

D I P L O M A R B E I T

Anwendung des Laserhobelns zur Gesenkreparatur von Druckgussformen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Liedl Gerhard

E311

Institut für Fertigungstechnik
und Hochleistungslasertechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Gerald Humenberger
Matrikelnummer 8825761
Spiegelfeldstraße 36, 4840 Vöcklabruck

Wien, im Jänner 2011

Danksagung

An erster Stelle möchte ich meinen *Eltern* danken,
durch deren unaufhaltsame Unterstützung es mir erst möglich gemacht wurde,
ein Studium zu beginnen und diese Arbeit erstellen zu können.

Einen besonderen Dank möchte ich auch noch
Em.O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dieter Schuöcker und *Dr. Penz* aussprechen,
die mich zu Beginn meiner Arbeit tatkräftig betreut haben.

Zuletzt möchte ich mich noch von ganzem Herzen bei
Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Liedl bedanken,
der für mich jederzeit bei anfallenden Fragen als Betreuer unterstützt hat,
als auch - über das Thema der Diplomarbeit hinausgehend - für Diskussionen
immer ein offenes Ohr hatte.

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	6
2	Einleitung	9
2.1	Laser	9
2.1.1	Allgemein	9
2.1.2	CO ₂ -Laser	9
2.1.2.1	Anregung und Emission	10
2.1.2.2	Selektive Anregung des oberen Laserniveaus	11
2.1.2.3	Lichtemission des CO ₂ Moleküls	12
2.1.2.4	Kühlung	13
2.2	Materialbearbeitung	16
3	Verfahrensgrundlagen	19
3.1	Abtragen mit dem Laser	19
3.1.1	Begriffsdefinitionen	19
3.1.2	Detailliertere Beschreibungen	21
3.2	Vorteile des Lasers	24
3.3	Vergleich Laser mit konventionellen Abtragverfahren	26
3.3.1	Zerspanende Bearbeitung	27
3.3.2	Funkenerosives Abtragen	29
3.3.3	Zusammenfassung	30
4	Versuchsaufbau	31
4.1	Bearbeitungsstation	31
4.1.1	Strahlquelle und Strahlführungssystem	32
4.1.2	Verwendete Düsen	37
4.1.3	Verfahrenheit und Steuerung	40
4.1.3.1	Verfahrenheit	40
4.1.3.2	Steuerung	40
4.1.4	Gasversorgungssystem	43
4.2	Messgeräte	45
4.2.1	Strahlvermessung	45
4.2.2	Leistungsmessgerät	49
4.2.3	Oberflächenrauheits-Messgerät	50
4.2.4	Durchflußmessgerät	51

5	Versuchsdurchführung	52
5.1	Allgemein	52
5.2	Anlagenspezifische Einstellungen	53
5.3	Strahlparameter	54
5.4	Legierungselemente	58
5.5	Spurversatz	60
5.6	Fokuslage	63
5.7	Vorschubgeschwindigkeit	65
5.8	Gasströmung	71
5.9	Oxidation	78
5.10	Gefügeänderung und Wärmeeinflusszone	81
6	Prozessoptimierung und Abtragstrategie	83
6.1	Prozessoptimierung	83
6.2	Abtragstrategie	85
7	Ausblick	86
	Literaturverzeichnis	87
A	Anhang	93
A.1	Werkstoffkennzahlen	93
A.2	Software der NUM CNC-Steuerung	94
A.2.1	NUM PC-Bedienpanel HMI	94
A.2.2	NUM Edit-Part-Program EditPP	95
A.2.3	NUM PLCTool	96
A.2.4	NUM SETTool	97
A.3	Prometec-Messung	99
A.3.1	Fokuslage	99
A.3.2	Kaustiken	100

Zusammenfassung

Das Hauptziel dieser Diplomarbeit besteht in der Reparatur von Druckgussformen. Durch diesen Vorgang kann die Standzeit der in der Herstellung sehr teuren Formen beträchtlich erhöht werden. Im Speziellen handelt es sich dabei um das Herausarbeiten von Rissen sowie Rissnetzwerken aus den Formen und einer gleichzeitigen Nahtvorbereitung für eine nachfolgende Reparaturschweißung.

Hierzu sollen mittels eines CO₂-Lasers die während des Produktionsprozesses entstandenen Risse entfernt werden. Stand der Technik ist das grobe Ausfräsen der vorhandenen Risse bzw. großflächige Abfräsen von Rissnetzwerken, gefolgt von einer Auftragsschweißung und einem abschließenden Nachschleifen der Konturen um die geforderten Oberflächenqualitäten und -genauigkeiten wieder herstellen zu können.

Es hat sich nach eingehenden Untersuchungen gezeigt, dass sich das spezielle Verfahren des Laserhobels für diese Aufgabe bestens bewährt. Aufgrund einer unkonventionellen Düsenanordnung ergibt sich bei diesem Prozess eine erheblich höhere Abtragleistung als bei der konventionellen Methode des Laserabtragens. Dies bedeutet in weiterer Folge eine erhöhte Wirtschaftlichkeit des Reparaturprozesses und ist notwendig um mit den konventionellen Bearbeitungsverfahren, hier vor allem mit dem bereits erwähnten Fräsen, konkurrieren zu können. Die Vorteile einer Bearbeitung mit dem Laser zeigen sich besonders beim Herausarbeiten von einzelnen Rissen. Man bearbeitet das Material unmittelbar in der Umgebung des Risses nur so weit, wie es für die Ausformung einer - für einen nachfolgenden erfolgreichen Schweißvorgang - erforderlichen Nut unbedingt notwendig ist.

Es ist in dieser Arbeit erfolgreich gelungen, Risse mittels dem Verfahren des Laserhobels¹ in der jeweils gewünschten Geometrie aus den Proben herauszuarbeiten. Derartig behandelte Druckgussformen wurden nach erfolgreichem Auftragsschweißen und einer geringfügigen Nachbearbeitung wieder problemlos in den Herstellungsprozess eingegliedert.

¹Patent des Instituts für spanlose Fertigung und Hochleistungslasertechnik [22].

1 Aufgabenstellung

Es soll in dieser Arbeit ein Bearbeitungsverfahren speziell für die Reparatur von - durch den Produktionseinsatz beschädigten - Druckgussformen unter der Zuhilfenahme eines CO₂-Lasers gefunden werden. Die folgende Abbildung 1.1 zeigt den für diese Aufgabe entwickelten Bearbeitungsprozess des Laserhobelns im Einsatz.



