M^2}$ -fache des Durchmessers eines kohärenten Gaußstrahls bei der gleichen Strahltailenposition und der gleichen Rayleighlänge, dem so genannten eingebetteten Gaußstrahl [Eppi10].

Für die Mikromaterialbearbeitung sind die Anforderungen an die Laser zur Herstellung präziser Strukturen hoch. Anstelle der Beugungsmaßzahl M^2 kann auch die Strahlqualitätskennzahl

bzw. die Gütezahl K ($M^2 = 1/K$) verwendet werden. Heute sind Lasersysteme mit einem M^2 unter 1,5 industriell verfügbar und finden in der Mikromaterialbearbeitung ihre Anwendung.

Ausgehend von der Gleichung (2-1) zur Berechnung der Intensität entlang der z - Richtung lässt sich die Gleichung (2-7) entwickeln, mit der sich nach [Herz94] die Isophoten der Intensitätsverteilung in der Strahlkaustik in Abhängigkeit der Ausbreitungsrichtung z des Gaußstrahls für unterschiedliche Intensitätsverhältnisse darstellen.

$$r(z) = \frac{w_0}{\sqrt{2}} \sqrt{\left[1 - \left(\frac{z}{z_0}\right)^2\right] \ln \left[\frac{I_0}{I_p} \frac{1 - \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}{1 - \left(\frac{z}{z_0}\right)^2} \right]} \quad (2-7)$$

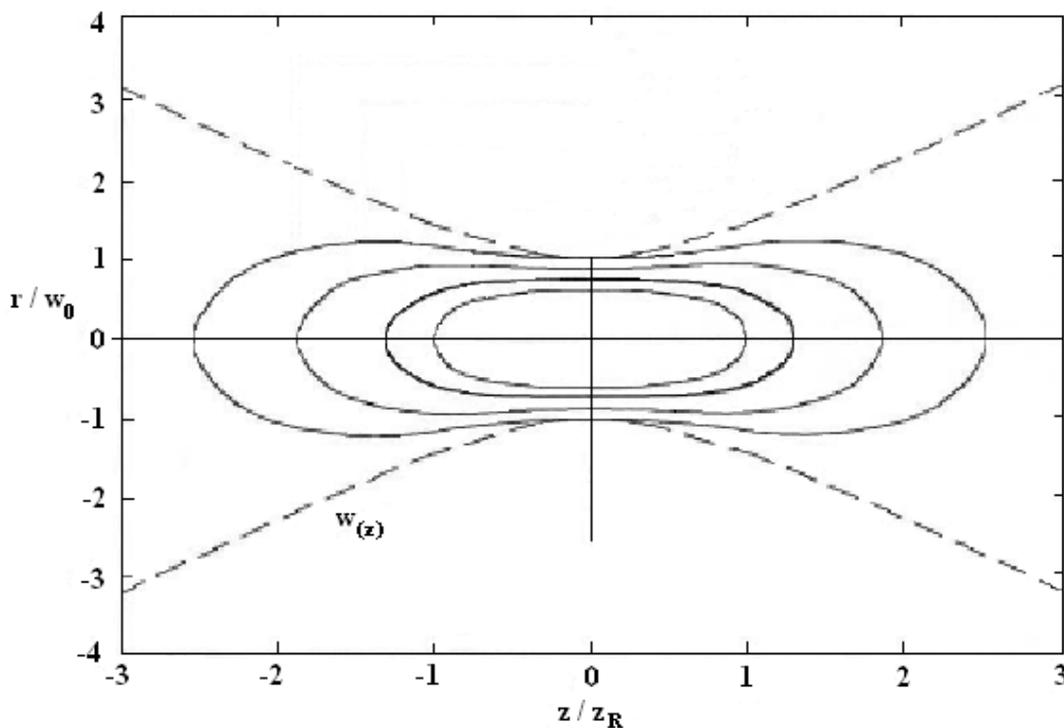


Abb. 2-7 Isophoten des Gaußstrahls für ausgewählte Intensitätsverhältnisse, nach [Herz94].
 Von Innen nach Außen: $I_0 / I_p = e^{0,7}$; $= e^{1,0}$; $= e^{1,5}$; $= e^{2,0}$

Ein wesentlicher Punkt in der Lasermaterialbearbeitung ist die Polarisation, d.h. die Ausrichtung des elektrischen Felds senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der transversalen Lichtwelle. Grundsätzlich lassen sich drei Polarisationsarten unterscheiden: linear, zirkular und elliptisch. Für die Materialbearbeitung spielt die zirkular polarisierte Welle eine wichtige Rolle und entsteht dann, wenn die Phasenverschiebung des Feldes in E_x - und E_y - Richtung gerade ein Viertel der Wellenlänge beträgt ($\varphi = \pi / 2$). Sie lässt sich aus einer linear polarisierenden Welle durch Verwendung eines so genannten $\lambda / 4$ Verzögerungsplättchens erzeugen. Verzögerungsplättchen weisen zur optischen Achse unterschiedliche Brechungsindizes n_x und n_y auf. Hergestellt sind diese meist aus doppelbrechenden Kristallen wie CaCO_3 , Quarz, ZnO , CaSe oder BaTiO_3 . Wird die optische Achse des Kristalls um 45° zur Polarisationsrichtung der ein-

fallenden Welle ausgerichtet, erfahren die beiden in x - und y - Richtung polarisierten Komponenten der Welle eine unterschiedliche Phasenverzögerung, welche bei geeigneter Dicke des Kristalls genau $\lambda / 4$ beträgt [Hüge09].

Auf Pulsdauer, Pulsform, und Repetitionsrate wird in Kapitel 5, Applikation eingegangen

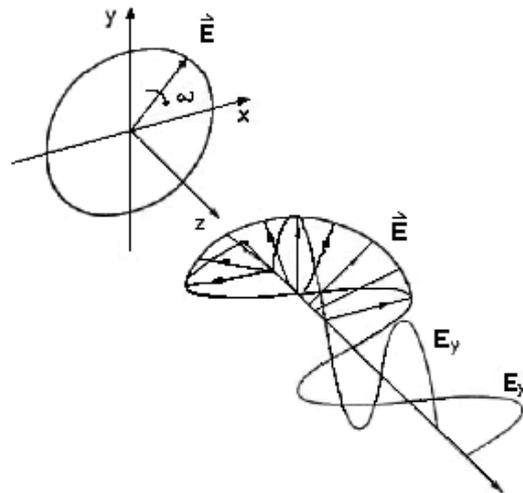


Abb. 2-8 Zirkulare Polarisation als Summe zweier um $\lambda / 4$ phasenverschobener Komponenten [Hüge09]

2.2.1 Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Materie

Trifft der Laserstrahl senkrecht auf die Werkstückoberfläche, so wird immer ein Teil R reflektiert. Kann bei entsprechender Dicke des Werkstoffs keine Transmission erfolgen, wird der gesamte verbleibende Strahlungsanteil A absorbiert und es gilt:

$$A = 1 - R \quad (2-8)$$

Im Absorptionsverhalten ist dabei eine Abhängigkeit sowohl von den optischen Eigenschaften des Werkstoffs (Brechungsindex n , Absorptionsindex κ) als auch von der Wellenlänge λ der Strahlung zu erkennen. Der Absorptionskoeffizient μ_a als beschreibende Kenngröße setzt sich wie folgt zusammen [Hüge92]:

$$\mu_a = \frac{4 \cdot \pi \cdot n \cdot \kappa}{\lambda} \quad (2-9)$$

Der weitere Verlauf des absorbierten Anteils der Intensität im Werkstoff entlang der Eindringtiefe z kann mit dem Beer'schen Gesetz beschrieben werden:

$$I(z) = I_0 \cdot A \cdot e^{-\mu_a z} = I_0 \cdot (1 - R) \cdot e^{-\mu_a z} \quad (2-10)$$

$I_0 \cdot A$ kennzeichnet hierbei den absorbierten Anteil der einfallenden Strahlungsintensität I_0 . Zur Charakterisierung der Absorption wird oft auch die Absorptionslänge l_a herangezogen, welche definiert ist als die Strecke, nach der die Intensität im Werkstück auf einen Bruchteil

von $1/e$ des ursprünglichen Werts I_0 abgefallen ist. l_a resultiert aus dem Kehrwert des Absorptionskoeffizienten μ_a :

$$l_a = \frac{1}{\mu_a} \quad (2-11)$$

Die während der Absorption erzeugte Wärme fließt in das Werkstück ab. Ein Maß für den Weg, den eine Isotherme innerhalb der Zeit t im Werkstück zurücklegt, ist die Diffusionslänge l_{th} (auch thermische Eindringtiefe). Die Diffusionslänge lässt sich bei Pulsdauern größer als 10 ps durch die Pulsdauer τ_P und die Temperaturleitfähigkeit D beschreiben [Daus99]:

$$l_{th} = 2\sqrt{D \cdot \tau_P} \quad (2-12)$$

Somit setzt sich die gesamte Eindringtiefe l der Laserstrahlung in das Werkstück aus der optischen (Absorptionslänge l_a) und der thermischen Einwirktiefe (Diffusionslänge l_{th}) zusammen:

$$l = l_a + l_{th} \quad (2-13)$$

2.2.2 Bearbeitungsprozess am Beispiel einer Laserbohrung

Für die Herstellung von Bohrungen, bzw. Strukturen von hoher Präzision, mit dem Laserstrahl als Werkzeug sind mehrere Verfahrensvarianten bekannt [Föhl00], [Daus99]. Das Einbringen tiefer Mikrobohrungen in Keramik soll hier am Beispiel des Perkussionsbohrens erläutert werden. Beim Perkussionsbohren führt eine Serie von Einzelpulsen auf die gleiche Stelle des Werkstücks zur Ausbildung des Bohrlochs. Auf diese Art lassen sich gegenüber dem Einzelpuls-Bohren größere Lochtiefen realisieren, die im Bereich mehrerer Millimeter liegen können. Durch die Auflösung des Bohrprozesses in Einzelschritte (Verringerung der Pulsenergie) reduziert sich das pro Puls abgetragene Volumen, welches bestimmt wird durch den Fokusbereich und die Einwirktiefe l , (2-13). Ebenso führt die Verkürzung der Pulsdauer τ_P zu einer Verringerung des pro Puls abgetragenen Volumens vgl. (2-12 und (2-13). Dieser geringere Materialabtrag begünstigt das Abströmverhalten des Materialdampfes und des Plasmas, was eine höhere Präzision der Bohrungen zur Folge hat. Basierend auf einer Modellvorstellung sollen die wesentlichen Wechselwirkungsvorgänge zwischen Laserstrahl und Materie erläutert werden, welche zur Ausbildung der Bohrlochgeometrie in Keramik beitragen. Der Bohrprozess wird durch das so genannte „Hirshegg - Modell“ in vier Phasen unterteilt. Bei der Herstellung eines Sacklochs sind diese einzelnen Phasen jedoch nicht immer klar voneinander trennbar und die Übergänge zwischen ihnen fließend. Außerdem werden bei Durchgangsbohrungen durch dünne Materialschichten nicht alle vier Phasen durchlaufen [Föhl00], [Somm01], [Daus99].

I. Planare Ablation

In der Startphase des Bohrprozesses herrschen die unter (2-8) beschriebenen Wechselwirkungsmechanismen (Fresnelabsorption) vor. Dabei bestimmen die Absorptionslänge l_a und der Fokusbereich d_F das Absorptionsvolumen V_A . Abhängig von der Wellenlänge dringt

die Laserstrahlung um eine gewisse Tiefe in das Material ein, wobei durch Absorption Energie verloren geht, welche die angrenzenden Gebiete erwärmt. Ist die Wärmeabfuhr durch Wärmeleitung geringer als der erneute Energieeintrag des Laserstrahls, kommt es zu einer fortschreitenden Erhitzung der Bearbeitungszone. Je nach Art des Materials und Höhe der Energie wird der Werkstoff an der entsprechenden Stelle aufgeschmolzen, verdampft oder zersetzt. Im Vergleich zum weiteren Bohrfortschritt wird in dieser ersten Phase der höchste Abtrag pro Zeit erlangt. Es lassen sich bereits nach wenigen Pulsen Ablagerungen im Ablationsbereich erkennen, die zu einer Erhöhung der Energieeinkopplung führen. Ursache der hohen Abtragsrate zu Beginn ist jedoch die große Einwirktiefe der Laserstrahlung in Keramik, die eine Verdampfung eines entsprechend großen Materialvolumens zur Folge hat. Ist die Intensität hoch genug, kommt es bereits in dieser ersten Phase zur Ausbildung eines Plasmas an der Werkstückoberfläche.

II. Ausbildung der Bohrkapillare

Setzt sich der Bohrprozess fort, so wandert die Abtragsfront in die Tiefe. An den steilen Seitenwandungen wird weniger Energie absorbiert, und es kommt zu einer vermehrten Reflexion des Laserstrahls in den Bohrgrund hinein. Durch diese Art Selbstfokussierung werden die Seitenwände weniger abgetragen, und es bildet sich eine konische Bohrspitze aus.

Das im Bohrkanal durch ionisierten Materialdampf entstandene Plasma erzeugt einen Dampfdruck, der abgetragenes Material aus dem Bohrgrund und auch Plasma bis über die Werkstückoberfläche mitreißt. Aufgrund der Wärmeleitung und Defokussierung durch das Plasma werden am Bohrgrund die Seitenwände noch mehr aufgeweitet. Die Bohrrate nimmt im Vergleich zur ersten Phase trotz höherer Energieeinkopplung und Selbstfokussierung durch Vielfachreflexion ab, was auf eine abschirmende Wirkung des Plasmas zurückzuführen ist [Kilm99], [Kono97].

III. Phase konstanter Bohrgeschwindigkeit

Nimmt die Bohrtiefe zu, steigen die Energieverluste des in den Bohrgrund hineinreflektierten Laserstrahls. Die Ursache hierfür liegt in der bei jedem Reflexionsvorgang auftretenden Absorption an den Seitenwänden. Trotz der Verluste durch Wandabsorption bleibt bei ausreichender Leistung in dieser Bohrphase die Abtragsrate nahezu konstant. Das am Bohrgrund weniger stark ionisierte Plasma wird zunehmend transparenter und hat aufgrund der geringeren Plasmaabsorption einen höheren Energieeintrag an dieser Stelle zur Folge. Somit wirkt das Plasma als Regler für die Leistung am Bohrgrund und für die konstante Bohrrate.

Die vom Plasma absorbierte Energie wird auch weiterhin an die Bohrungswand abgegeben, weitet diese auf und glättet den Bohrkanal. Mit wachsender Bohrtiefe tritt immer weniger Plasma auf, und die Aufweitung des Bohrkanals nimmt ab. Auf diese Weise entsteht der typisch konische Verlauf der Tiefenbohrung wie in der Abbildung 2-9 dargestellt. Zudem ist in dieser Phase erkennbar, dass mit kürzeren Pulsen höhere Bohrraten erreichbar sind. Das Plasma, das während des Pulses entsteht, baut sich nur zeitverzögert auf, womit dem Laserpuls weniger Energie entzogen werden kann.

IV. Stopp des Bohrfortschritts

Sollte die Energiedichte, die durch Vielfachreflexion bis in den Bohrgrund gelangt, nicht mehr hoch genug sein, um den Schwellwert für eine Materialverdampfung zu überschreiten, so kommt der Bohrprozess zum Erliegen. Die vom Laserstrahl weiterhin eingebrachte Energie führt dann lediglich zu einer stärkeren Erwärmung der angrenzenden Zonen, bzw. zu einer Aufweitung des Bohrungseintritts.

In der Abbildung 2-9 ist der Querschnitt einer Perkussionsbohrung in einen Stapel unterschiedlich starker Aluminiumnitridkeramiken dargestellt. Im oberen Bereich wird an der verzerrten Darstellung der für Perkussionsbohrungen typische unruhige Verlauf deutlich. Im unteren Bereich sind charakteristische Mikroskopaufnahmen aus unterschiedlichen Bohrtiefen zu sehen, welche die Unrundheit solcher Bohrungen illustrieren. Bestimmend für die Qualität einer solchen Bohrung sind Fokusgeometrie, Pulsenergie (Pulsdauer) sowie die Schmelzbewegung aus der Bohrung. Aspektverhältnisse von 1:200 wurden in Extremfällen mit speziellen, gütegeschalteten Festkörperlaser (MOPA - System) erreicht [Bind06].

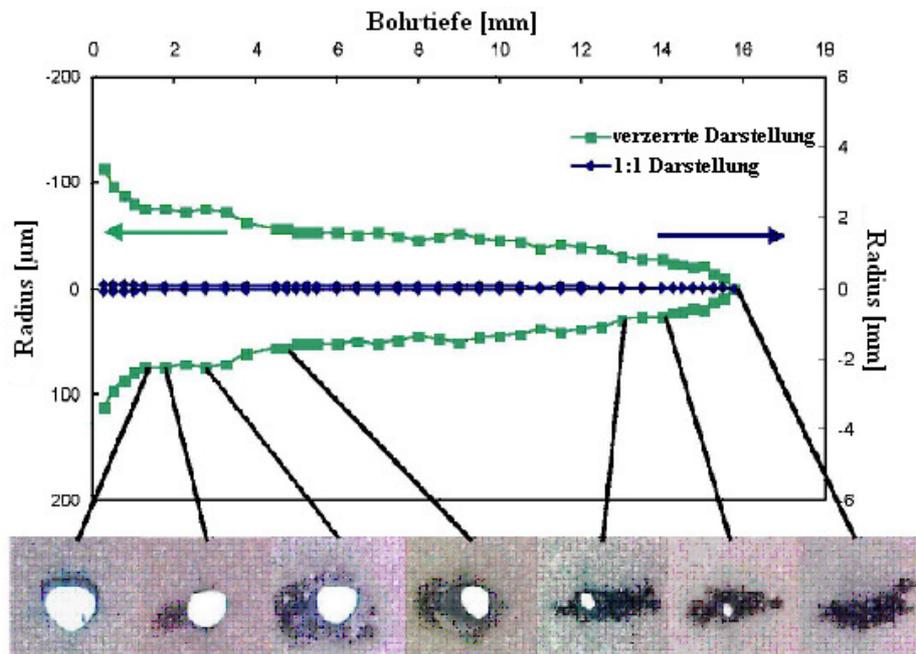


Abb. 2-9 Verlauf einer Perkussionsbohrung in Aluminiumnitrid-Keramik [Bind06]

2.3 Bearbeitungsverfahren

In der Abbildung 1-1 sind die einzelnen Prozessstrategien zur Erzielung von Strukturen hoher Präzision dargestellt. Einzelpuls- und Perkussionsbohren bestehen durch ihre hohe Effizienz, leiden jedoch unter der mangelnden Präzision. Trepanier- und Wendelbohrungen erreichen die notwendige Präzision, haben jedoch den Nachteil der geringen Prozessgeschwindigkeit. Präzision und Form der Bohrung sind in vielen Fällen jedoch Grundvoraussetzung für die Funktion eines Bauteils, so dass die Prozessgeschwindigkeit eher eine sekundäre Rolle spielt. Eine Erhöhung der Rundheit wird erreicht, wenn eine Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück hergestellt wird. Eine solche Bewegung lässt sich auch werkstückseitig reali-

sieren, jedoch reichen dafür weder Geschwindigkeit noch Präzision zur effizienten Bearbeitung heutiger CNC - Maschinen aus. Eine Bewegung der Laserstrahlung ist daher besser und einfacher zu realisieren. Beim Trepanierbohren wird mit dem Perkussionsbohren eine Durchgangsbohrung geschaffen, woran sich eine kreisförmige Schnittbewegung anschließt.

Der Unterschied zu anderen Laserbohrverfahren liegt in der Kombination von Bohr- und Schneidverfahren. Außer der kreisförmigen sind auch andere Schnittbewegungen zwischen Werkstück und Laserstrahl möglich und erlauben so konturierte Bohrungen. Der Schmelzaustritt wird analog zu Laserstrahlschneiden mit Hilfe eines koaxial zum Laserstrahl geführten Gasstroms unterstützt und nach unten ausgeblasen. Dies bewirkt einen deutlich reduzierten Schmelzanteil gegenüber dem Perkussionsbohren, wodurch die Rundheit sowie die Bohrwandrauheit verbessert werden. Mit dem Trepanierbohren lassen sich zylindrische Bohrungen mit minimalem Kantenradius auf der Ein- und Austrittseite herstellen. Anwendung findet dieses Verfahren bei Bohrungen von Durchmessern größer als 120 μm und $\pm 10 \mu\text{m}$ Genauigkeit. Die Materialstärken liegen bei einigen Millimetern und entsprechen denen des Perkussionsbohren[Wawa04].



Abb. 2-10 Verfahren und Herstellung von Trepanierbohrungen [Popr05]

Im Unterschied zum Trepanierbohren wird beim Wendelbohren die Fokusslage des Laserstrahls auf einer wendelförmigen Bahn (realisiert durch eine zweite Achse) in das Werkstück geführt, der Durchbruch wird erst nach mehreren Umläufen erreicht. Durch die bessere Verteilung der Laserpulse und der Verringerung der Pulsenergie (ähnlich dem des Perkussionsbohrens) kann bei geringerer Rauheit der Bohrwand sowie besserer Rundheit der Bohrung die Präzision nochmals erhöht werden. Die Schmelze wird durch die Relativbewegung zur Außenwand gedrückt und glättet dadurch die Bohrwand. Zum Einsatz kommen meist kurz gepulste Lasersysteme im Bereich von Piko - bis Nanosekunden. Anwendung findet dieses Verfahren überall dort, wo höchste Präzision bei großen Aspektverhältnissen erforderlich ist. Das Feinstanzen endet bei Materialstärken von ca. 0,3 mm und Aspektverhältnissen von 1,3 und lässt sich bei Hartmetallen nicht durchführen. Mit dem Wendelbohren ist hier eine Anslusstechologie gefunden, die einerseits die Präzision, andererseits die gewünschten Aspektverhältnisse, z.B. für Einspritzdüsen im Dieselmotor (Durchmesser von etwa 100 μm in 1 mm Edelstahl) ermöglicht. Außerdem lassen sich mit diesem Verfahren Formbohrungen mit unterschiedlichem Konuswinkel herstellen, die Einfluss auf das Strömungsverhalten von Flüssigkeiten oder Gasen nehmen können.

2.4 Strahlrotationssysteme

Charakteristisch beim Wendelbohren ist die Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück, außerdem verfügen solche Systeme über hohe Rotationsgeschwindigkeiten (einige tausend U / min), die den gewünschten Puls - zu Puls - Überlapp für hochrepetierende Systeme zum Erreichen der nötigen Präzision realisieren. Ebenso lassen sich mit solchen Systemen Winkelverstellungen des einfallenden Laserstrahls zum Werkstück ausführen, die variable Bohrlochgeometrien erzeugen. In Abbildung 2-11 sind die unterschiedlichen Bohrlochgeometrien dargestellt. Beim Laserbohren hängt die Form der Bohrung auch immer von der Art und Weise der Fokussierung und der Lage des Strahls zum Werkstück ab. Standardmäßig trifft der Laserstrahl im rechten Winkel zur Oberfläche auf das Werkstück auf und hinterlässt bei der Bearbeitung eine positiv konische Bohrung, bei welcher der Eintrittsdurchmesser größer als der Austrittsdurchmesser ist. Gefragt sind jedoch Bohrungen, wie aus anderen Bearbeitungsverfahren bekannt, mit parallelen Bohrwandverlauf, also Bohrungen mit gleichem Aus - und Eintrittsdurchmesser. Um dies zu erreichen, wird der Winkel zwischen einfallendem Strahl und Werkstück angestellt und um die Achse rotiert. Der Außenstrahl steht dadurch im 90° - Winkel zur Werkstückoberfläche, wobei der Anstellwinkel mit $\varepsilon = 0^\circ$ definiert ist. Dies gewährleistet einen zylindrischen Verlauf in die Tiefe. Der Innenstrahl bildet dabei einen spitzen Winkel zum Werkstück, was aber nicht weiter von Bedeutung ist, da dieser zur Formgebung nicht beiträgt. Vergrößert man die Einstellung weiter, bildet der Außenstrahl einen stumpfen Winkel zum Werkstück, und es kommt zu negativ konischen Bohrungen. Das heißt, der Eintrittsdurchmesser ist kleiner als der Austrittsdurchmesser. Das Verhältnis Austritts- zu Eintrittsbohrung kann jedoch nicht beliebig gesteigert werden, da der Innenstrahl, je nach Fokussierung und Bohrfortschritt, den Eintrittsdurchmesser abträgt.

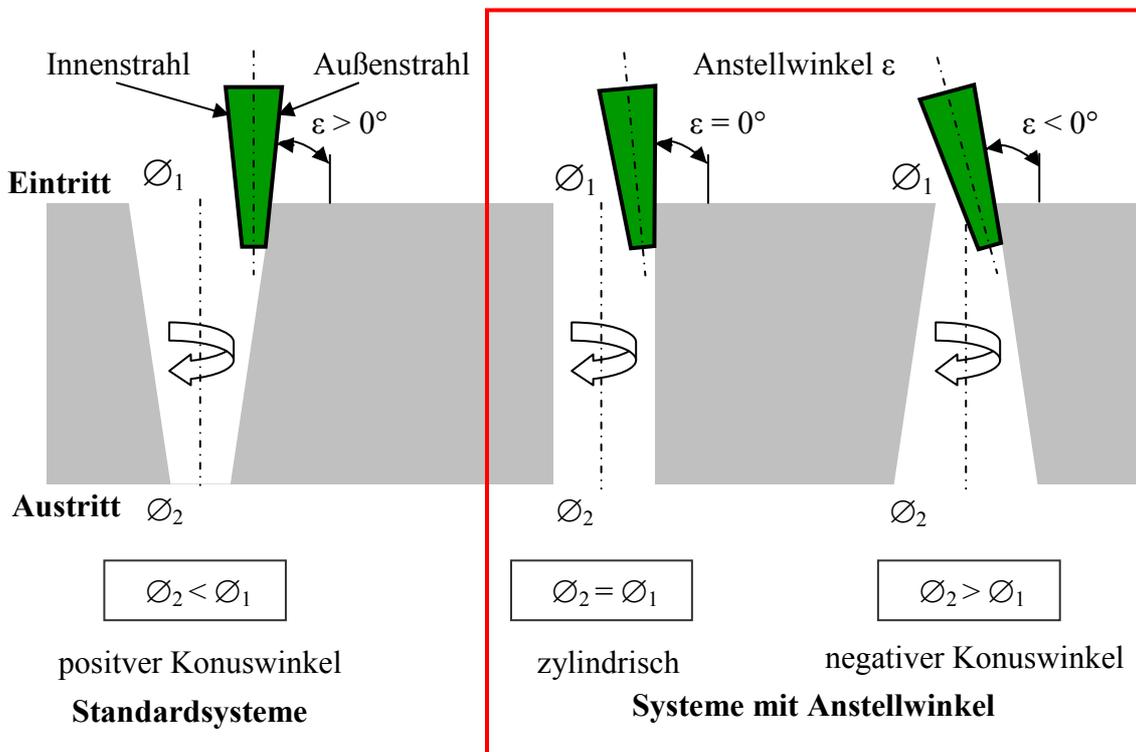


Abb. 2-11 Verfahrensbedingte Bohrlochgeometrien

Systeme, die durch eine Relativbewegung zwischen Werkstück und Laserstrahl gekennzeichnet sind, und bei denen das Werkstück stillsteht, lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

Strahleinstellung vor der Fokussierung

Scannersystem mit f - Theta - Objektiv, telezentrischem f - Theta - Objektiv

außermittig rotierende Linsen

rotierende Keilplatten

Bildrotationssysteme

Strahleinstellung nach der Fokussierung

Scannersystem ohne f - Theta - Objektiv

Bei f - Theta - Objektiven wird verlangt, dass die Ablage zur optischen Achse y' in der Abtastebene proportional zum Schenkelwinkel θ auf der Eingangsseite ist

$$y' = f' \cdot \Theta \quad (2-17)$$

während für die verzeichnungsfreie Abbildung sonst gilt

$$y' = f' \cdot \tan \Theta \quad (2-18)$$

Diese Verzeichnungseigenschaften sind charakteristisch für eine derartige Objektivkonstruktion. In der Abbildung 2-12 wird ein solches Objektiv gezeigt, das in diesem Fall für einen großen Scan - Winkel ($2\theta_{\max} = 100^\circ$) ausgelegt ist. Außerdem verläuft hier der Strahlengang nahezu telezentrisch, d. h. die Ausgangsbündel sind ausreichend parallel zur Achse. Dadurch ergeben sich bei geringfügiger axialer Verlagerung der Bildebene keine Maßstabsänderungen. Das Bildfeld ist gut geebnet, d. h. alle Bündel werden in der achsensenkrechten Brennebene F' fokussiert. In der Abbildung 2-12 zeigen drei unterschiedliche Scan - Winkel θ mit gleichem Abstand ($16,67^\circ$, $33,33^\circ$, 50°) eine entsprechende Zunahme der Bildhöhe y' mit gleichem Abstand. Am Ort der Eintrittspupille liegt der Drehspiegel, der die kontinuierliche θ - Änderung bewirkt [Naum92].

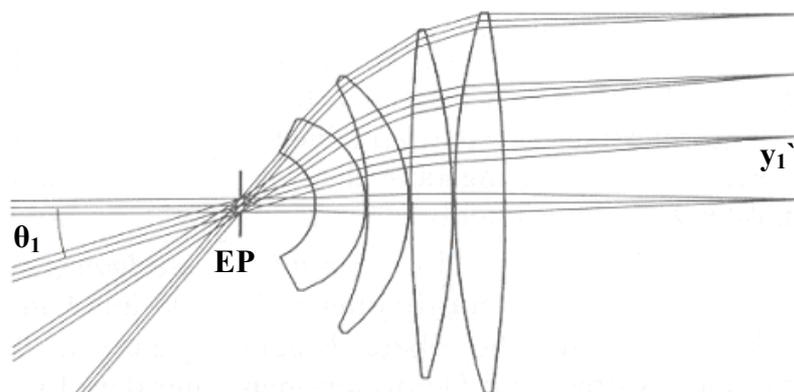


Abb. 2-12 Telezentrisches f - Theta - Objektiv, EP = Eintrittspupille (Ort des Drehspiegels), $y_1' =$ Bildhöhe zum Winkel θ_1 [Naum92]

2.4.1 Scannersysteme

Bei Scannersystemen mit f - Theta - Objektiven befindet sich der Scannerkopf im Strahlengang vor dem Objektiv. Zur Anwendung kommen hier zwei Systeme: zum einen das Planfeldobjektiv, das den Strahlfokus im gesamten Scannerfeld in einer Ebene hält, zum anderen das telezentrische Objektiv, welches einen schräg auf das Objektiv auftreffenden Strahl (üblich) nicht nur in der Ebene des Scannerfelds hält, sondern auch senkrecht zu dieser. Beide Systeme eignen sich nicht zur Herstellung von zylindrischen - bzw. Unterscheidungsbohrungen. Beim Planfeldobjektiv winkelt der Strahl nach Durchtritt des Objektivs nach außen ab, in der Mittelstellung steht er senkrecht. Beim telezentrischen Objektiv steht der Strahl stets senkrecht zur Ebene, das heißt, eine Strahlanwinklung mit DurchmesserEinstellung ist damit nicht möglich.

Bei Scannersystemen ohne f - Theta - Objektiv kann der Scannerkopf auch hinter dem Objektiv angeordnet sein, hierbei trifft der fokussierte Strahl auf zwei Ablenkspiegel (für X - und Y - Richtung), die körperlich nicht am selben Ort sein können. Daraus ergibt sich eine Verzeichnung in der Ebene, das heißt, die Fokusfläche ist gekrümmt und muss kompensiert werden. Dies erreicht man durch die Nachführung einer Linse (in Z - Richtung), welche die Brennweitenkorrektur vornimmt. Auch wenn mit diesem System die Herstellung der gewünschten Bohrungen möglich wäre, ist man aufgrund der Bauraumbedingungen auf große Brennweiten angewiesen.

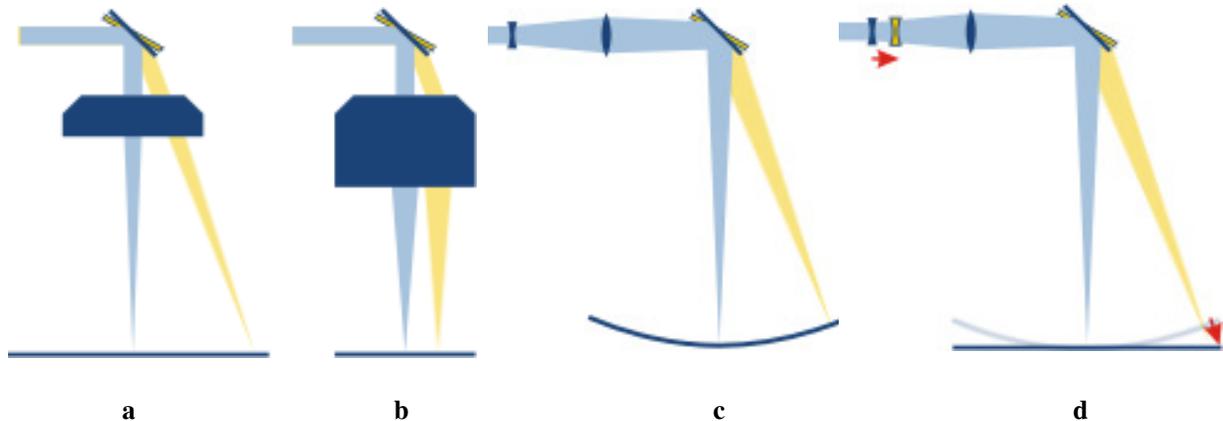


Abb. 2-13 Mögliche Scannerverfahren, a = Planfeldobjektiv, b = telezentrisches Objektiv, c = Fokussierung vor dem Scannerkopf, d = Fokussierung vor dem Scannerkopf mit Kompensation [Arge11]

Zum Abfahren einer Bahnkurve wird die Rotation der Laserstrahlung in X - und Y - Richtung zerlegt (Mikrovektoren). Die Zeit, die zur Steuerung der Mikrovektoren benötigt wird, bestimmt die Umlaufzeit der Laserstrahlung. Demnach bestimmt sich die Rotationsgeschwindigkeit aus dem Ausgabe- und Einstellintervall der Spiegelsteuerung, dem Bohrungsdurchmesser und der Bohrungstoleranz, die wiederum die Rundheitstoleranz der Bohrung bestimmt. In der Abbildung 2-14 ist die Verfahrenspur eines Scannersystems dargestellt. Unter der Annahme einer Bahntoleranz von $0,5 \mu\text{m}$ (entspricht einer Durchmesserstoleranz der Bohrung von $1 \mu\text{m}$) ergeben sich für einen Umlauf mit dem Radius von $50 \mu\text{m}$ rund 3.200 Mikro-

vektoren. Die Grenzfrequenz ergibt sich aus dem Trägheitsmoment des Spiegels, dessen Größe auf den Durchmesser des Eingangsstrahls abgestimmt wird, sowie den Steuerimpulsen. Eine schnelle, handelsübliche Steuerkarte benötigt ca. 10 μ s für das Steuerintervall eines Mikroschritts. Daraus ergibt sich eine Umlaufzeit von 0,032 s, was einer Drehfrequenz von 32,25 Hz oder 1.860 U / min entspricht. Diese begrenzte Rotationsfrequenz reicht zur Herstellung präziser Mikrobohrungen mit geringer Temperaturenflusszone nicht aus [Wawe08].

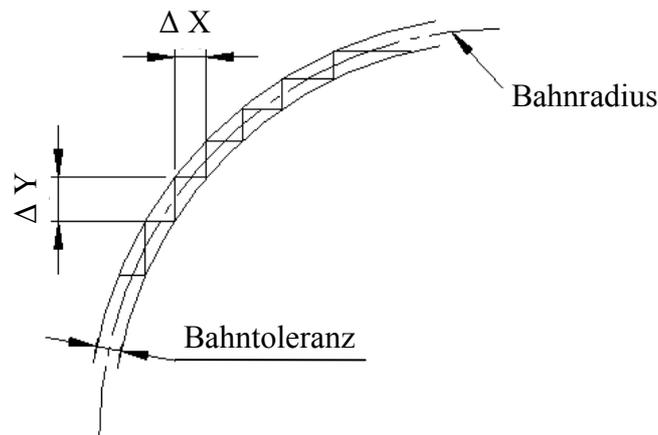


Abb. 2-14 Bahnkurve mit einem Scannersystem [Wawe08]

2.4.2 Außermittig rotierende Linsen

Im Patent US 4,461,947 aus den 70er Jahren ist ein Verfahren beschrieben, bei dem mittels einer exzentrisch zur optischen Achse angeordneten Linse der Strahl durch deren Drehung in eine rotierende Bewegung zur optischen Achse versetzt wird. Linsen besitzen die Eigenschaft, Randstrahlen weitest gehend auf die optische Achse zu fokussieren, so dass zur Beschreibung einer Umlaufbahn mit Durchmesser der Strahl relativ weit außerhalb der optischen Achse auf die Linse treffen muss. Dies erfordert große Linsen und damit große Massen. Außermittig angeordnete Massen wirken als Unwucht und lassen keine hohen Drehzahlen zu. Erreicht werden hier einige 100 U / min bei vibrationsarmer Strahlführung. Eine Strahlanwinklung ist nicht unabhängig von der DurchmesserEinstellung möglich. Trotz vieler Unzulänglichkeiten fand dieses System Einsatz beim Verschweißen fertigungsbedingter Bohrungen an Turbinenschaufeln mit Verschlussstopfen. Aufgrund der Legierungszusammensetzung sind Verfahrensgeschwindigkeiten von ca. 100 mm / s bei einem Durchmesser von 4 mm notwendig, um dies rissfrei zu realisieren. Die Strahlanwinklung spielt hier keine Rolle. Der einfache Aufbau und der unkomplizierte Betrieb sprechen für den Aufbau eines solchen Systems.

2.4.3 Rotierende Keilplatten (Diffraktiv - Scanner)

Von der Firma Optra Inc. USA wird ein System mit zwei rotierenden Prismen angeboten, welche in zwei ineinander geschachtelten Hohlwellenantrieben angeordnet sind. Zur Verstellung der Prismen zueinander wird über einen Hohlwellenantrieb und den dazu gehörigen Winkelencoder die Differenzeinstellung zum zweiten Antrieb und seinem Prisma vorgenommen. Im Betrieb kann so jeder Punkt einer Fokusebene, ähnlich wie beim Scanner, angesprochen werden. Vorteil bei diesem Diffraktiv - Scanner ist die räumliche Unabhängigkeit der X - und Y - Verstellung. So wird die Fokusnachstellung nur durch die Weglängenänderungen des optischen Materials bestimmt. Außerdem können höhere Drehzahlen realisiert werden, da die Kreisbewegung systembedingt erzwungen wird und die Steuerungstechnik nur bei einer Einstellungsänderung benötigt wird (im Gegensatz zum Scanner). Laut Herstellerangaben sind Umdrehungen von 6.000 U / min möglich. Unsymmetrische Massenverteilung je nach Einstellung des Systems wirken auch hier drehzahlbegrenzend. Eine Einstellung des Anstellwinkels unabhängig vom Durchmesser ist nicht realisierbar, der Strahl winkelt, je nach Stellung, stets nach außen ab, es sei denn die Prismenflächen stehen genau parallel zueinander, dann ergibt sich wie bei einer, unter einem Winkel stehenden, planparallelen Platte ein Strahlversatz. Die Fokussierung kann mit Objektiven, wie unter 2.4.1 Scannersysteme beschrieben, vorgenommen werden.