Abbildung 1.1: *Laserhobeln im Einsatz*

Während des Produktionsprozesses entstehen durch die thermische Wechselbeanspruchung dieser Formen Risse an den Oberflächen. Dieser Effekt wird meist noch durch das

Abkühlen¹ der Kokillen mit Formentrennmittel zwischen zwei Bearbeitungszyklen wesentlich verstärkt. Man erreicht damit eine kürzere Stillstandszeit zwischen zwei Druckgussvorgängen, die Dauer bis die Oberfläche nicht mehr den Qualitätsanforderungen entspricht, wird dabei jedoch erheblich verkürzt.

Da die Herstellung solcher Gussformen sehr teuer ist und sich diese erst bei hohen Stückzahlen amortisieren, versucht man diese zu reparieren bevor sie endgültig als Ausschuss aus dem Produktionsprozess ausgegliedert werden müssen. Bisher wurden derart beschädigte Formen durch großflächiges Ausfräsen der Risse, darauffolgendem Auftragschweißen und Wiederherstellung der ursprünglichen Form sowie seiner Oberflächengüte, repariert und wieder in den Herstellungsprozess eingegliedert.

Der Ansatz für die Reparatur unter der Zuhilfenahme eines CO₂-Lasers besteht dabei in der Bearbeitung eines gegenüber dem Fräsen sehr kleinen Bereichs, demzufolge fallen dadurch auch deutlich geringere Volumina zum Abtragen an. Dies ist wiederum erforderlich um aus wirtschaftlichen Gründen (vor allem in Bezug auf die Abtrage rate) überhaupt mit dem Fräsen konkurrieren zu können. Auf diesen Punkt wird in einem späteren Abschnitt noch genauer eingegangen².

Im Detail wird dabei der Riss entlang seines Verlaufs mittels Laserhobeln aus dem Druckgussgesenk in Form einer schmalen v-förmigen Nut herausgearbeitet. Bei dem gesuchten Verfahren sollen diese Nuten so abgetragen werden, dass für einen darauffolgenden Schweißvorgang keine weiteren Nachbearbeitungen mehr an dem Bauteil notwendig sind. Das heißt, es soll bereits durch den Abtragvorgang selbst eine für das Schweißen optimale Fugengeometrie samt geforderter Oberflächeneigenschaften erreicht werden.

¹Die Formen werden dabei an den im Bearbeitungsprozess beteiligten heißen Oberflächen mit Trennmittel (meist wassermischbare Formentrennmittel) besprüht. Dies führt zu hohen Temperaturwechselbeanspruchungen des Kokillenwerkstoffs und in der Folge zu Rissen im Material.

²Siehe dazu den Abschnitt 3.3 auf der S. 26.

1 Aufgabenstellung

In der folgenden Abbildung 1.2 sind zwei unterschiedliche Teilbereiche einer zur Reparatur zur Verfügung gestellten Druckgussform abgebildet. Dabei sind jeweils im oberen Abschnitt die zu bearbeitenden Risse im Gesenk gut zu erkennen und in der unteren Ansicht sieht man dieselben Bereiche nach einem mittels Laserhobeln durchgeführten Reparaturprozesses.

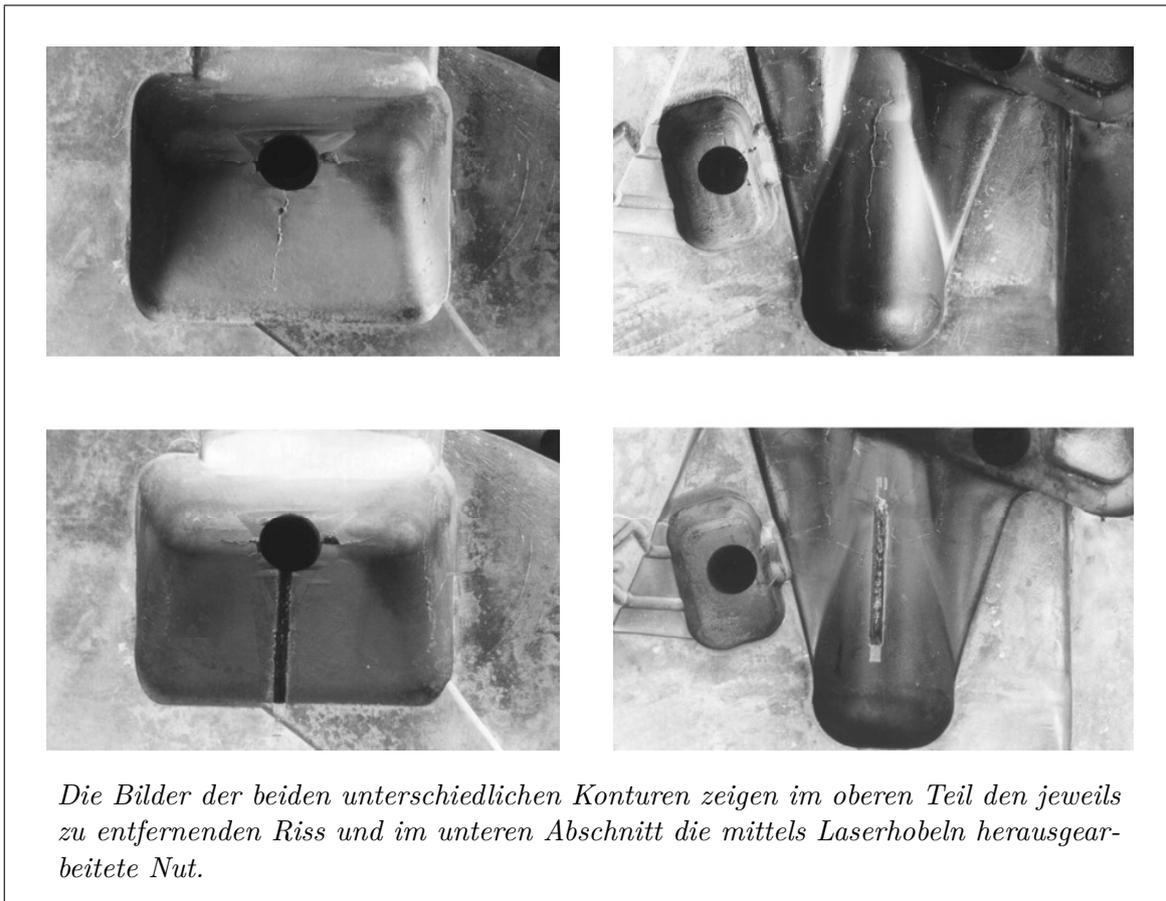


Abbildung 1.2: Darstellung von zwei mittels Laserhobeln hergestellter Nuten

Diese Bilder sollen einen ersten Eindruck bzgl. der Ausgangssituation sowie der anzustrebenden Ergebnisse darstellen. Auf die genauen Eigenschaften sowie der Form der dabei herausgearbeitete Nut wird im folgenden Verlauf der Arbeit noch detaillierter eingegangen.

2 Einleitung

2.1 Laser

2.1.1 Allgemein

Mit dem **Laser**¹ steht uns eine Energiequelle mit höchster physikalischer Güte zur Verfügung. Der Laserstrahl ist ein gerichteter, monochromatischer² und kohärenter³ Lichtstrahl mit einer sehr geringen Divergenz⁴. Diese Eigenschaften ermöglichen eine über weite Entfernungen (fast) gleichbleibende Strahlqualität und eine sehr gute Fokussierbarkeit auf kleinste Flächen. Dadurch werden Intensitäten in Größenordnungen von bis zu 10^8 W/cm^2 erreicht. Bei diesen hohen Intensitäten ist es sogar möglich Metall zu verdampfen. Somit empfiehlt sich der Laser für die Bearbeitung verschiedenster Materialien, insbesondere auch für die Behandlung von Gussformen.

Es soll aber bei allen Vorzügen auch auf die relativ hohen Investitionskosten von hochperformanten Laseranlagen hingewiesen werden. Des weiteren kann die Lasermaterialbearbeitung, wie im Falle des Laserabtragens, nur durch seine hohe Flexibilität und einer direkten Bearbeitung der defekten Stelle mit konventionellen Verfahren konkurrieren. Es muss hierbei nur wenig Material in unmittelbarer Nähe der Fehlstelle entfernt werden. Demgegenüber muss beim herkömmlichen Fräsen ein vergleichsweise großes Volumen an Material abgespannt und auch wieder aufgetragen werden (mittels einer Auftragsschweißung). Anschließend möchte ich genauer auf CO₂-Laser sowie auf den von mir verwendete Laser eingehen.

2.1.2 CO₂-Laser

In diesem Unterabschnitt wird kurz auf die Funktionsweise eines CO₂-Lasers eingegangen. Diese Erläuterungen beruhen hauptsächlich auf dem Buch „High Power Lasers in Production Engineering“ [20] bzw. „Handbook of the Eurolaser Academy“ [19]. Erfunden wurde der CO₂-Laser im Jahre 1964 von C.K.N. Patel [15]. Bei diesen Lasern erfolgt die Umwandlung der elektrischen Energie, welche bei dem von mir verwendeten Laser mittels Gleichstrom eingebracht wird, zu infraroter Strahlung mit einer charakteristischen

¹Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

²Strahlung einer genau definierten Frequenz (ideal betrachtet) bzw. Lichtemission in einem sehr schmalen Frequenz- bzw. Wellenlängenbereich (real betrachtet).

³Kohärenz zweier Wellen bedeutet, dass sie dieselbe Frequenz und eine konstante Phasendifferenz aufweisen.

⁴D. h. einer nur sehr kleinen Aufweitung des Strahldurchmessers in Ausbreitungsrichtung.

Wellenlänge von $10.6 \mu\text{m}$. Eine weitere Möglichkeiten zur Bereitstellung der Energie für derartige Laser besteht in der Verwendung von HF-Strom¹. Diese Umwandlung geschieht innerhalb eines Gasgemisches, welches aus CO_2 , N_2 und He besteht. Diese Laserquellen besitzen einen ausgezeichneten Strahlmodus und es können damit sehr hohe Leistungen erreicht werden. Im sogenannten cw-Modus² sind bereits serienmäßig Produkte mit bis zu 45 kW erhältlich. Der Grund für die erreichbaren hohen Leistungen eines CO_2 -Laser liegt einerseits in dem - für Laseranlagen - relativ hohen Wirkungsgrad bei der Umwandlung der elektrischen Energie in Strahlleistung (theoretisch mehr als 30 %), andererseits ist eine sehr effektive Kühlung des im Elektrodensystem erhitzten CO_2 -Gasgemisches mittels Wärmetauschern möglich.

2.1.2.1 Anregung und Emission

Wie bereits aus der Bezeichnung des Lasers hervorgeht, erfolgt die Umwandlung der elektrischen Energie in Strahlung durch das CO_2 Molekül. Dieses Molekül besteht aus einem Kohlenstoffatom (C) in der Mitte, welches auf jeder Seite an ein Sauerstoffatom (O) gebunden ist (siehe hierzu die Abbildung 2.1).

Diese drei Atome werden von elastischen Kräften zusammengehalten und können verschiedene Schwingungen um ihre Gleichgewichtslage ausführen:

Biegeschwingung: Ist eine transversale Schwingung, wo zwei Sauerstoffatome in ihrer Gleichgewichtslage bleiben und das Kohlenstoffatom senkrecht zur Hauptachse des Moleküls oszilliert.

Symmetrische Längsschwingung: Eine weitere Möglichkeit sind longitudinale Schwingungen, bei denen das Kohlenstoffatom in seiner Gleichgewichtslage bleibt und die beiden Sauerstoffatome sich in entgegengesetzte Richtungen bewegen.

Asymmetrische Längsschwingung: Oder aber es erfolgt die Oszillation in der gleichen Richtung, welches man als asymmetrische Längsschwingung bezeichnet.

Es können dabei alle drei Schwingungsarten gleichzeitig auftreten. Daher kann der vollständige Schwingungszustand durch ein „Zahlentrippel“ beschrieben werden. Die erste Nummer steht dabei für die symmetrische Schwingung, die zweite für die Biegeschwingung und die dritte für die asymmetrische Schwingung. Beispielsweise kennzeichnet das Trippel (001) eine rein asymmetrische Schwingung, wobei diese auch den höchsten Energiegehalt aufweist und als „oberes Laserniveau“ bezeichnet wird. Die (100) Schwingung ist eine symmetrische Schwingung niedrigerer Energie und bildet zugleich das „untere Laserniveau“ eines CO_2 -Lasers (siehe Abbildung 2.2).

¹High Frequency bzw. Hochfrequenz.

²Abkürzung für „continuous wave“ bzw. auch als Dauerstrich bezeichnet.