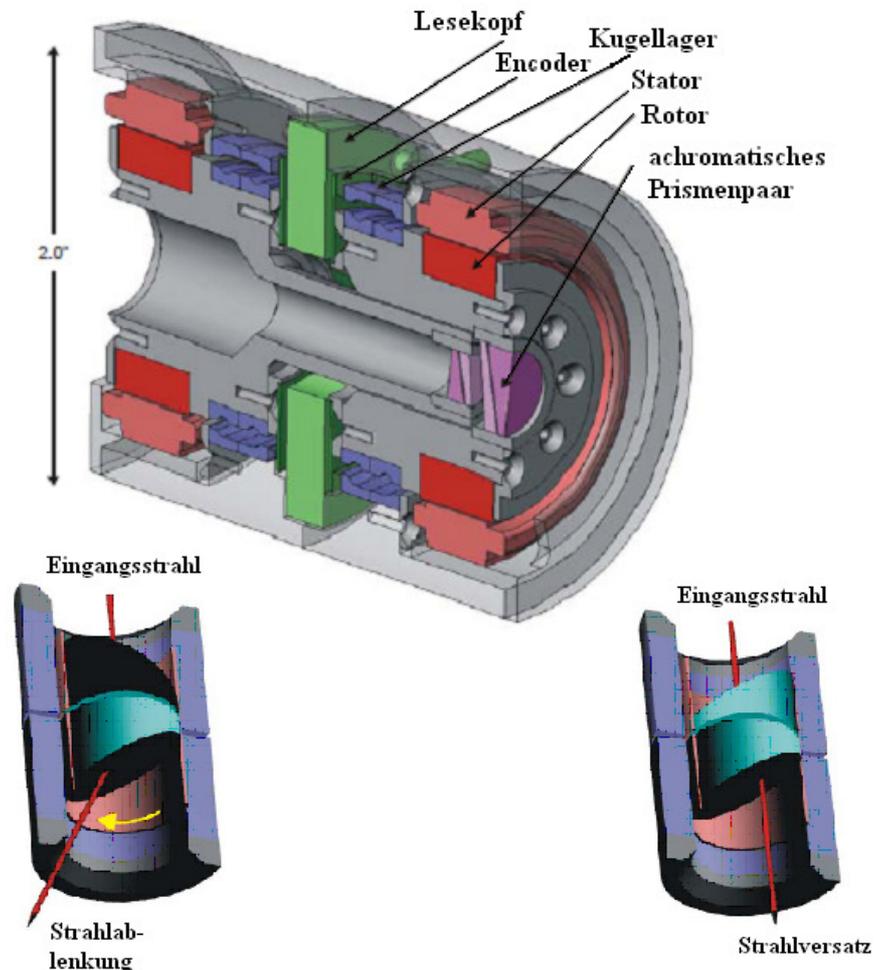


Abb. 2-15 Diffraktiv - Scanner, oben: mechanischer Aufbau, unten: optische Funktionsweise [Schw01]

2.4.4 Rotierende Keilplatten mit Anstellwinkel

Ein weiteres Keilplattensystem wurde von der Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge FGSW in Stuttgart entwickelt und ist in Abbildung 2-16 dargestellt. Dieses System arbeitet mit drei Keilplatten, die durch die Verdrehung der Platten zueinander sowie die Verschiebung gegeneinander eine Einstellung der Bohrlochgeometrie ermöglichen. Durchmesser bis zu 400 μm mit Anstellwinkel von $\pm 5^\circ$ können damit hergestellt werden. Zur Einstellung der Parameter muss die Optik angehalten werden. Trotz recht guter Bearbeitungsergebnisse ist der voluminöse Aufbau des Systems mit ca. $500 \times 440 \times 255 \text{ mm}^3$ und einem Gewicht von ca. 50 kg nachteilig und macht es für eine Integration in eine CNC - Anlage praktisch unbrauchbar. Ebenso ist eine hohe Strahlstabilität erforderlich, da sich geringste Veränderungen gravierend auf das Ergebnis auswirken und einen hohen Justageaufwand erfordern. Außerdem ist das System aufgrund der großen Kugellagerdurchmesser und des externen Zahnriemenantriebs auf eine Drehzahl von 3.000 U / min begrenzt. Eine ausführliche Beschreibung des Systems findet sich unter [Müll03].



Abb. 2-16 Automatisch verstellbares Trepaniersystem, links: mechanischer Aufbau, rechts: optische Funktionsweise [Müll03]

2.4.5 Bildrotationssysteme

Eine Laserbearbeitungsoptik mit Bildrotator wurde am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, ILT in Aachen aufgebaut und ist in der Abbildung 2-17 dargestellt. Grundidee bei diesem System ist die Drehung des vom Laser kommenden Strahlprofils zur Erhöhung der Bohrungsrundheit. Dies wird mit einem rotierenden Doveprisma und dessen Totalreflexion im Innern erreicht. Vorteilhaft bei diesem Aufbau ist der Einbau des Prismas in einen Hohlwellenmotor, der trotz der ungleichen Massenverteilung eine hohe Laufruhe erwarten lässt. Sämtliche Einstellungen lassen sich von außen an ruhenden Bauteilen vornehmen, was ebenso für dieses System spricht. Nachteilig ist hier, wie auch beim Vorgängersystem, die Empfindlichkeit ge-

gen äußere Einflüsse sowie der hohe Justageaufwand. Dies erklärt auch die vielen Kompensationselemente, die dafür sorgen, dass die Prismenfehler, die aus fertigungstechnischen Gründen auftreten, korrigierbar sind. Ist das System erst einmal justiert, liefert es mit einem Nanosekundensystem recht gute Ergebnisse. Eine weitere Einschränkung zeigt sich in der Verwendung von Kurzpulssystemen. Hier treten durch die langen Glaswege und dem Browning-Effekt, auf den unter 3.4.6, Auswahl der optisch Gläser, noch näher eingegangen wird, Verfärbungen im Glas auf, die dieses System für solche Anwendungen unbrauchbar machen. Mit einem solchen System sind Applikationen mit Drehzahlen bis 12.000 U / min realisiert worden, theoretisch wird das System mit einer Drehzahl von 40.000 U / min angegeben. Erreichbare Durchmesser bis 300 μm und ein Anstellwinkel bis zu 4° sind möglich. Die geometrischen Abmessungen sowie das Gewicht liegen auch hier mit $660 \times 285 \times 193 \text{ mm}^3$ und 20 kg außerhalb des akzeptablen Bereichs. Die ausführliche Beschreibung hierzu findet sich unter [Wawe08].

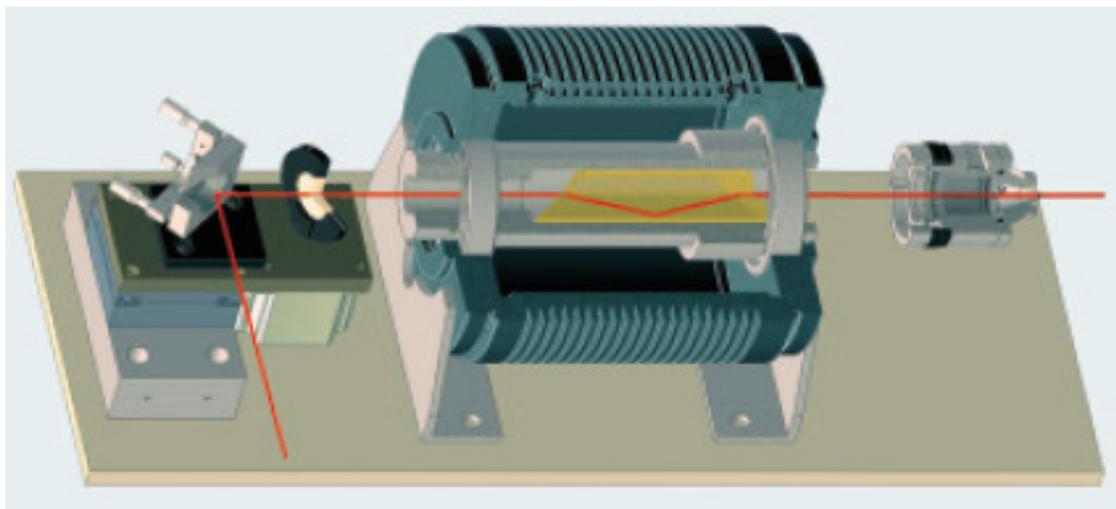
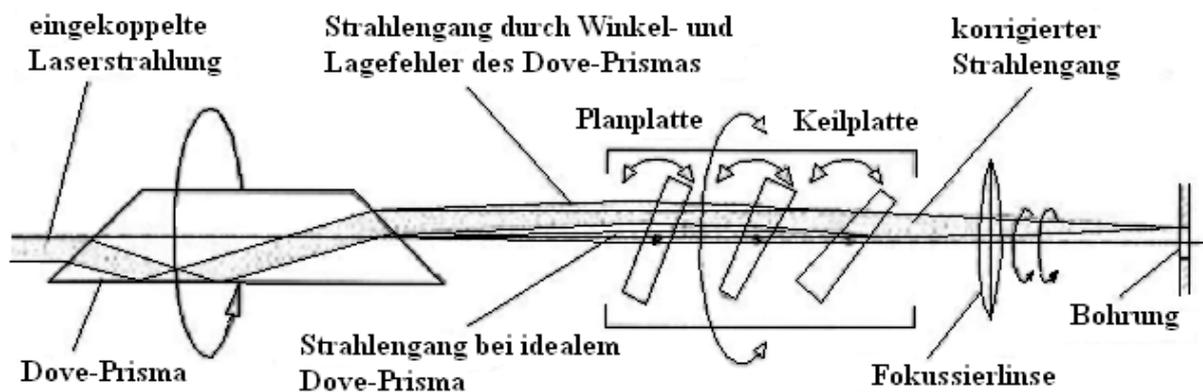


Abb. 2-17 Bildrotationssystem mit Dove-Prisma, oben: optische Funktionsweise unten: idealisierter mechanischer Aufbau [Wawe08]

2.4.6 Strahleinstellung vor der Fokussierung

Allen diesen Systemen gemeinsam ist die Strahlmanipulation vor der eigentlichen Fokussierung. Dadurch trifft der Laserstrahl außermittig auf die Linse, die diesen auf das Werkstück fokussiert, siehe Abbildung 2-18. Optische Fehler wie Astigmatismus, Koma und Verzeich-

nung müssen im Objektiv kompensiert werden. Das heißt, das Fokussiersystem muss generell auf das jeweilige System angepasst werden und besteht aus einer ganzen Reihe von optischen Bauteilen, die eigens hierfür angefertigt werden müssen. Dadurch lässt sich die Anpassung der Brennweite an bestimmte Applikationsaufgaben nur mit einem erheblichen Aufwand bewerkstelligen, der sich in den Kosten niederschlägt. Außerdem werden solche Systeme eher für spezielle Anforderungen in Einzelstücken gefertigt, das die Kosten nochmals steigen lässt. Ein weiteres Augenmerk sollte hierbei auch auf UV - Wellenlänge und Kurzpulslaser gelegt werden, da die Materialkombination für Objektive stark eingeschränkt wird. Zusätzlich wirkt sich der bereits erwähnte Browning - Effekt bei langen Glaswegen negativ aus.

Eingestellte Durchmesser oder Anstellwinkel sind nie unabhängig voneinander zu betrachten, da eine Winkelverstellung immer eine Durchmesserverstellung und umgekehrt nach sich zieht. Dies bedeutet aufwendige und langwierige Justagearbeit, die dem Anwender viel Erfahrung abverlangt.

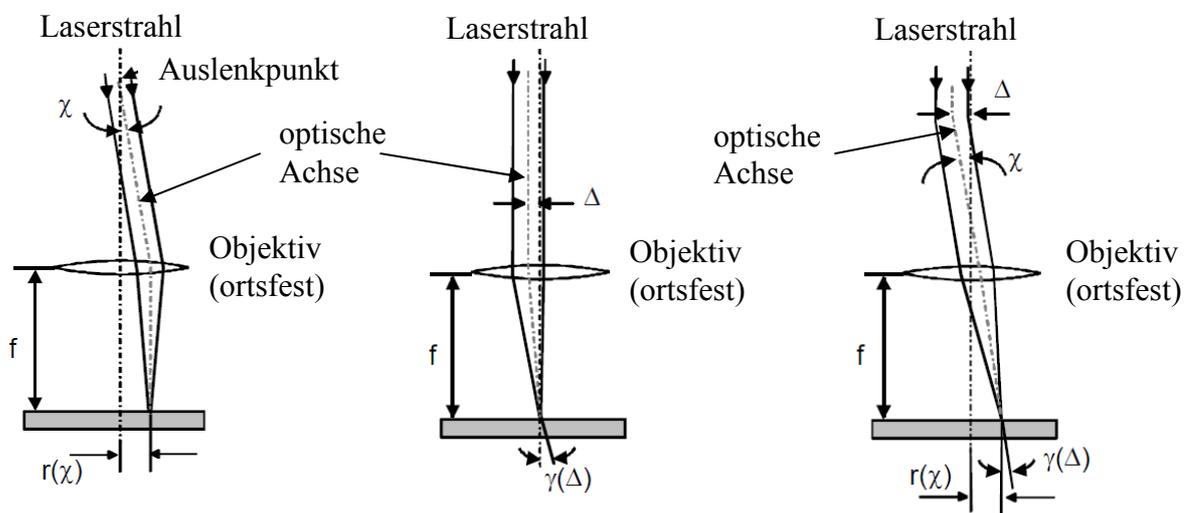


Abb. 2-18 Einstellung der Bohrgeometrie nach [Müll03]

2.4.7 Strahleinstellung nach der Fokussierung

Die in dieser Arbeit vorgestellte Bearbeitungsoptik hat zum Ziel, einerseits eine hohe Präzision und Verlässlichkeit bei der Applikation zu erfüllen, andererseits jedoch die Handhabung und Einsatzbreite nicht aus dem Auge zu verlieren. Daher wurde von Anfang an bei der Entwicklung daran gedacht, ein möglichst großes Anwendungsfeld abzudecken. Optisch wird der mit hoher Qualität fokussierbare Laserstrahl erst nach der Fokussierung abgelenkt und eingestellt. Dies führt dazu, dass sich die aus dieser Manipulation auftretenden Fehler auf dem Werkstück mitdrehen und immer in derselben Ausrichtung zur Bearbeitungsebene stehen. Alle optischen Elemente, bis auf eine, werden aus Standardelementen, die als Katalogware angeboten werden, zusammengesetzt und garantieren somit eine hohe und gleich bleibende Qualität. Die Fokussieroptik wirkt nur indirekt auf die Stellgrößen ein und kann problemlos gewechselt werden, ohne eine komplette Neujustierung vorzunehmen. Winkel - und DurchmesserEinstellung sind weitestgehend unabhängig voneinander und gewährleisten eine schnelle und unkomplizierte Einrichtung des Systems. Mechanisch hat das System die Größe heuti-

ger Scanneroptiken und ist in der Handhabung ähnlich. Hieraus ergibt sich die Möglichkeit, unterschiedliche Systeme mit gleichem Grundaufbau für verschiedene Industriezweige aufzubauen. Durch Beachtung der Massenverteilung bei sich drehenden Teilen konnten Drehzahlen für bestimmte Applikationen in Verbindung mit kurzgepulsten hochrepetierenden Systemen mit bis zu 40.000 U / min realisiert werden. Für hochpräzise Anwendungen lässt sich ein Messsystem integrieren, welches die optischen Stellglieder in ihrer Lage überwacht und, wenn nötig, nachstellt. Dies gewährt eine hohe Sicherheit in der Fertigung. In der Abbildung. 2-19 ist der Funktionsverlauf des optischen Strahlengangs schematisch dargestellt und die Wirkungsweise illustriert.

Der kollimiert einfallende Strahl wird erst fokussiert. Als optische Fehler tritt hier ausschließlich sphärische Aberration auf, die mit einfachen Mitteln wie der Flächenaufteilung kompensierbar ist. Anschließend wird unter Verwendung einer planparallelen Platte der Strahlengang aus der Systemachse parallel versetzt, hier entsteht Astigmatismus. Durch die Drehung der planparallelen Platte bleibt jedoch die Ausrichtung dieses Fehlers zur Bearbeitungsebene immer gleich und kann in gewissen Grenzen akzeptiert werden. Dies findet in Kapitel 3.4 noch nähere Betrachtung. In der Folge trifft der Strahl auf einen Keil, der ihn anwinkelt und über die Systemachse hinweg auf das Werkstück auftreffen lässt. Der Keil ist in der Achse gegen Verdrehung mit der planparallelen Platte gekoppelt und in der Ausrichtung fixiert. Die auftretenden optischen Fehler sind hier hauptsächlich Koma und Astigmatismus und aufgrund der Konstruktion des Keils (siehe hierzu Kapitel 3.2 und 3.3) von ihrem Wert her eher gering. Ebenso wie der von der planparallelen Platte erzeugte Astigmatismus sind diese Fehler zur Bearbeitungsebene ausgerichtet. Nur durch Überschreitung der Systemachse und Drehung um diese lassen sich negativ konische Bohrungen realisieren.

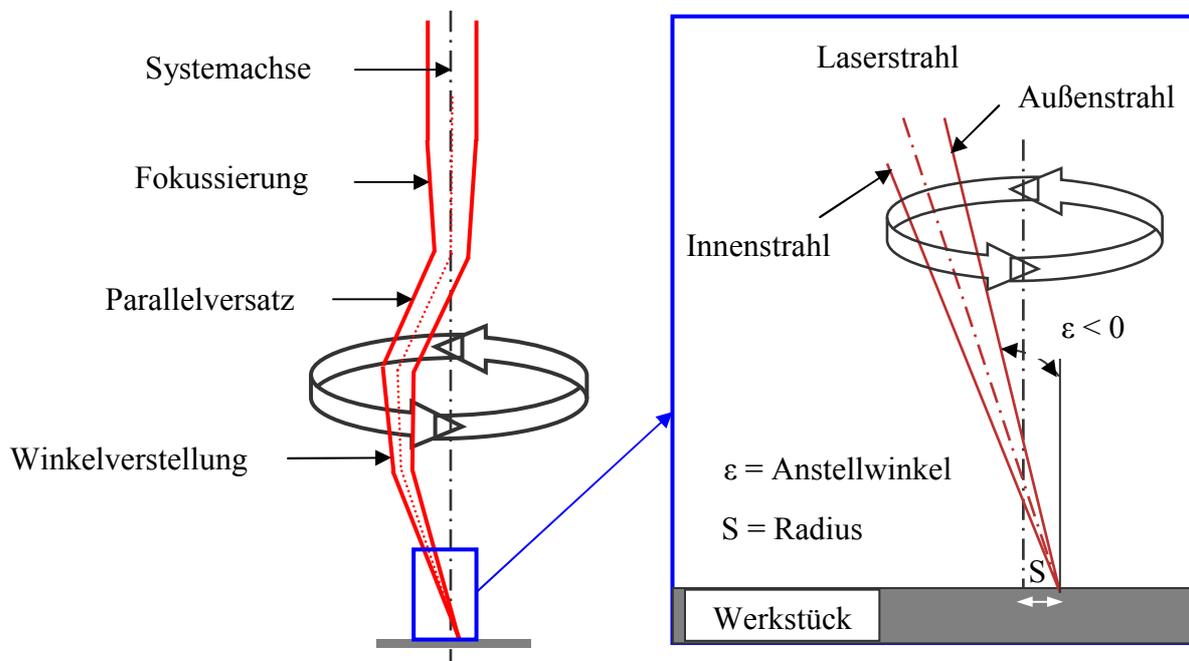


Abb. 2-19 Funktionsdarstellung der Strahlmanipulation

3 Das optische System

3.1 Anforderungen an das optische System

Das Konzept, wie auch das Design des optischen Systems, ergibt sich aus den Anforderungen der Industrie an eine präzise und schnelle Strahlablenkung mit einstellbaren Parametern sowie den systembedingten Problemen einer optischen Strahlführung, die möglichst einfach gehalten werden sollten. Außerdem unterliegt das System einigen fertigungstechnischen Restriktionen, die bei der Ausführung zu berücksichtigen sind. In der Tabelle 3-1 sind die wesentlichen Anforderungen aufgeführt.

Nr.	Forderung	Auswirkung
1	schwingungsunanfällige Stellkomponenten	geringe mechanische Anforderungen an das Antriebssystem
2	tolerante Strahleinkopplung	vereinfachte Justage, unkomplizierte Maschineneinrichtung
3	entkoppelte Stellparameter	Anstellwinkel und Bohrdurchmesser frei einstellbar, dies ermöglicht große Flexibilität
4	Durchmesser „0“ bis < 500 µm	erhöht die Vielfalt und die Einsatzmöglichkeiten in der Applikation
5	massensymmetrischer Aufbau	erlaubt vibrationsarm hohe Drehzahlen und verringert den mechanischen Aufwand
6	Standardkomponenten	erlaubt eine hohe Fertigungsqualität bei geringen Kosten
7	Einsatz variabler Fokussiersysteme	Anpassung der optischen sowie der lasertechnischen Parameter möglich
8	kurze Brennweite	vorteilhaft bei Lasersystemen mit geringer Leistung zur Erzeugung hoher Intensitätsspitzen
9	hohe Fokussierungsqualität	Erhöhung der Bearbeitungsqualität, Bearbeitung von Mikrostrukturen

Tabelle 3-1 Anforderungen an das optische System

3.2 Komponenten und Bewegungsoptionen

Bevor hier auf die Funktionsweise eingegangen wird, sollen erst anhand der Abbildung 3-1 die Elemente und ihre Bewegungsoptionen vorgestellt werden. Es wurde darauf geachtet, dass möglichst wenige optische Bauteile in den Strahlengang eingebracht werden, um die Laserstrahlung nicht unnötig zu schwächen. Das Doppel-Linsensystem erlaubt aufgrund der Flächenaufteilung eine deutliche Verringerung der Aberration und damit eine verbesserte Fokussierung gegenüber einer einfachen Linse [Thor07]. Die planparallele Platte sorgt für den gewünschten Strahlversatz zur optischen Achse und nimmt Einfluss auf die Einstellung des gewünschten Bearbeitungsdurchmessers. Aus der Kombination von Plankonkav- und Plankonvexlinse ergibt sich die Möglichkeit eines variablen Keils (Abat'scher Keil), der in Grenzen den Strahlwinkel beeinflusst und damit den Auftreffwinkel zum Werkstück bestimmt. Zum Schutz der Optik vor Rückständen aus der Applikation dient das Schutzglas, welches auch den Arbeitsabstand zum Werkstück festlegt.

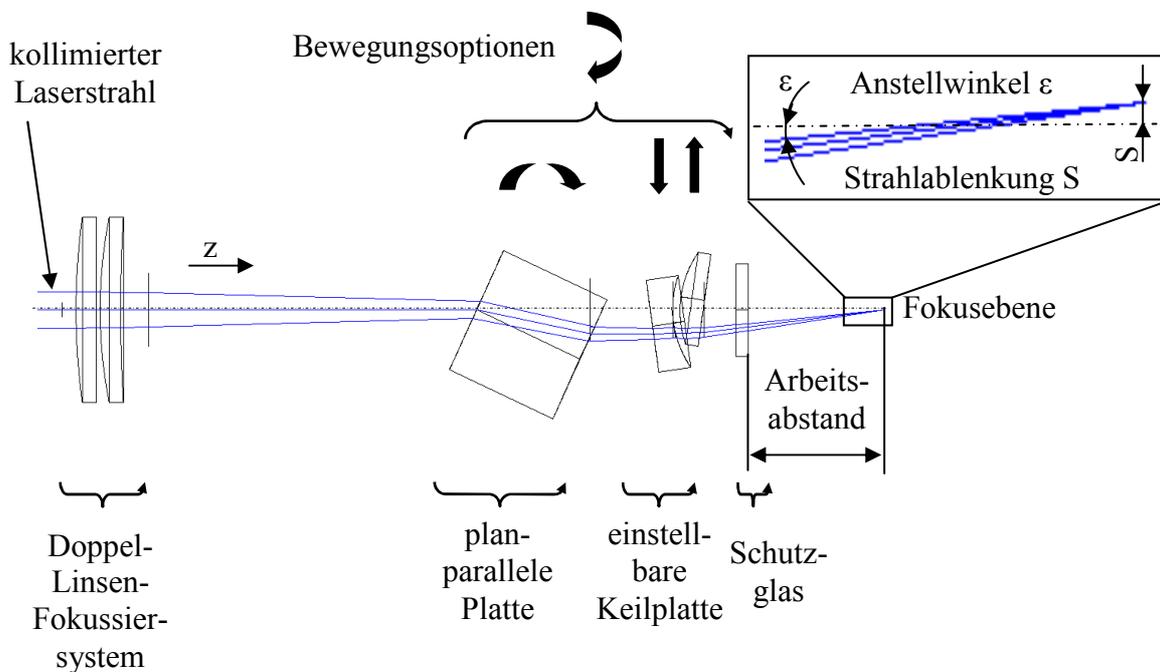


Abb. 3-1 Optisches System mit Komponenten und Bewegungsoptionen

Zur schnellen Verteilung von Laserpulsen auf einer präzise eingestellten Kreisbahn rotieren die planparallele Platte und der variable Keil um die Systemachse. Hierdurch beschreibt der ausgelenkte und fokussierte Strahl auf dem Werkstück eine Kreisbahn. Das Fokussiersystem steht hierbei still, dies wird im Kapitel 3.6, Vibration des optischen Systems, noch näher betrachtet. Mit dem Anstellwinkel ε wird der Winkel zwischen äußerem Randstrahl (nach Überschreitung der Systemachse, siehe Abbildung 3-1) und der Systemachse bezeichnet. Dieser ist verantwortlich für den Konuswinkel der sich bei großen Aspektverhältnissen (Durchmesser zu Materialstärke) in der Applikation einstellt.

3.3 Funktionsweise und Einstellparameter

Die ZEMAX - Simulation zeigt die Variabilität der Einstellparameter in der Abbildung 3-2. Auf der linken Seite ist die Funktionsweise der planparallelen Platte mit konstantem Winkel und variablen Bearbeitungsdurchmessern zu sehen. Hierzu wird die planparallele Platte zur optischen Achse gekippt. Beim Durchlaufen des Laserstrahls durch eine planparallele Platte tritt eine Parallelverschiebung S auf. Die Größe von S' wird durch den Einfallswinkel α des einfallenden Strahls auf die planparallele Platte, die Dicke d der planparallelen Platte und dem Brechungsindex n der planparallelen Platte bestimmt. Daraus folgt für den Strahlversatz [Berg87]:

$$S' = f(\alpha, d, n) \quad (3-1)$$

$$S' = d \cdot \sin \alpha \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right) \quad (3-2)$$

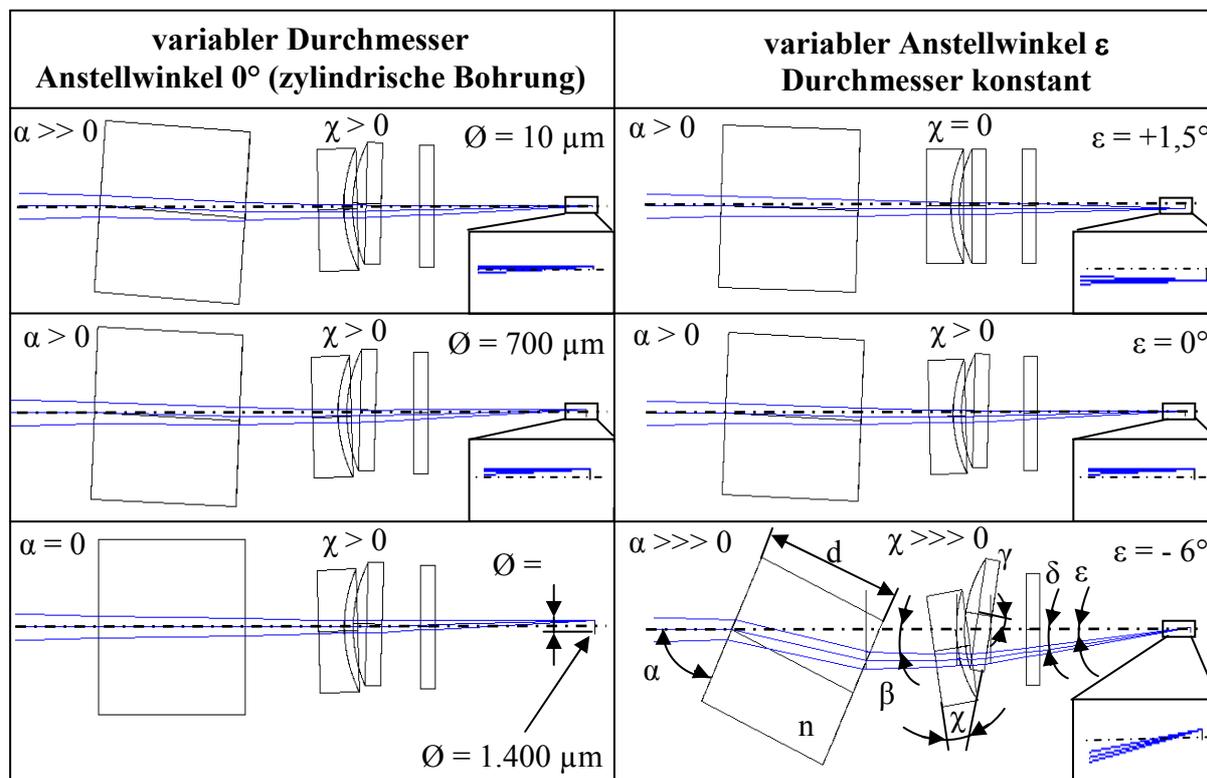


Abb. 3-2 Variation der Einstellparameter, links: Durchmessererstellung, rechts: Winkelverstellung

In der Abbildung 3-2 ist auf der linken Seite das Verfahren der Durchmessereinstellung dargestellt. Der Anstellwinkel ε wird dabei so eingestellt, dass dieser parallel zur optischen Achse verläuft ($\varepsilon = 0^\circ$). Hierzu wird der variable Keil ausgelenkt und zieht den fokussierten Strahl um den halben Öffnungswinkel aus der Systemachse. Dies stellt die maximal erreichbare Durchmessererstellung dar. Zur Verringerung des Durchmessers wird die planparallele Platte gekippt. Der Parallelversatz sorgt nun für die Reduzierung. Diese Einstellung wird genutzt, um Bearbeitungen mit einem Konuswinkel von 0° , bzw. zylindrische Bohrungen herzustellen. Auf der rechten Seite ist der variable Anstellwinkel ε bei konstantem Durchmesser dargestellt.

Je weiter der variable Keil ausgelenkt wird, umso größer ist die Winkelverstellung und damit auch die Durchmesserstellung. Durch die Verstellung der planparallelen Platte kann der Durchmesser bei gegebenem Winkel auf den gewünschten Wert eingestellt werden. Trifft ein Laserstrahl auf die gezeigte Anordnung, wird er um den Winkel $\delta = \chi + \gamma - \beta$ abgelenkt. Ist die Anordnung mit der Brechzahl n von Luft umgeben, so erhält man bei gegebenen Winkeln χ und γ für den Austrittswinkel [Naum92] folgendes:

$$\delta = \arcsin(\cos\chi \cdot \sin\beta - \sin\chi \sqrt{n^2 - \sin^2\beta}) \quad (3-3)$$

Der Anstellwinkel ε ist abhängig von der gewählten Fokussieroptik, die je nach Brennweite bei konstantem Strahleintrittsdurchmesser einen anderen Öffnungswinkel erzeugt. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass die Durchmesserstellung unabhängig von der Winkelverstellung vorgenommen werden kann, bei der Einstellung des Winkels muss der Durchmesser jedoch auf den jeweiligen Wert angepasst werden. Der Arbeitsabstand spielt bei der Bearbeitung mit Winkeleinstellung ebenso eine Rolle, da sich ein größerer Abstand in einem größeren Durchmesser widerspiegelt. Größere Arbeitsabstände sind daher eher mit einer größeren Brennweite der Fokussieroptik zu realisieren. Zu große Verstellungen ziehen steigende optische Fehler nach sich.

3.4 Optische Fehler und Fokusqualität

In der Lasermikromaterialbearbeitung ist das Strahlparameterprodukt für die Fokussierung und damit die Fokusqualität von zentraler Bedeutung. Dies lässt sich auch mit optischen Elementen zwischen der Strahlquelle (hier einer Laserstrahlquelle) und dem Fokus nicht zu verbessern, [Hodg92]. Eine Verbesserung der Fokusqualität ist nur über die Resonatorkonfiguration des verwendeten Lasers zu erreichen. Daher wird bei allen Fokussier- und Strahlführungssystemen angestrebt, die optischen Fehler so gering wie möglich zu halten. In der Abbildung 3-3 ist eine ZEMAX - Berechnung mit dem dazu gehörigen Spotdiagramm des hier verwendeten optischen Systems zu sehen, dabei sind die Parameter so eingestellt, dass eine von der Automobilindustrie häufig geforderte Applikation (Eintrittsbohrung 70 μm , Austrittsbohrung 110 μm , Materialstärke 1 mm) durchgeführt werden kann [Höch10]. Entlang der Z - Achse sind die Intensitätsverteilungen bis $\pm 500\mu\text{m}$ vom Fokus für die hier gewählte Einstellung dargestellt.

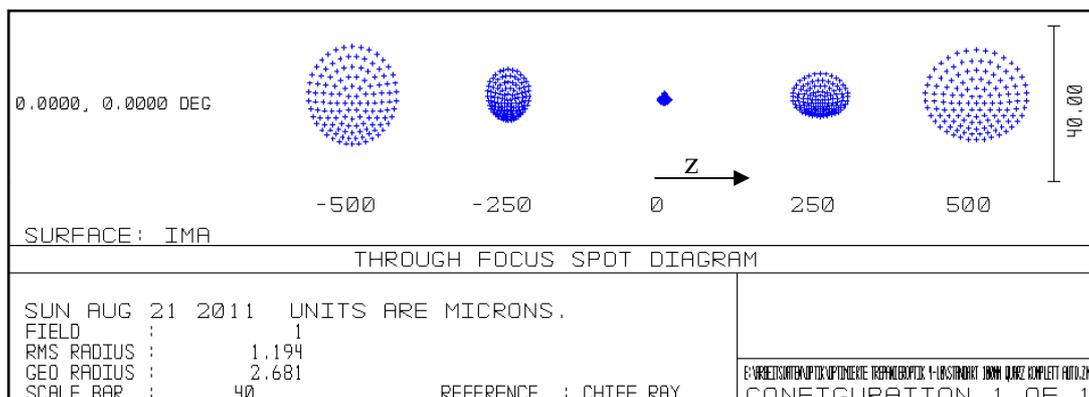


Abb. 3-3 Spotdiagramm mit ausgewählten Einstellparametern

Der RMS - Radius ergibt dabei einen Wert, der um den Faktor fünf kleiner ist als der der wellenoptischen Berechnungen. Das bedeutet, dass für diese Einstellung das System ausreichend korrigiert ist. Jedoch wird deutlich, was aus der Abbildung 3-2 bereits erkennbar ist: die Abbildung 3-3 zeigt Astigmatismus und Koma. Der Öffnungsfehler ist in der Folge zu klein, um aus der Darstellung hervorzutreten. Der Bildwölbungsfehler wird noch genauer betrachtet.

3.4.1 Sphärische Aberration

Die sphärische Aberration (Öffnungsfehler) stellt einen Fehler 2. Ordnung dar und wird durch die unterschiedlich starke Brechung der Lichtstrahlen an der jeweiligen Linsenposition hervorgerufen. Kompensiert wird dieser Fehler durch das Aufteilen der Brechung auf mehrere Flächen sowie die Anpassung der Radien. Diese sind durch die Brechkraft beeinflussbar. So lassen sich mit hochbrechenden Gläsern große Radien realisieren und damit die sphärische Aberration verringern [Zügg10]. Für eine sehr große Objektweite erreicht bei gegebener Brennweite und Linsenöffnung die sphärische Aberration nach dem Gesetz von Euler ein Minimum, wenn das Verhältnis r_1 / r_2 der Krümmungsradien der folgenden Bedingung genügt [Berg87]:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{4 + n - 2n^2}{2n^2 + n} \quad (3-4)$$

Achromate finden zur Kompensation der sphärischen Aberration oft Anwendung. Hierbei ist darauf zu achten, dass keine verkitteten Systeme benutzt werden, da diese den Intensitätsspitzen bei Kurzpulssystemen in der Lasermaterialbearbeitung nicht standhalten. Standardmäßig werden hier Systeme mit Luftspalt genutzt. Die Abbildung. 3-4 stellt den Verlauf einer typischen sphärischen Aberration, unabhängig von der Größenordnung des Strahls im Spotdiagramm dar.

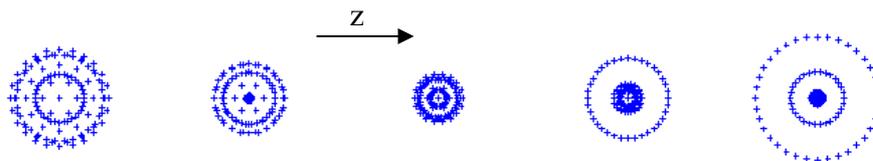


Abb. 3-4 Spotdiagramm einer typischen sphärischen Aberration

3.4.2 Koma

Koma tritt immer dann in Erscheinung, wenn achснаhe Lichtstrahlen eine Linse unter einem Winkel zur optischen Achse treffen. Bei der Koma verschiebt sich das Zentrum zum Rand hin und weist hier ein kometenhaftes Bild auf (Koma, vom griechischen Κομα oder Κομη = Haar). Die Kompensation gelingt wie bei der sphärischen Aberration über Flächenaufteilung und Radienanpassung. Ein gutes Ergebnis erreicht man mit einer Blendenanordnung zwischen Gegenstandsseite und Linse. Ist es notwendig, die Koma auf Null zu reduzieren, und lässt dies der optische Aufbau zu, ist es erforderlich, ein streng symmetrisches System aufzubauen, in deren Mitte sich eine Blendenanordnung befindet. Solche Systeme kompensieren sich gegen-

seitig und finden daher in vielen Objektiven Verwendung. Die Abbildung. 3-5 stellt den Verlauf eines typischen Koma-Fehlers, unabhängig von der Größenordnung des Strahls im Spotdiagramm dar.

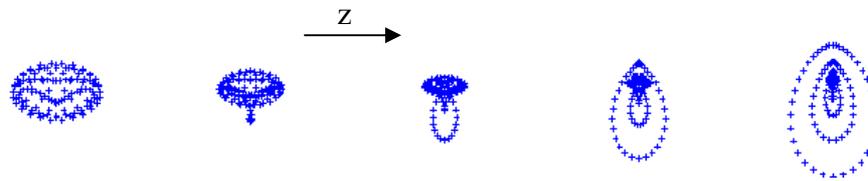


Abb. 3-5 Spotdiagramm eines typischen Koma-Fehlers

3.4.3 Astigmatismus

Von Astigmatismus (Punktlosigkeit) wird gesprochen, wenn der Hauptstrahl eines Strahlbündels außerhalb und unter einem Winkel zur optischen Achse, ein optisches System durchtritt. Hierbei ergeben sich in der Bildebene zwei unterschiedliche Brennpunktlagen. Die Brennpunkte liegen in Ausbreitungsrichtung hintereinander. In der Meridionalebene werden die zentrumsnahen Strahlen fokussiert, in der Sagittalebene die periphereren Strahlen. Beide Brennpunkte sind elliptisch und ihre Hauptachse ist um 90° zueinander gedreht. Zwischen Meridionalebene und Sagittalebene befindet sich der Bereich des kleinsten Strahldurchmessers, der eigentliche Brennpunkt. Kompensieren lässt sich der Astigmatismus durch Wahl der entsprechenden Radien, da diese auf den Hauptstrahl wirken. Liegt der Hauptstrahl jedoch auf der optischen Achse, wirkt diese Korrekturmaßnahme nicht. Die Abbildung 3-6 stellt den Verlauf eines typischen Strahls mit Astigmatismus, unabhängig von der Größenordnung des Strahls im Spotdiagramm dar.

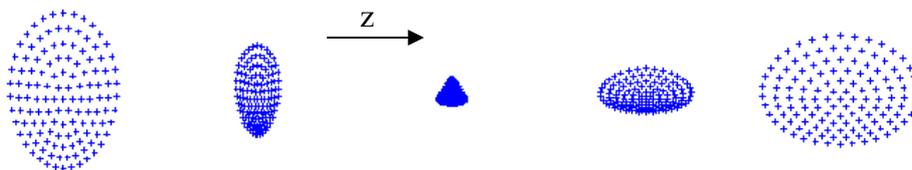


Abb. 3-6 Für Astigmatismus typisch Spotdiagramm

3.4.4 Wellenoptische Betrachtung

Im Gegensatz zur geometrischen Optik, wo sich vom Gegenstand weg Kugelwellen ausbreiten, deren Krümmungsradien linear mit dem Abstand wachsen, gilt dieses nicht für den Gaußstrahl. Hier nimmt das Abbildungsgesetz für die Taille eine andere Form an. Wenn man davon ausgeht, dass am Ort der Taille die Phasenfläche eben ist, also $R = \infty$, dann erhält man nach [Hodg92]:

$$\underbrace{\frac{1}{z} + \frac{1}{z'}}_{\text{geometrische Optik}} = \frac{1}{f} + \frac{z_R^2}{z[z^2 + z_R^2 - zf]} \quad (3-5)$$

wobei z' der Abstand der Taille von dem Linsenscheitel ist und positiv ausfällt, falls wie in der Abbildung 3-7 dargestellt, die Taille rechts der Linse liegt. Für die gezeigten Größen gilt:

$$w'_0 = w_0 \frac{f}{\sqrt{z_R^2 + (z-f)^2}} \quad (3-6)$$

$$w_f = f \cdot \theta_0 \quad (3-7)$$

$$z'_R = z_R \frac{f^2}{z_R^2 + (z-f)^2} \quad (3-8)$$

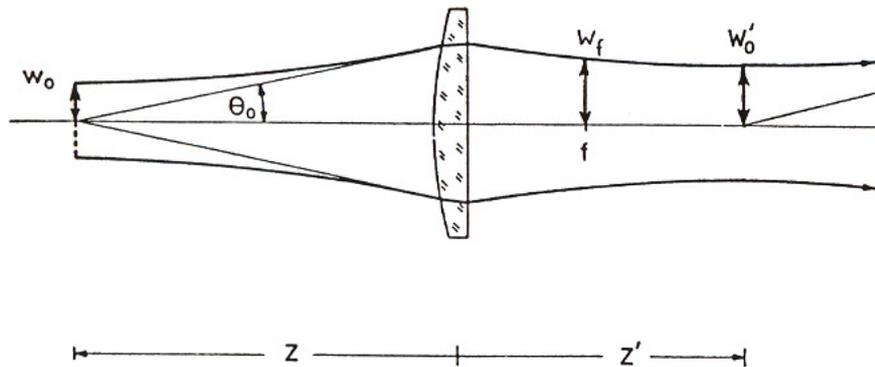


Abb. 3-7 Verlauf eines Gaußstrahls durch eine Linse [Hodg92]

Aus (3-5) und (3-8) erkennt man, dass große Rayleighlängen z'_R und ein kleiner Fokusradius w'_0 nicht vereinbar sind. Die Division der beiden Gleichungen liefert:

$$\frac{w'_0{}^2}{z'_R} = \frac{w_0{}^2}{z_R} = \frac{\lambda}{\pi} \quad (3-9)$$

Neben dem Strahlparameterprodukt ist das Verhältnis Fokusfläche zu Rayleighlänge eine Konstante des Gaußstrahls. Versucht man den Fokusradius möglichst klein zu wählen, indem man z.B. die Brennweite der Linse klein wählt, so wird die beidseitige Rayleighlänge mit der Fokusfläche abnehmen. Man kann aus diesem Grund nicht beliebig enge und gleichzeitig tiefe Schnitte in ein Werkstück machen.