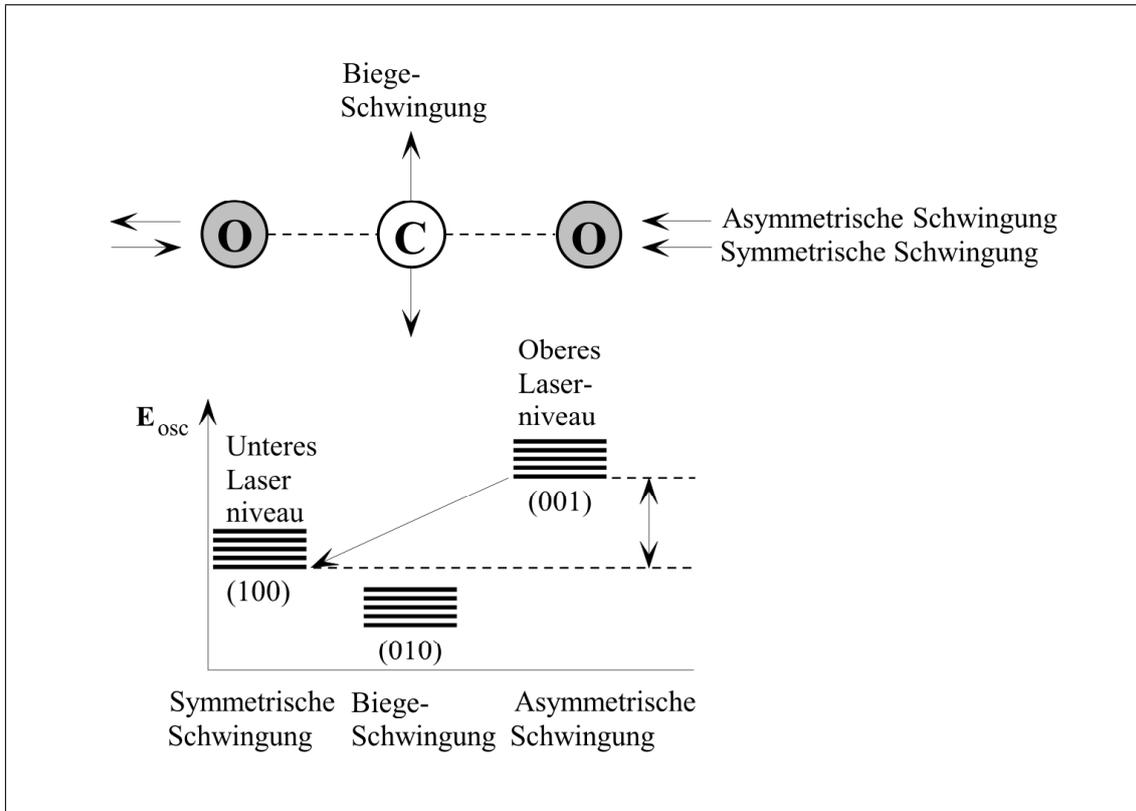


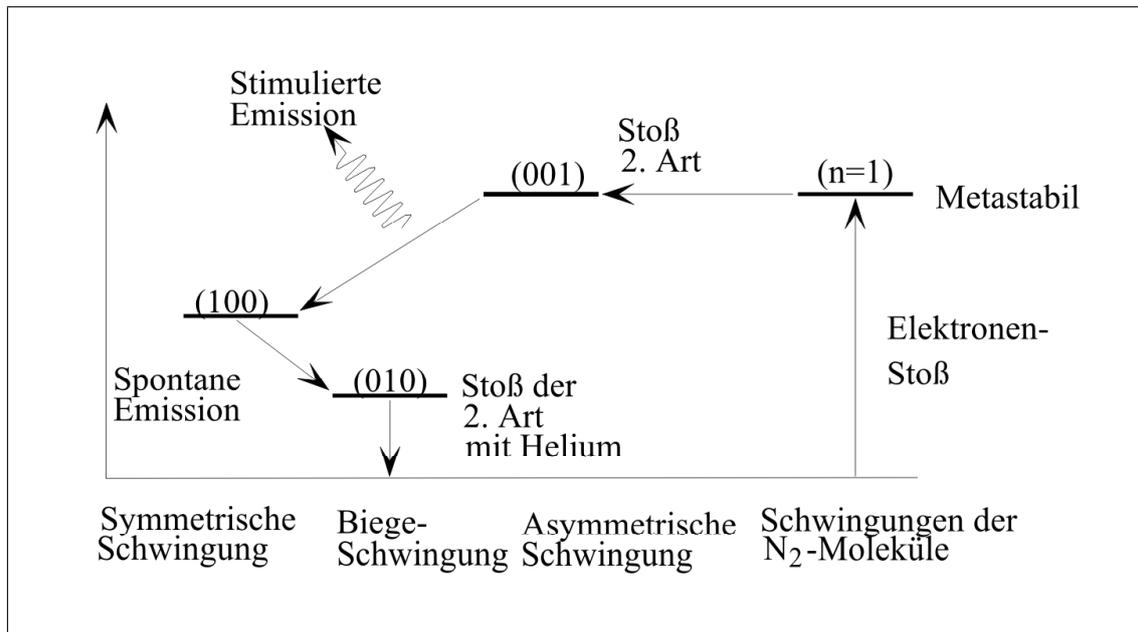
Abbildung 2.1: Die Schwingungszustände eines CO_2 Moleküls

2.1.2.2 Selektive Anregung des oberen Laserniveaus

Die Bildung der Inversion¹ zwischen dem oberen und unteren Laserniveau eines CO_2 -Lasers kann stark verbessert werden, indem eine selektive Anregung des oberen Laserniveaus erfolgt. Dieses erreicht man üblicherweise mittels eines Hilfsgases, welches hier in der Form von Stickstoff zur Anwendung kommt. Dessen Moleküle bestehen aus zwei Atomen, welche Längsschwingungen ausführen können, wobei deren geringster energetischer Zustand sehr nahe beim oberen Laserniveau des CO_2 -Lasers liegt und fast metastabil ist (siehe Abbildung 2.2 auf der S. 12).

Wenn sich also in einer Mischung aus Stickstoff und CO_2 durch eine Gasentladung viele freie Elektronen befinden und mit hoher Geschwindigkeit bewegen, werden die Stickstoffmoleküle bis zu ihrem ersten Schwingungsenergieniveau angeregt. Dort verbleiben sie eine sehr lange Zeit und dienen währenddessen als Energiespeicher.

¹Kennzeichnet einen Zustand, in dem mehr Atome pro Volumeneinheit das höhere Energieniveau und weniger Atome das niedrigere Energieniveau einnehmen. Es wird sozusagen die stimulierte Emission über die Absorption gehoben.