Die Abbildung 3-8 zeigt die graphische Darstellung der Abbildungsgleichung (3-5). Der Grenzfall der Abbildungsgleichung der geometrischen Optik wird nur erreicht für $z_R / z = 0$, d.h. wenn die Strahltaile, in Einheiten der Rayleighlänge gemessen, sehr weit entfernt ist. In diesem Fall verhält sich der Gaußstrahl gerade wie eine Kugelwelle.

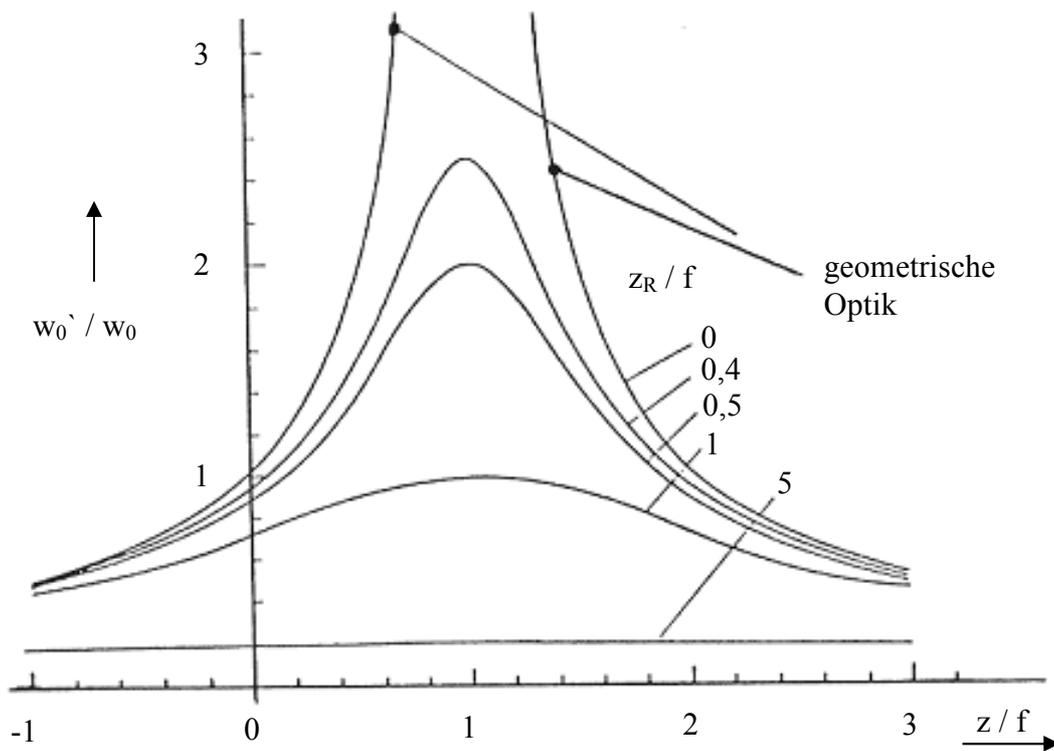


Abb. 3-8 Zusammenhang zwischen dem Abbildungsmaßstab w_0' / w_0 , der Gegenstandsweite z und der Rayleighlänge z_R nach (3-5), nach [Hodg92]

Die Abbildungsgleichung der geometrischen Optik gilt nach wie vor, nur liefert sie nicht die Strahltaile, sondern den Ort des „Bildes“ w' der Taille. Dieses Bild der Taille ist keine Taille und besitzt auch keine ebene Phasenflächen. Ihre Bezeichnung Bild ist jedoch zutreffend, da alle von w_0 ausgehenden Strahlen im Bild w_0' vereinigt werden [Hodg92]. Sind die Beträge von Tailenabstand z und Brennweite f gleich, also 1, und ist die Rayleighlänge z_R im Verhältnis zur Brennweite f klein (für große Brennweiten), nähern sich die Phasenfronten der geometrischen- und der Wellenoptik an.

3.4.5 Bildfeldwölbung

Bei der Bildfeldwölbung handelt es sich um einen Fehler, der in der Bildebene auftritt. Hierbei wird der Fokus in der Bildebene in Achsrichtung, in Abhängigkeit vom Abstand der optischen Achse, verschoben. Diese Verschiebung verläuft auf einem Radius, dem „Petzvalradius“, dessen Scheitelpunkt sich in der optischen Achse befindet. Für dünne Linsen gilt folgende Bedingung:

$$\frac{1}{R'} = -\frac{\phi}{n} = -\frac{1}{f' \cdot n} \quad (3-10)$$

Für ein beliebiges System ist die Größe f' / R' ein von der Brennweite unabhängiges Maß für die Petzvalkrümmung. Korrigieren lässt sich dieser Fehler durch Verwendung von negativer Brechkraft bei kleiner Randstrahlhöhe. Die größte Wirkung erzielt man, wenn eine negative Feldlinse in die Gegenstands- und Bildebene gelegt wird. Dies scheidet für den vorliegenden Fall jedoch aus, da die Lasermaterialbearbeitung in der Bildebene stattfinden soll. Meniskus-

linsen haben aufgrund ihrer ähnlichen Radien und ihrer Dicke meist eine reduzierende Wirkung auf die Petzvalkrümmung [Zügg10].

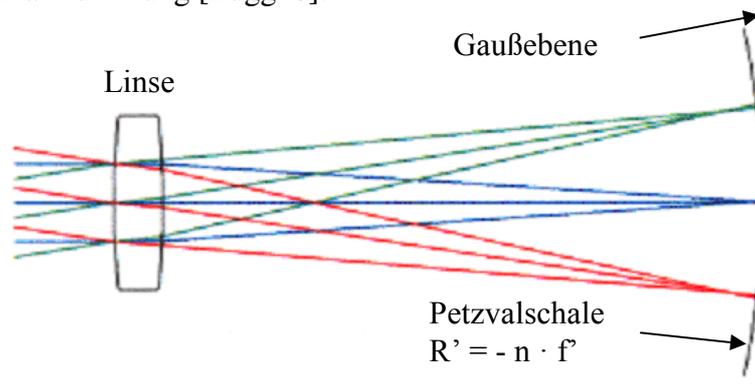


Abb. 3-9 Darstellung der Petzvalkrümmung anhand einer Linse [Zügg10]

Die Abbildung 3-10 zeigt die Verschiebung der Fokusslage bei Veränderung der Einstellparameter des Gesamtsystems. Hierbei wird der Anstellwinkel ε bei konstantem Durchmesser von $100 \mu\text{m}$ variiert. Die Fokussieroptik, die mitverantwortlich ist für die Rayleighlänge ist, wird mit 100 mm Brennweite festgelegt. Die Verschiebung ergibt sich maßgeblich aus den unterschiedlichen optischen Weglängen, die durch die Einstellung hervorgerufen werden.

In der Abbildung 3-2 ist die Wirkung der Einstellparameter dargestellt. Hierbei wird ersichtlich, dass sich die größten Weglängenunterschiede aus den jeweiligen Winkelpositionen der planparallelen Platte ergeben. Die Fokusslage erfährt hierbei je nach Weglängenunterschied durch die planparallele Platte und deren Brechungsindex eine Verschiebung. Die Verschiebung im variablen Keil ist durch den kompensierenden Aufbau vernachlässigbar. Ebenso der Einfluss des Schutzglases, da dessen Dicke gering ist. Die Lageverschiebung zeigt größere Werte als der Betrag der Rayleighlänge. Dies bedeutet, dass die Fokusslage in Z- Richtung für die jeweilige Einstellung angepasst werden muss.

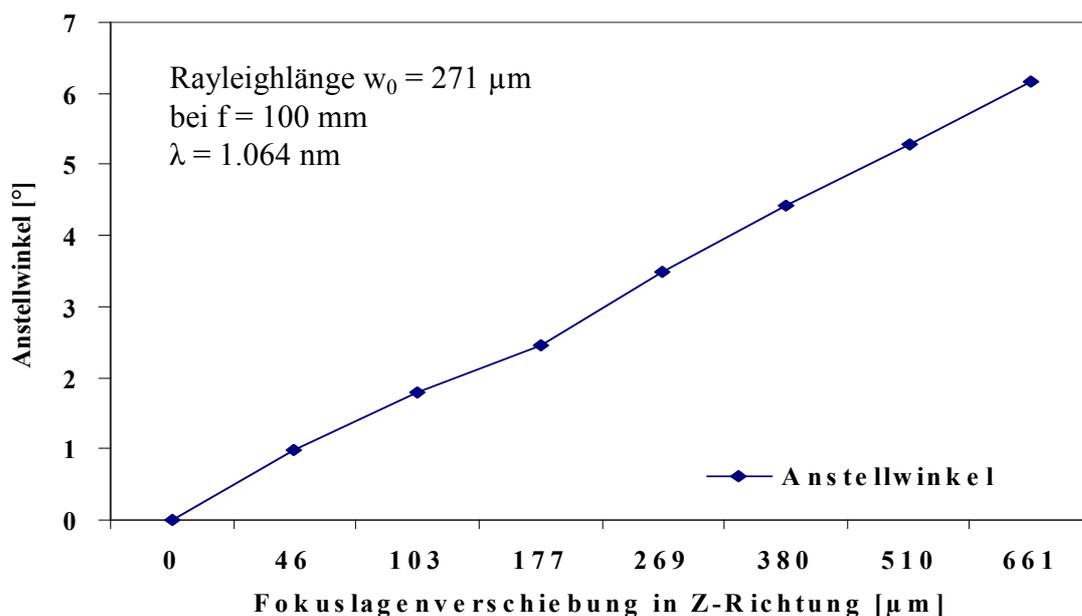


Abb. 3-10 Z - Verschiebung der Fokusslage bei Parameterverstellung

3.4.6 Auswahl optischer Gläser für den Strahlengang

Bekannt ist, dass durch ionisierende Strahlung Gläser und Kristalle verfärbt werden. Anwendung findet dies bei der Einfärbung von Edelsteinen. Dieser Effekt lässt sich auch bei kurzgepulsten Lasersystemen, die heute im industriellen Einsatz sind, beobachten. Problematisch wird dies, wenn diese Systeme mit Wellenlängen im VIS - oder im UV - Bereich ausgestattet werden. Hier baut sich die Verfärbung durch die Dauerbestrahlung schnell auf und absorbiert so die Laserstrahlung. Bei Kurzpulssystemen muss bei der Wahl von gläsernen Optiken genau auf deren Einsatz geachtet werden. So können z.B. bei Wellenlängen von 532 nm keine BK7-Optiken mehr verwendet werden, die Folge wäre die Zerstörung des Systems [Lemk10]. Dies schränkt die Auswahl an optischen Gläsern stark ein, da die begrenzte Zahl an hochbrechenden Gläsern, die ein Design mit geringen Massen und verbesserter Fehlerkompensation erlaubt, dadurch noch schwieriger wird. Hochbrechende Kristalle sind oft stark doppelbrechend und daher für die Verwendung ungeeignet. Die Abbildung. 3-11 zeigt das Transmissionsverhalten der laserinduzierten Verfärbung von Kalk - Natron - Glas (Optiwhite) und BK 7 (Schott).

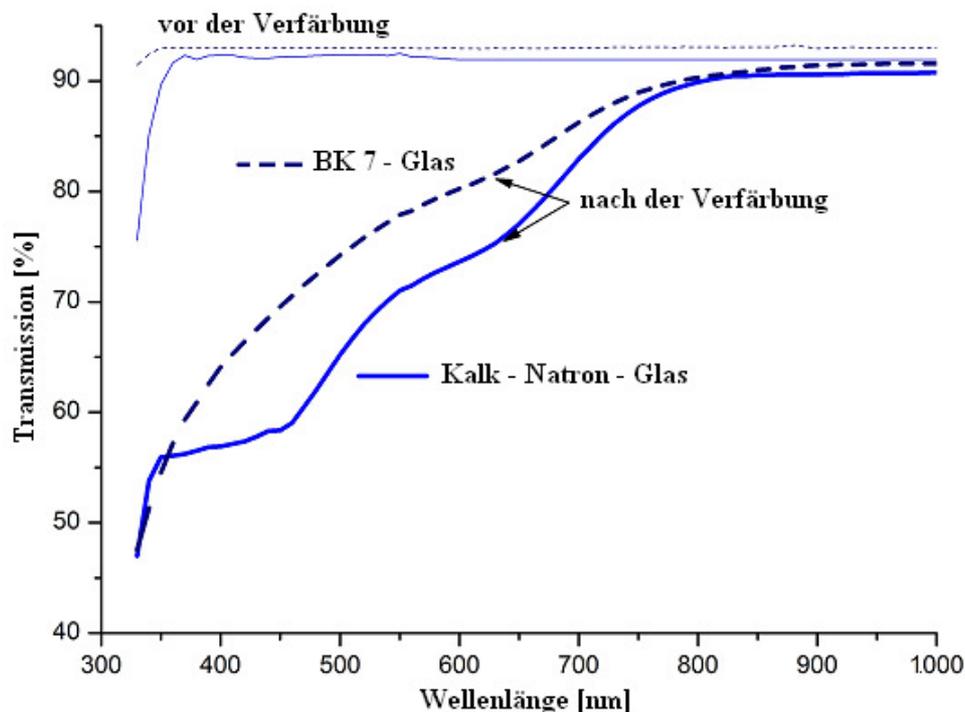


Abb. 3-11 Laserinduzierte Verfärbung [Lemk10]

3.5 Kompensation der optischen Fehler durch Rotation

Die bedeutendsten Fehler sind Koma und Astigmatismus, sie werden in erster Linie von den optischen Elementen planparallele Platte und variabler Keil (Plankonkav - und Plankonvexlinse) erzeugt. Dies sind auch die Elemente, die in Rotation versetzt werden. Um die Rotation der Fehler deutlich zu machen, wurde das System weit aus dem Arbeitsbereich bewegt. In dieser Einstellung können Durchmesser von bis zu 6 mm (innerhalb des Arbeitsbereiches bei $f = 100$ mm max. $1.400 \mu\text{m}$) realisiert werden. Bei großen Verstellungen wird der Strahl „weit“ aus der Systemachse weg bewegt. Je weiter die Auslenkung, desto größer die Fehler, d. h. die optischen Fehler Astigmatismus und Koma wurden verstärkt. Um die Rotation der Fehler noch besser zu erkennen, wurde an unterschiedlichen Positionen der Strahltaile auf den Durchmesser eine Reihe von Laserpulsen gesetzt. Die Materialperforation liefert dabei einen Abdruck der jeweiligen Fokusslage mit ihren optischen Fehlern. Die Abstände wurden dabei so gewählt, dass die Einschüsse, anders als später in der Applikation, nicht überlappen. In der Abbildung. 3-12 zeigt das Spotdiagramm der ZEMAX - Rechnung die jeweiligen Einstellung. In den Applikationsbildern ist auf 3, 6, 9 und 12 Uhr eine Vergrößerung des Fokusabdruck zur besseren Erkennung dargestellt. Hier lässt sich nun zeigen, dass der Fehler mitrotiert und die Lage zur Schnittkante immer gleich bleibt. Dies ist für die Applikation von großer Bedeutung, da dies symmetrisch runde Bohrungen und hochwertige Schnittkanten erlaubt. Zur Verwendung kam ein Laser mit einer Strahlqualität von M^2 kleiner als 2, bei einer Wellenlänge von 1.064 nm und einer Pulsbreite von 30 nsek .

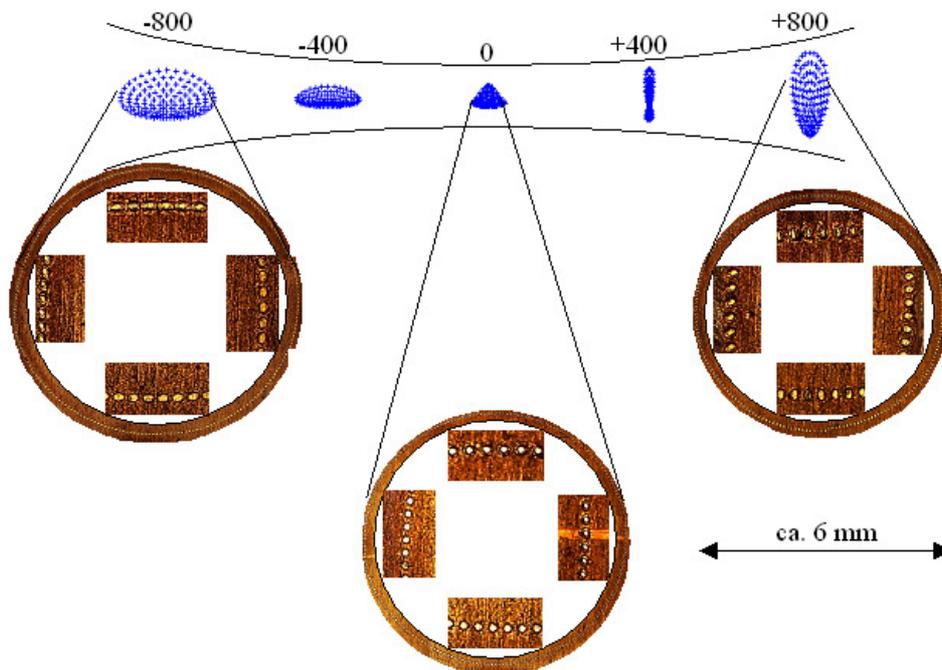


Abb. 3-12 Fokusabdruck

3.6 Vibration des optischen Systems

Um die Laserpulse präzise auf einer Kreisbahn verteilen zu können, werden die Stillelemente in Rotation versetzt. Erreicht wird dies durch die Verwendung eines Hohlwellenantriebs, auf

dessen Achse die optischen Stullelemente montiert sind. Der Strahl kann dadurch durch das Innere des Motors geführt werden, und die Elemente müssen nicht von extern angetrieben werden. Hierdurch lassen sich schwingungsarm hohe Drehzahlen erreichen. Jedoch erzeugt jedes mechanische System, welches in Bewegung versetzt wird, auch Schwingungen, die sich im ungünstigsten Fall überlagern und aufaddieren. Diese Resonanzschwingungen haben eine hohe Amplitude und sind schwer zu dämpfen. Um die Auswirkungen dieser Schwingungen auf das optische System zu untersuchen, wurden mit einem Laservibrometer Messungen vorgenommen.

Der hier verwendete Drei - Phasen - Asynchronmotor hat den Vorteil, dass die Schwingungsausrichtung (aufgrund seines magnetischen Feldes) in X - Y-Richtung erfolgt, in Z - Richtung treten nur vernachlässigbar kleine Werte auf. In der Abbildung 3-13 ist die Auswertung einer solchen Messung dargestellt. Deutlich zu sehen ist die Erhöhung der Amplitude bei 2.000 U / min und 9.000 U / min. Hier liegen Resonanzstellen vor.

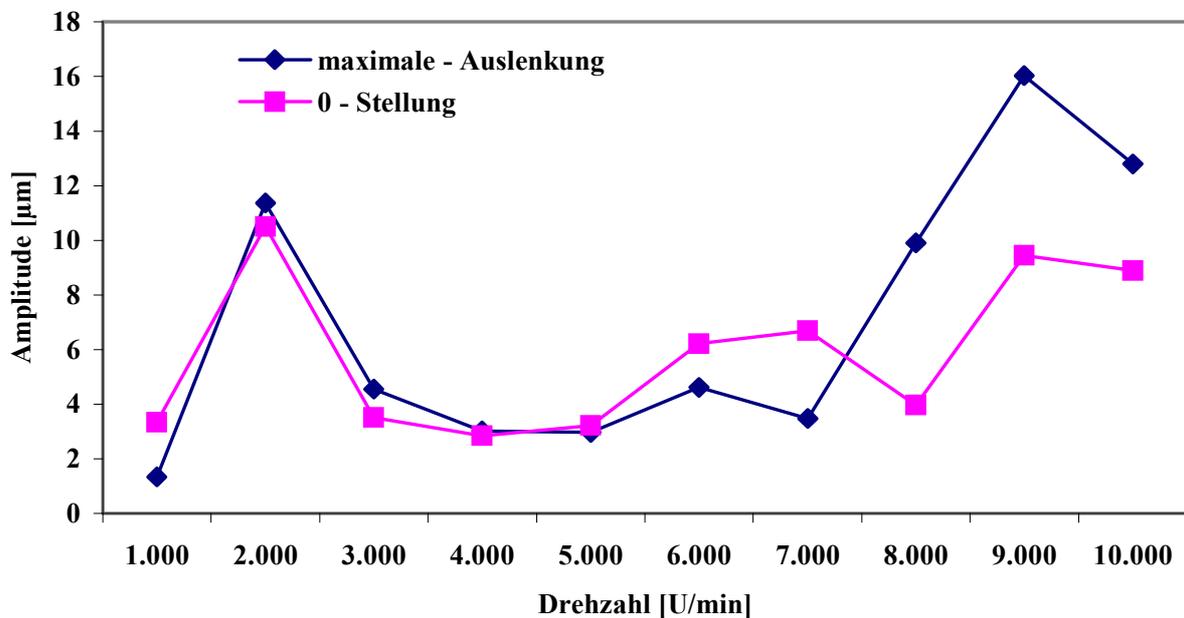


Abb. 3-13 Auswertung der Laservibrationsmessung

Die maximale Amplitude wird mit 16 µm, das heißt ± 8 µm aus der Null - Lage erreicht. Zur Berechnung der Fokuslagenverschiebung dient dieser Wert als Grundlage. Des Weiteren sind die Vorgaben aus der Industrie ein guter Anhaltspunkt für die zu erreichenden Werte. Toleranzanforderungen von 1 - 2 Prozent vom Bohrungsdurchmesser werden immer wieder genannt. Dies bedeutet bei einer 100 µm - Bohrung eine maximale Verschiebung der Fokuslage um 1 µm.

Mit ZEMAX lassen sich danach die Fokuslagenverschiebungen berechnen. Die in Rotation versetzten Elemente (planparallele Platte und variabler Keil, mechanisch gekoppelt) werden in Y - Richtung (transversal zur Lichtausrichtung) verschoben und ihre Fokuslage berechnet. Die Fokusqualität wird hierdurch kaum beeinflusst, da sich die optischen Weglängen durch das System kaum verändern. Bei der planparallelen Platte bleibt die Weglänge konstant, beim

variablen Keil sind die Änderungen aufgrund der ausgleichenden Wirkung der Plankonkav- und der Plankonvexlinse sehr klein. Selbst die Winkelverstellung lässt sich vom Einfluss der transversalen Verschiebung zur Strahlrichtung kaum beeinflussen, der Winkel zwischen den wirkenden Flächen bleibt konstant. In der Abbildung. 3-14 ist die errechnete Fokusverschiebung im Diagramm dargestellt.

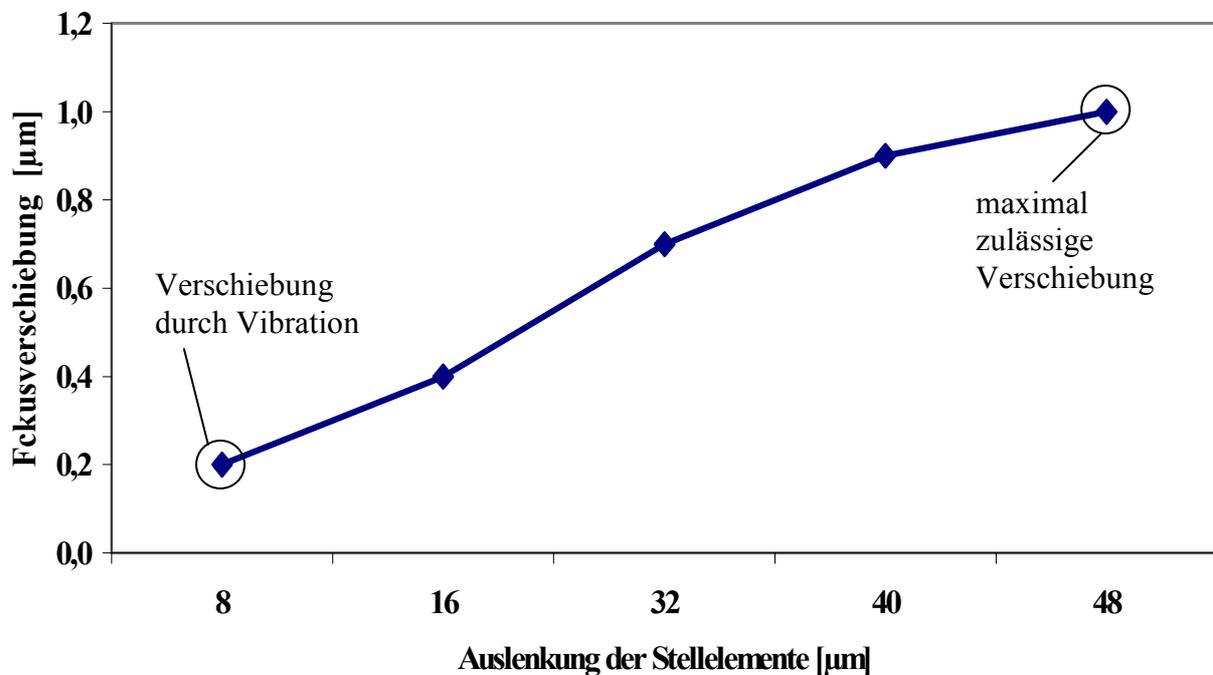


Abb. 3-14 Fokusverschiebung durch Vibration

Wesentlich für das Erreichen von guten Ergebnissen ist die Trennung von Fokussiereinheit und Stellelementen, die mechanisch entkoppelt aufgebaut, voneinander schwingungs isoliert sind. Hierauf wird im Kapitel 4, Konstruktion und Aufbau der Bearbeitungsoptik, näher eingegangen. Grundlage für die Berechnung waren $70\ \mu\text{m}$ Eintrittsbohrungen bei einem Anstellwinkel von 3° .

3.7 Erreichbare Strahlwerte

In der Tabelle 3-2 sind die Parameter des optischen Systems dargestellt. Die Fehler der optischen Elemente, die im RMS - Radius der Bildgröße in der Bildebene abgebildet werden, liegen unterhalb derer der wellenoptischen Berechnungen des Taillenradius'. Das heißt, dass das optische System nicht durch die Elemente, sondern durch die verwendete Strahlquelle begrenzt wird. Bei der richtigen Wahl der Strahlquelle können dadurch qualitativ hochwertige Bearbeitungsergebnisse realisiert werden. Bohrungsdurchmesser, Anstellwinkel sowie die Vielzahl der verwendbaren Fokussierobjektive geben Aufschluss über die Breite der Anwendungsmöglichkeiten des Systems in der Applikation.

Außer bei einer Brennweite von $f = 50\ \text{mm}$ wurde der Arbeitsabstand mit $20\ \text{mm}$ festgelegt. Bei $f = 50\ \text{mm}$ begrenzen die mechanischen Bauteile den Arbeitsabstand. Da in dem hier vorgestellten System die Manipulation des Strahls hinter der Fokussierung geschieht, ist die Brennweite ein Maß für den verwendbaren Bauraum. Aber auch hier reicht der Raum zur

Verwendung einer Gasdüse noch aus. Der Strahldurchmesser wurde mit 5 mm gewählt, um die optischen Fehler in Grenzen zu halten. Größere Strahldurchmesser ergeben nicht, wie bei klassischen Bearbeitungsoptiken, einen kleineren Fokusbereich, sondern wirken durch das rapide Ansteigen der Aberrationen eher vergrößernd. Die hier ermittelten Werte wurden auf Grundlage eines Lasersystems mit guter Strahlqualität $M^2 < 1,3$ und einer Wellenlänge $\lambda = 1.064$ nm errechnet. Zur Bestimmung der optischen Parameter diente das Berechnungsprogramm Win ABCD aus dem Ferdinand - Braun - Institut, welches auf der Matrizenmultiplikation basiert. Andere Werte wurden mit ZEMAX bestimmt.

		Brennweite / f bei Strahldurchmesser \varnothing 5 mm und Arbeitsabstand ca. 20 mm			
Parameter		50 [mm]	75 [mm]	100 [mm]	150 [mm]
Anstell- winkel ε bei \varnothing 100 μm	- ε [°]	4,4	4,8	5,8	6,1
	+ ε [°]	2,9	1,9	1,4	1,0
RMS \varnothing 100	$r_{\text{max.}}$ [μm]	1,7	1,0	0,5	0,2
Bohrung	\varnothing [μm] 0°	2.100	1.800	1.400	900
Fokus	w_0 [μm]	3,5	5,1	6,8	10,2
Rayleighlänge	Z_R [μm]	73	157	271	617


Arbeitsabstand 12 mm

Tabelle 3-2 Erreichbare Einstellwerte bei einer Wellenlänge λ von 1.064 nm und einer Laserstrahlquelle von $M^2 < 1,3$

4 Konstruktion und Aufbau der Bearbeitungsoptik

4.1 Anforderungen an die Konstruktion

Das optische System wird in zwei unterschiedlichen Aufbauten eingesetzt. Einerseits in einer Bearbeitungsoptik, die zur Bearbeitung von transparenten Materialien bei feinmechanischen Abmessungen dient (System 1). Hier liegt das Interesse bei der Erreichung hoher Drehzahlen, die für eine schonende und sichere Bearbeitung sorgt. Bei diesen Applikationen liegen die Anforderungen an die Genauigkeit im Bereich der Freimaßtoleranzen (DIN 7168 fein), die in der Feinwerktechnik üblich sind. Daher reicht eine einmal eingestellte Parameterkombination in der Regel aus, um Bearbeitungen dauerhaft in hinreichender Präzision durchführen zu können.

Ganz anders stellt sich die Situation in der Mikromaterialbearbeitung bei System 2 dar. Hier werden sehr hohe Anforderungen an die Applikation gestellt. Toleranzen im Bereich weniger Mikrometer sind keine Seltenheit. Parameterverstellungen während der Bearbeitung zur Herstellung von Formbohrungen (Shape hole) oder zur Ausarbeitung bzw. zur Veredelung der Bohrwand sind oft geäußerte Wünsche. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, reicht es nicht aus, ein System mit manueller Verstellung zu konzeptionieren, hier müssen alle Parameter über Stellglieder ansprechbar und in ein Regelsystem eingebunden sein, welches eine Online - Überwachung der optischen Stellglieder gewährleistet. In den Tabellen 4-1 und 4-2 sind die wesentlichen Forderungen an die Systeme aufgelistet.

System 1		
Nr.	Forderung	Auswirkung
1	schwingungsentkoppelte Halterung der Fokussieroptik mit Wechsellvorrichtung	Erhöhung der Bearbeitungsqualität
2	manuelle Verstellung der Systemparameter	vereinfachter Aufbau
3	rotationssymmetrische Massenverteilung bei der Halterung der optischen Elemente	Reduktion der systembedingten Schwingungen
4	Drehzahlregelung der Antriebskomponenten	Anpassung des Puls - zu Puls - Überlapps
5	Erreichen hoher Drehzahlen bei geringen Schwingungen	schonende Bearbeitung

Tabelle 4-1 Forderungen an System 1

System 2		
Nr.	Forderung	Auswirkung
1	schwingungsentkoppelte Halterung der Fokussieroptik mit Wechsellvorrichtung	Erhöhung der Bearbeitungsqualität
2	betriebsunabhängige Ansteuerung der Stellglieder	komplexer Aufbau
3	rotationssymmetrische Masseverteilung bei der Halterung der optischen Elemente	Reduktion der systembedingten Schwingungen
4	Drehzahlregelung der Antriebskomponenten	Anpassung des Puls - zu Puls - Überlapps
5	Regelung der Stellelemente	Integration eines Online-Messsystems

Tabelle 4-2 Forderungen an System 2

Vergleicht man die beiden Tabellen 4-1 und 4-2 miteinander, wird ersichtlich, dass sich einige Punkte wiederholen. So ist nicht nur das optische System gleich, sondern auch Teile des mechanischen Aufbaus können auf eine gemeinsame Basis gestellt werden. Der mechanische Aufbau der schwingungsentkoppelten Fokussieroptik wird in beiden Systemen gefordert, hinzu kommt der Wunsch, die Optik unkompliziert wechseln zu können. Diese Baugruppe wird so aufgebaut, dass sie für beide Systeme nutzbar ist. Analog hierzu wird auch bei Punkt 3 und Punkt 4 verfahren. Auf die sich unterscheidenden Punkte wird nachfolgend eingegangen.

4.2 Konstruktion und Aufbau von System 1

In der Abbildung 4-1 ist das System 1 im Viertelschnitt dargestellt. In diesem Zusammenhang wird nicht auf konstruktive Einzelheiten eingegangen, sondern in erster Linie auf die Erläuterung der Funktionsweise. Der Antriebsmotor ist hierbei vereinfacht dargestellt. Die schwingungsentkoppelte Justageaufnahme (01) ist fest mit der Grundplatte (02) verbunden, diese dient später auch zur Befestigung an der Maschinenachse. Die Schwingungsentkopplung wurde über die Befestigung des Drei - Phasen - Hohlwellenmotors (03) realisiert, dessen Befestigungspunkte in Schwingungsdämpfern gelagert, mit der Grundplatte (02) verbunden sind. Die Justage und die Einstellung der Fokussieroptik (01) lässt sich mit auf Wellen sitzenden Achsspannern (04) und einer Gewindeeinstellung (05) bewerkstelligen. Die durch die Motorwelle geführte Optik (06) kann in ihrer Lage justiert sowie im Abstand zu den folgenden optischen Elementen eingerichtet werden.

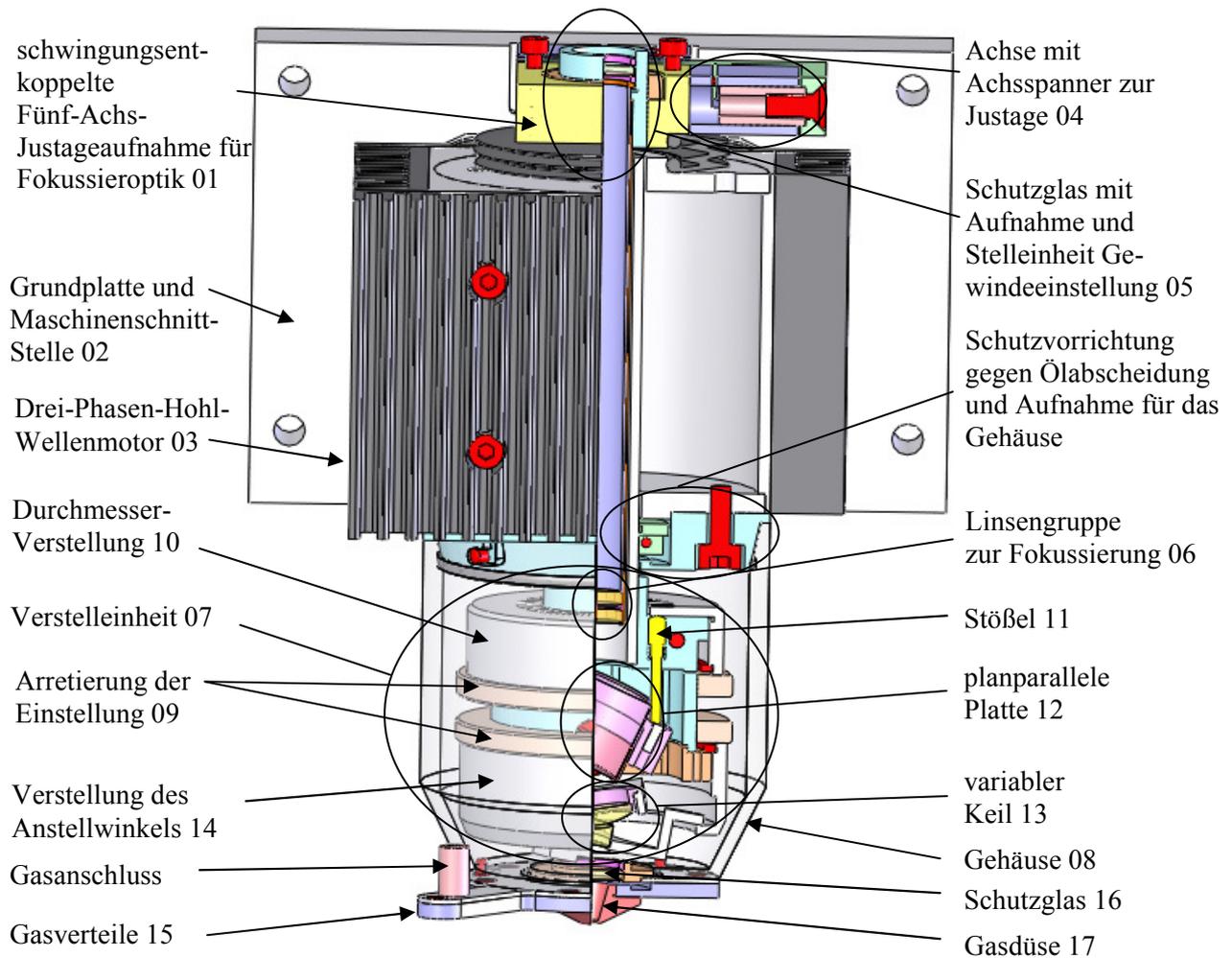


Abb. 4-1 Darstellung der manuell einstellbaren Bearbeitungsoptik

Die Verwendung von Wechseloptiken ist problemlos möglich, hierzu steht der komplette Bauraum der Hohlwelle zur Verfügung. Die manuelle Verstellung der optischen Elemente wurde - in einer Einheit (07) zusammengefasst - auf der Hohlwelle des Motors montiert. Die Verstellung wird bei entferntem Gehäuse (08) an den Stellringen vorgenommen. Hierzu wird der jeweilige Konterring (09), der zur Arretierung der Einstellung dient, gelöst, um anschließend am Stellring die gewünschte Parametereinstellung vornehmen zu können.

Das System erlaubt die unabhängige Wahl von Durchmesser und Winkelverstellung. Die Durchmesserbeeinflussung erreicht man über die Verdrehung des oberen Stellrings (10), welcher dann auf einen Stößel (11) drückt, der anschließend auf die Einfassung (12) der planparallelen Platte wirkt und diese im Winkel auslenkt. Stößel (11) und Einfassung (12) sind hinterfedernd gelagert. Dies ermöglicht eine spielfreie Einstellung. Die gelagerte Einfassung (12) und ihre Massen sind so berechnet, dass sich diese bei jeder Einstellung rotationssymmetrisch verteilen. Bei Rotation wirken die Fliehkräfte so, dass die Einfassung (12) gegen den Stößel (11) drückt und in Richtung der Federn arbeitet. Eine ähnliche Funktionsweise zeigt die Verstellung des Anstellwinkels (13), hier sind Plankonvex - und Plankonkavlinse ineinandergeschachtelt, in einem gemeinsamen Drehpunkt hinterfedernd gelagert, so dass ihre Radien mit einem Luftspalt versehen ineinander laufen. Auch hier arbeiten die Federn gegen den

Stelling (14) und realisieren damit eine spielfreie Einstellung. Die Fliehkräfte wirken wie bei der Durchmesser-einstellung in Richtung der Federn. Ebenso sind die Linsenfassungen auf Massensymmetrie hin untersucht und ausgeglichen worden. Auch bei hoher Drehzahl und großen Fliehkräften bleiben die Einstellungen unverändert.

Das Gehäuse (08) ist mit einem Bajonettverschluss versehen, welcher ein problemloses Öffnen und Verändern der Einstellwerte erlaubt. Außerdem dient das Gehäuse zum Schutz vor drehenden Teilen. Am Gehäuse ist der Gasverteiler (15) befestigt, der das Schutzglas (16) sowie die Düse (17) trägt und mit dem zugeführten Prozessgas die Applikation unterstützt. Vorteilhaft ist, dass der Motor quasi kontaktfrei im Leerlauf betrieben werden kann.

In der Abbildung 4-2 sind die Einstellschrauben (10), (14) von System 1 (links) gezeigt. Das Gehäuse (08), welches zur Aufnahme des Gasverteilers (15) dient, wurde entfernt. Mit den Einstellschrauben (10), (14) wird die jeweilige Verstellung der optischen Elemente, wie im Funktionsprinzip dargestellt (rechts), realisiert. Dabei zeigen die Blockpfeile die Wirkung der mechanischen Verstellung. Die Einrichtung des Fokussiersystems lässt sich in der Justagegruppe (01) vornehmen und ist in der Abbildung 4-1 gezeigt. Die Lage der optischen Elemente in der Funktionsskizze entspricht annähernd der der konstruktiven Umsetzung.

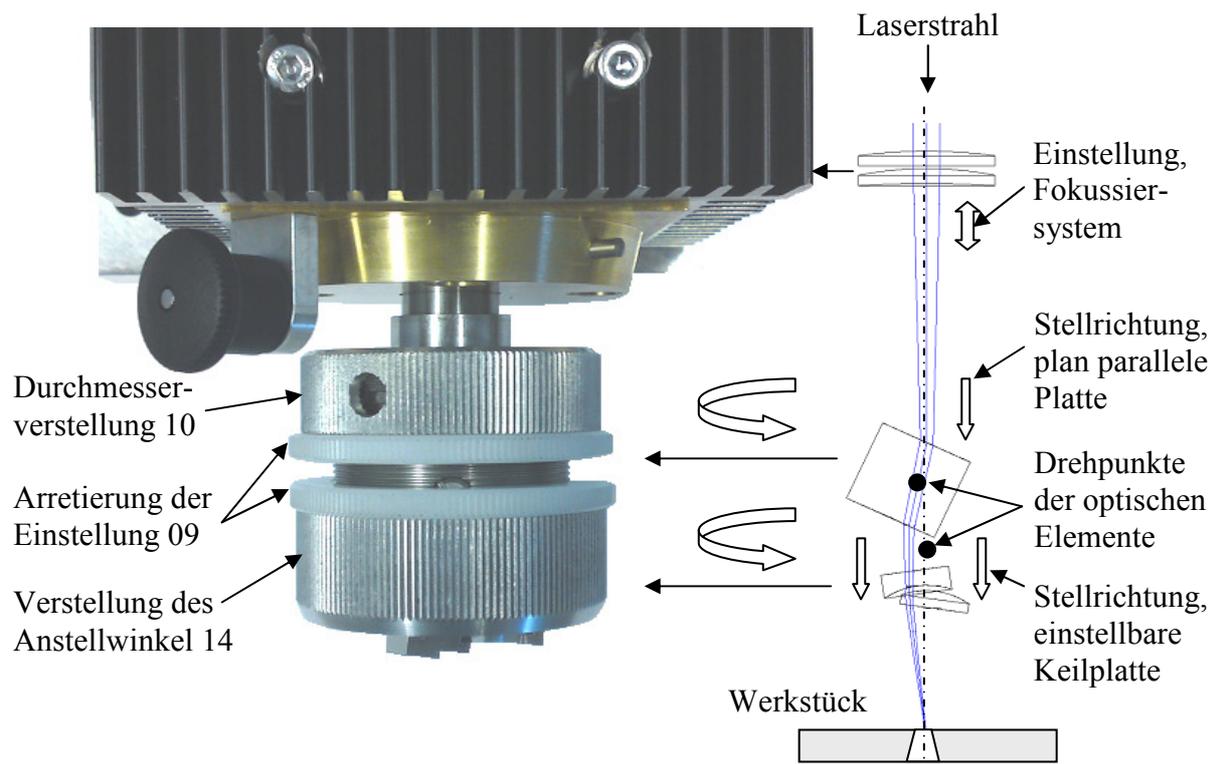


Abb. 4-2 Darstellung der Einstellschrauben mit Funktionsprinzip

4.2.1 Technische Daten System 1

In der Tabelle 4-3 sind die wesentlichen technischen Daten von System 1 dargestellt. System 1 kann in zwei Ausführungsformen realisiert werden, hier spielt die Hohlwellenausführung eine bedeutende Rolle. Bei großen Motorleistungen und hohen Drehzahlen wirken die magnetischen Kräfte sowie die Fliehkräfte auf den Rotor und bringen die Hohlwelle zum Durchbiegen. Aus diesem Grund muss zum Erreichen der Maximaldrehzahl die Hohlwelle verstärkt ausgeführt werden, wodurch sich der Innendurchmesser verkleinert. Dies wirkt sich in der Konstruktion auf die freie Apertur und somit auf die verwendeten Optiken aus.

System 1		
Parameter	Ausführung A	Ausführung B
Drehzahl [U / min]	1.000 - 20.000	1.000 - 40.000
Optik [Ø in “]	½	¼
freie Apertur [mm]	10	5,5
Empfohlener Strahldurchmesser [mm]	< 5	< 3
elektrischer Anschluss [V] / [VA]	230 / 425	230 / 425
geometrische Abmaße H x B x T [mm]	200 x 100 x 120	200 x 100 x 120

Tabelle 4-3 Technische Daten der manuell einstellbaren Bearbeitungsoptik

4.3 Konstruktion und Aufbau von System 2

Wie bei System 1 liegt auch hier der Fokus auf der Erläuterung der Funktionsweise. Auf die schwingungsentkoppelte Justieraufnahme (01), die Einheit der optischen Elemente (07), die Gaszuführung (15) sowie die Befestigung des Drei - Phasen - Hohlwellenantriebs (03), welche äquivalent zu System 1 aufgebaut sind, wird nicht mehr eingegangen. In der Abbildung 4-3 ist der Viertelschnitt der automatisierten Bearbeitungsoptik mit Messsystem dargestellt. Auf das Messsystem wird in Abschnitt 4.3.1 noch näher eingegangen, hier soll nur die Integrationsfähigkeit des Systems demonstriert werden.

Wie gefordert sind in System 2 die optischen Stellglieder motorisch ansteuerbar. Das heißt die in System 1 manuell vorgenommene Verstellung lässt sich nun automatisiert über Schrittmotoren ansteuern. Diese links und rechts des Drei - Phasen - Hohlwellenantriebs (01) angeordneten Schrittmotoren (02), (03) werden im Mikroschritt betrieben und sprechen über die Zahnriemengetriebe die Stellglieder der Baugruppen Durchmesser- und Winkelverstellung (04), (05) an. Die kugelgelagerten Stellglieder greifen über Feingewindegetriebe auf die rota-

tionsentkoppelte Stößelbefestigung, die in Doppelspindellager geführt werden, zu. Die Entkopplung ermöglicht die Verstellung in jeder Betriebslage. Die Stößel wirken ähnlich wie bei System 1 auf die optischen Stellglieder und lenken diese in ihren Lagen aus. Ein besonderes Augenmerk bei der Konstruktion muss auf das Höhenspiel gelegt werden. Dies ist besonders bei der Lagerung der Stellglieder, dem Feingewindegetriebe und dem Doppelspindelkugellager zu beachten. Letzteres ist relativ einfach zu realisieren, da Spindelkugellager auf Wunsch werkseitig aufeinander angepasst zu beziehen sind. Bei Lagerung der Stellglieder in einem einfachen Vierpunktlager muss konstruktiv auf das Höhenspiel reagiert werden. Hier wurden Federbleche eingesetzt, welche die Kugel der Lager immer nur an einer Seite der Lagerschale abrollen lassen. Das Feingewindegetriebe kann eigentlich nur über fertigungstechnische Toleranzvorgaben abgefangen werden, jedoch wird an dieser Stelle noch die Möglichkeit der Materialkombination genutzt, um die Stellglieder im Gewindebereich zu schlitzen und dadurch ein leichtgängiges, vorgespanntes und quasi spielfreies Gewinde zu realisieren. Was außerdem noch zu Stellfehlern führt, ist die Dehnung der Zahnriemen unter Last. Daher ist beim gesamten System auf Leichtgängigkeit zu achten.

Die Zahnriemen bestehen aus Polyurethan und hochfesten Stahlcord - Zugträgern, die keine Nachdehnung zulassen, außerdem sind die Riemen vorgespannt, um jedes Spiel zu vermeiden [Mulc10]. Die Stößel werden zusätzlich in der Lagerfassung der optischen Stellglieder geführt und wirken damit präzise auf die Verstellung. Außerdem sind die Stößelbefestigungen mit Stiften versehen, die verhindern, dass sich diese durch die Reibung in den Lagern bei Rotation verstellen. Auch hier muss darauf geachtet werden, dass die Maßpaarung in einer Passung ausgeführt wird, um das Umkehrspiel zu minimieren. Die Endschalter im oberen Teil der Stellantriebe (06) werden von der Steuerung abgefragt und verhindern, dass die Stellglieder an den Anschlag fahren. Ein dritter Schalter kann als Referenzschalter genutzt werden und lässt sich in seiner Lage verstellen. So können bestimmte Parameterkombinationen problemlos auch ohne Messsystem wiedergefunden werden. Bei der mechanischen Ausführung wurde auch hier auf Spielfreiheit geachtet.

Obwohl bei der Werkstoffkombination auf die entsprechende Paarung geachtet wurde, kommt die Konstruktion nicht ohne Schmierung aus. Zum Einsatz kommt hier ein Schmierstoff, der sich einerseits bei hohen Drehzahlen nicht ablöst und andererseits die Leichtgängigkeit erhält. Diese Schmierstoffe sind Fette, die einen harnhaltigen Anteil besitzen. Mit dieser Maßnahme können die optischen Elemente vor Verschmutzung geschützt werden, ohne die Funktionsfähigkeit einzuschränken. Vorteile dieses Aufbaus sind die komfortable Einrichtung der Applikation sowie das Wiederfinden der Parameterkombination.

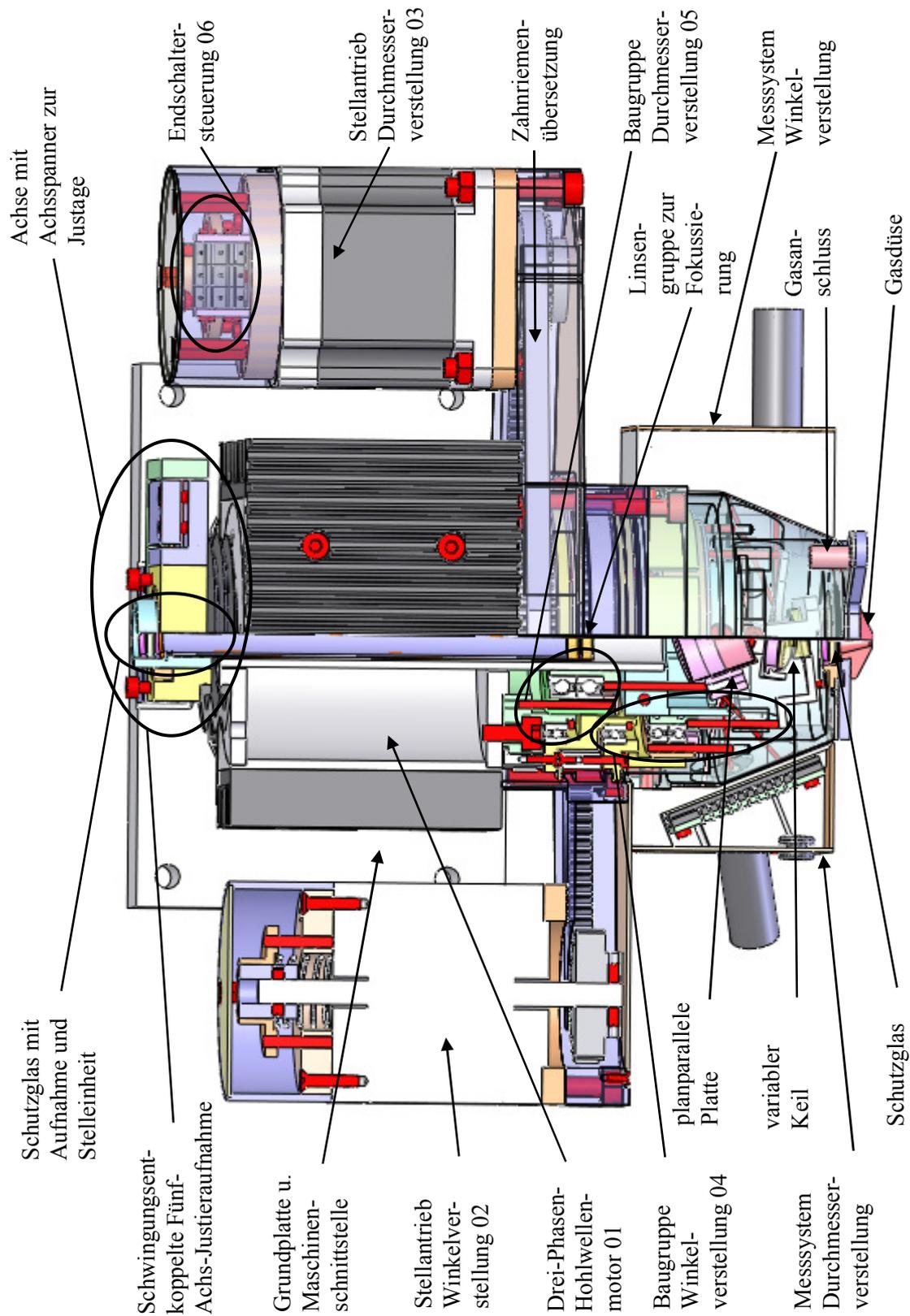


Abb. 4-3 Darstellung der automatisierten Bearbeitungsoptik mit Messsystem

In der Abbildung 4-4 ist die Leistungsfähigkeit des Systems bildlich demonstriert. Erzeugt wurde diese Darstellung, indem die Optik mit einer Drehzahl von 1.000 U/min rotierte und dabei die Stellelemente ausgelenkt wurden. Gezeigt ist hier eine Tiefengravur auf einem Edelstahlblech, wobei die Zustellung von außen zum „0“- Punkt und wieder zurück erfolgte. Das heißt, es wurde eine spiralförmige Doppelspur geschrieben, die nicht nur die Gleichförmigkeit der Bearbeitungsstruktur zeigt, sondern auch das Umkehrspiel beinhaltet. Eine gewisse Unsicherheit ist auch der Strahlquelle zuzuschreiben, da diese bei den Abmessungen eine erhebliche Auswirkung auf das Bearbeitungsergebnis hat. Der verwendete Laser wurde mit einem M^2 kleiner 2 vermessen.

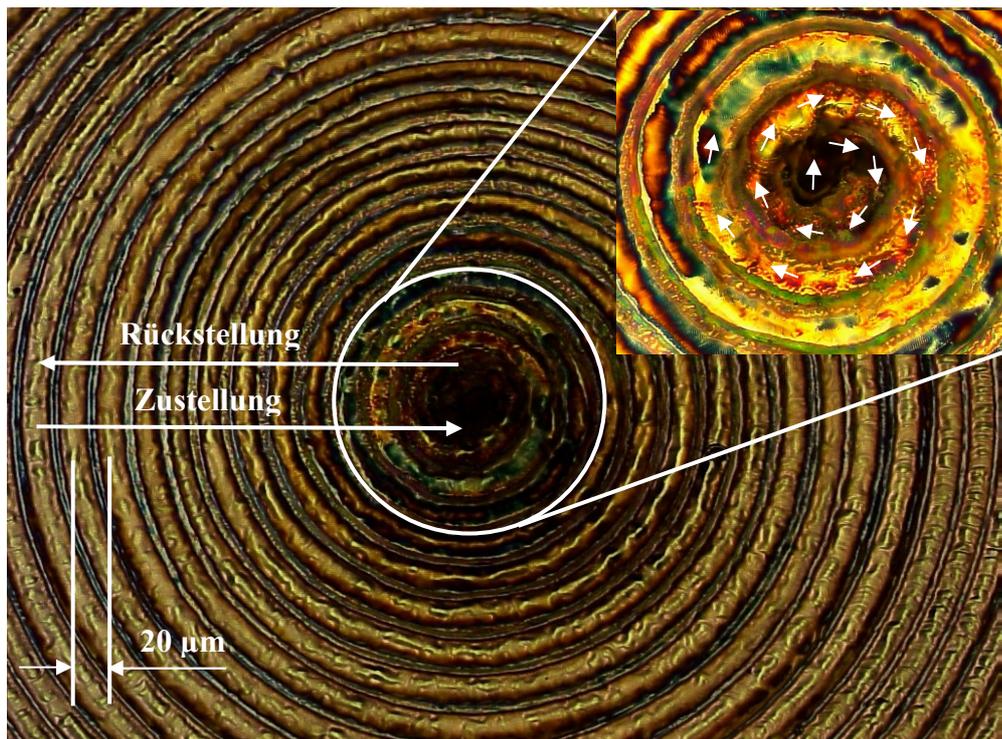


Abb. 4-4 Darstellung der Bearbeitungsgenauigkeit des Systems

4.3.1 Konstruktion und Aufbau des Messsystems

Trotz umfangreicher konstruktiver Maßnahmen lässt sich eine absolut spielfreie Konstruktion nur mit festen Komponenten erreichen. Dies wurde mit System 1 realisiert, obwohl auch die äußere Beeinflussung (in erster Linie die Temperatur) berücksichtigt werden muss, um eine Langzeitstabilität im Betrieb zu gewährleisten. Will man ein System mit variabler Parametereinstellung möglichst während der Bearbeitung nutzen, muss die Position der Stellelemente vermessen werden. Der Fehler, der in der vorgestellten Konstruktion am stärksten, abgesehen von den äußeren Bedingungen, ins Gewicht fällt, ist das Umkehrspiel. Bei diesem Fehler, wie auch dem Fehler durch äußere Beeinflussung, geht der Bezug zur Mikroschrittsteuerung der Stellglieder verloren und deshalb muss bei hoch präzisen Applikationen nachjustiert werden. In der Abbildung 4-5 ist das Messsystem als einzelne Baugruppe dargestellt.

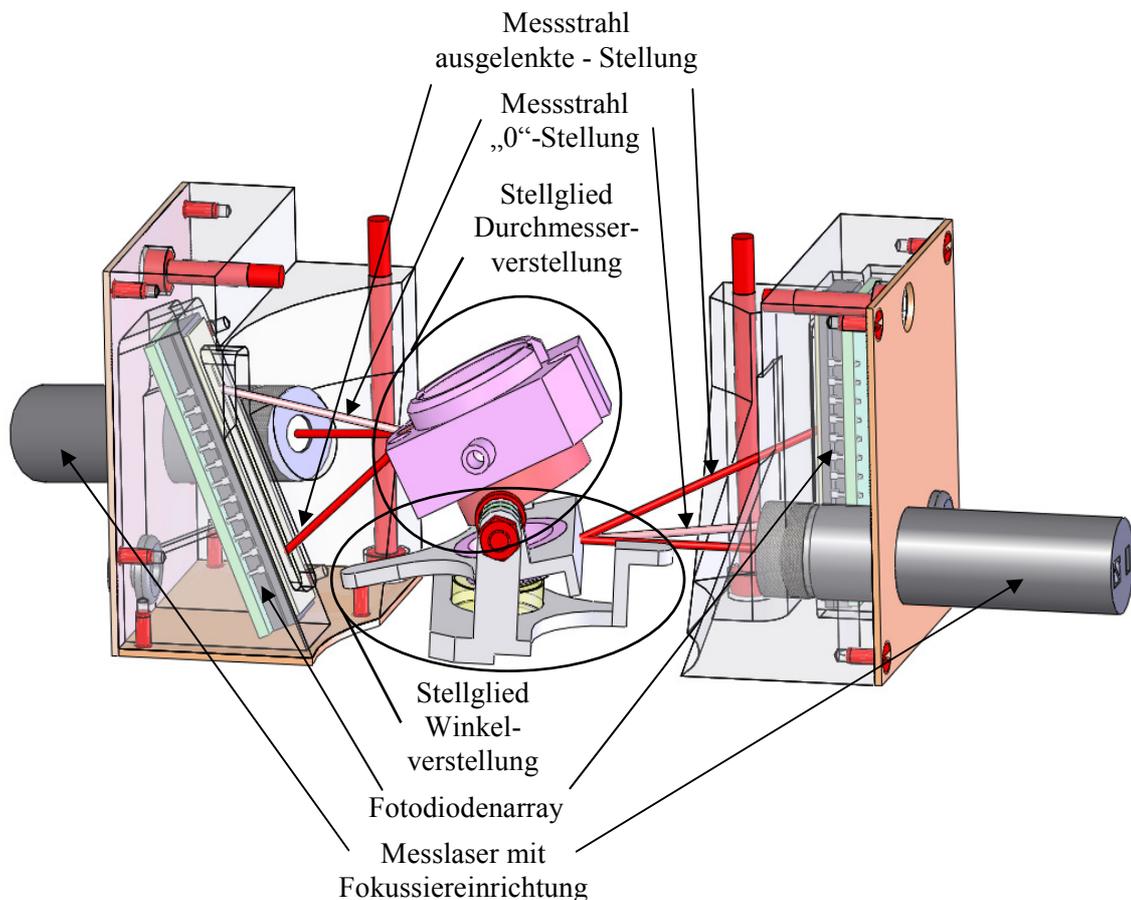


Abb. 4-5 Darstellung des Messsystems

Diese Einheit besteht aus zwei getrennten Systemen, die symmetrisch zueinander aufgebaut sind. Dabei trifft der Laserstrahl, pro Umdrehung einmal, auf das jeweilige Stellglied und wird von diesem auf ein Fotodiodenarray reflektiert. Hierbei verdoppelt sich die Winkelwegstrecke (Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel) auf Grund der Reflexion und erhöht damit die Genauigkeit der Auflösung. Je nach Stellung der Glieder wird der Sensor an einer anderen Stelle getroffen und dieser Wert registriert. Zur Erhöhung der Auflösung wird der Fokussierdurchmesser so eingestellt, dass mehrere Pixel gleichzeitig angesprochen werden. Diese werden ausgewertet und hieraus das arithmetische Mittel gebildet. Dies verdoppelt virtuell die Anzahl der Pixel und erhöht dadurch die Genauigkeit des Messsystems. Die Stellglieder der Winkelverstellung sind mechanisch gekoppelt, daher reicht es aus, wenn ihre Lage einseitig abgefragt wird. Mit dieser Art der Triangulationsmessung lässt sich die Lage der Stellglieder im Online-Betrieb kontrollieren und die ermittelten Werte zur Regelung nutzen. Außerdem kann auf diese Weise auf äußere Beeinflussung, wie z.B. Temperaturerhöhung, reagiert werden. In der Abbildung 4-6 ist die Messgenauigkeit des Messsystems dargestellt. Zur Berechnung der Wertereihe planparallele Platte wurden die geometrischen Gegebenheiten sowie die Gleichung (3-1) aus Kapitel 3 in Betracht gezogen und über die Pixelposition des Fotodiodenarrays (siehe Abbildung 4-5 links) aufgetragen. Je nach geometrischem Verlauf des Strahls

ändert sich die Auflösung entsprechend. Analog hierzu wird bei der Berechnung der Wertereihe variabler Keil verfahren. Grundlage zur Berechnung bilden hierzu die geometrischen Gegebenheiten (siehe Abbildung 4-5, rechts) sowie die Gleichung (3-2) aus Kapitel 3. Durch die mechanische Kopplung der beiden Linsenfassungen und der Messung einer einzelnen Seite entstehen bei der Wertereihe annähernd lineare Verhältnisse. Die Auflösungsleistung fällt hier schlechter aus, da die Anzahl der Pixel pro Verstelleinheit entsprechend geringer gerät. Die resultierende Wertereihe stellt die Aufaddierung von Reihe planparallele Platte und Reihe variabler Keil dar und beschreibt die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems. Erhöhen lässt sich die Auflösungsgenauigkeit durch Änderung der geometrischen Gegebenheiten und / oder durch die Verwendung von Fotodiodenarrays mit kleinerem Pixelabstand und höherer Pixelanzahl pro Strecke. Diese Lösung ist der Kompaktheit und Integrationsfähigkeit des Gesamtsystems geschuldet.

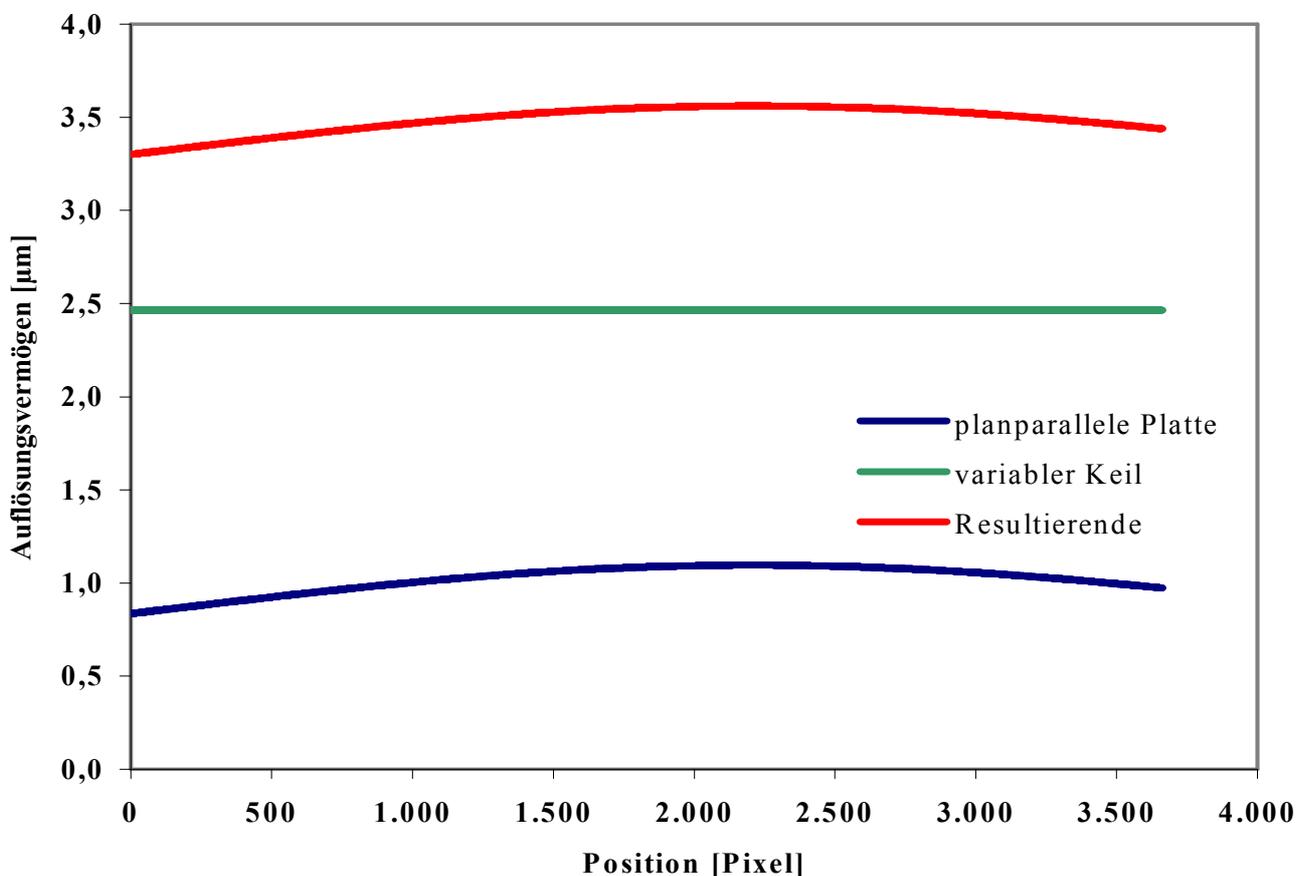


Abb. 4-6 Auflösungsvermögen des Messsystems, ungünstiger Fall

4.3.2 Technische Daten System 2

Obwohl bei der automatisierten Bearbeitungsoptik die gleiche Antriebseinheit Verwendung findet wie bei der manuellen Bearbeitungsoptik, muss die Drehzahl auf 10.000 U / min begrenzt werden. Die Ursache hierfür liegt hauptsächlich in der Verwendung der großen Doppelspindelkugellager, die zur Rotationsentkopplung und Verstellung des variablen Keils genutzt werden. Die Grenzdrehzahl liegt laut Herstellerangaben [Rodr09] bei 10.000 U / min. Das Messsystem ist optional verwendbar und lässt sich je nach Bedarf integrieren. Die Steue-

ung muss dann entsprechend angepasst werden, da ohne Messung keine Regelung möglich ist. Die optischen Komponenten werden hiervon nicht beeinflusst und sind bei beiden Ausführungen äquivalent. In der Tabelle 4-4 sind die wesentlichen technischen Daten der automatisierten Bearbeitungsoptik mit und ohne Messsystem gegenübergestellt. Alle Werte wie Wiederholgenauigkeit, Anfahrgeschwindigkeit, sowie steuer- und regelbar ändern sich auf Grund ihrer Unabhängigkeit nicht.

System 2		
Parameter	ohne Messsystem	mit Messsystem
Drehzahl [U / min]	1.000 - 10.000	1.000 - 10.000
Optik [Ø in °]	½	½
freie Apertur [mm]	10	10
empfohlener Strahldurchmesser [mm]	< 5	< 5
Wiederholgenauigkeit [µm]	< 10	< 3,5
Anfahrge- schwindigkeit [s]	< 1	< 1,5
steuerbar [1] regelbar [2]	1	2
elektrischer. Anschluss [V] / [VA]	230 / 425	230 / 425
geometrische Abmaße H x B x T [mm]	200 x 245 x 120	200 x 245 x 120

Tabelle 4-4 Technische Daten der automatisierten Bearbeitungsoptik

4.4 Ansteuerung der Systeme

In der Abbildung 4-7 ist das Steuerungskonzept von System 1 und 2 dargestellt. Auch hier wurde der modulare Aufbau weiter geführt. Baugruppen, die sich innerhalb der strichpunkt- tierten Linie befinden, dienen dem Betrieb von System 1 ohne Verwendung einer CNC - Steuerung.

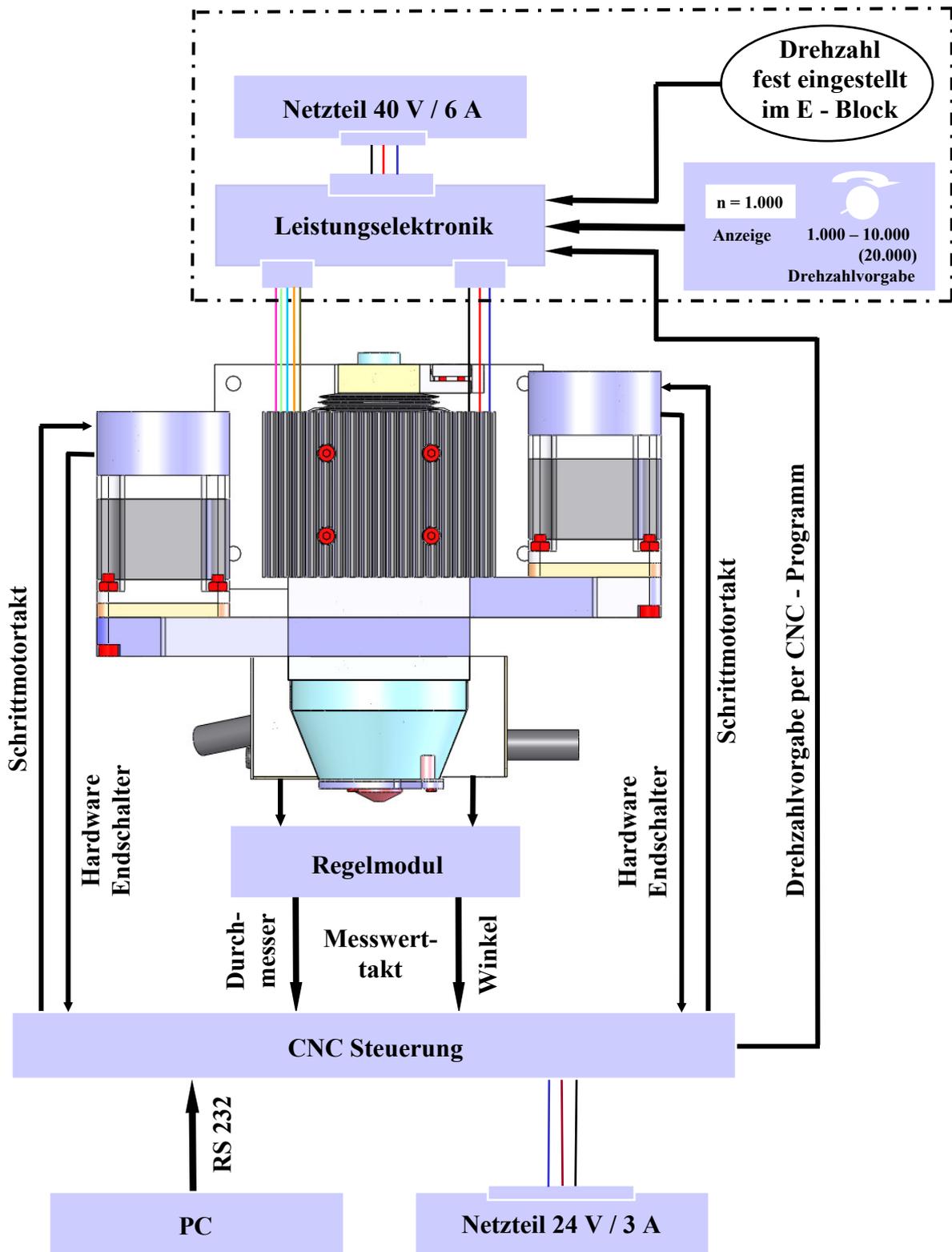


Abb. 4-7 Steuerungskonzept der Systeme

Dazu kann bei der Vorgabe der Drehzahl zwischen einer fest eingestellten oder einer variablen Drehzahl gewählt werden. Wird System 1 im Zusammenhang mit einer CNC - Steuerung betrieben, kann die Drehzahl über diese programmiert und angesteuert werden. Wird System 2 (ohne Messsystem) mit der Steuerung betrieben, können alle Optionen aus System 1 weiter genutzt werden. Zusätzlich ist es jedoch notwendig, für die Steuerung der Stellglieder zu sorgen, die entweder über die CNC - Steuerung oder über einen PC zu realisieren ist. Hier werden dann auch die Endlagenschalter abgefragt. In der letzten Ausbaustufe System 2 (mit Messsystem) kommt noch ein zusätzliches Regelmodul zum Einsatz, welches die Messwerte abfragt, auswertet und die entsprechenden Signale an die CNC - Steuerung bzw. an den PC zur Steuerung der Stellglieder weiter gibt. Mit diesem modularen Konzept kann individuell auf die unterschiedlichen Ansprüche reagiert werden.

5 Applikation

In diesem Abschnitt wird die Leistungsfähigkeit der in Kapitel drei und vier beschriebenen Bearbeitungsoptiken anhand von Verfahrensuntersuchungen dargestellt. Schwerpunkte dieser Untersuchungen sind das Einbringen von Mikrobohrungen in spröden Materialien sowie die Bearbeitung von transparenten Werkstoffen. Hierzu werden Bearbeitungsstrategien beschrieben und unter Darstellung von Applikationsergebnissen erläutert, die mit den auf dem Markt befindlichen Systemen nicht realisierbar sind. Die Werkstoffeigenschaften der Materialien lassen eine andere Art der Bearbeitung nur sehr schwer oder gar nicht zu. Bei den transparenten Werkstoffen wurden unter anderem Aspektverhältnisse von 1:40 bei präzisiertem zylindrischen Bohrverlauf mit einem Durchmesser von 1 mm erreicht. In spröden keramischen Werkstoffen konnten Bohrgeometrien mit Aspektverhältnissen von über 1:10 bei Einhaltung der Toleranzen von einem Prozent in Form und Geometrie realisiert werden.

5.1 Versuchsbeschreibung

Aufgrund der geometrischen Abmessungen sowie dem Gewicht der Bearbeitungsoptik kann das System wie eine konventionelle Bearbeitungsoptik, bzw. wie ein herkömmliches Scanner-system verwendet werden. Zur Durchführung der Applikationsuntersuchungen wurde das System an den unterschiedlichsten Arbeitsstationen der LMTB sowie in Bearbeitungsmaschinen von Industriepartnern getestet. Hierfür spricht die einfache und intuitive Handhabung des Systems sowie die unabhängige Wahl der Parametereinstellungen. In diesem Zusammenhang war es möglich, unterschiedlichste Lasersysteme mit der Optik zu verbinden und somit einen großen Anwendungsberich zu überspannen. In der Abbildung 5-1 ist eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zu sehen, bei der die Bearbeitungsoptik an einer konventionellen CNC - Maschine befestigt ist.

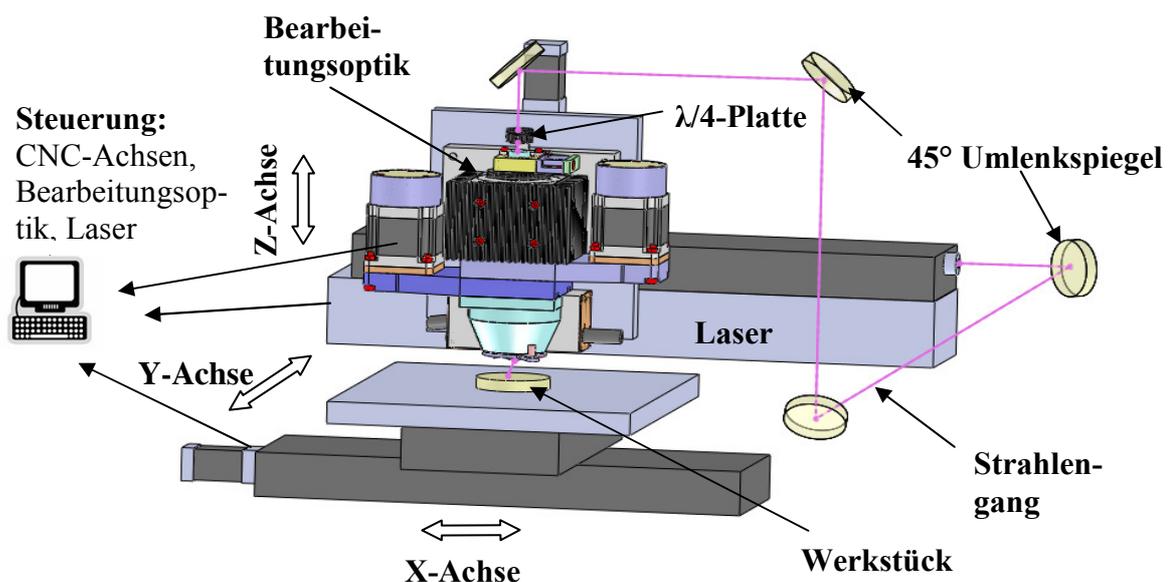


Abb. 5-1 Schematische Darstellung der Versuchsanordnung

Die Strahleinkopplung wird über Umlenkspiegel bewerkstelligt, die je nach Stand des Lasers an die Situation angepasst werden können. Wesentlich hierbei ist, dass der Strahl zentrisch und lotrecht in die Optik einfällt. Die $\lambda / 4$ -Platte dient zur Gewährleistung einer zirkular polarisierten Strahlung auf dem Werkstück, da viele Umlenkspiegel polarisationsabhängig sind und somit die Gefahr einer undefinierten Strahlung bergen. Diese Problematik wird in diesem Kapitel noch eingehend diskutiert.

Die im Einsatz befindlichen Lasersysteme zeigen das zur Verfügung stehende Spektrum in der modernen Mikromaterialbearbeitung und sind unter der Tabelle 5-1 zusammengestellt. Hierunter befinden sich Kurzpulspikosekunden - Systeme im Infrarotbereich bei $\lambda = 1.064$ nm und frequenzverdoppeltem Grün bei $\lambda = 532$ nm sowie Nanosekunden-Systeme mit entsprechenden Wellenlängen und der Umstellmöglichkeit auf $\lambda = 355$ nm. Ebenso war es möglich, Untersuchungen mit einem Faserlasersystem zu realisieren, das in der Industrie auf Grund seines preislichen Vorteils weitere Applikationsfelder eröffnet. Alle Systeme lassen sich vom PC aus ansprechen und sichern dadurch eine komfortable Bedienung.