Abbildung 2.2: Das Übergangsschema des CO₂-Lasers

Stoßen¹ nun die angeregten Stickstoffmoleküle mit den CO₂ Molekülen - welche keine molekularen Schwingungen ausführen - zusammen, so wird die Anregungsenergie des N₂ durch einen Stoß auf das CO₂ Molekül übertragen. Letzteres wird dadurch auf das obere Laserniveau gebracht und das Stickstoffmolekül bleibt ohne Schwingungsenergie zurück. Eine solche selektive Anregung des oberen Laserniveaus von CO₂ verbessert die Inversion erheblich.

2.1.2.3 Lichtemission des CO₂ Moleküls

Wenn nun ein im oberen Laserniveau befindliches CO₂ Molekül von einem Photon mit einer Wellenlänge von 10.6 μm getroffen wird, findet die stimulierte Emission eines zweiten Photons statt. Dabei fällt das CO₂ Molekül in Form einer symmetrischen Schwingung (100) auf das untere Laserniveau zurück und fällt dann sehr schnell in den Zustand der Biegeschwingung (010). Dieser ist aber leider metastabil und somit ist der Grundzustand des Moleküls schwierig zu erreichen.

Die Biegeschwingung wird deswegen auch als „Flaschenhals“ des CO₂-Lasers bezeichnet. Nun besteht wieder die Möglichkeit mit der Verwendung eines weiteren Hilfsgases - und zwar Helium - dieses Problem in den Griff zu bekommen. Das Helium hat Energieniveaus in der Größenordnung der Biegeschwingung und kann die Energie dieses Zustandes (bzw. Flaschenhalses) - wiederum durch Stöße¹ - aufnehmen. Diese Energie wird dann an den

¹Durch einen Stoß der zweiten Art.

Wänden des Lasers (bzw. Wärmetauschers) abgegeben. Das CO_2 Molekül kommt somit in den Grundzustand und kann wiederum an der Anregung und dem Emissionsprozess teilnehmen.

Ein weiteres Problem entsteht durch das geringe Energieniveau der Biegeschwingung (dieses ist sehr nahe bei Null), da es durch thermische Zusammenstöße bereits bei Temperaturen über 100°C angeregt werden kann. Das untere Laserniveau kann in diesem Fall nicht mehr geleert werden, wodurch die Inversion wegen der hohen Besetzung reduziert wird. Es ist eines der Hauptprobleme der Hochleistungs- CO_2 -Laser, die Gastemperaturen unter dieser Grenze zu halten.

2.1.2.4 Kühlung

Aufgrund des gerade vorher aufgezeigten Problems muss das Lasergas effizient gekühlt werden. Man erreicht dies durch ein entsprechendes Gastransportsystem. Hierbei wird das Gas vom Elektrodensystem weg - wo es erhitzt wurde - in einen üblicherweise mit Wasser gekühlten Wärmetauscher geleitet und auf eine genügend niedrige Temperatur abgekühlt. Von hier gelangt es nun wieder in das Elektrodensystem zurück, wodurch der Kühlkreislauf geschlossen wird.

Da üblicherweise in der Praxis weniger als $20\%¹$ der dem Laserplasma zugeführten elektrischen Energie in Strahlung umgewandelt wird, dient der Rest als Verlustleistung und führt zur Erhitzung des Lasergases sowie der Elektroden.

Als praktisches Beispiel für ein solches System soll die von mir verwendete Strahlquelle dienen. Diese ist ein mit Gleichstrom angeregter schnell längsgeströmter CO_2 -Laser (wird oft auch als „fast axial flow“-Laser bezeichnet). Wichtig hierbei ist das Konzept der „*Längsströmung*“, welches die ideale Strahlungsausformung für das Abtragen von Druckgussformen bereitstellt. Eine Prinzipskizze eines einfachen Resonators in längsgeströmter Bauweise ist in der folgenden Abbildung 2.3 (auf S. 14) wiedergegeben.

¹Unter Einbeziehung aller Verluste (wie z. B. durch den Leistungsaufwand für die Gasumwälzung, der Kühlung, die Energieaufbereitung, usw.) ergibt sich ein resultierender Gesamtwirkungsgrad zwischen 6 bis 10%.

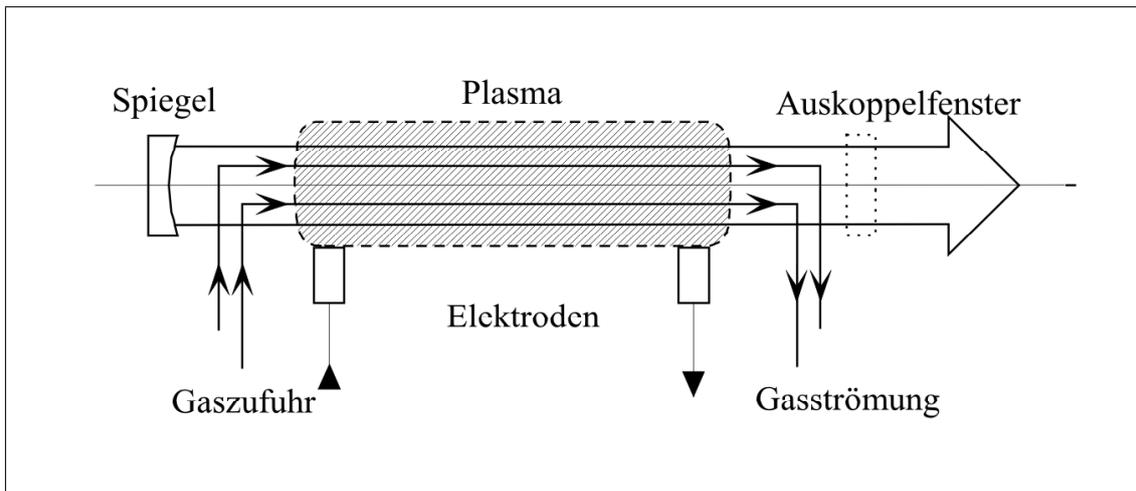


Abbildung 2.3: *Prinzipskizze eines längsgeströmten CO₂-Lasers*

Wie in dieser Darstellung ersichtlich, ist bei einem längsgeströmten Laser die Strömungsrichtung des Lasergases parallel zur Resonatorachse. Diese Achse geht einerseits durch den Mittelpunkt des im Bild links befindlichen total reflektierenden Spiegels sowie andererseits durch den des Auskoppelfensters¹ hindurch. Dieses Konzept ist auch noch einmal sehr schön auf der linken Seite in der Abbildung 2.4 dargestellt.

Aufgrund des - bei einer solchen Bauform des Systems - hohen Strömungswiderstands² (bzw. Druckverlusts) tritt eine Limitierung der erreichbaren Laserleistung in Hinblick auf eine effiziente Kühlung ein. Dafür ist aber bei diesem Konzept die Strahlqualität am höchsten und dies ist für das Laserhobeln mehr von Bedeutung als eine sehr hohe Strahlleistung. Um nun doch höhere Leistungen erreichen zu können, werden in der Praxis zur Leistungsskalierung mehrere Entladungseinheiten - wie in der Abbildung 2.4 links für zwei Einheiten dargestellt - optisch in Reihe, strömungsmäßig aber parallel geschaltet.

¹Als Auskoppelfenster dient ein für die Laserstrahlung zu einem gewissen Prozentsatz durchlässiger Spiegel, ein sogenannter „teildurchlässiger“ Spiegel.

²Widerstände durch das Elektrodensystem, den Entladungsrohren, den Wärmetauschern und des Verdichters bzw. Gebläses.

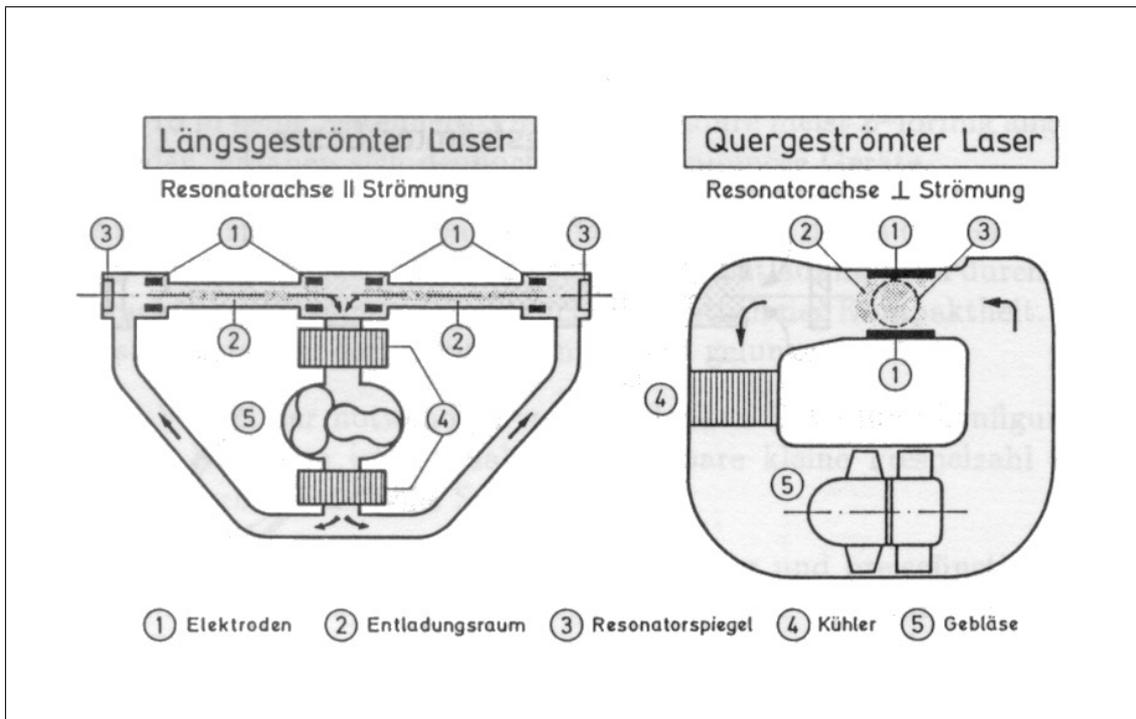


Abbildung 2.4: Darstellung der möglichen Bauformen von Gaslasern

Um die hier benötigten sehr hohen Gasgeschwindigkeiten von etwa 550 m/s - bei einem Gasdruck von nur einem Zehntel einer Atmosphäre - zu erreichen, muss man Radialverdichter oder Roots-Gebläse einsetzen.

Weiters gibt es noch die Bauform des „*quergeströmten*“ Gaslasers (auch „*transverse flow*“-Laser genannt), wobei diese Variante nicht die Strahlqualität eines längsgeströmten CO₂-Lasers erreicht. Bei der quergeströmten Ausführung ist entgegen dem vorher dargestellten Prinzip die optische Achse senkrecht zur Strömungsrichtung ausgerichtet. Eine Gegenüberstellung dieser beiden möglichen Grundbauformen kann man sehr anschaulich in der Abbildung 2.4 [6] betrachten.

Bei dieser Variante kann man einfacher zu höheren Leistungsdichten gelangen. Auch auf Grund der geringeren Druckverluste im Gaskreislauf der Kühlung werden hier hauptsächlich Axialgebläse bzw. Tangentialverdichter verwendet, welche der Geometrie des quergeströmten Konzepts viel besser angepasst sind. Daraus folgt auch eine in Bezug zur Laserleistung kompaktere Bauweise.

Genauere Details zu dem von mir verwendeten CO₂-Laser kann man dem Unterabschnitt 4.1.1 auf der S. 32 entnehmen.

2.2 Materialbearbeitung

Durch die hoch präzise, berührungslose und auch kraftfreie Einbringung der Energie an der Bearbeitungsstelle erzielt man hohe Prozessgeschwindigkeiten und eine hohe Qualität der bearbeiteten Stelle.

Wichtig bei der Betrachtung der Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Werkstück sind die Einflüsse von der Intensität, der Wellenlänge und der Polarisation der Strahlung. Im Falle metallischer Materialien möchte ich hier kurz auf die oben bereits erwähnte Wechselwirkung eingehen [6].