Parameter	Hersteller / Typ				
	Azura custom-built	IB Laser custom-built	IPG YLP Serie	Lumera Super Rapid	Rofin E20 SHG
Wellenlänge [nm]	532 / 355	1.064 / 532	1.060 - 1.070	1.064 / 532	532
max. Leistung [W]	5	40 / 18	20	9 / 6	14
Pulsdauer	35 ns	24 ns / 15 ns	100 ns	10 ps / 7 ps	15 ns
Repetitions - Rate [kHz]	1 - 100	10 - 100	20 - 50	10 - 640	10 - 200
max. Pulsenergie [μ J]	1.000	1.800	1.000	250 / 200	560
Strahlqualität M^2	< 1,3	< 1,8	< 2	< 1,3	< 1,8
Polarisation	linear	linear	random	linear	linear

Tabelle 5 - 1 Lasersysteme zur Applikationsuntersuchung

5.2 Systemtechnik

Eines der wesentlichsten Bestandteile des Gesamtsystems ist neben der Bearbeitungsoptik der verwendete Laser. Um Bearbeitungen höchster Qualität ausführen zu können, muss der im Laser erzeugte Strahl den Anforderungen genügen. Festkörpersysteme mit hoher Strahlbrillanz werden heute meist mit Longitudinal - Dioden gepumpt, wobei das Pumplicht oft über Lichtleitfasern zum aktiven Medium geführt wird. Das Pumplicht ist auf die Absorptionsban-

de des Kristalls abgestimmt und verhindert damit unnötige Wärmebildung. Hierbei spielt das Temperaturmanagement des Kristalls eine zentrale Rolle. Heizt sich dieser durch das Pumpen zu stark und womöglich asymmetrisch auf, kommt es zu einer deformierten thermischen Linse, bei der sich die Randstrahlen anders verhalten als die Mittenstrahlen. Solche Strahlen zeichnen sich durch eine schlechte Strahlqualität aus, es sei denn, man setzt resonatorintern eine Modenblende ein, welche dazu geeignet ist, nur den brillanten Teil des Strahls zu nutzen. Nachteil dieser Methode ist jedoch der hohe Leistungsverlust. Eleganter ist es, die Absorption des Pumplichts so zu steuern, dass sich der Kristall homogen erwärmt und sich ohne thermischen Stress an die jeweilige Pumpenergie anpassen kann. Systeme mit guter Strahlqualität werden meist als Resonator - Verstärker - Systeme aufgebaut, wobei der Resonator für die Erzeugung des Strahls mit hoher Brillanz und der nachgeschaltete Verstärker für die Anhebung der Leistung ohne Brillanzverschlechterung zuständig ist. In der Abbildung 5-2 ist die Strahlqualitätsmessung des Lumera Super Rapid bei 10 kHz und einer mittleren Leistung von drei Watt im Grünen dargestellt. Zur Vermessung wurde der Varianzdurchmesser gewählt, der 95,4 Prozent des Strahls umschließt und zur Grundlage der in der Tabelle 3-2 berechneten Werte dient (industriell übliche Angaben im 86,5 Prozent - Durchmesser). Die Messung wurde mit einem aus dem Ferdinand - Braun - Institut kommenden Profile Viewer durchgeführt.

Hierzu wird der Laserstrahl hinter einem 45° - Umlenkspiegel auf eine handelsübliche Kamera mit Hilfe eines optischen Systems abgebildet. In einzelnen Schritten wird dabei die Taille durchfahren und je ein Bild aufgenommen. Die ausgelesenen Pixel werden mit Hilfe der Software vermessen und als Wert abgelegt. Anschließend wird eine Parabel berechnet, die als Fit durch die gemessenen Werte gelegt wird. Hieraus lässt sich der Tailenradius sowie - anhand der Steigung - der Winkel bestimmen.

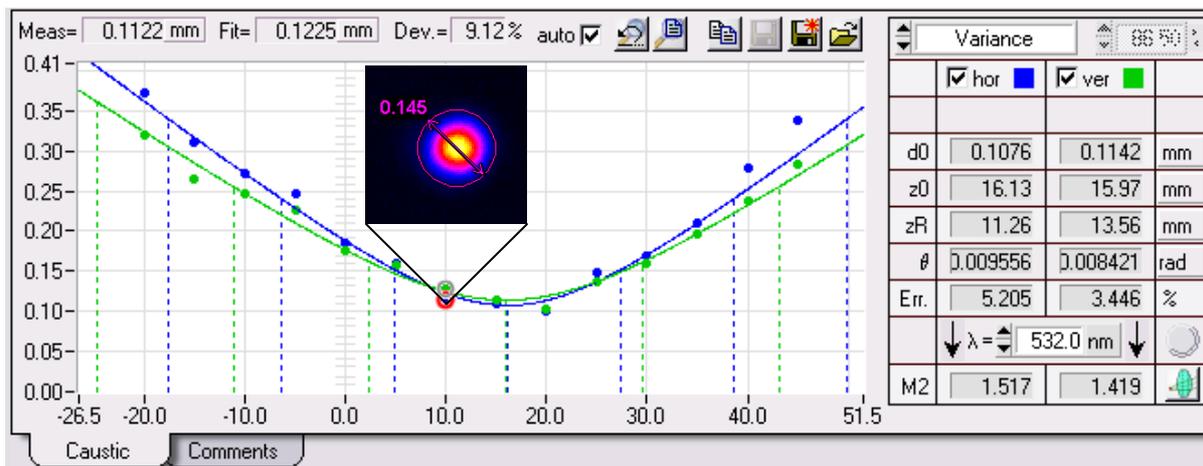


Abb. 5-2 Strahlqualitätsmessung am Lumera Super Rapid

Mit der Formel (2-5) erhält man das SPP und aus der Formel (2-6) den M^2 - Wert, was hier für horizontale und vertikale Richtung getrennt ausgewiesen ist. Die beiden Parabeln in zueinander senkrechter Richtung zeigen im Bereich des Fokus eine sehr gute Übereinstimmung, was auf eine gute Rundheit des Strahls schließen lässt. Unterstützt wird dies durch die Messbildaufnahme, die selbst außerhalb des Fokus einen kreisrunden Strahl darstellt.

Bei Faserlasern lässt sich die Strahlqualität über die numerische Apertur (NA) der Faser bestimmen. Die Rundheit des Strahls ist hier systembedingt gegeben, da die Strahlung in der Faser erzeugt wird, und der Faserkern durch Vielfachreflexion immer voll ausgefüllt ist.

Auf dem Markt befindliche Lasersysteme mit einer Strahlqualität von M^2 kleiner 2 weisen meist ein ausreichend rundes Strahlprofil auf, um mit der hier vorgestellten Optik präzise runde Bohrungen auszuführen. Weicht das Strahlprofil jedoch durch Dejustierung stark von der Rundheit ab, zeigen sich auch in der Applikation unrunde Bohrungen, da das Strahlprofil bei diesem System nicht mitgedreht wird.

Vom Lizenznehmer 3D MICROMAC ist seit 2011 eine Maschine mit vollkeramischer Drei - Achs - CNC unter dem Namen microDRILL ns 1064 auf dem Markt. Zur Anwendung kommt als Bearbeitungsoptik je nach Aufgabenstellung die manuelle oder die voll automatisierte Variante. Auf die Wahl des Lasers kann ebenso flexibel je nach Kundenwunsch und Aufgabenstellung reagiert werden.



Abb. 5-3 System microDrill der Firma 3D MICROMAC

5.3 Transparente Werkstoffe

Umgangssprachlich zählen zu den transparenten Werkstoffen alle Materialien, die für das menschliche Auge durchsichtig, bzw. durchscheinend sind. Hierzu zählen auch Kunststoffe wie Acryl oder Plexiglas sowie Materialien mit aufgerauter oder matter Oberfläche. Bei der Bearbeitung transparenter Werkstoffe mit Laser liegt der Schwerpunkt bei Werkstoffen mit hinreichend optischer Qualität (klar durchscheinend) sowie glatten Oberflächen. Die gängigsten hierunter sind Floatglas als Fensterglas, BK 7, Quarz oder B 270 als optisches Glas sowie Saphir für optische Spezialanwendungen.

Glas ist ein Sammelbegriff für eine Vielzahl von Stoffen mit sehr unterschiedlichen Zusammensetzungen, die sich im glasartigen Zustand befinden und sowohl künstlich als auch natürlich vorkommen. Glas ähnelt strukturell einer Flüssigkeit, deren Zähigkeit bei normalen Umgebungstemperaturen so hoch ist, dass sie als fester Körper wahrgenommen wird. Im engeren Sinne sind mit Glas anorganische Verbindungen gemeint, die diese Eigenschaften aufweisen. Allgemein besitzen Silizium -, Bor -, Germanium -, Phosphor - und Arsen - Oxide die Fähigkeit zur Glasbildung. Lässt man diese Stoffe nach dem Schmelzen erkalten, so erstarren sie hauptsächlich ohne Kristallisation, so dass Gläser entstehen.

Aus physikalischer Sicht sind Gläser gegenüber einem Kristall gleicher Zusammensetzung instabil. Aus dem alltäglichen Umgang ist bekannt, dass Glas bei schnellem Temperaturwechsel von heiß nach kalt schnell zu Bruch gehen kann. Hierzu tragen mehrere Eigenschaften bei: die schlechte Wärmeleitfähigkeit, die hohe Wärmeausdehnung sowie die begrenzte Zugfestigkeit. Beim Abschrecken des Glases entsteht ein Temperaturgradient zwischen der äußeren kalten Schicht, die ihr Volumen zu verringern sucht und dem inneren heißen Kern, der sich ausdehnt. Wird die Zugfestigkeitsgrenze überschritten, breitet sich der Bruch mit großer Geschwindigkeit nach innen aus.

Schnelles Aufheizen ist dagegen weniger gefährlich, weil in diesem Fall die Außenschicht unter Druckspannung gerät und die Druckfestigkeit der Gläser mindestens das Zehnfache der Zugfestigkeit beträgt. Um verbesserte Eigenschaften zu erhalten, können Gläser veredelt werden. Hierzu zählen das thermische oder physikalische Härten sowie das chemische Härten. Beim thermischen Härten wird das Glas aufgeheizt, um im Nachgang von außen definiert gekühlt zu werden. Durch diesen Prozess kühlt sich das Glasinnere langsamer ab als die Außenseiten und zieht sich noch zusammen, wenn die Oberfläche schon erstarrt ist. Hierdurch entsteht in der Oberflächenschicht eine Druckvorspannung und im Innern eine Zugvorspannung. Eingestellt werden diese über die jeweilige Prozesstemperatur. Die erzeugte Druckvorspannung ist etwa dreimal höher als die normale Biegebeanspruchung und um so höher, je dicker das Glas ist. Die Methode des chemischen Vorspannens beruht auf Ionenaustausch. Die Ionen der einzelnen chemischen Elemente haben verschiedene Radien und sind in unterschiedlichen Abständen zueinander angeordnet. Wird das Glas in einer geeigneten Schmelze aufgeheizt, können die größeren Ionen aus der Schmelze Plätze mit den in der Glasoberfläche befindlichen kleineren Ionen tauschen. Hierdurch entsteht eine Art Platzmangel, der letztlich die Druckspannung erzeugt. Bei einer Austauschzone von 0,1 mm lässt sich eine Festigkeitssteigerung auf das Fünf - bis Sechsfachen erreichen [Pfae86].

Beurteilen kann man die Vorspannung mit Hilfe gekreuzter Polarisatoren, die diese sichtbar werden lassen. Zur nachträglichen Bearbeitung eignen sich veredelte Gläser nicht, da eine punktuelle Schwächung der Oberfläche zum Zusammenbruch der Vorspannung führt, Form und Geometrie müssen vor diesem Prozess eingebracht werden. In der Tabelle 5-2 sind die Eigenschaften verschiedener Werkstoffe zusammengestellt. Die ersten beiden Werkstoffe sind durch ihre optische Transparenz gekennzeichnet, ihre Härte ist im Vergleich zum Stahl sehr hoch und ihre Wärmeleitfähigkeit entsprechend klein, ebenso ist die Druckfestigkeit um Faktoren höher. Bei der Bearbeitung mit Festkörperlasern geeigneter Wellenlänge (hierzu in Kapitel 5.3.1) wird die Strahlungsenergie lokal, nahe der Oberfläche, eingebracht und sorgt für einen Temperaturgradienten, der die Druckspannung übersteigt. Dies bringt einen Defekt hervor, der sich im Herausbrechen kleiner Materialstücke äußert. Der unter 2.2.2 beschriebene Bearbeitungsprozess ist auch hier weiterhin gültig, jedoch wird die Effizienz durch den Materialabtrag von Partikeln bestimmt. Anders als bei schmelzbildenden Werkstoffen bestimmen Druckfestigkeit, Härte und Wärmeleitfähigkeit die Bearbeitbarkeit von Gläsern mit Festkörperlasern.

Parameter	Werkstoff			
	Floatglas	Quarzglas	Aluminium-Nitrid	Stahl St 37
Dichte ρ [kg / m ³]	2,5	2,2	3,31	7,9
Brechungsindex n (588 nm)	1,52	1,45	2,16	-
Druckfestigkeit σ_D [N / mm ²]	700 - 900	1.150	> 2.000	225
Biegezugfestigkeit σ_B [N / mm ²]	30	67	> 30	283
Elastizitätsmodul E [N / mm ²]	$7,0 \cdot 10^4$	$7,0 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^5$
Härte nach Vickers HV [kN / mm ²]	$4,93 \pm 0,34$	5,5 - 6,5	17 - 23	0,10
Wärmeleitfähigkeit k [W / (m K) ⁻¹]	0,8	1,4	180 ± 10	47 - 58
Ausdehnungskoeffizient α (20 - 300°C)[K ⁻¹]	$9,0 \cdot 10^{-6}$	$0,58 \cdot 10^{-6}$	$3,6 - 5,6 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$

Tabelle 5-2 Vergleich der Werkstoffeigenschaften

5.3.1 Einfluss der Wellenlänge

Betrachtet man die Transmissionskurve von Gläsern allgemein, wie sie in der Abbildung 5-4 dargestellt ist, würde man die Bearbeitung von Gläsern eher den CO₂ - Lasern bei einer Wellenlänge von $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ überlassen. Bei dieser Wellenlänge wird die Strahlungsenergie des Lasers voll absorbiert und kann dadurch zur Bearbeitung beitragen. Jedoch führt diese Bearbeitungsart beim Fortschreiten in die Tiefe des Materials oft zur starken Überhitzung in der Bearbeitungszone, welche durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Glases das Werkstück zum Brechen bringt. Festkörperlaser bei einer Wellenlänge von $\lambda = 355 \text{ nm}$, bzw. $\lambda = 266 \text{ nm}$ lassen sich zwar für die Bearbeitung nutzen und im Prozess besser kontrollieren, bieten jedoch aufgrund ihrer erhöhten Absorption nicht die Möglichkeit der rückseitigen Bearbeitung. Die Kantenqualität lässt sich durch den absprengenden Materialabtrag, wie er unter 5.3 beschrieben ist, mit der Wellenlänge nicht beeinflussen. Bei Festkörperlasern mit einer Wellenlänge von $\lambda = 1.064 \text{ nm}$ ist im Prinzip die Bearbeitung von der Rückseite aus möglich, jedoch trägt auch hier die Strahlung zum starken Aufheizen des Glases bei. Hierdurch ist der Prozess schwer kontrollierbar und nicht für alle Gläser möglich, das wiederum die Anlagentechnik erschwert.

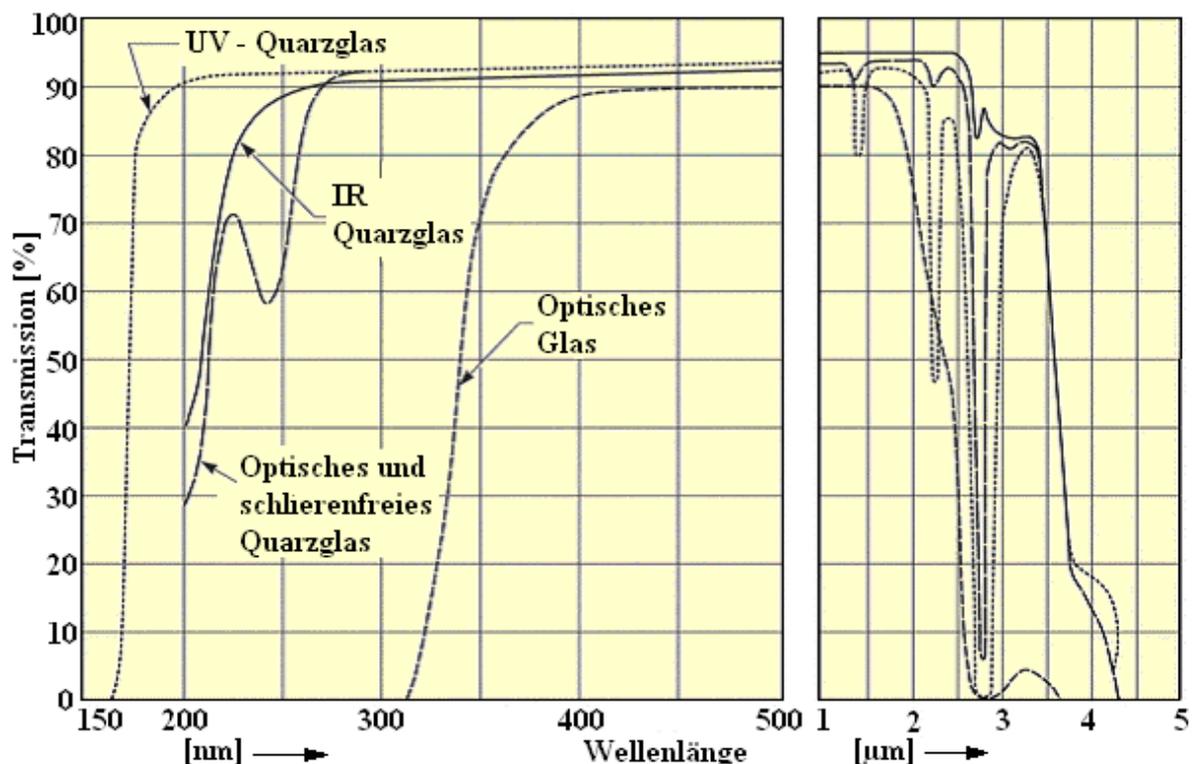


Abb. 5-4 Transmissionskurven transparenter Werkstoffe [Newp09]

Die besten Ergebnisse werden mit einem Festkörperlaser der Wellenlänge $\lambda = 532 \text{ nm}$ erreicht. Hier lässt sich die Energie punktgenau sowohl auf der Vorderseite wie auch auf der Rückseite einbringen. Die hohe Transmission des Glases bei dieser Wellenlänge lässt nur eine begrenzte Aufheizung zu. Bearbeitbar sind alle gängigen Glassorten sowie glaskeramische Werkstoffe, z.B. Zerodur. Anlagentechnisch weist diese Wellenlänge eine Reihe von Vortei-

len gegenüber UV - Systemen auf. Der Laser selbst arbeitet im stabilen Bereich. Er dekrementiert nicht durch die harte UV - Strahlung, ebenso entfällt die UV - Stufe, und die Wartungsintervalle verlängern sich, was insgesamt preisliche Vorteile hat. Beim Aufbau der Bearbeitungsoptik lassen sich faktisch alle optischen Werkstoffe verwenden, was sich in der Qualität des Fokus und im größeren Parameterraum widerspiegelt.

In der Tabelle 5-3 sind die unterschiedlichen Wellenlängen mit ihren möglichen Bearbeitungsrichtungen dargestellt: je weiter die Wellenlänge in Richtung Infrarot wandert, desto höher ist die Abtragsschwelle. Die höchste Effizienz erreicht man mit der rückseitigen Bearbeitung bei $\lambda = 532 \text{ nm}$, jedoch ist dies bei Mikrobohrungen mit Pikosekunden nicht immer möglich, da hier der Abtransport des Abtragsguts aus der rückseitigen Schnittfuge nur sehr schwer zu bewerkstelligen ist (Kapitel 5.3.5). Hier lassen sich mit der richtigen Strategie auch mit der vorderseitigen Bearbeitung gute Ergebnisse erzielen.

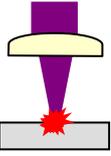
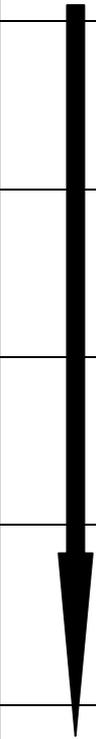
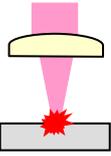
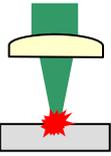
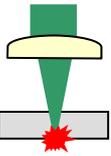
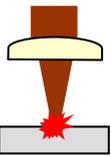
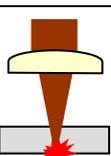
Darstellung	Bearbeitungsrichtung	Wellenlänge [nm]	Abtragsschwelle	Beschreibung
	↓	266		vorderseitige Bearbeitung mit geringer Effizienz
	↓	355		vorderseitige Bearbeitung mit geringer Effizienz
	↓	532		vorderseitige Bearbeitung mit präziser Einkopplung
	↑	532		rückseitige Bearbeitung mit hoher Effizienz und präziser Bearbeitung
	↓	1.064		vorderseitige Bearbeitung mit erhöhtem Kontrollaufwand eingeschränkt anwendbar
	↑	1.064		rückseitige Bearbeitung mit erhöhtem Kontrollaufwand eingeschränkt anwendbar

Tabelle 5-3 Wellenlängenvergleich und möglich Bearbeitungsrichtungen

5.3.2 Bearbeitungsstrategie und Wirkungsweise

Klassisch werden bei der Lasermaterialbearbeitung die Werkstücke von der Vorderseite bearbeitet, hierbei wirkt der unter 2.2.2 beschriebene Prozess. Glas zeigt durch seine besonderen Materialeigenschaften gegenüber Materialien mit großem Schmelzanteil ein anderes Verhalten, welches unter 5.3 besprochen wurde. Bestimmt ist der Abtrag in erster Linie vom Einbringen des Temperaturgradienten und dem daraus resultierenden Ausbrechen von Materialpartikeln. Bei der Bearbeitung von der Vorderseite wird die Energie nahe der Oberfläche in das Werkstück eingebracht und sorgt dadurch über den beschriebenen Mechanismus für einen Abtrag in Richtung des Werkstückinnern. Hierbei werden die Abtragsprodukte (Partikelgasgemisch) nach oben geschleudert und aus der Bearbeitungszone entfernt. Aufgrund der hohen Transparenz des Glases entsteht in der Bearbeitungszone wenig Wärme und die Mikrorisse sind eher durch die Bruchstücke bestimmt.

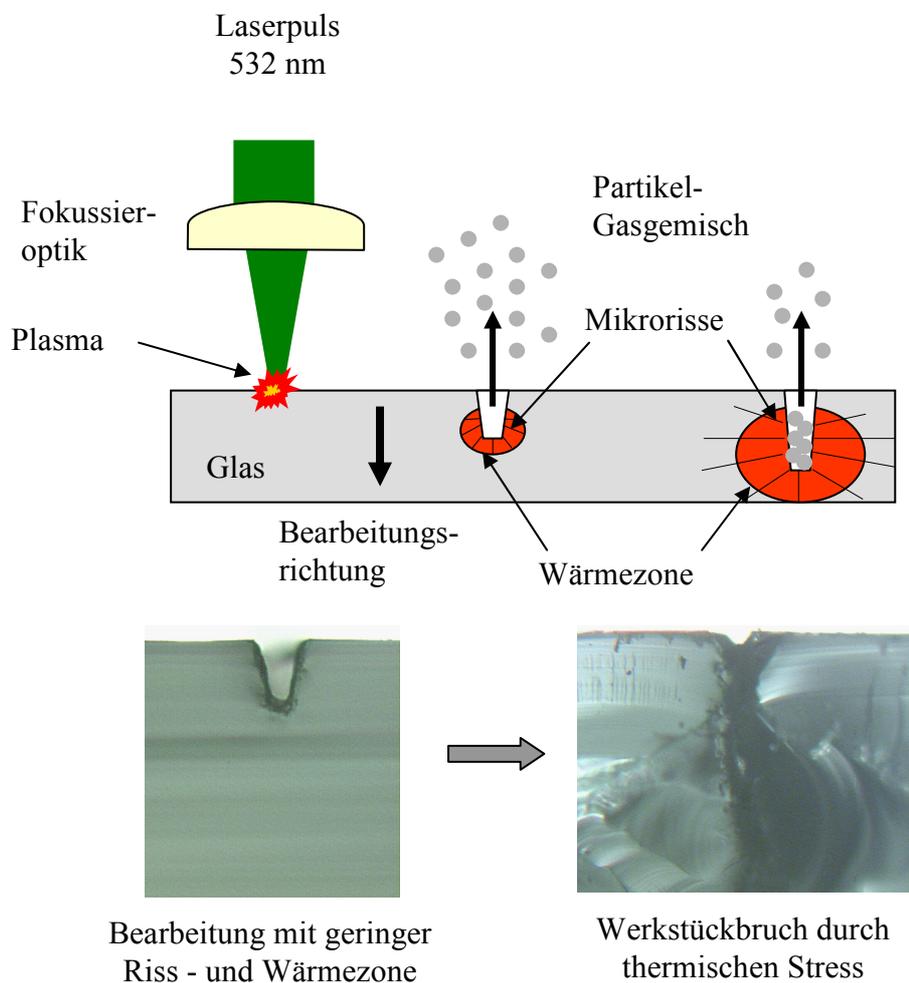


Abb. 5-5 Vorderseitige Bearbeitung von transparenten Werkstoffen

Wird der Prozess weiter in das Werkstückinnere fortgesetzt, können sich die Bruchstücke nicht mehr so einfach aus dem engen Bearbeitungsspalt befreien und bleiben aufgrund ihrer Größe und ihrer Scharfkantigkeit im Bearbeitungsspalt hängen (siehe Abbildung 5-7). Der Abtrag erfolgt jetzt nur noch durch Sublimation, die Energiezufuhr des Laserstrahls wird im-

mer mehr durch die Abschattung an der Eintrittsseite der Bearbeitung sowie der Abschirmung am Plasma bestimmt und im weiten Bereich um die Bearbeitungszone in Wärme umgesetzt. Abgetragenes Material wird wieder aufgeschmolzen und verhindert um so mehr den Transport des Abtragsgutes. In der Folge heizt sich das Glas an der Bearbeitungsstelle immer mehr auf, bis die Druckspannung des zu bearbeitenden Glases überschritten wird, und das Glas bricht. Eine Möglichkeit, weiter in die Tiefe des Werkstücks vorzudringen, liegt in der Verbreiterung der Spurbreite, dies lässt sich durch mehrmaliges Überfahren mit leichtem Versatz erreichen. Durch die größere Öffnung auf der Eintrittsseite sowie dem größeren Bearbeitungsspalt wird eine Steigerung der Bearbeitungstiefe möglich. Jedoch ist auch dieser Prozess begrenzt, da früher oder später wieder die gleiche Situation entsteht wie oben beschrieben.

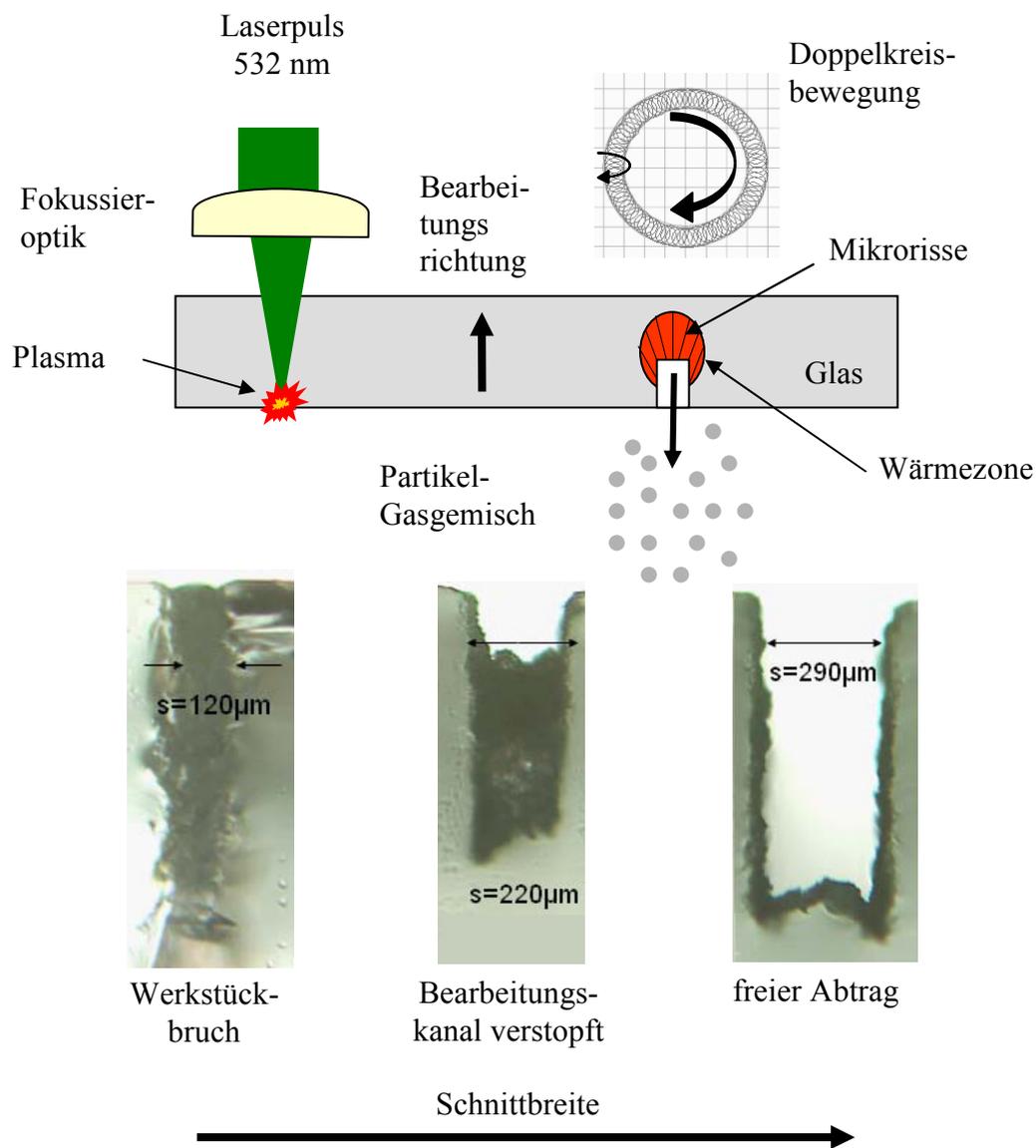


Abb. 5 - 6 Rückseitige Bearbeitung von transparenten Werkstoffen

Die hier vorgestellte Bearbeitungsoptik lässt eine vorder- wie auch eine rückseitige Bearbeitung mit eingestellter Schnittbreite zu. Dazu rotiert die Optik mit einem Strahlversatz um die eigene Achse, wobei sich das Werkstück mit Hilfe eines CNC - Kreuztischs unter dieser hinweg bewegt. Die Z - Achse bestimmt mit ihrer Helixfahrt die Bearbeitungstiefe. Hiermit las-

sen sich wie bei Fräsarbeiten beliebige Konturen in das Material einbringen. Dies trifft um so mehr bei der Bearbeitung von der Rückseite zu, da auch hier, anders als bei der vorderseitigen Bearbeitung, zylindrische, bzw. 90° - Wände entstehen, siehe Abbildung 5-6. Das heißt, die hier eingebrachte Laserenergie wirkt punktgenau an der Stelle, in die sie eingebracht wird, Abschattung durch eintrittsseitige Bearbeitungskanten oder Plasmaabschirmung treten nicht auf. Außerdem wird die Mikrorissbildung in Richtung Werkstückinneres durch die Rayleighlänge des Strahls begünstigt. Hierdurch lässt sich je nach Glas eine fünf - bis zehnmal höhere Abtragsrate als bei der vorderseitigen Bearbeitung erreichen. Ist die Schnittbreite größer als $300\ \mu\text{m}$ gewählt, fällt das Abtragsgut bei Glasdicken kleiner $3\ \text{mm}$ von selbst aus der Fuge. Bei größeren Bohrtiefen lässt sich dies mit Unterstützung von Pressluft ausblasen. Mit diesem Verfahren lassen sich je nach Fokussierlinse nahezu beliebig tiefe Bohrungen bei Durchmessern von ca. $1\ \text{mm}$ herstellen. Nachteilig bei diesem Verfahren ist die begrenzte Schnittfuge. Wird diese kleiner $200\ \mu\text{m}$ gewählt, lässt sich das Abtragsgut bei tieferen Bohrungen nicht mehr aus der Schnittfuge entfernen, und es kommt zu dem weiter oben beschriebenen Werkstückbruch. Beeinflussen lässt sich die Größe des Abtragsguts über die Pulsdauer des Lasers, die bei den hier vorgestellten Untersuchungen im Bereich von $15 - 35\ \text{ns}$ liegen. Unter 5.3.5 wird der Einfluss der Pulsdauer nochmals gesondert diskutiert und auf die Bearbeitung von Mikrobohrungen in Glas eingegangen.

In der Abbildung 5-7 ist das Abtragsgut, typisch für eine rückseitige Nanosekunden-Bearbeitung, anhand einer Rasterelektronenmikroskopaufnahme zu sehen. Form und Ausdehnung der Partikel variieren zwischen 10 bis $150\ \mu\text{m}$. Ihre scharfkantigen Formen bestätigen ebenso die Theorie des Ausbrechens oder des Abplatzens sowie die Größenvielfalt, da bei einem solchen Prozess auch immer kleinere Stücke mitgerissen werden. Etwas kurios sind die Glasfäden, die sich in einigen wenigen Applikationen zeigten. Dies lässt darauf schließen, dass sehr feiner Glasstaub durch die eingebrachte Energie wieder aufgeschmolzen und dieser durch den Materialabtrag nach außen befördert wurde.

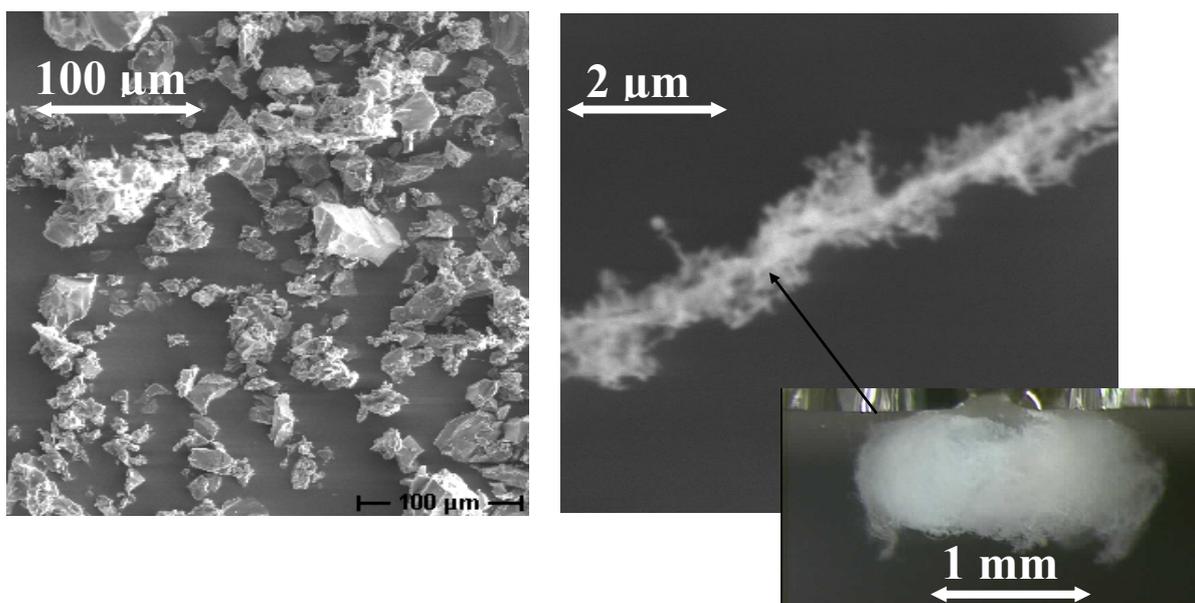


Abb. 5-7 Abtragsgut einer Nanosekunden-Bearbeitung

5.3.3 Abtragspur und Kantenqualität

Mit der Steuerung der Rotationsgeschwindigkeit der Bearbeitungsoptik ist man in der Lage, die Pulse gleichmäßig auf der Bearbeitungsspur zu verteilen. Heutige Laser sind hochrepetierende Systeme, die ihre volle mittlere Leistung bei maximaler Pulsrate erreichen. Darunter leidet die Pulsenergie, die ihr Maximum meist in der Nähe der minimalen Pulsrate findet. Zur Bearbeitung von Glas ist jedoch nicht die mittlere Leistung, sondern die Leistung pro Puls [Pr] für das Erreichen der Abtragungsschwelle, die im Glas bei ca. $100 \text{ J} / \text{cm}^2$ liegt, maßgeblich. Die Verteilung der Pulse spiegelt sich direkt in der Kantenqualität der Bearbeitungsspur wieder, die in der Abbildung 5-8 dargestellt ist. Bei ungleicher Verteilung der Pulse brechen im weiteren Verlauf der Bearbeitung durch die weitere Schwächung des Materials schlagartig größere Stücke aus, als bei gleichmäßiger Bearbeitung. Diese Stücke reißen dann besonders in der nahen Oberfläche Material aus dem Kantenbereich und hinterlassen eine ausgemuschelte Kantenstruktur. Bei gleichmäßiger Verteilung tritt dieses Erscheinungsbild nicht so stark hervor, die Bruchstücke sind kleiner und dadurch der Kanteneffekt geringer.

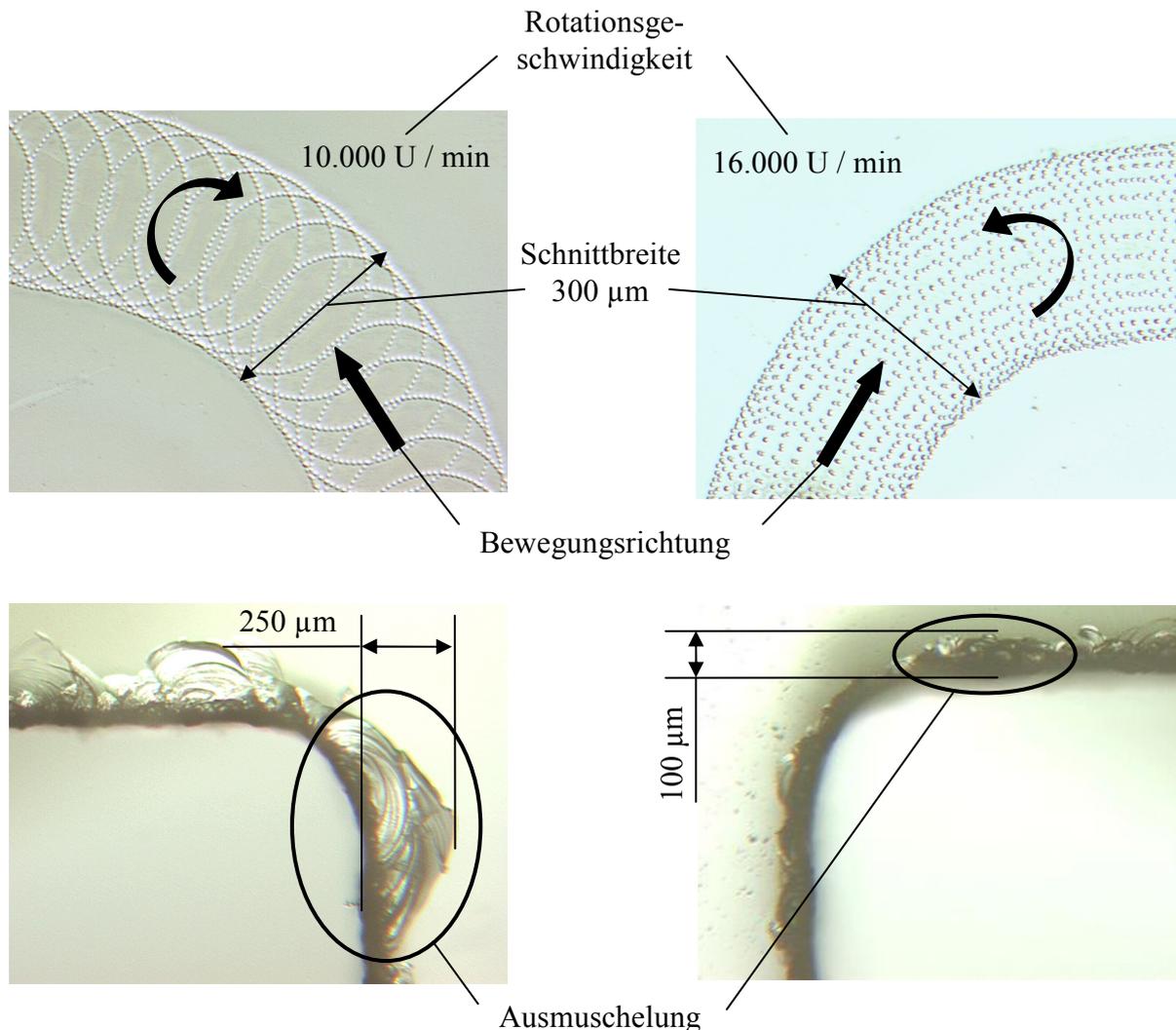


Abb. 5-8 Einfluss der Bearbeitungsspur

Im weiteren Verlauf der Bearbeitung spielt dieser Effekt nur noch eine untergeordnete Rolle. Durch die ausreichende Schnittbreite bricht das Material nur noch nach innen (in Richtung Schnittfuge) heraus, da hier die aufzuwendende Druckspannung leichter zu überwinden ist, als wenn Material aus der massiven Wand ausgebrochen werden muss. Die Bearbeitungsgeschwindigkeit ist bei gleichmäßiger Verteilung höher als bei ungleichmäßiger. Hier sind die Materialstücke zwar kleiner, jedoch wird mit jedem Puls ein Stück Material gelöst, wobei es bei ungleichmäßiger Bearbeitung vieler Pulse bedarf, bis ein großes Stück Material ausgearbeitet ist. Eine effiziente Bearbeitung im Glas wird mit der rückseitigen Methode bei Rotationsdrehzahlen der Bearbeitungsoptik von 15.000 bis 20.000 U / min erreicht, in seltenen Fällen sind auch Drehzahlen über 20.000 U / min sinnvoll.