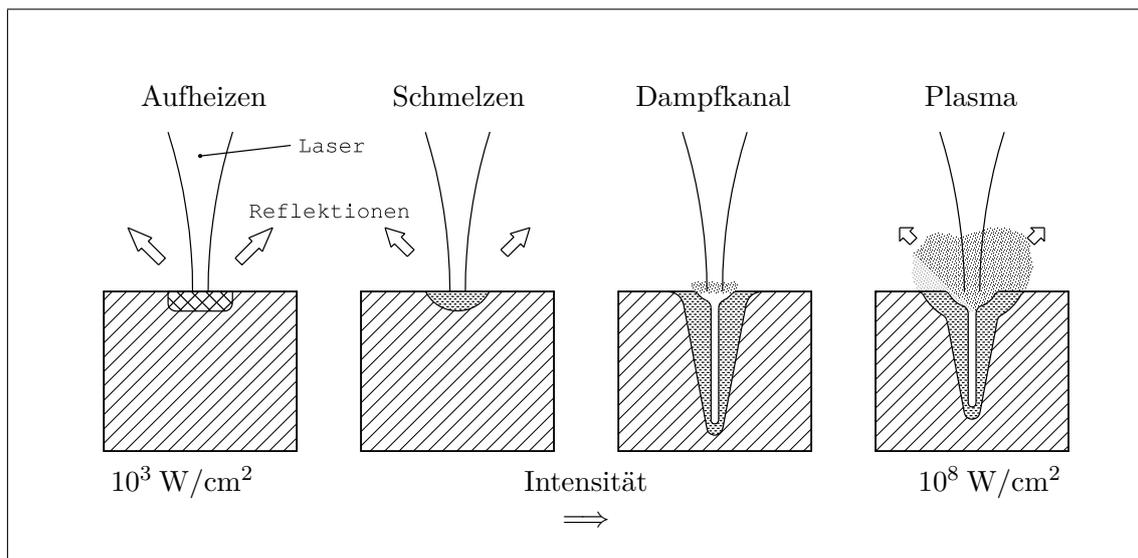


Abbildung 2.5: Einfluss der Intensität bei der Wechselwirkung Laserstrahl-Werkstück

Betrachtet man in der Abbildung 2.5 den Fall des Aufheizens mit Intensitäten von bis zu 10^4 W/cm^2 , so hängt hier die absorbierte Leistung hauptsächlich von der Wellenlänge der Strahlung, den Materialeigenschaften sowie der Beschaffenheit der Oberfläche ab.

Nun erkennt man in der Abbildung 2.6 auf S. 17, die den Verlauf des Absorptionsgrades über der Wellenlänge der auftreffenden Strahlung bei glatten Oberflächen, Raumtemperatur und senkrechtem Strahlungseinfall für Metalle zeigt, dass bei der betrachteten Wellenlänge (der von mir verwendete CO_2 -Laser hat eine Wellenlänge von $10,6 \mu\text{m}$) nur wenige Prozent der auftreffenden Strahlung absorbiert wird. Der weitaus größere Anteil der Laserstrahlung wird aber reflektiert. Des weiteren hängt der Absorptionsgrad auch noch von der Polarisation [6, 21] und vom Einfallswinkel¹ der Laserstrahlung ab.

Diese eingebrachte Energie reicht aus um das Werkstück lokal aufheizen zu können. Typische Anwendung dieses Falles wäre z. B. das Härten von Bauteilen.

¹Ist der Winkel gemessen zwischen einer Normalen auf die absorbierende Fläche und der Strahlaustrittsrichtung.

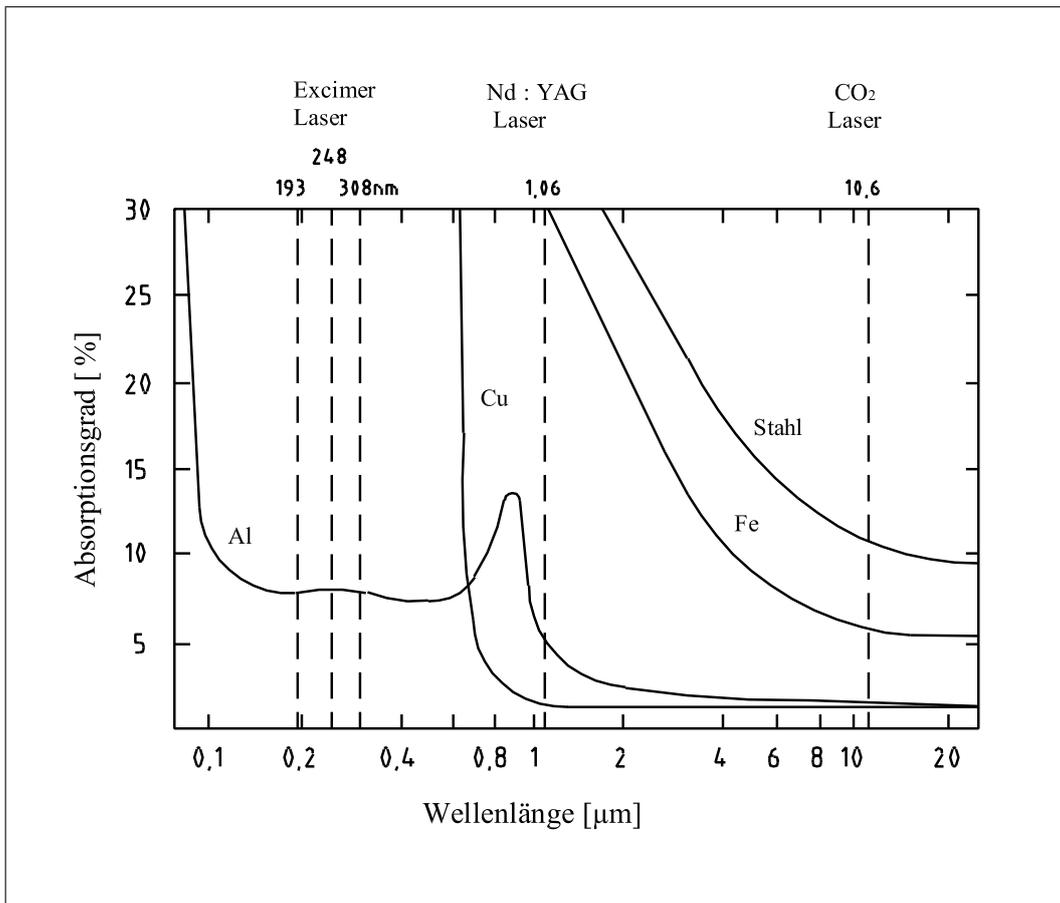


Abbildung 2.6: Absorptionsgrad in Abhängigkeit von der Wellenlänge bei glatten Oberflächen, Raumtemperatur und normalem Strahlungseinfall [6]

Wird nun durch höhere Leistung bzw. durch Fokussierung die Intensität auf 10^5 W/cm^2 bis 10^6 W/cm^2 gesteigert, so beginnt das Material an der Oberfläche aufzuschmelzen und es setzt ein lokales Verdampfen ein. Es steigt dabei die Absorption geringfügig an.