5.3.4 Puls - zu Puls - Verteilung

Die Puls - zu Puls - Verteilung bestimmt den lokalen Eintrag der Strahlungsenergie in das Werkstück. Als Näherung für den Überlappungsgrad \ddot{U} zwischen zwei einzelnen Laserpulsen kann der Abstand zweier aufeinander folgender Pulse, bezogen auf den Pulsdurchmesser d_f , angenommen werden. In der Abbildung 5-9 ist die Puls - zu Puls - Überlappung dargestellt. Nach der Gleichung (5-1) bedeutet ein Pulsüberlapp von 100 Prozent einen vollständige Überlapp zweier Pulse. Bei einem Abstand zwischen den Pulsen von mehr als dem Durchmesser eines einzelnen Pulses werden die Ergebnisse der Formel negativ. Hierbei stellen f_{rep} die Repetitionsrate des Lasers, n_d die Drehzahl, $2\omega_0$ den Fokussdurchmesser und s_b die Schnittbreite dar [Bimb91]. Die Schnittbreite ergibt sich durch die Bewegung des Werkstücks und ist gleich des Rotationsdurchmessers.

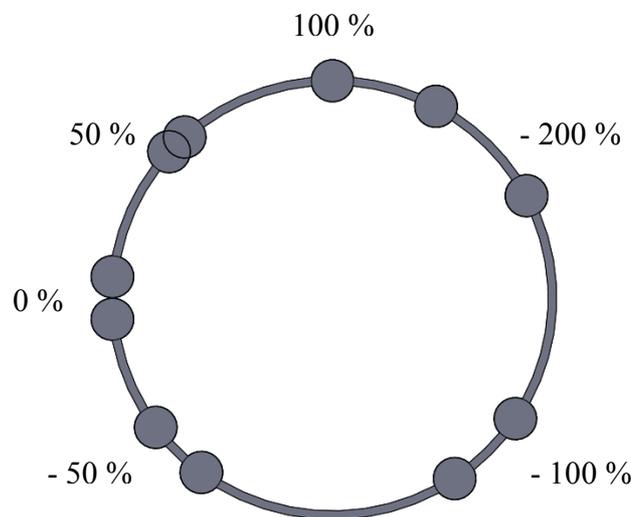


Abb. 5-9 Puls- zu Puls- Überlapp in graphischer Darstellung [Bimb91]

$$\ddot{U}[\%] = \left[1 - \left(\frac{n_d \cdot \pi \cdot s_b}{2\omega_0 \cdot f_{rep}} \right) \right] 100\% \quad (5-1)$$

Bei der Bearbeitung wirkt die eingebrachte Energie nicht nur in der Ebene, sondern durch die Rayleighlänge auch ins Volumen. In der Abbildung 5-10 ist der eingestellte Überlapp in Abhängigkeit der Steigungen über die Zeit aufgetragen. Bei großem Pulsabstand ist die lokal eingebrachte Energie gut deponiert und kann nach dem beschriebenen Prozess zum Abtrag beitragen. Rücken die Pulse jedoch immer näher zusammen, wird die lokale Belastung immer größer und das thermische Ungleichgewicht nimmt zu, bis es bei einem Überlapp von knapp über 40% zu Spannungsrissen im Werkstück kommt. Größere Abstände unterhalb - 50%; bis 60 Prozent bieten keinen Vorteil in der Bearbeitungsqualität, hierzu tragen eher die unter 5.3.3 beschriebenen Effekte bei. Durch Erhöhung der Steigung lässt sich die Effizienz der Bearbeitung nur begrenzt steigern, hier tritt ein ähnlicher Effekt, wie unter 5.3.3 beschrieben, bei schlechter Pulsverteilung über die Abtragsspur auf. Dieser äußert sich jedoch hier nicht durch eine schlechte Kantenqualität, sondern macht sich hauptsächlich in der Bearbeitungszeit bemerkbar. Wird die Steigung zu groß gewählt, wird der Prozess instabil, was an der oszillierenden Darstellung der Helixfahrt bei 67 μm zu erkennen ist. Insgesamt ist der Puls - zu Puls - Überlapp jedoch als unkritisch zu bewerten.

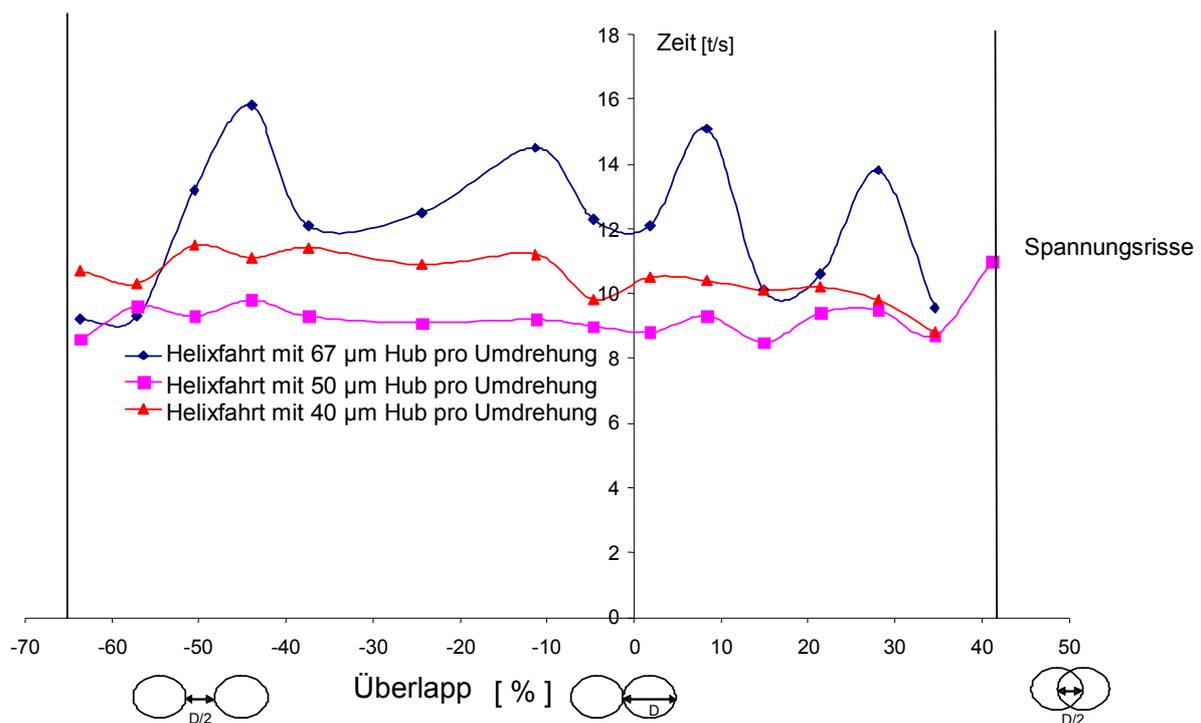


Abb. 5-10 Puls- zu Puls- Überlapp in Kombination mit Helixfahrt

5.3.5 Pulsdauereinfluss

Zur Herstellung von Bohrungen, die kleiner als die oben beschriebene Schnittbreite von 300 μm sind, ist eine gänzlich andere Bearbeitungsstrategie notwendig, die in der Abbildung 5-11 dargestellt ist. Hier wird der Fokuspunkt des Lasers in die Mitte der Bohrung gesetzt und während der Bearbeitung über eine Spiralbahn kontinuierlich nach außen bis zum Tangieren des Außendurchmessers geführt. Hier angelangt, beginnt der zweite Bewegungsschritt zurück

zur Mitte. Dies führt dazu, dass das Material von innen nach außen aus dem Bohrkanal geräumt wird und trotz der beengten Geometrie kleine Bohrungen entstehen können. Aufgrund der kleinen Durchmesser, die in manchen Fällen gerade das Doppelte des Fokusdurchmessers besitzen, ist eine rückseitige Bearbeitung schwer kontrollierbar. Solche Bearbeitungen werden von der Vorderseite durchgeführt. Um eine zylindrische Bohrung zu erhalten, muss, wie unter 3.3 beschrieben, der Laserstrahl gegenüber seiner Ausrichtung angestellt werden. Mit der hier beschriebenen Bearbeitungsoptik lässt sich die Winkelverstellung unabhängig von der Durchmesserstellung einstellen, wobei zur Herstellung von zylindrischen Strukturen die Winkeleinstellung nur einmal vorgenommen werden muss und die Durchmesserstellung sich oszillierend im Bearbeitungsfeld bewegt. Zur besseren Kontrolle wird die Z - Achsenverschiebung nicht über eine Helixfahrt, sondern schrittweise nachgeführt.

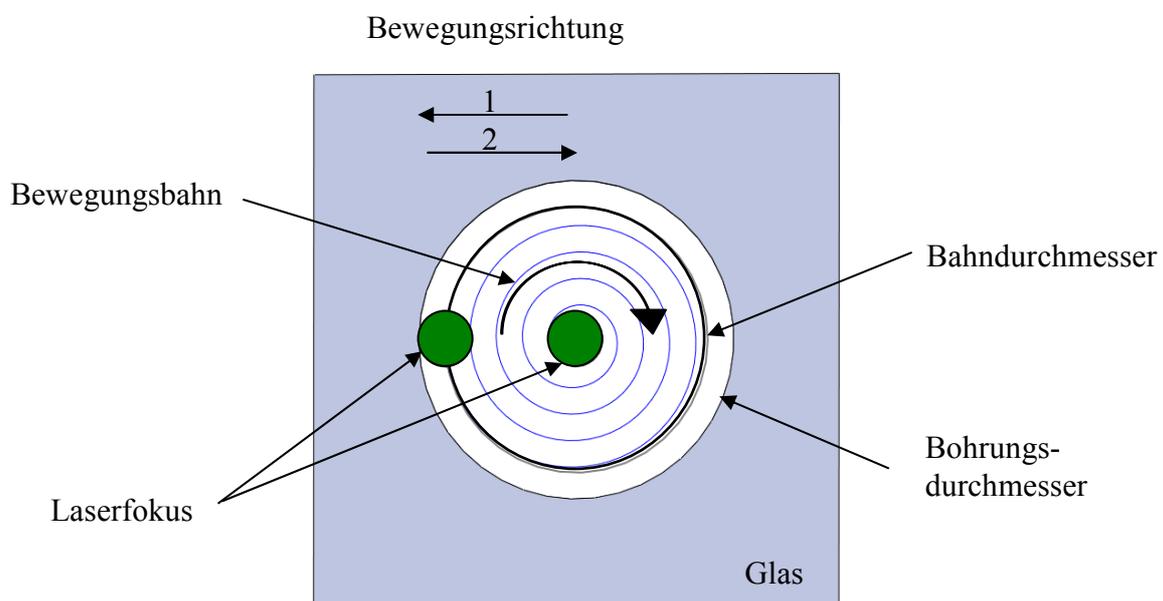


Abb. 5-11 Bearbeitungsstrategie zum Herstellen kleiner Bohrungen

In der Abbildung 5-12 werden zwei sehr ähnliche Bearbeitungen anhand der oben beschriebenen Strategie mit zwei unterschiedlichen Lasersystemen durchgeführt. Im Unterschied zu der bisher gezeigten Bearbeitung, weist die Kantenqualität auf der Eintrittseite bei beiden Systemen eine gute Qualität auf. Dies ist das Ergebnis der Bearbeitungsstrategie, die dafür sorgt, dass das Bohrloch von innen heraus ausgeräumt wird. Hierdurch platzt Material erst in der Bohrlochmitte ab und macht Platz für die weitere Bearbeitung, die sich dann Stück für Stück an den eigentlichen Durchmesser herantastet. Dort angekommen, wird dieser nur tangiert, bevor die Bewegung in die umgekehrte Richtung fortgesetzt wird. Bei diesem kurzweiligen Verbleiben an der Bohrkante hat das Material die Chance, angeschmolzen zu werden und sich zu glätten. Dies erklärt die deutlich bessere Kantenqualität.

Im Vergleich von Piko - zu Nanosekundenlaser lässt sich beim Pikosekundensystem nochmals ein Qualitätssprung erkennen. Dies ist auf den erhöhten Verdampfungsanteil bei der Bearbeitung zurückzuführen, der bei diesen Systemen erreicht wird. Der Materialabtrag ist hier durch deutlich kleinere Bruchstücke gekennzeichnet. Diese Annahme bestätigt sich dann

nochmals auf der Austrittsseite. Die Nanosekundenbearbeitung ist gekennzeichnet von Ausbrüchen, die kurz vor dem Austreten des Lasers Stücke in üblicher Weise aus dem Material ausplatzen lässt. Außerdem sind Spannungsringe zu erkennen, die auf hohe Kräfte im Bohrkanaal schließen lassen. Erklären lässt sich dies durch das hohe Aspektverhältnis von 1:10. Hier wird schnell klar, dass es Bruchstücke aus dem unteren Teil der Bohrung schwer haben, das Bohrloch zu verlassen. Außerdem ist die Bohrwand angeschmolzen, so dass Materialstücke auch an ihr verkleben können. Anders bei der Pikosekundenanwendung: durch den hohen Verdampfungsanteil können die kleineren Materialstücke leichter aus dem Bohrkanaal heraus transportiert werden und beeinflussen den Gesamtprozess nicht so stark. In der Abbildung 5-12 ganz rechts ist anhand einer seitlichen Aufnahme durch das Glas der zylindrische Verlauf der Bohrung zu sehen.

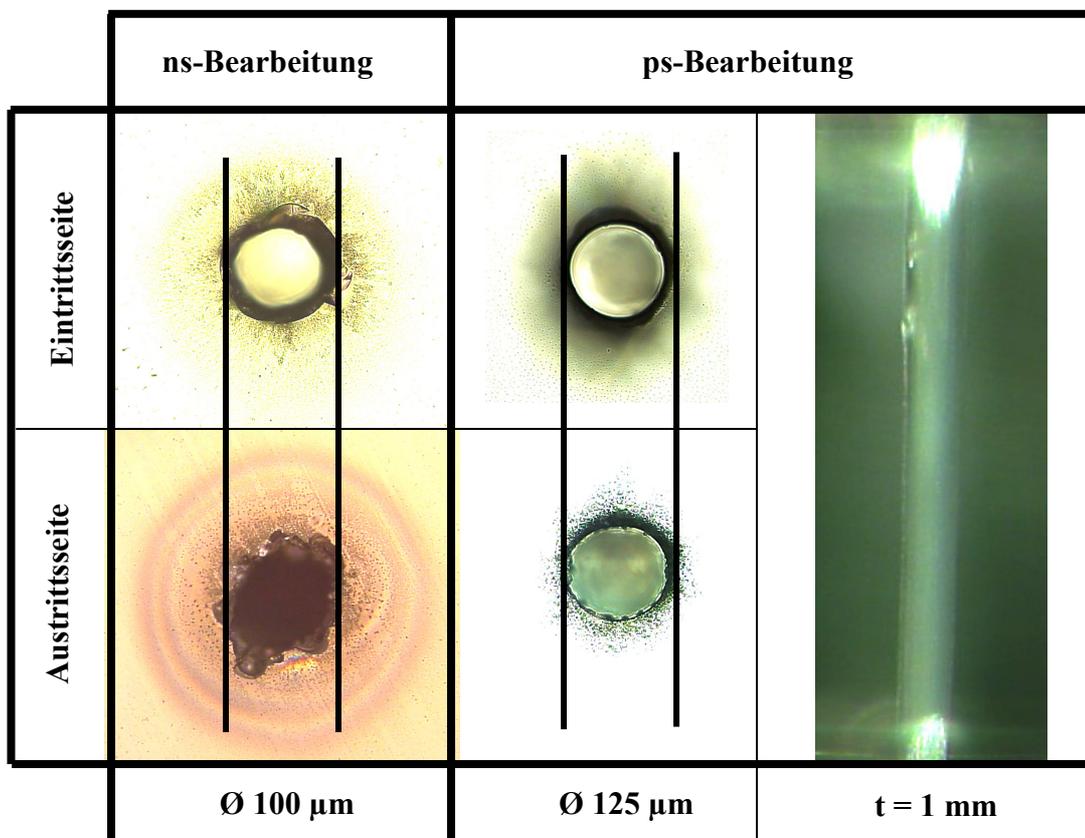


Abb. 5-12 Pulsdauereinfluss beim Bohren von kleinen Durchmessern

In der Abbildung 5-13 ist das Abtragsgut einer Pikosekunden-Bearbeitung in einer Rasterelektronenmikroskopaufnahme zu sehen. Im Vergleich zu der in der Abbildung 5-7 gezeigten Aufnahme nach einer Nanosekunden - Bearbeitung unterscheiden sich Form und Größe grundlegend. Sind nach Nanosekunden- Bearbeitung deutlich Bruchstücke zu erkennen, zeigt der Abtrag hier bis auf wenige Ausnahmen eher verrundete Kanten und sehr kleine Stücke, bei denen die größten etwa im Bereich der kleinsten der Nanosekunden-Bearbeitung liegen. Dies stützt die oben beschriebene Annahme, dass das Abtragsgut mit dem verdampften Anteil aus der Bearbeitungsebene abtransportiert und in dieser Zeit durch die hohe Temperatur angeschmolzen wird. Die in der Abbildung 5-13 gezeigte Aufnahme entstand durch die Abnahme

des Abtragsgut (Debris) mit Hilfe eines Leit-Tabs (leitfähige Klebefolie zur Präparation von pulverigem Probenmaterial am REM) über einer Bohrung. Dadurch ist natürlich ein Teil verrutscht, so dass Form und Größe der Bohrung so nicht wiedergegeben werden können.

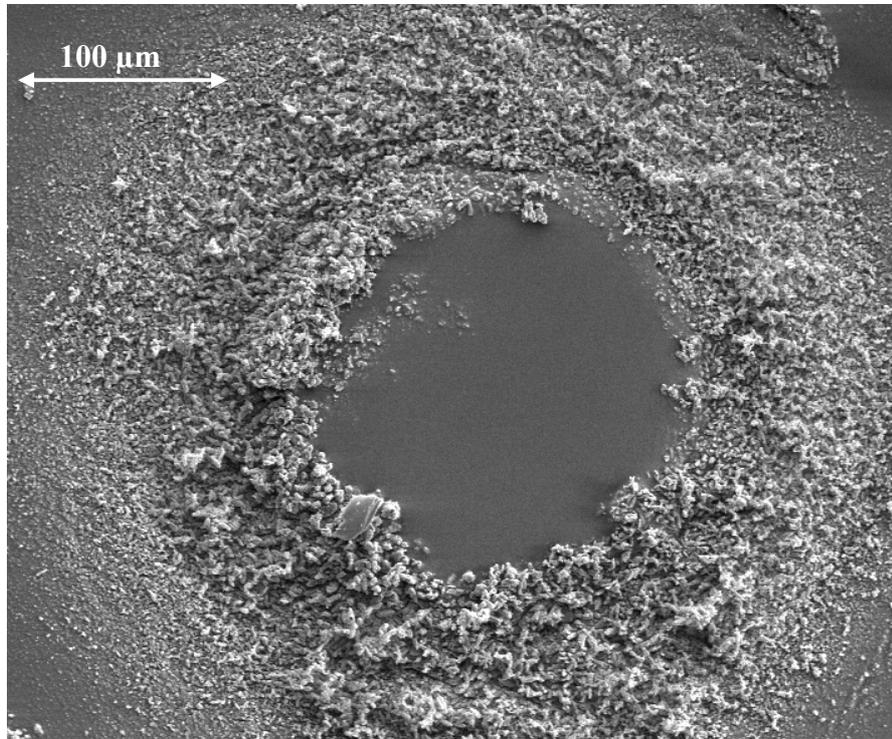


Abb. 5-13 Abtragsgut (Debris) einer Pikosekunden - Bearbeitung

5.4 Keramische Werkstoffe

Etwa 18 Prozent des Gesamtmarkts für Keramik fallen in den Bereich Hochleistungskeramik für technische Anwendungen. Solche keramischen Werkstoffe und Produkte werden unter dem Sammelbegriff „Technische Keramik“ zusammengefasst. Diese technischen Keramiken sind im Hinblick auf die geforderten Eigenschaften optimiert. Je nach Zusammensetzung und Aufbereitung der verwendeten Rohmaterialien sowie ihrer Formgebung und auch der Art des Brennens können die Eigenschaften der jeweiligen Erzeugnisse dem beabsichtigten Verwendungszweck in hohem Maße angepasst werden. Sie werden entsprechend ihrer mineralogischen, beziehungsweise chemischen Zusammensetzung gegliedert, die in der Abbildung 5-14 dargestellt ist [Ance11].

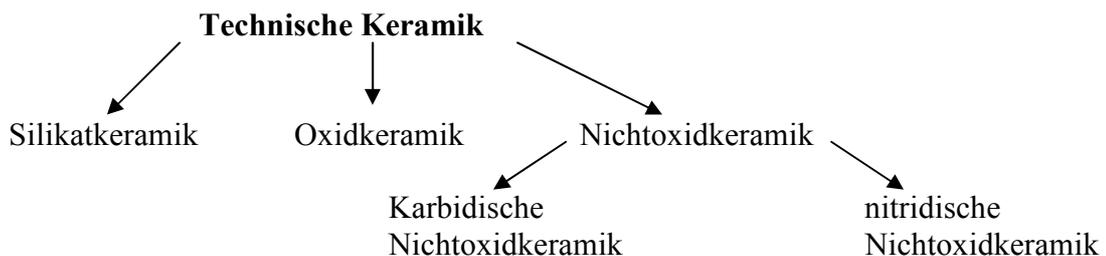


Abb. 5-14 Werkstoffgruppen der technischen Keramik

Bis auf die Gruppe der Nichtoxidkeramik soll hier nicht weiter auf die einzelnen Werkstoffgruppen eingegangen werden, da diese keine Bestandteile der weiteren Applikationen darstellen. Zu den Nichtoxidkeramiken gehören keramische Werkstoffe, zum Beispiel aus Verbindungen von Silizium und Aluminium mit Stickstoff oder Kohlenstoff. Generell weisen Nichtoxidkeramiken einen hohen Anteil an kovalenten Bindungen auf, die ihnen auch bei hohen Einsatztemperaturen sehr gute mechanische Eigenschaften verleihen. Alle Rohstoffe dieser Keramiken werden synthetisch hergestellt. Werkstoffe dieser Keramikgruppe sind beispielsweise: Siliziumcarbid, Siliziumnitrid, Aluminiumnitrid, Borcarbid, Bornitrid.

Die Herstellung lässt sich in drei Stadien unterteilen: Pulverherstellung und - Aufbereitung, Formgebung und Sintern. In der ersten Herstellungsphase werden die Ausgangsmaterialien zerkleinert und gemahlen, um in der zweiten Phase (zum Beispiel durch Pressen) in die gewünschte Form gebracht zu werden. Beim Pressen wird das Pulver bei Raumtemperatur stark verdichtet und ergibt den so genannten Grünling, der sich in diesem Stadium noch kostengünstig bearbeiten lässt, da die Endhärte erst in der letzten Phase durch das Sintern erreicht wird. Der Sintervorgang findet bei ca. Zweidrittel bis Dreiviertel der absoluten Schmelztemperatur und bei hohen Drücken statt. Durch die hohe Temperatur bilden sich zwischen den einzelnen Teilchen so genannte Sinterbrücken. Durch den hohen Druck werden die Poren zwischen den Körnern zum Großteil eliminiert. Die Abbildung 5-15 zeigt das typische Bruchgefüge einer Aluminiumnitridkeramik. Deutlich sind die einzelnen Körner und die dichte Packung zu erkennen.

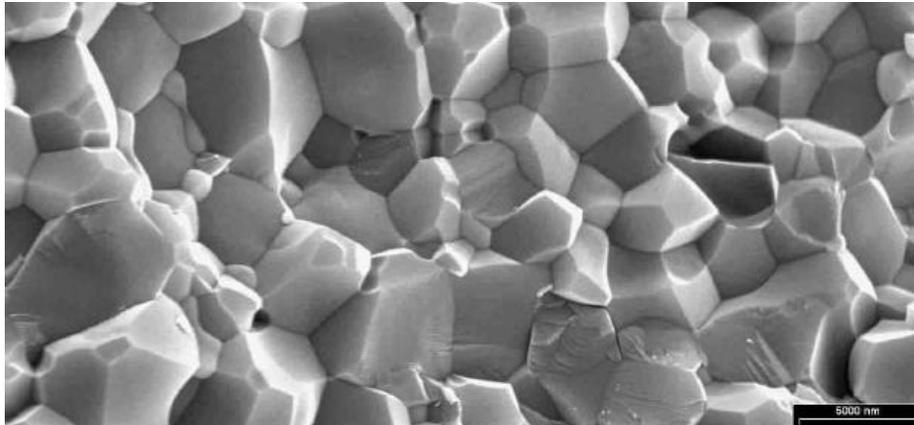


Abb. 5-15 Bruchgefüge einer Aluminiumnitridkeramik [Ance11]

Nach dem Sintervorgang ist eine Nachbearbeitung der Keramiken durch die hohe erzielte Härte sehr kostspielig und nahezu ausschließlich mit Diamantwerkzeugen möglich. Die Fertigung kleiner Strukturen für den Bereich der Mikrotechnik sind mit dem oben genannten Herstellungsverfahren für Keramiken kaum oder gar nicht möglich [Metz02].

5.4.1 Eigenschaften keramischer Werkstoffe

Keramiken weisen einen überwiegend kovalenten Anteil atomarer Bindungen auf und besitzen im Vergleich zu Metallen keine frei beweglichen Elektronen. Die kovalenten Bindungen verleihen den Keramiken hohe Härte und Steifigkeit, elektrisch isolierende Eigenschaften,

chemische und thermische Beständigkeit, Strahlungsresistenz, aber auch hohe Sprödigkeit und geringe Thermoschockbeständigkeit. Zur Anwendung bei den folgenden Applikationen kam ausschließlich Aluminiumnitridkeramik, daher soll hier auch nur auf deren Eigenschaften eingegangen werden.

Die mechanischen Eigenschaften sind gekennzeichnet durch: Verschleißfestigkeit, hohe mechanische Festigkeit, große Härte, niedrige Dichte, Formbeständigkeit und Formstabilität. Bei Bestrahlung der Keramiken mit einem Laserpuls hoher Pulsspitzenleistung spielt deshalb die Temperaturschockbeständigkeit der Keramiken eine wichtige Rolle. Nach [Tiet94] existiert ein allgemeingültiges Verfahren zur Temperaturwechselbeständigkeit, jedoch wird sie allgemein nicht durch den Abfall der Biegefestigkeit bei Veränderung der Temperaturdifferenz charakterisiert. Der Festigkeitsabfall ist durch die Rissbildung zu erklären. Die Richtwerte der für die Temperaturwechsel - und Temperaturgradientenbeständigkeit R_1 und der Thermoschockbeständigkeit R_2 werden wie folgt definiert:

$$R_1 = \frac{\sigma_B}{E\alpha_t} \quad (5-2)$$

$$R_2 = \frac{k\sigma_B}{E\alpha_t} \quad (5-3)$$

Mit den Größen Bruchfestigkeit σ_B , dem Elastizitätsmodul E , dem linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten α_t und der Wärmeleitfähigkeit k sind Keramiken mit kleinem linearem Ausdehnungskoeffizienten und hoher Wärmeleitfähigkeit entsprechend Gleichung 5-3 thermoschockbeständiger und neigen bei der Lasermaterialbearbeitung weniger zur thermisch bedingter Rissbildung. Hier hat Aluminiumnitrid gegenüber anderen Keramiken einen großen Vorteil.

Die thermischen Eigenschaften der verwendeten Keramiken sind bei der Lasermaterialbearbeitung von besonderem Interesse, da das Strahlwerkzeug Laser hauptsächlich als thermisches Bearbeitungsverfahren angesehen werden kann [Raib99]. Durch die kurzreichweitigen, kovalenten atomaren Bindungen besitzen Keramiken neben der hohen Härte auch eine extreme Hochtemperaturfestigkeit, Temperaturwechselbeständigkeit und eine hohe Warmformbeständigkeit. Aluminiumnitrid beginnt sich bei einer Temperatur von $T = 2.573$ K in flüssiges Aluminium und gasförmigen Stickstoff zu zersetzen. Das Ausgasen von Stickstoff bedingt einen ca. 20 prozentigen Volumenverlust. Erst ab 2.767 K beginnt das flüssige Aluminium zu verdampfen [Pedr93]. Weitere wichtige Kenngrößen für die Lasermaterialbearbeitung sind die Wärmeleitfähigkeit k und die Temperaturleitfähigkeit D , die über die Dichte ρ und die spezifische Wärmekapazität c_p miteinander verknüpft sind:

$$D = \frac{k}{c_p\rho} \quad (5-4)$$

Nach der Gleichung (5 - 4) sind die Temperatur- und Wärmeleitfähigkeit von der spezifischen Wärmekapazität abhängig und unterliegen somit ebenfalls dem Einfluss der Temperatur.

Im Bezug auf die optischen Eigenschaften verhalten sich die keramischen Werkstoffe grundlegend anders als metallische. Metalle absorbieren Licht in einer Oberflächenschicht, deren

Stärke klein im Vergleich zur Wellenlänge ist. Für Keramiken hingegen ist dies für einen großen Wellenlängenbereich zwischen $\lambda = 300 \text{ nm}$ und $\lambda = 2000 \text{ nm}$ nicht der Fall. Man spricht von einem Transmissionsfenster. Das heißt, die optische Eindringtiefe l_a ist in diesem Bereich im Vergleich zu Metallen sehr hoch. Für das Laserbohren von Keramiken mit Festkörperlaser bedeutet dies, dass sich die eingestrahelte Energie über einen verhältnismäßig großen Bereich verteilt. Um den zu bearbeitenden Werkstoff besonders im Bereich der Prozessschwelle auf die für das Abtragen erforderliche Temperatur erhitzen zu können, darf je nach eingestrahelter Energiedichte ein Maximalwert der Eindringtiefe nicht überschritten werden [Daus99].

Bedingt durch den Herstellungsprozess der gesinterten technischen Keramik bestehen diese meist aus kleinen Körnern, die über eine Glasphase miteinander verbunden sind. Üblicherweise besitzen die Glasphase und der Keramikkörper unterschiedliche Brechungsindizes. Diese Inhomogenitäten des Brechungsindex führen zu Reflexionen und Lichtbrechungen an den Korngrenzen und somit zu fortwährenden Richtungsänderungen des eingestrahelten Lichtes. Dieser Effekt der Streuung hat zur Folge, dass sich die Transparenz und damit die optische Eindringtiefe der gesinterten Keramiken gegenüber der des einkristallinen Materials stark vermindert. Verunreinigungen und Überreste von Sinteradditiven in der Keramik verstärken diesen Effekt. Die beschreibende physikalische Größe ist der Streukoeffizient μ_s , der die Häufigkeit der Streueignisse pro zurückgelegter Strecke angibt [Rogg97].

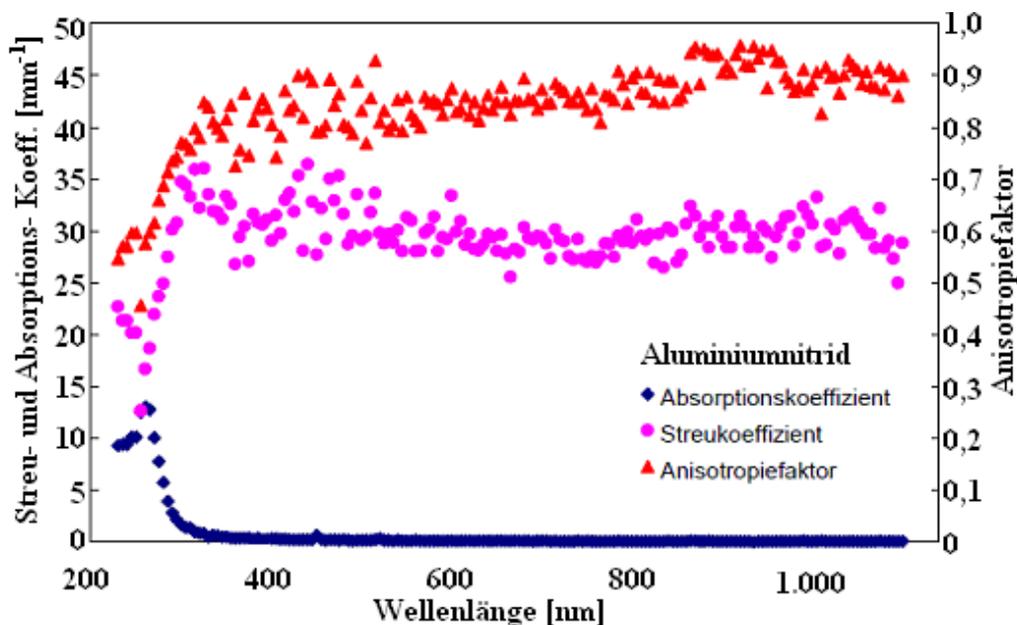


Abb. 5-16 Berechnete optische Eigenschaften für Aluminiumnitrid [Metz02]

Die in der Abbildung 5-16 berechneten Werte unterliegen ebenfalls einem Einfluss der Temperatur und sind nur für den Beginn der Erwärmung maßgebend. So nimmt der Reflexionsgrad von Aluminiumnitrid bei höheren Temperaturen bis zur Zersetzungstemperatur kontinuierlich von ca. 30 Prozent bei 1.000 °C, bis ca. 10 Prozent bei 2.300 °C ab. Ebenfalls finden beim Abtragen mittels Laserpulsen häufig Phasenumwandlungen des Werkstoffs statt, welche die Einkopplung der Laserstrahlung erheblich beeinflussen [Raib99],[Daus99]. Beim Abtragen von Aluminiumnitrid entsteht zum Beispiel im Randbereich der Materialbearbeitung

durch Dekomposition eine dünne Aluminiumschicht, deren optische Eigenschaften erheblich von denen des Ausgangswerkstoffs abweichen. In atmosphärischer Umgebung wird diese Aluminiumschicht durch die während des Abtrags herrschenden hohen Temperaturen sofort oxidiert, und es entsteht entlang des Bohrloches eine dünne Aluminiumoxidschicht, die ebenfalls die optischen Eigenschaften des Grundmaterials erheblich verändert.

5.4.2 Polarisations-eigenschaften

Bei der Herstellung von Mikrostrukturen spielt der Polarisationszustand des Laserstrahls eine ausschlaggebende Rolle. Diese wirkt sich besonders auf die Lochform am Laseraustritt aus. Bei linearer Polarisation wird der zur Bohrungswand parallele Anteil stärker absorbiert als der senkrechte Anteil [Daus95]. Deshalb steht mit zunehmender Tiefe der Bohrung mehr und mehr die senkrechte Polarisation zum Materialabtrag zur Verfügung, und der Bohrungsaustritt wird senkrecht zur Polarisationsrichtung oval ausgebildet. Dieser Effekt lässt sich zum Bohren ovaler und konischer Löcher einsetzen, indem die Polarisation gezielt eingestellt und mit der Z - Achse nachgeführt wird [Benz99]. Hier sollen jedoch mit dem verwendeten Versuchsaufbau kreisförmige Löcher hergestellt werden. Deshalb wird der Einfluss der Polarisation minimiert. Mit Hilfe eines $\lambda/4$ - Plättchens wird der hauptsächlich linear polarisierte Laserstrahl in überwiegend zirkular polarisiertes Licht umgewandelt. Die Polarisation des verwendeten Lasers ist auf Grund des Aufbaus des Oszillators und seiner nachfolgenden Elemente vorgegeben. Somit ist die Einstellung der zirkularen Polarisation bei geeignetem mechanischen Aufbau zeitlich konstant [Hone04]. Der prozentuale Anteil bezogen auf den Durchmesser lässt bei größer werdenden Bohrungen mit der hier gezeigten Bearbeitungsoptik immer stärker nach und ist bei Bohrungen mit einem Durchmesser größer als $\varnothing 200 \mu\text{m}$ kaum noch zu erkennen. In der Abbildung 5-17 wurde die Bearbeitungsoptik auf zylindrische Bohrungen mit einem Durchmesser von ca. $100 \mu\text{m}$ eingestellt und entsprechende Bohrungen bei jeweiliger Stellung der $\lambda/4$ - Platte in 1 mm - starke Aluminiumnitridkeramik eingebracht. Zur besseren Darstellung wurde eine Nachführung der Z - Achse nicht vorgenommen.

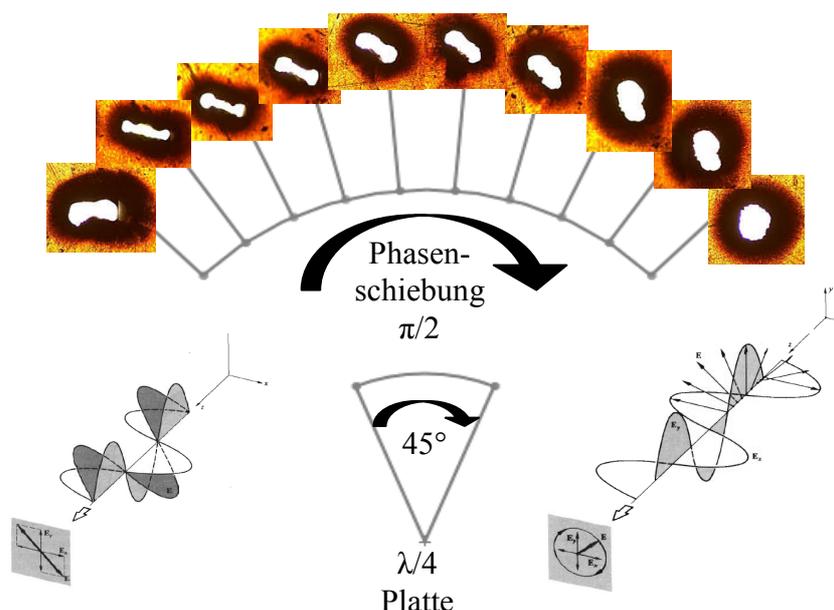


Abb. 5-17 Auswirkung der Polarisation

5.4.3 Herstellung definierter Bohrlochgeometrien

Die Präzision und Qualität einer Laserbohrung lässt sich mit Hilfe der Ein- und Austrittsbohrung, der Bohrungswand und der Geometrie bzw. Rundheit der Bearbeitung beurteilen. Ein- und austrittsseitig lassen sich die Rundheit sowie die Wärmeeinflusszonen und Rissbildungen oder Abplatzungen durch die Bearbeitung relativ leicht erkennen. Zur Untersuchung der Bohrungswand ist es nötig, ein Schliffbild anzufertigen, welches unter 5.4.4 genauere Beachtung findet. Im Vergleich zur Perkussionsbohrung kann mit der hier vorgestellten Bearbeitungsoptik auf Grund des geänderten Abtragsmechanismus eine deutlich höhere Bearbeitungsqualität erzielt werden. Bei der Perkussionsbohrung wird die Geometrie der Bohrung, wie unter 2.2.2 beschrieben, wesentlich durch die Erstarrung der Schmelze bestimmt. Dabei baut sich eintrittsseitig durch den Dampfdruck der herausbeförderten Schmelze eine so genannte Eintrittskrone auf, die sich selbst bei Aluminiumnitrid schwer vom Grundmaterial lösen lässt. In der Abbildung 5-18 sind zwei Bohrungen in Aluminiumnitrid mit der Stärke von $250\ \mu\text{m}$ mit den unterschiedlichen Verfahren dargestellt. Dabei ist links die Perkussionsbohrung zu sehen, welche durch ihre Unrundheit sowie ihrer großen Wärmeeinflusszone (durch Schwärzung im Randbereich zu erkennen) gekennzeichnet ist. Rechts ist die Wendelbohrung dargestellt, die Wärmeeinflusszone ist hier minimal ausgeprägt, ebenso wenig zeigt sich eine Eintrittskrone. Die Geometrie ist gesteuert und nicht von zufälligen Parametern abhängig. Hergestellt wurden diese Bohrungen mit einem Nanosekundensystem bei einer Pulsdauer von $\tau_p = 35\ \text{ns}$, einer Leistung $P_m = 9\ \text{W}$ bei einer Wiederholfrequenz von $f_{\text{rep.}} = 20\ \text{kHz}$. Die Strahlqualität lag hier, mit der Wellenlänge $\lambda = 1.064\ \text{nm}$, bei ca. $M^2 = 2$, was einem Fokussdurchmesser w_0 von ca. $45\ \mu\text{m}$ entsprach. Dies bedeutet, dass der Strahl kaum ausgelenkt, und optische - und Systemachse annähernd identisch sind. Der Strahl befand sich praktisch in Eigenrotation und im Gegensatz zur Perkussionsbohrung die Relativbewegung des Strahls zum Werkstück für das Bohrerergebnis verantwortlich ist.

Eintrittsbohrung

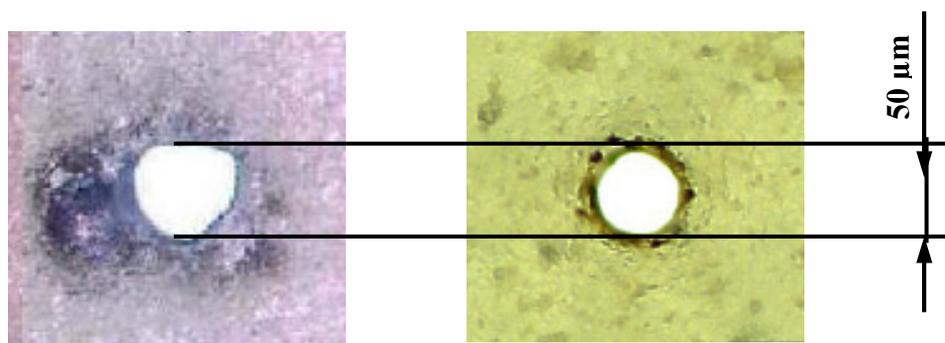


Abb. 5-18 Vergleich der Bohrverfahren in AlN, links: Perkussionsbohren, rechts: Wendelbohren

Mit dieser Bearbeitungsoptik lassen sich unterschiedlichste Bohrgeometrien herstellen, die mit klassischen mechanischen Verfahren (siehe Kapitel. 2) oder mit den traditionellen Laserverfahren in dieser Qualität nicht möglich sind. In der Abbildung 5-19 sind eine Reihe von Bohrungen in Aluminiumnitrid von $t = 1\ \text{mm}$ Stärke mit unterschiedlichster Geometrie darge-

stellt. Ein- und Austrittseite sind im Rohzustand, also ohne irgend einen Reinigungsprozess durchlaufen zu haben, zu sehen. Daher sind hier und da noch kleine Überreste aus der Bearbeitung zu erkennen, die jedoch nach der Ultraschallreinigung verschwunden sind. Bei den Querschliffaufnahmen verhindert die Einbettmasse den Blick auf die Bohrungswand, zu erkennen sind lediglich die Kantenschärfe und der exakte geometrische Verlauf. Weitere Aufnahmen hierzu befinden sich im Anhang. Die hier dargestellten Abmessungen werden in dieser Form oder ähnlich von der Industrie oft nachgefragt. Bohrungen mit negativer Konizität werden genutzt, um Öffnungen in Hohlräume einzubringen, eine klassische Anwendung hierzu sind Einspritzdüsen für Dieselmotoren.

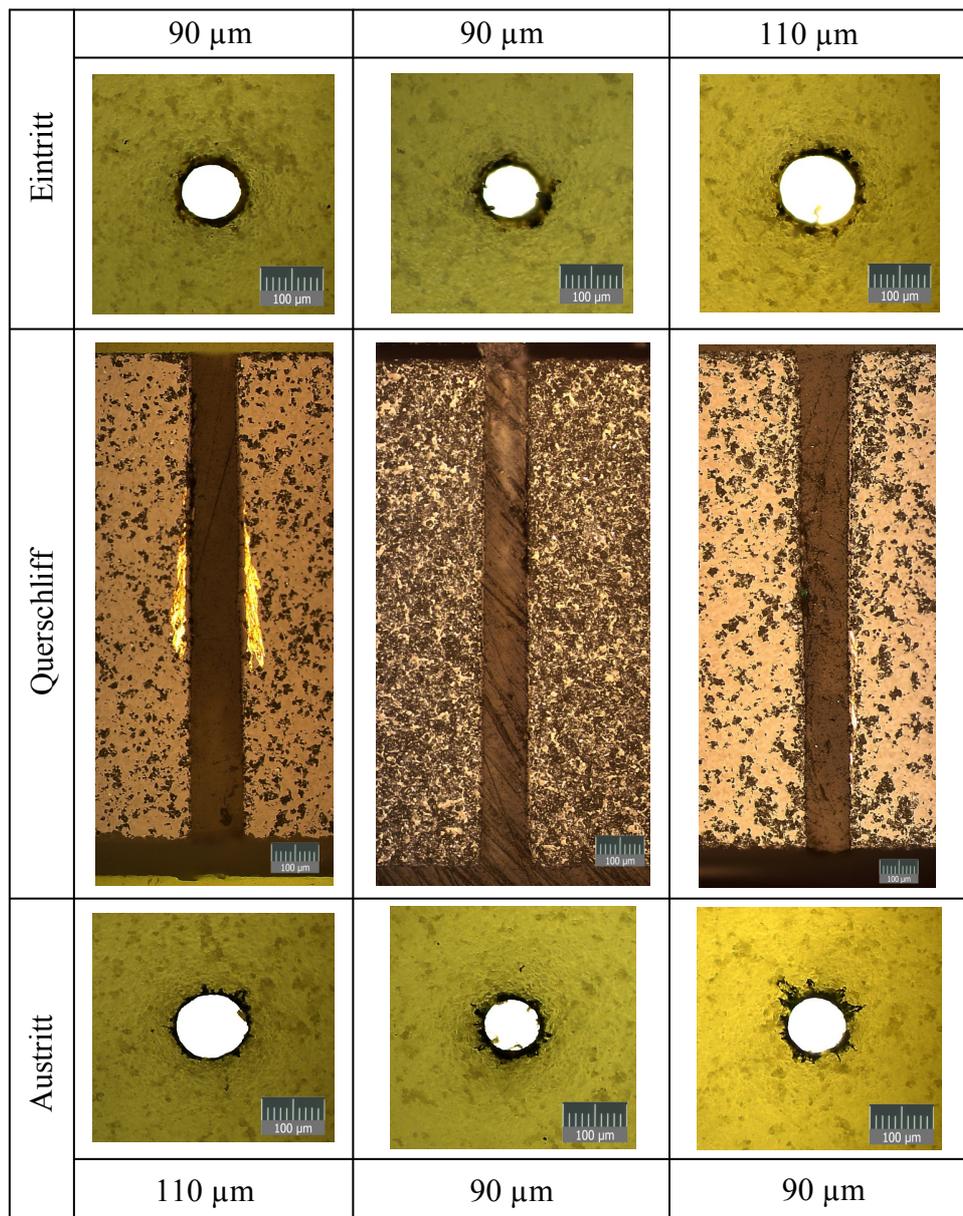


Abb. 5-19 Bohrungen in 1 mm - Aluminiumnitrid, von links nach rechts: negativ konisch, zylindrisch, positiv konisch

Jedoch lassen sich mit diesem Prozess nicht nur sehr kleine, sondern auch verhältnismäßig große Bohrungen in mechanisch schwer zu bearbeitenden Materialien in hervorragender Qualität und mit polierter Bohrwand in einem Arbeitsgang herstellen. In der Abbildung 5-20 ist eine zylindrische Bohrung mit einem Durchmesser von 1.400 μm in Korund zu sehen. Korund ist ein kristallines Material mit der Mohshärte von 9 und zählt damit nach dem Diamanten zu einem der härtesten Materialien. Die Bearbeitung wurde mit einem Pikosekundensystem durchgeführt. Die Bohrwand weist eine sehr geringe Rauheit auf und wirkt augenscheinlich poliert, was durch die REM - Aufnahme etwas verloren geht.

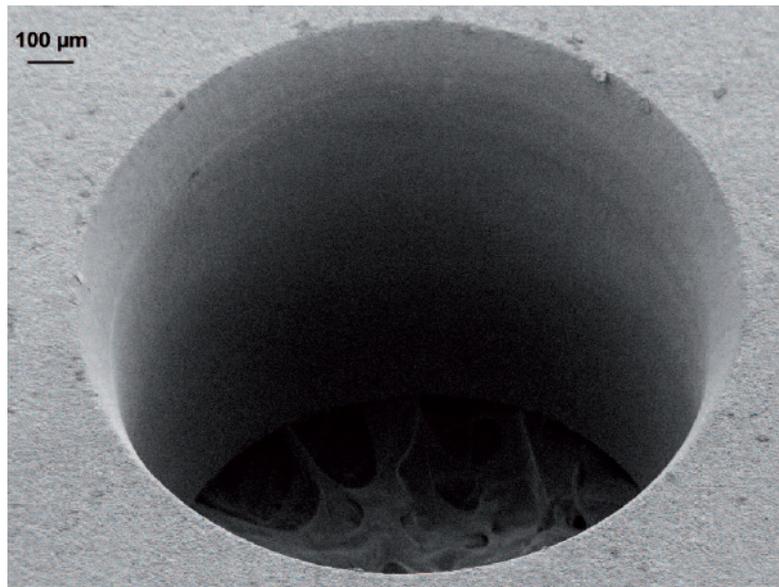


Abb. 5-20 Zylindrische \varnothing 1.400 μm - Bohrung in Korund [Micr11]

Die Reproduzierbarkeit spiegelt sich am besten in der in der Abbildung 5-21 dargestellten Querschliffreihe der Bearbeitung wieder. Hier sind eine Reihe von zylindrischen Bohrungen mit dem Durchmesser von 100 μm in Aluminiumnitrid eingebracht. Gut zu erkennen ist der gleichmäßige und scharfkantige Verlauf der Bearbeitung. Kleinere Unregelmäßigkeiten entstehen durch das nicht exakte Aufbringen der Probe auf die Schleifscheibe, was bei Bohrungen in dieser Größenordnung etwas Übung bedarf. Die Bohrkanäle sind wie in der Abbildung 5-19 mit Einbettmasse gefüllt und verwehren den Blick auf die Bohrwand.

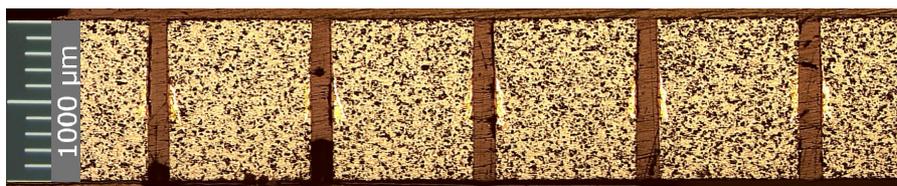


Abb. 5-21 Querschliffreihe von zylindrischen \varnothing 100 μm - Bohrungen in AlN

5.4.4 Bohrwandqualität

Wie unter 5.4.1 erläutert, entsteht während der Laserbearbeitung von Aluminiumnitrid ein Anteil Schmelze. Beim Perkussionsbohren wird die Schmelze vom Dampfdruck axial nach außen gedrückt und ist abhängig von der Intensität der Laserstrahlung. Mit der hier vorgestellten Bearbeitungsoptik treibt der Fokus durch Rotation die Schmelze entlang der Bohrwand vor sich her. In der Abbildung 5-22 ist das Prinzip schematisch dargestellt.

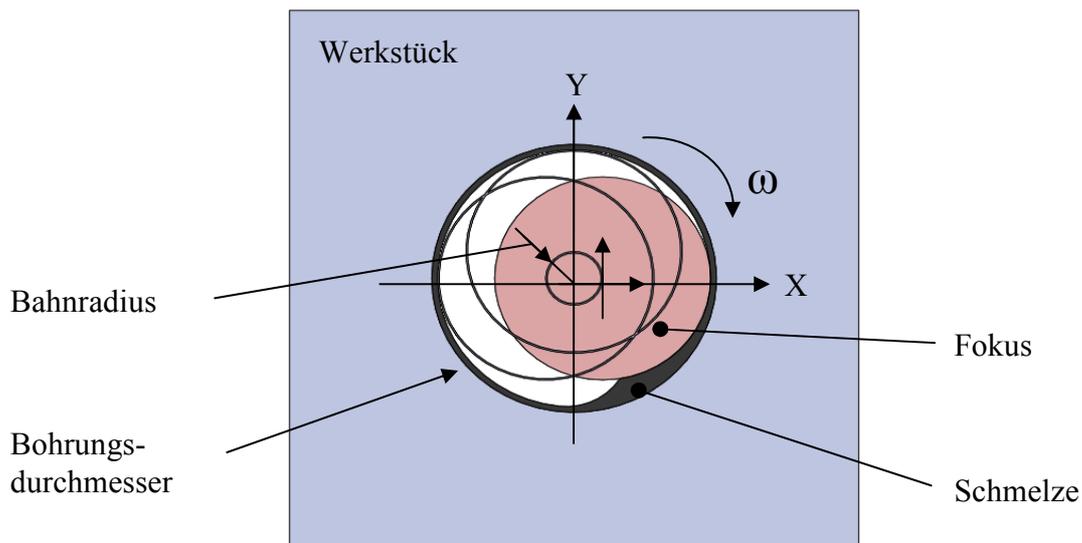


Abb. 5-22 Laserbearbeitung von Werkstoffen mit Schmelzanteil

Die Schmelze legt sich durch die Rotationsbewegung an der entsprechenden Bohrwand an, wird in radialer Richtung ausgedünnt und fließt dadurch zu Beginn des Bohrprozesses aus der Bohrung heraus. Die entsprechende Schmelzkrone hat, anders als beim Perkussionsbohren, keine Anbindung an das Grundmaterial, sondern nur an die Schmelzschicht innerhalb der Bohrung. Die Schmelzschicht wird im weiteren Verlauf des Prozesses mit zunehmendem Bohrungsdurchmesser ausgedünnt, wodurch die Schmelzkrone schließlich die Haftung verliert und sich von der Bohrung löst. Sobald keine Schmelze mehr aus dem Bohrloch austritt, erfolgt der Materialabtrag nur noch dampfförmig, wobei die rotierende Schmelze innerhalb der Bohrung vom wirksamen Fokus, welcher der Isophoten mit Verdampfungsintensität entspricht, verdampft wird [Wawe08]. Zeitlich betrachtet endet bei dem Perkussions- und Einzelpulsbohren der Bohrprozess nach dem Durchbohren des Materials. Die einfallende Laserstrahlung wird an der Bohrwand reflektiert und verlässt die Bohrung durch den Austritt, ohne weiteres Material abzutragen. Bei dem hier gezeigten Bohrverfahren geschieht das nur, wenn die Strahlung exakt senkrecht auf das Werkstück auftritt. Ist der Strahl angestellt (für negativ bzw. positiv konische Bohrungen) wird so lange Material abgetragen, bis sich an der Bohrwand ein Winkel relativ zur Laserstrahlung einstellt, unter dem Totalreflexion stattfindet. Beim Perkussionsbohren entspricht die Bohrzeit der Durchbohrdauer. Bei dem hier vorgestellten Verfahren ist der Bohraustritt nach dem Durchbohren entsprechend des kegelförmigen Bohrfortschritts verjüngt, gegenüber der herzustellenden Bohrung existiert ein verbleibendes Abtragsvolumen. Dieses Volumen wird bei der Durchbohrung abgetragen. Hier ergibt sich die

Bearbeitungszeit aus der Durchbohrdauer plus der Dauer zur Ausarbeitung der eingestellten Geometrie. Diese kann je nach Konizität ein Vielfaches der Durchbohrdauer betragen. In der Abbildung 5-23 ist der Schnitt einer zylindrischen Bohrung mit dem Durchmesser von $180\ \mu\text{m}$ in Aluminiumnitrid zu sehen. Die Aufnahmen bestätigen den oben beschriebenen Mechanismus. Deutlich zu sehen ist die aus dem Sintervorgang entstandene Gefügestruktur von Aluminiumnitrid außerhalb des Bearbeitungsbereichs. Im Bearbeitungsbereich ist unter einem Lichtmikroskop eine glänzende metallische Schicht zu erkennen, die sich unter dem REM als eine geglättete und porengefüllte Fläche darstellt. Ebenso lässt sich eine sehr homogene Struktur der Bohrwand erkennen, was darauf hin deutet, dass sich die Schmelzschicht während der gesamten Bearbeitung über der Bohrwand ausbreitete und erst nach Prozessende gleichmäßig erstarrte. Aber nicht nur die verbesserte Oberflächenrauigkeit sprechen für dieses Bearbeitungsverfahren, sondern auch die geringe Wärmeeinflusszone, die für die Bearbeitung von keramischen Werkstoffen, die leicht zu Temperaturschock - bedingter Rissbildung neigen, von großem Vorteil ist.

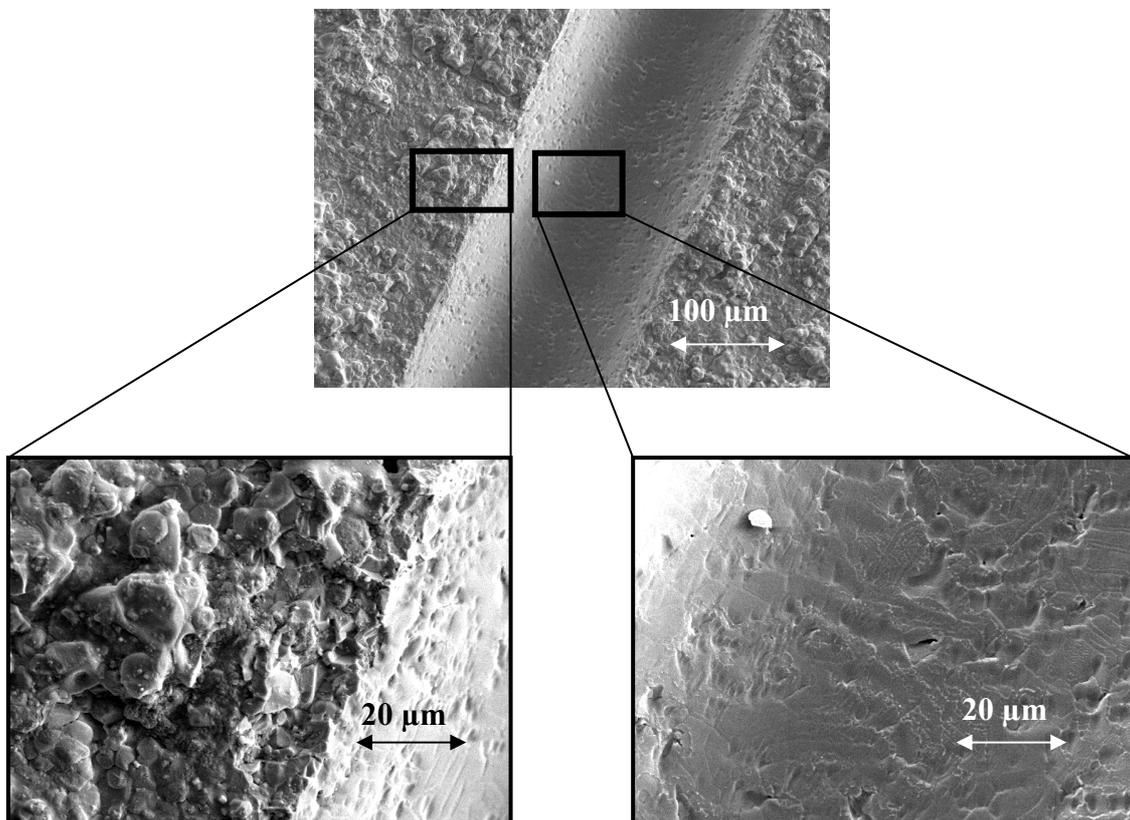


Abb. 5-23 Darstellung der Bohrwandqualität

5.4.5 Erreichbare Bohrlochgeometrien

Betrachtet man den Laserstrahl als geometrisches Werkzeug und ist dabei die Bohrungstiefe größer als die Rayleighlänge, lässt sich über die geometrischen Zusammenhänge die Bohrungstiefe als Näherung ermitteln. In der Abbildung 5-24 ist dies oben bildlich dargestellt. Hieraus erschließt sich schnell, dass es nicht gelingen kann, kleinste Bohrungen in beliebiger Dicke Werkstücke einzubringen. Zwar lässt sich der Öffnungswinkel des Strahls über die

Wahl der Fokussieroptik beeinflussen, jedoch ändert sich dabei auch immer der Fokusdurchmesser (kleiner Öffnungswinkel, großer Fokusdurchmesser), was die Geometrie ebenfalls einschränkt. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Aufweitung des einfallenden Strahls, der als Basis für den Fokussierungswinkel gilt. Wird dieser zu groß gewählt, erreicht man in der Regel einen kleineren Fokusdurchmesser, jedoch vergrößert sich wiederum der Öffnungswinkel. Außerdem vergrößern sich die optischen Fehler (siehe Kapitel 3), was im Endeffekt wieder zu einem großen Fokusdurchmesser führt. Letztendlich erzielt man hiermit keine Vorteile. Wird der Eintrittsdurchmesser verkleinert, ist dies auch nur begrenzt möglich: bei zu kleinem Durchmesser verlieren die optischen Elemente, hier speziell die sphärischen Flächen, immer mehr an Wirkung und verschieben damit den kompletten Strahlengang.

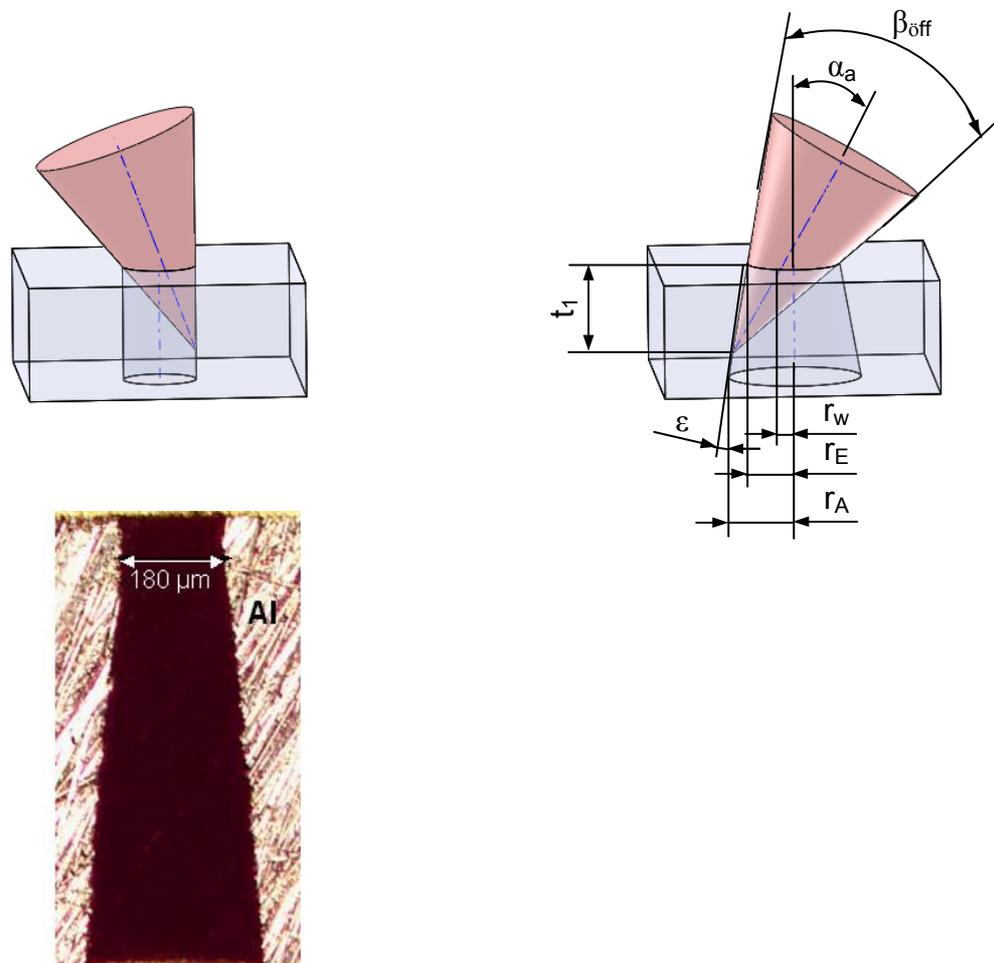


Abb. 5-24 Systembedingte Begrenzung der Bohrgeometrie:
 zylindrische Bohrung (oben links), negativ konische Bohrung (oben rechts),
 Querschliff einer negativ konischen Bohrung Al_2O_3 mit eintrittsseitiger Senkung (unten)

Die Abbildung 5-24 zeigt unten einen Querschliff einer negativ konischen Bohrung in Al_2O_3 , bei der die Helixverschiebung der Z-Achse zu groß gewählt wurde. Beim Eintauchen des Laserstrahls in die Bohrung tangierten die äußeren Randstrahlen eintrittsseitig die Bohrung und bearbeiteten diese in der Art, dass eine Senkung entstand. Beim Anblick dieser Bohrung liegt der Gedanke nahe, mit dieser Bearbeitungsoptik auch Formbohrungen herzustellen, die für

spezielle Anforderungen, z.B. im Triebwerksbau bei der Einbringung von „shape holes“, Anwendung finden könnten. Dies wurde jedoch im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht näher untersucht. In der Abbildung 5-25 sind die näherungsweise ermittelten Werte für mögliche Bohrungsgeometrien in Diagrammen dargestellt.

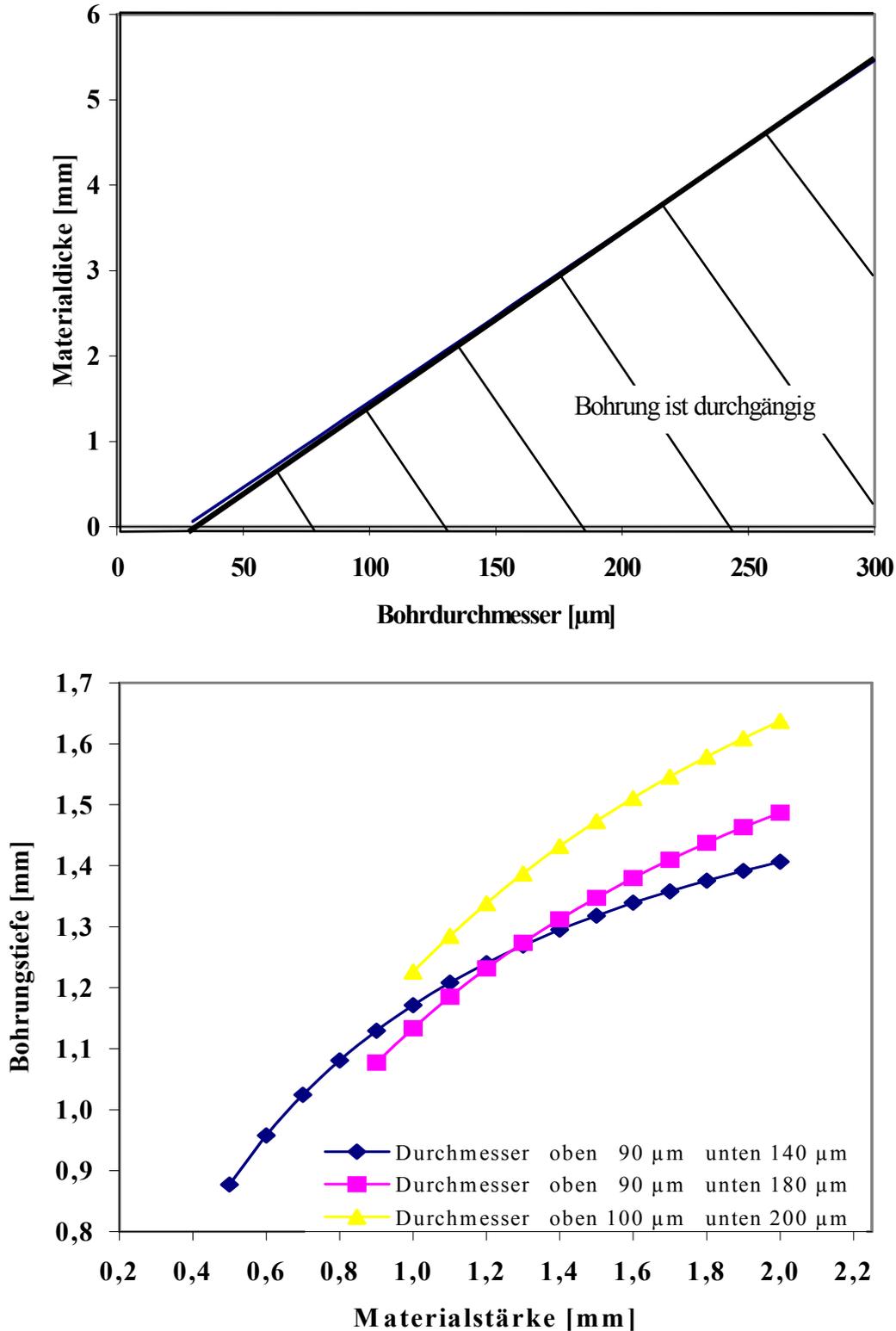


Abb. 5-25 Darstellung erreichbarer Bohrgeometrien:
zylindrische Bohrungen (oben), ausgewählte negativ konische Bohrungen (unten)

Zur Grundlage der Berechnungen dienten eine Brennweite von $f = 100 \text{ mm}$, ein Strahleintrittsdurchmesser von 5 mm und ein Fokusbereich $d_0 = 30 \text{ }\mu\text{m}$. In der Abbildung 5-25, Darstellung der zylindrischen Bohrung (oben) ergibt sich ein Aspektverhältnis von ca. 1:13, was sich auch in der Praxis realisieren lässt. In der gleichen Abbildung zeigen unten ausgewählte negativ konische Bohrungen, bis zu welcher Bohrtiefe diese eingebracht werden können, ohne Schaden an der Eintrittsseite anzurichten. Mit der Materialstärke zeigt sich, ob die Bohrung durchgängig ist.

6 Zusammenfassung

Kommerziell erhältliche sowie in der Literatur beschriebene Lasermaterialbearbeitungssysteme unterscheiden sich deutlich in Größe, Gewicht, Flexibilität und optischem Aufbau von der hier vorgestellten Bearbeitungsoptik. Die bisherigen Bearbeitungsmodule lassen sich nur schwer in die standardmäßige Anlagentechnik integrieren. Aufgrund ihrer Größe und ihrem Gewicht müssen sie speziell angepasst werden. Dies treibt die Anlagenkosten in die Höhe. Ihre Einsatzmöglichkeiten sind auf Grund ihrer eingeschränkten Flexibilität auf wenige ausgewählte Applikationen beschränkt, so dass sie zu einem Nischenprodukt werden.

Mit der vorliegenden Arbeit wird ein System beschrieben, welches mit Blick auf einen großen Anwenderkreis konzipiert wurde. Die geometrischen Abmessungen sowie das Gewicht können in die Dimensionen heutiger Scannersysteme eingeordnet werden. Somit ist das Einwechseln in standardmäßige Bearbeitungsmaschinen problemlos möglich. Die Flexibilität der Fokussieroptik überspannt ein weites Parameterfeld und lässt ein breites Applikationsspektrum zu.

Der Aufbau mit nur wenigen optischen Standardelementen erhöht die Qualität sowie die Verfügbarkeit der Bauteile. Außerdem lassen sich damit die Komponenten besser an die jeweiligen Lasersysteme (von UKP im UV bis CW im IR) anpassen. Da kaum Unwuchten vorliegen, können Drehzahlen bis 20.000 U / min, in speziellen Fällen auch 40.000 U / min erreicht werden. Dabei ist die Fokussieranordnung schwingungsentkoppelt und produziert eine stabile Fokusslage. Die übrigen Elemente sind so gewählt, dass sie schwingungsunkritisch auf den Strahlengang wirken. Mit den unabhängig voneinander wirkenden Stellparametern ist ein strukturiertes Vorgehen bei der Parametersuche möglich.

Das optische System ermöglicht den Aufbau zweier unterschiedlicher Systeme mit angepasstem Genauigkeitsbereich. So findet System 1 mit manueller Parametereinstellung seine Anwendung bei der Bearbeitung von Materialien mit feinmechanischen Abmessungen und Toleranzen, wobei System 2 in vollautomatisierter Version mit einem Regelsystem ausgerüstet ist, welches online alle optischen Stellparameter überwacht. Hiermit lassen sich Bearbeitungen in engen Toleranzfeldern bei höchster Qualität und Reproduzierbarkeit realisieren.

Bei der Bearbeitung transparenter Werkstoffe konnten unter der Verwendung der hier vorgestellten Bearbeitungsoptik neue schonende Verfahren vorgestellt werden. Durch die gleichmäßige Verteilung der Einzelpulse ist es möglich, nahezu beliebige Aspektverhältnisse bei Durchmessern von über 300 μm in transparente Werkstoffe einzubringen. Ebenso wird gezeigt, dass dieses Verfahren die Bearbeitung von Freiformkonturen in Werkstücke nahezu jeder Stärke gestattet. Zylindrische Bohrungen mit Durchmessern von ca. 100 μm werden mit einem Aspektverhältnis von 1:10 in bisher nicht gekannter Qualität hergestellt. Ein- und Austrittsseite sind frei von Ausmuschelung und Rissbildung. Der Bohrkanal selbst weist eine glatte und homogene Wandstruktur auf.

Bei der Bearbeitung keramischer Werkstoffe lassen sich die in der Literatur beschriebenen Prozesse für das Perkussionsbohren bei guter Qualität durchführen. Das Wendelbohren erhöht

die Qualität der Bohrung deutlich, was für keramische Materialien ebenso zutrifft wie für die metallischen Werkstoffe. Der Schmelzanteil keramischer Werkstoffe ist deutlich kleiner, führt jedoch ebenso wie bei den metallischen Werkstoffen zu einer Qualitätserhöhung im Bohrwandbereich. Gerade dem Temperaturschock bei empfindlichen glasartigen, kristallinen und keramischen Werkstoffen kommt diese Art der Bearbeitung entgegen, da der Wärmeeintrag nicht wie beim Perkussionsbohren auf eine Stelle konzentriert, sondern über die Bearbeitungsbahn verteilt wird. Präzision und Geometrie der Strukturen keramischer Werkstoffe unterscheiden sich nicht von dem bei metallischen Werkstoffen. Im Vergleich zum Perkussionsbohren ist die Wärmeeinflusszone deutlich geringer und der Materialauswurf im Ein- und Austrittsbereich vernachlässigbar klein. Die geometrische Form ist gesteuert und nicht von unkalkulierbaren Parametern abhängig.

Jedoch hat auch dieses System technische Grenzen, die an Beispielen von zylindrischen und negativ konischen Bohrungen bei nichttransparenten Werkstoffen aufgezeigt werden. So hängt die Durchbohrung in gewünschter Geometrie von der Dicke des gewählten Materials ab. Das heißt, es lassen sich in beliebig dickes Material keine Bohrungen mit sehr kleinem Durchmesser einbringen.

Die hier vorgestellte Technologie bietet für die Fertigung eine Reihe von unschlagbaren Vorteilen, was Bearbeitungszyklen, Qualität und Formgebung angeht, die mit konventionellen Verfahren, wie in Kapitel zwei beschrieben, nur sehr schwer oder gar nicht realisiert werden können. Technisch eröffnet dies bei der Entwicklung von Produkten neue Möglichkeiten, die sowohl die Gestaltungsfreiheit wie auch Effizienz erhöhen und dadurch letztendlich auch zur Einsparung von Kosten führt.

7 Ausblick

Der hier gezeigten Bearbeitungsoptik erschließt sich durch konstruktive Merkmale sowie ihren technischen Möglichkeiten ein weites Feld von Applikationen. In dieser Arbeit dienten die durchgeführten Untersuchungen der Demonstration ihrer Leistungsfähigkeit sowohl in technischer als auch in wissenschaftlicher Hinsicht.

Verbesserungspotential gibt es bei der Auslegung des Messsystems. Hier lassen sich durch die Wahl dicht gepackter Fotodiodenarrays für hoch präzise Anforderungen höhere Messgenauigkeiten erzielen. Diese werden in naher Zukunft durch die fortschreitende Miniaturisierung verfügbar sein.

Optisch ist die Entwicklung der Glassorten mit immer höherem Brechungsindex interessant. Hochbrechende Gläser und Kristalle versprechen kurze Glaswege und erhöhen die optische Qualität. Besonders kurze Glaswege sind im Hinblick auf die weitere Verkürzung der Laserpulse ein wesentlicher Aspekt. Bei der optischen Strahlführung sind die Möglichkeiten weitestgehend ausgereizt, da mit dem hier gezeigten System die optischen Fehler weit unterhalb der Beugungsgrenze gedrückt werden konnten. Jedoch erschließt sich mit höherbrechenden Gläsern ein größerer Parameterraum bei gleichbleibender Qualität.

Mechanisch ist der weiteren Reduzierung der Motorschwingungen Beachtung zu schenken. Zwar ist dies durch die Wahl der optischen Komponenten und der Entkopplung der Fokussieroptik ausreichend kompensiert, jedoch wird ein Teil der Motorschwingungen bei zu filigraner Befestigung auf die Anlagentechnik übertragen, was die Anwendung beeinflussen kann. Speziell gewebte Karbonfasern, die zu einer Befestigungsgrundplatte laminiert werden, können hier zur Abhilfe beitragen und die hochfrequenten Schwingungen aufnehmen.

Es werden eine ganze Reihe von Applikationsuntersuchungen von der Industrie gewünscht. Diese fallen ausnahmslos in den feinmechanischen sowie mikrotechnischen Bereich: angefangen bei Mikrobohrungen in Flachglas mit einem Durchmesser von ca. 50 μm zur Herstellung von Filtern für aggressive Medien, über Formbohrungen für den Turbinenbau, bis zum Herstellen von Schweißverbindungen mit unterschiedlichen Werkstoffen zur Durchmischung der Schweißnaht. Andere Anwendungen gehen in Richtung Feinschneiden, hier liegt das Augenmerk auf der schonenden Bearbeitung mit geringem Wärmeeintrag bei dünnen Werkstücken und beim Schneiden temperaturschockempfindlicher Werkstoffe mit größerer Wandstärke und 90° Schnittkante. Wieder andere betreffen Schichtabtragsuntersuchungen mit definierten Spurbreiten, bei denen durch die höhere Pulsdichte im Randbereich eine schonende und klare Abgrenzung geschaffen werden kann.

Ein Grossteil der Bearbeitungen lässt sich mit industriell verfügbaren Pikosekundensystemen (besser noch Sub - Pikosekundensystemen) realisieren, für andere reichen Nanosekundensysteme aus. Die Optik lässt die Verwendung dieser Lasersysteme zu und wurde bereits mit Femtosekundensystemen betrieben.

8 Literaturverzeichnis

- [Alve94] von Alvensleben, F., Herstellung von Mikrobohrungen mit dem Nd: YAG-Laser, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Fertigungstechnik, Nr.309, 1994
- [Ance11] ANCeram GmbH & Co. KG Esbachgraben 21 D - 95463 Bindlach
www.anceram.com
- [Arge11] Produktinformation, Objektive für Scanneranwendungen. Fairma Arges GmbH Wackersdorf
- [Bahm00] Bahmüller, J., Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur Qualitätssteigerung beim Laserbohren, Dissertation, Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW), Universität Stuttgart, Herbert Utz Verlag, München, 2000
- [Benz99] Benz, G., Schneider, R., Eismann, A., Wawra, T., Verfahren zur Erzeugung definiert konischer Löcher mittels eines Laserstrahl, Patentschrift DE 199 05 571 C 1, 1999
- [Berg87] Bergmann, L. Schäfer, C, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III, Optik. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York, 1987
- [Bimb91] Bimberg, D., Materialbearbeitung mit Lasern, Grundlagen und Anwendungen, Expert Verlag, Ehningen bei Böblingen, 1991
- [Bind06] Binder, A., Mikrobearbeitung mit gepulsten Festkörperlaser, Dissertation, Fachgebiet Mikrotechnik, Technische Universität Berlin, 2006
- [Daus95] Dausinger, F., Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität, Habilitation, Stuttgart, Teubner Verlag Wissenschaft, 1995, Universität Stuttgart 1995 (Reihe Laser in der Materialbearbeitung)
- [Daus99] Dausinger, F., Abein, T., Breitling, D., Radtke, J., Konov, V., Garnov, S., Klimentov, S., Kononenko, T., Tsarkova, O., Bohren keramischer Werkstoffe mit Kurzpuls-Festkörperlaser, Laser Opto 31, Nr.3, S.78, 1999
- [Dubb07] Grote, K. - H., Feldhusen, J., Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, Auflage 22, Springer - Verlag, 2007
- [Eich04] Eichler, J., Eppich, B., Dünkel, L., Die Strahlqualität von Lasern: Wie bestimmt man Beugungsmaßzahl und Strahldurchmesser in der Praxis, www.laser-journal.de
- [Eppi10] Eppich, B., Win ABCD Bedienungsanleitung, Ferdinand Braun Institut, Berlin, 2010

- [Edmu07] Optics and optical instruments catalog, Produktkatalog der Firma Edmund optics, Karlsruhe, 2007
- [Föhl00] Föhl, C., Untersuchung zum Präzisionsbohren von Keramik mit Nd:YAG- Laserpulsen im ns- Bereich, Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 2000
- [Gill00] Gillner, A, Hartmann, C., Kombinationsverfahren zur Herstellung keramischer und schwer zerspanbarer Mikrokomponenten. Abschlussbericht des Verbundprojekts Kombilas, Fraunhofer Institut für Lasertechnik (ILT), Aachen, 2000
- [Herm09] Hermanns C., Persönliches Gespräch, Firma. MDI Schott, Mainz, Juni2009
- [Herz94] Herziger, G., Lasertechnik II, Vorlesungsskript Physikalische Grundlagen und Anwendungen in der Materialbearbeitung, 2. Auflage, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen, 1994
- [Höch10] Höche, T, Persönliches Gespräch, Firma 3D Micromac, Chemnitz, April 2010
- [Hodg92] Hodgson, N., Weber, H., Optische Resonatoren, Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1992
- [Hone04] Honer, M., Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung, Dissertation, Universität Stuttgart, 2004
- [Hüge92] Hügel, H., Strahlwerkzeug Laser: Eine Einführung, Teubner Verlag, Stuttgart, 1992
- [Hüge09] Hügel, H., Graf, T., Laser in der Fertigung, Vieweg + Teubner Verlag, 2009
- [Jasp02] Jasper, K., Neue Konzepte der Laserstrahlformung und - führung für die Mikrotechnik, Dissertation, Universität Stuttgart, 2002
- [Klim99] Klimentov, S., Garnov, S.V., Kononenko, T.V., Konov, V.I., Pivovarov, P.A., Dausinger, F., High rate deep channel ablative formation by picosecond-nanosecond combined laser pulses, Applied Physics, A 69, S. 633, 1999
- [Kono97] Klimentov, S. M., Konov, I.V., Loubnin, Kononenko, T.V., Garnov, S.V., Dausinger, F., Raiber, A., Taut, C., Laser ablaton of metals in picosecond-nanosecond pulswith in the present of different ambient atmospheres, Applied Surface Science, 109, S. 48, 1997
- [Lehr11] Lehr, H., Vorlesungsskript Photonik, Fachgebiet Mikrotechnik, Technische Universität Berlin, 2011
- [Lemk10] Lemke, A., Ashkenasi, D., Spannungsfreie Innenmarkierung von Gläsern durch laserinduzierte Färbung., Photonik, S. 40, 2/2010

- [Lume11] Lumera LASER GmbH Opelstr. 10 67661 Kaiserslautern, [www.lumera – laser.com](http://www.lumera-laser.com)
- [Metz02] Metzger, Th., Abtrags- und Prozessschwellenuntersuchungen an Aluminiumoxid und Aluminiumnitrid mit gepulster Laserstrahlung, Diplomarbeit, Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW), Stuttgart, 2002
- [Micr11] 3D-Micromac AG, Technologie-Campus 8, 09126 Chemnitz www.3d-micromac.com
- [Mulc98] Synchroflex Zahnriemen aus Polyurethan, Produktkatalog der Firma. Contitech, Mulco, W. H. Müller GmbH & Co Kg, 1998
- [Müll03] Müller, M., Föhl, Ch., Verbundprojekt, Präzise Materialbearbeitung mit Ultrakurzpuls-Strahlquellen (Primus), Abschlußbericht für das Teilvorhaben Systemtechnik für hochpräzise Bohrungen und Oberflächenabtrag mit ultrakurzen Laserpulsen, Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge (FGSW) mbH Stuttgart 2003
- [Naum92] Naumann, H., Schröder., G, Bauelemente der Optik, 6. Auflage, Fachbuchverlag Leipzig, 1992
- [Newp09] Resource Katalog der Firma Newport 2008/2009, Irvine, CA 92606, USA
- [Nolt99] Nolte, S., Kamlage, G., Bauer, T., Fallnich, C., Ostendorf, A., von Alvensleben, F., Mikrostrukturierung mit Femtosekundenlasern, Laser Opto, 31(3), S. 72 – 76, 1999
- [Pedr93] Pedraza, A.J., Zhang, J.-Y., Esrom, H., Surface modification of aluminium-nitride and of aluminium by excimer laser, Mat. Res. Soc. Symp, Proc. 285, S. 209, 1993
- [Pfae86] Pfaender, H. G., überarbeitet von Schröder, H., Schott - Glaslexikon, 3. Auflage, mvg-Verlag, Landsberg am Lech, 1986
- [Popr05] Poprawe, R., Lasertechnik für die Fertigung, Grundlagen Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005
- [Raib99] Raiber, A., Grundlagen und Prozesstechnik für das Lasermikrobohren technischer Keramiken, Dissertation, Fachbereich Konstruktions- und Fertigungstechnik, Universität Stuttgart, 1999
- [Rodr09] Reali-Slim Dünnringlager, Produktkatalog der Firma Rodriguez GmbH, Precision in Motion, Eschweiler, 2009

- [Rogg97] Roggan, A., Dosimetrie thermischer Laseranwendungen in der Medizin, Untersuchung der optischen Gewebeeigenschaften und physikalisch - mathematische Modellentwicklung, Dissertation, Fachbereich Physik, Technische Universität Berlin, 1997.
- [Rohd99] Rohde, H., Qualitätsbestimmende Prozessparameter beim Einzelpulsbohren mit einem Nd: YAG-Slablaser, B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, 1999
- [Schw01] Schwarze, C., Vaillancourt, R., Carlson, D., Schundler, E., Evans, T., Engel, J., Risley-Prism Based Compact Laser Beam Steering for IRCM, Laser Communications and Laser Radar, OPTRA Inc. 461 Boston Street Tospfield, MA 01983
- [Somm01] Sommer, S.S., In situ Untersuchungen zum Bohrfortschritt in Keramik beim Laserbohren mit Nanosekundenpulsen, Studienarbeit, Universität Stuttgart 2001
- [Thor06] Tools of the Trade, Volume 19, Produktkatalog der Firma Thorlabs GmbH, Dachau, 2007
- [Tiet94] Tietz, H., Technische Keramik - Aufbau, Eigenschaften, Herstellung, Bearbeitung, Prüfung, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994
- [Treu99] Treusch, H-G., Bohren mit gepulsten Nd: YAG-Lasersystemen, Laser- und Optoelektronik Nr.4, S. 397 – 408, 1985
- [Wawa04] Wawara, T., Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzision mittels Laserstrahlung, Dissertation, Universität Stuttgart, 2004
- [Wawe08] Wawers, W., Präzisions-Wendelbohren mit Laserstrahlung, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen, 2008
- [Wens02] Wensink, H., Fabrication of Microstructures by Powder Blasting, Dissertation, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2002
- [Yan02] Yan, B.H., Wang, A.C., Huang, F.Y., Huang, C.Y., Study of precision micro-holes in borosilicate glass using micro EDM combined with micro ultrasonic vibration machining, International Journal of Machine Tools & Manufacture 42, 1105–1112, 2002
- [Zügg10] Zügge, H., Gross, H., Hellmuth, T., Menke, Ch., Optische Systeme: Design und Simulation, Seminar, 74541 Vellberg, April 2010

9 Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
SPP	Strahlparameterprodukt	[mm mrad]
w_0	Strahltaillenradius	[μm]
$w(z)$	Strahltaillenradius in Strahltaillenposition	[μm]
w_f	Strahlradius in der Brennweite	[μm]
θ_0	Divergenzwinkel	[rad]
λ	Wellenlänge	[nm]
I	Intensitätsverteilung	[W / m ²]
P_m	Laserleistung	[W]
P_p	Pulsleistung	[J]
z_0	Strahltaillenposition	[mm]
z_R	Rayleighlänge	[μm]
M^2	Beugungsmaßzahl	-
K	Gütezahl	-
φ	Phasenverschiebung	[°]
y'	Ort des Bildes	[mm]
f	Brennweite	[mm]
n	Brechungsindex	-
A	Absorptionsgrad	[%]
R	Reflexionsgrad	[%]
μ_a	Absorptionskoeffizient	-
κ	Absorptionsindex	-

D	Temperaturleitfähigkeit	$[\text{m}^2 / \text{s}]$
τ_p	Pulsdauer	$[\text{s}]$
V_A	Absorptionsvolumen	$[\text{mm}^3]$
U	Drehzahl	$[\text{min}^{-1}]$
ε	Anstellwinkel	$[\text{°}]$
S	Strahlablenkung	$[\mu\text{m}]$
α'	Einfallswinkel zur Planplatte	$[\text{°}]$
d	Dicke der Planplatte	$[\text{mm}]$
β'	Konkavlinse zur optischen Achse	$[\text{°}]$
χ'	Keilwinkel	$[\text{°}]$
γ'	Konvexlinse zur optischen Achse	$[\text{°}]$
δ	Winkel zwischen geometrisch und optischer Achse	$[\text{°}]$
f	Brennweite	$[\text{mm}]$
Φ	Brechkraft	-
R'	Petzvalradius	$[\text{mm}]$
ρ	Dichte	$[\text{kg} / \text{m}^3]$
σ_D	Druckfestigkeit	$[\text{N} / \text{mm}^2]$
σ_B	Biegefestigkeit	$[\text{N} / \text{mm}^2]$
E	Elastizitätsmodul	$[\text{N} / \text{mm}^2]$
HV	Härte nach Vickers	$[\text{kN} / \text{mm}^2]$
k	Wärmeleitfähigkeit	$[\text{W} / (\text{mK})^{-1}]$
α	Ausdehnungskoeffizient	$[\text{K}^{-1}]$
Ü	Puls - zu Puls - Überlapp	$[\%]$
d_f	Abtragsdurchmesser / Pulsdurchmesser	$[\mu\text{m}]$
$f_{\text{rep.}}$	Repetitionsrate	$[\text{kHz}]$

n_d	Drehzahl	$[\text{min}^{-1}]$
s_b	Schnittbreite	$[\mu\text{m}]$
R_1	Temperaturgradientenbeständigkeit	$[\text{K}]$
R_2	Thermoschockbeständigkeit	$[\text{Wm}^{-1}]$
c_p	spezifischen Wärmekapazität	$[\text{J}(\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$
l_a	optische Eindringtiefe	$[\mu\text{m}]$
μ_s	Streukoeffizient	$[\text{m}^{-1}]$
t	Materialstärke	$[\text{mm}]$
β_0	Öffnungswinkel	$[\text{°}]$
r_w	Wendelradius	$[\mu\text{m}]$
r_E	Eintrittsradius	$[\mu\text{m}]$
r_A	Austrittsradius	$[\mu\text{m}]$

10 Veröffentlichungen und Vorträge im Verlauf dieser Arbeit

Ashkenasi, D., Binder, A., Jaber, H., Kern, H., Müller, N., Ziegert, A., Laser Processing of ceramic and crystalline wafer substrates for microelectronic applications, SPIE Vol. 4977, 542-554, Photonics West, San Jose, CA, USA, 2003

Binder, A., Ashkenasi, D., Müller, N., Riesbeck, T., Eichler, H. - J., Microdrilling, - scribing and - cutting with high - quality and high - power ns - Nd:YAG systems, SPIE Vol. 5063, 401-406, Laser Precision Micro Fabrication, München, Germany, 2003

Müller, N., „Optische Fräse“, Entwicklung einer neuartigen Laser Trepanieroptik für die Präzisionsbearbeitung, Workshops, Bayerisches Laserzentrum (blz), Nürnberg, 12/2007

Müller, N., Laserinduzierter Mikroabtrag zur Präzisionsbearbeitung transparenter Werkstoffe, Workshops des Verbands Deutscher Glasbläser e.V, Berufliches Schulzentrum Wertheim, Reichenberger Straße 8, 97877 Wertheim, 09 2008

Schwagmeier, M., Müller, N., Ashkenasi, D., Laser micro machining of metal foils, ceramics and silicon substrates, Lasers in Manufacturing WLT, Conf. Proc. 541-547, 2009

Ashkenasi, D., Müller, N., Kaszemeikat, T., Illing, G., Laser micro machining of glass, ceramics and metals utilizing trepanning optics, Proceedings of LPM - the 11th International Symposium of Laser Precision Microfabrication, 2010

Ashkenasi, D., Kaszemeikat, T., Müller, N., Eichler, H. - J., Illing, G., Laser micro machining of glass, ceramics and metals utilizing trepanning optics, ICALEO, Paper Number M904, Conf. Proc., 2010.

Ashkenasi, D., Kaszemeikat, T., Müller, N., Dietrich, R., Eichler, H. - J., Illing, G., Laser Trepanning for Industrial Applications, Lasers in Manufacturing WLT, Conf. Proc., to be published, 2011

Ashkenasi, D., Müller, N., Kaszemeikat, T., Illing, G., Advanced laser micro machining using a novel trepanning system, Journal of Laser Micro/NanoEngineering (JLMN), to be published, 2011

Illing, G., Ashkenasi, D., Kaszemeikat, T., Müller, N., Diego-Vallejo, D., Eichler, H. - J., Laser machining and plasma analysis using a novel trepanning system, Photonics West, San Francisco, CA, USA, to be published, 2011

Ashkenasi, D., Kaszemeikat, T., Müller, N., Lemke, A., Laser Mikrobearbeitung von Flachglas: Bohren und Schneiden, 2. Workshop, Laserbearbeitung von Glaswerkstoffen, Laser Zentrum Hanover e.V., Bayrisches Laserzentrum GmbH, April 2011

Gebhardt, M., Petsch, T., Lasch, M., 3D Micromac, und Ashkenasi, D., Müller, N., Kaszemeikat, T., Laser - und Medizin - Technologie GmbH Berlin, Industrielles Laserbohren mittels Wendelbohroptik, Mikroproduktion 03/11

Laseroptiksysteme, Laseroptische Werkzeuge. Neuartige Trepanieroptiken ermöglichen die Laser-Präzisionsbearbeitung in verschiedenartigen Werkstoffen, Laser Heft - Nr. 2, Mai/Juni 2011

11 Aus dieser Arbeit hervorgegangene Patente

Ashkenasi, D., Müller, N.,

Verfahren und Vorrichtungen zur schnellen Ablenkung eines Lichtstrahls auf eine eingestellte Kreisbahn, DE 10 2007 012 695.8, Priorität: 13.03.2007

Ashkenasi, D., Müller, N.,

Verfahren und Vorrichtungen zur schnellen Ablenkung eines Lichtstrahls auf eine eingestellte Längsbahn, DE 10 2007 014 933.8, Priorität: 22.03.2007

Ashkenasi, D., Müller, N.,

Vorrichtungen und Verfahren zum Führen eines Lichtstrahls, PCT / EP 2008 / 053042
Priorität: 13.03.2007 / 22.03.2007 / 13.03.2008

Ashkenasi, D., Dietrich, R., Müller, N.,

Trepanieroptik, Lagemessung der optischen Stellglieder im Betrieb,
DE 10 2010 049 459, Priorität vom 13.9.2010

Ashkenasi, D., Kazemaikat, T., Müller, N.,

Trepanieroptik, orbit-on-orbit,
DE 10 2010 049 460, Priorität vom 13.9.2010

12 Anhang

12.1 Systementwicklung

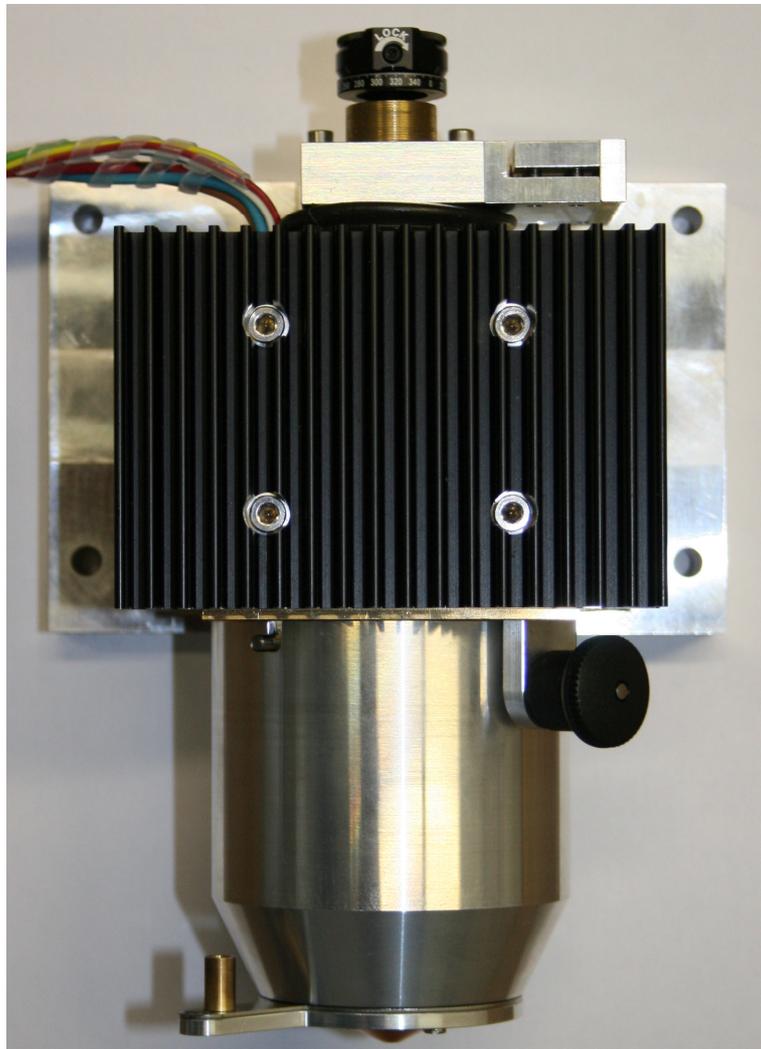


Abb. 12-1 Ansicht der Bearbeitungsoptik System 1 oben, Steuermodul unten, manueller Betrieb, Einstellung über Regelsystem

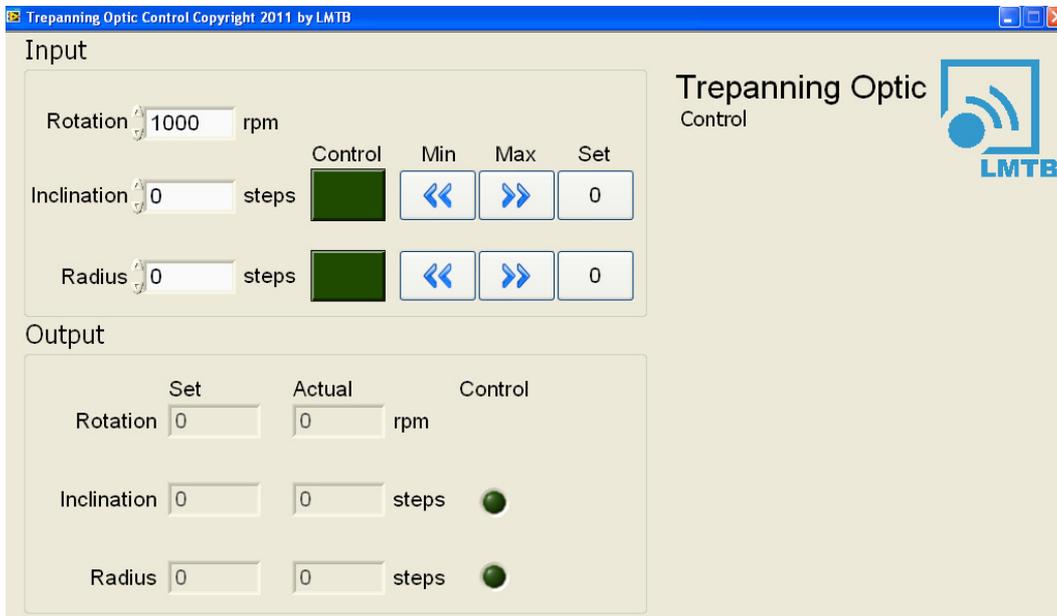
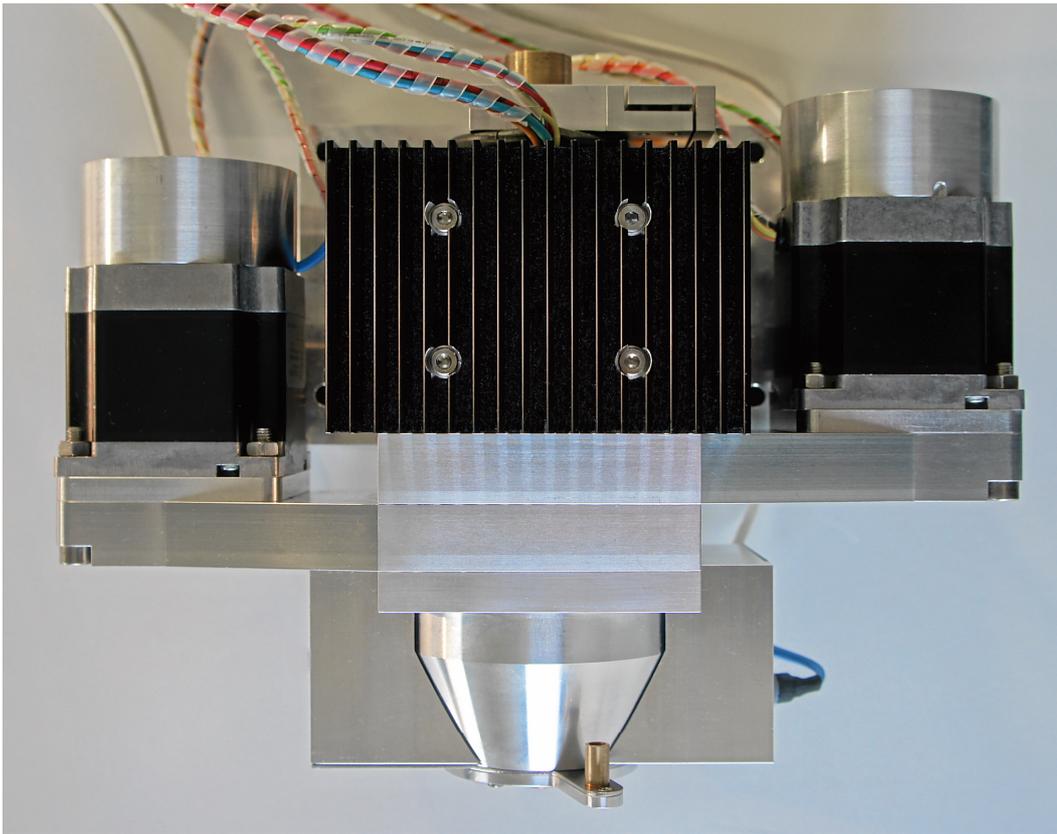


Abb. 12-2 Ansicht der Bearbeitungsoptik System 2 oben, Steuersoftware unten, vollautomatische Regelung, Ansteuerung über PC

12.2 Bearbeitungsbeispiele transparenter Werkstoffe

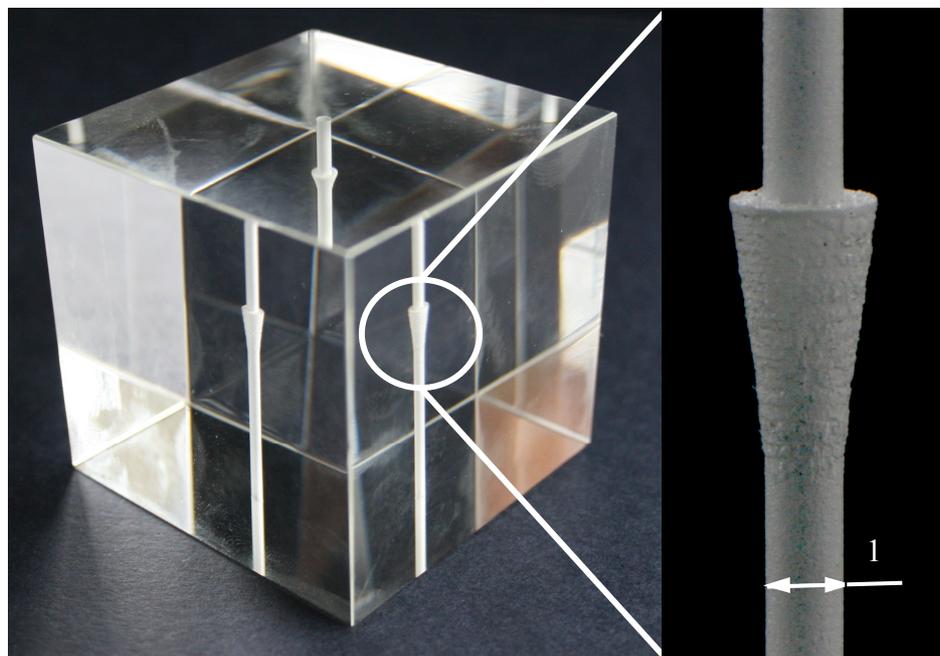
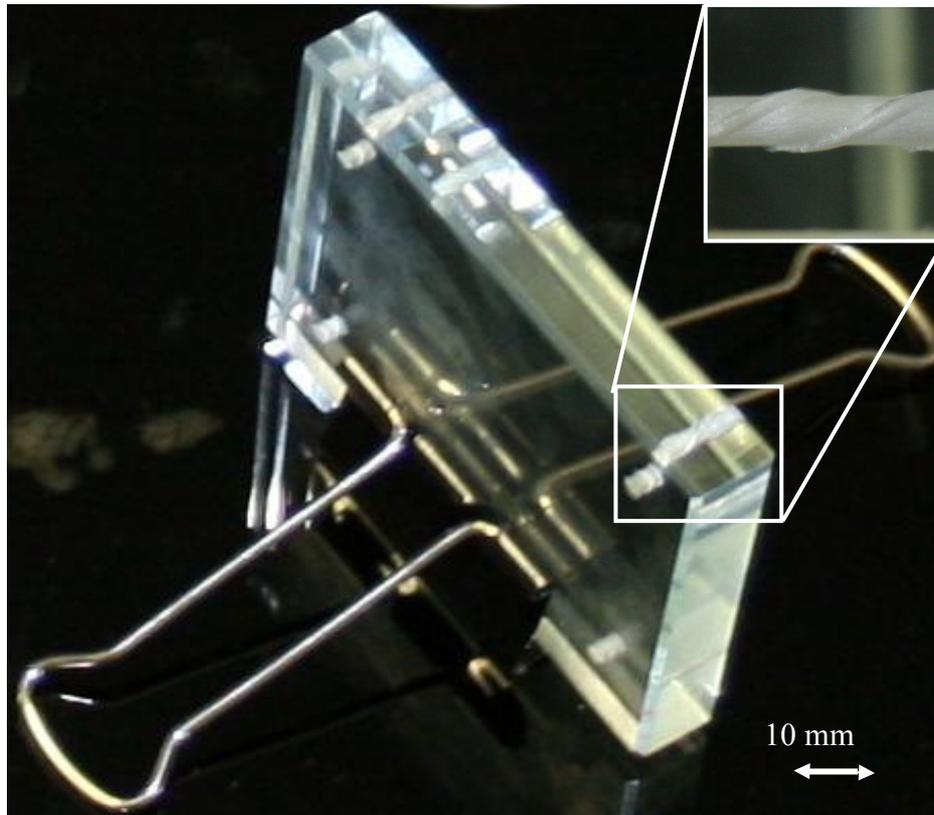


Abb. 12-3 Bearbeitung transparenter Werkstoffe mit Innenkontur
oben: Glasgewinde in 12 mm starke Glasplatte, Kerndurchmesser 3 mm
unten: 1 mm - Bohrung durch 40 mm Glaswürfel mit mittiger Aufweitung

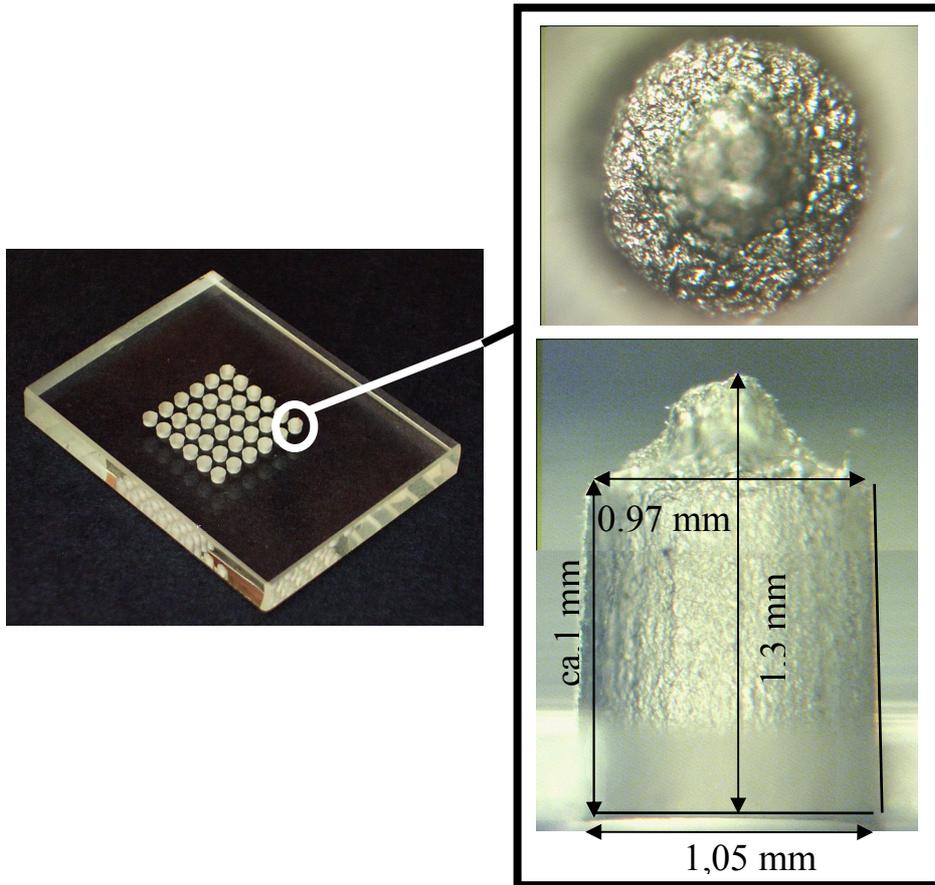


Abb. 12-4 Vorderseitige Bearbeitung in Quarz ohne Winkelanstellung, Herstellung von Sacklochbohrungen mit positivem Winkel

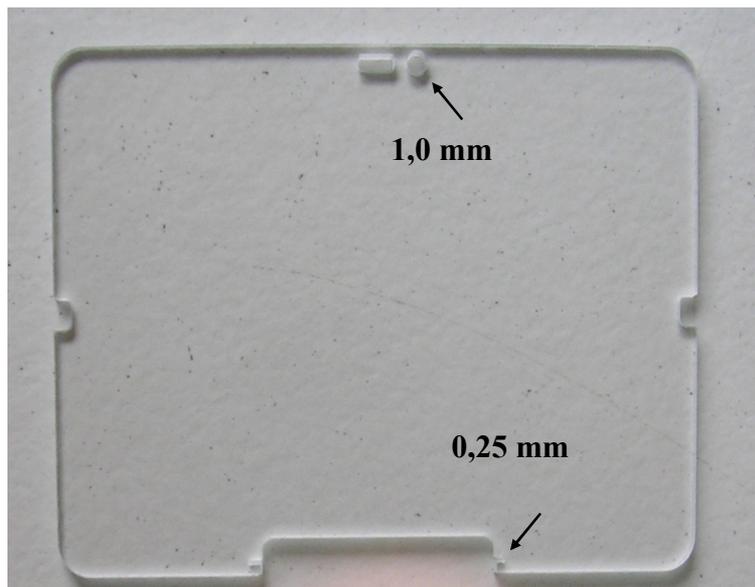


Abb. 12-5 Bearbeitung von Abdeckgläsern mit geometrischen Formen, $t = 1 \text{ mm}$

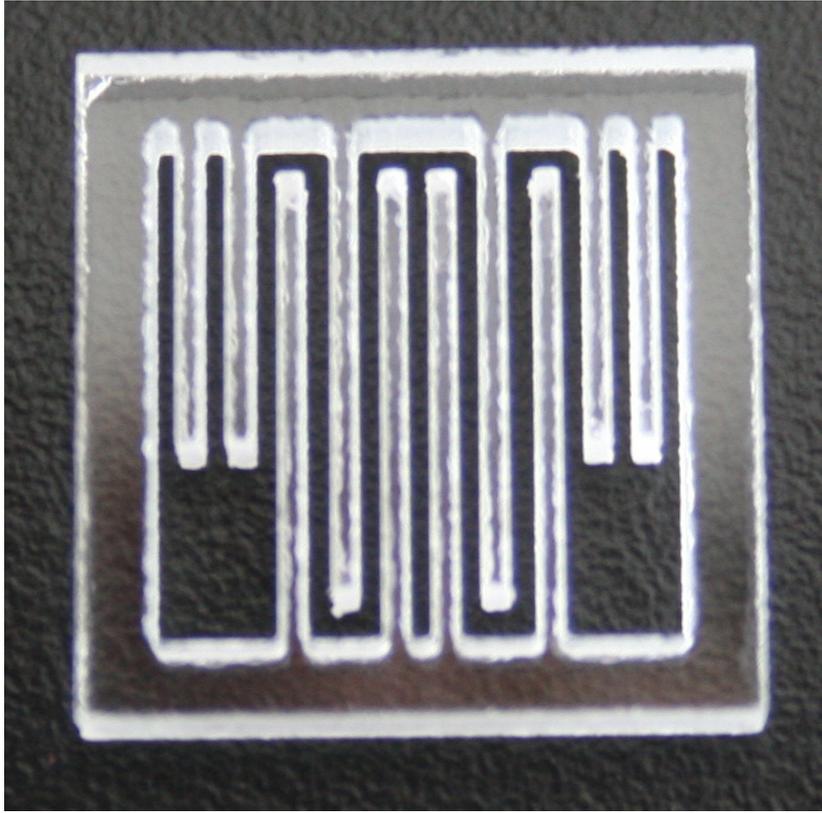


Abb. 12-6 Konturschnitte in 2,7 mm starken Glasträger, Stegbreite 500 μm



Abb. 12-7 0,6 mm - Schrägbohrungen in 6 mm - Quarzglas

12.3 Bearbeitungsbeispiele keramischer und anderer Werkstoffe

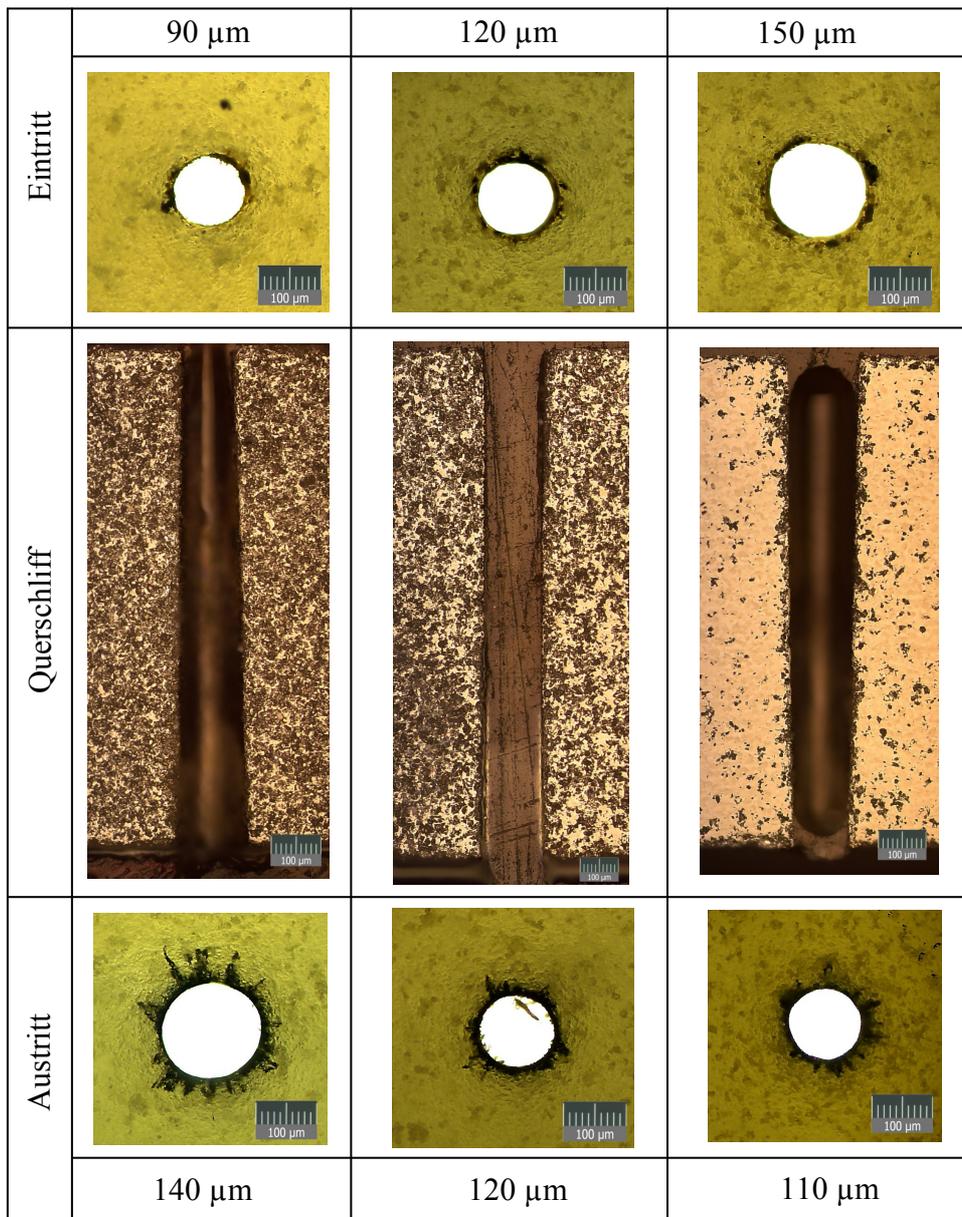


Abb. 12-8 Weitere Bohrungen in 1 mm Aluminiumnitrid, von links nach rechts: negativ konisch, zylindrisch, positiv konisch

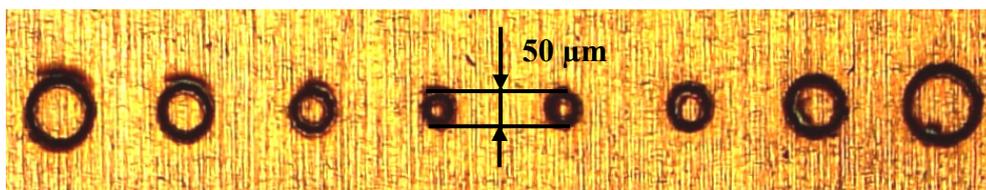


Abb. 12-9 Beschriftungsreihe mit Durchmesserstellung

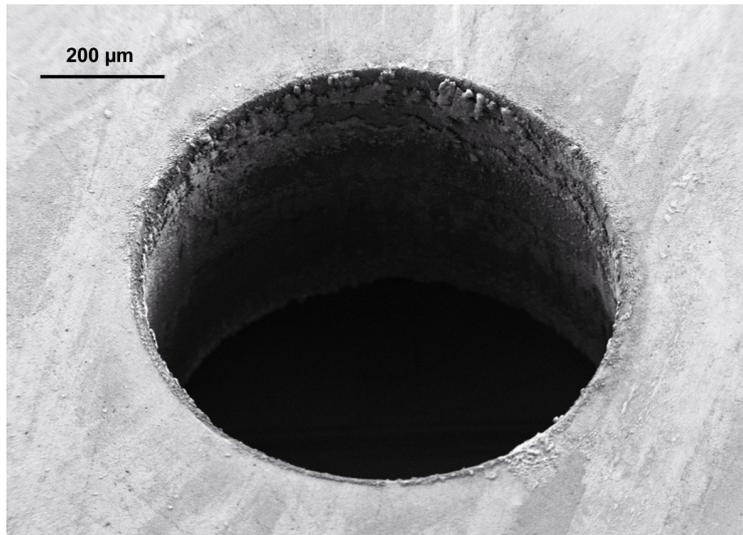


Abb. 12-10 Bearbeitung von polykristallinem Diamant [Micr11]



Abb. 12-11 Bearbeitung von Buntmetall, Breite der Verbindungsstege 50 μm [Lume11]