Bei Intensitäten in der Größenordnung von einigen 10^6 W/cm^2 bildet sich ein Dampfkanaal (Dampfkapillare bzw. auch „key hole“ genannt) aus, der in etwa einen Durchmesser in der Größe des fokussierten Laserstrahles hat. In diesem Fall wird ein großer Teil der einfallenden Strahlung absorbiert. Wenn es einmal gelungen ist, den Zustand mit ausgebildeter Dampfkapillare zu erreichen, so spielen die Wellenlänge, die Oberflächenbeschaffenheit und die Werkstoffeigenschaften nur mehr eine geringere Rolle in Bezug auf die Absorption. Hierbei soll auch erwähnt werden, dass die Wellenlänge einen direkten Einfluss auf den erreichbaren Durchmesser des fokussierten Strahles hat.

Wenn man nun die Intensität noch weiter auf Werte zwischen 10^7 W/cm^2 bis 10^8 W/cm^2 steigert, so beginnt immer mehr Material zu verdampfen. In Folge dessen strömt mehr Metalldampf aus der Kapillare aus und es beginnt sich das über der Werkstückoberfläche

3 Verfahrensgrundlagen

3.1 Abtragen mit dem Laser

Formabtragen bezeichnet die Herstellung von dreidimensionalen Geometrien (Vertiefungen) in einem Werkstück. Ein Formabtrag kann durch verschiedene physikalische Mechanismen und Verfahrensvarianten erzielt werden [17]. Eine allgemeine Beschreibung zum Abtragen mit Laserstrahlung findet man in der

Definition Laserstrahlabtragen nach DIN 32540 [4]

Thermisches Abtragen mit Laserstrahl ist Fertigen durch Abtrennen von Stoffteilchen im festen, flüssigen oder dampfförmigen Zustand von einem festen Körper durch wärmeinduzierte Prozesse. Die an der Wirkstelle erforderliche Wärme entsteht durch Energieumsetzung beim Auftreffen und Eindringen eines Laserstrahles auf bzw. in das Werkstück. Zusätzliche Prozesswärme kann durch Oxidationsvorgänge entstehen. Das Abtragen bezieht sich sowohl auf das Entfernen von Werkstoffschichten als auch auf das Abtrennen von Werkstückeilen.

Eine genauere Eingrenzung für das hier verwendete Verfahren bietet die

Definition Laserstrahlformabtragen nach DIN 32450 [4]

Laserstrahlformabtragen ist das Abtrennen von Werkstoffteilchen zur gezielten Veränderung der vorhandenen Oberflächengestalt oder Geometrie eines Werkstücks.

3.1.1 Begriffsdefinitionen

Da aber derzeit keine verbindliche Normung existiert, sondern nur der Vornormentwurf bzgl. „Thermisches Abtragen mit dem Laserstrahl“, möchte ich in dieser Arbeit die folgenden Begriffsdefinitionen verwenden (in Anlehnung an [17]):

Schmelzabtragen: Der Abtrag erfolgt hauptsächlich durch Austreiben des schmelzflüssigen Materials durch ein Arbeitsmedium, in der Regel durch Gas. Es kann dabei auch zum Verdampfen des Werkstoffs kommen, welches aber für den Materialabtrag eine untergeordnete Rolle spielt. Neben der mechanischen Wirkung des Arbeitsmediums kann es auch durch seine inerte Wirkung die Werkstückoberfläche schützen oder mittels reaktiver Anteile die Energieeinbringung um ein Vielfaches erhöhen. Letzteres geschieht durch die ablaufende exotherme Reaktion wie auch

durch die Verbesserung der Absorption infolge der oxidierten Metalloberfläche. Zudem wird durch die Austrieb der Schmelze durch eine Änderung seiner physikalischen Eigenschaften unterstützt¹.

Sublimationsabtragen: Beim reinen Sublimationsabtragen erfolgt der Abtrag durch Verdampfen des Werkstoffs. Eine schmelzflüssige Phase bildet sich hierbei nicht aus. Auch beim indirekten Verdampfen über die Schmelzphase wird von einem Sublimationsabtrag gesprochen. Als Arbeitsmedium wird ein inertes Gas zum Schutz der Werkstückoberfläche bzw. der optischen Komponenten eingesetzt. Fallweise wird bei Metallen zur Unterstützung der Energieeinkopplung auch Sauerstoff als reaktives Gas verwendet.

Photoablation: Durch die hohe Quantenenergie von kurzwelliger Laserstrahlung werden molekulare Verbindungen direkt aufgebrochen. Das Werkstück wird thermisch nur geringfügig beeinflusst.

Laseroxidspanen: Der Abtrag erfolgt durch das Abheben einer oxidierten Werkstoffschicht in Form eines Spanes. Die oxidierte Schicht löst sich aufgrund thermisch induzierter mechanischer Eigenspannungen durch vergrößertes Volumen und hohen Temperaturgradienten selbstständig ab. Als Prozessgas wird Sauerstoff eingesetzt, welches unter geringem Druck coaxial zum Laserstrahl auf das Werkstück geleitet wird.

Laserstrahlschneidabtragen: Bezeichnet eine Verfahrensvariante des Schmelz- oder Sublimationsabtragens. Es werden dabei durch geeignete Anordnung von einen oder mehreren auf das Werkstück gerichteten Laserstrahlen konvergierende Kerben herausgeschnitten, welche die Entnahme von ganzen Geometrieelementen im festen Zustand ermöglichen.

Laserhobeln: Ist eine Verfahrensvariante des Schmelzabtragens. Der Abtrag erfolgt beim Laserhobeln² durch das Austreiben von schmelzflüssigem Material mit einem zur Werkstückoberfläche tangentialen Gasstrahl. Durch die off-axiale Anordnung der Düse muss der Bearbeitungspunkt an der Werkstückoberfläche im Schnittpunkt von Laserstrahl-Gasstrahl liegen.

¹Dies geschieht durch eine Verringerung der Viskosität und der Oberflächenspannung.

²Patent des Instituts für spanlose Fertigung und Hochleistungslasertechnik [22].

3.1.2 Detailliertere Beschreibungen

Beim *Schmelzabtragen* wird das Werkstück durch eine kontinuierliche oder gepulste Laserstrahlung an seiner Oberfläche jeweils in einem kleinen Bereich aufgeschmolzen (bzw. verdampft), und die entstehende Schmelze durch einen einwirkenden Gassstrahl ausgetrieben. Durch Verschieben des Werkstücks entweder in einer Ebene normal zur Laserstrahlung oder durch Drehung eines zylindersymmetrischen Werkstücks können nuten- und riefenförmige Vertiefungen an der Werkstückoberfläche erzeugt werden. Werden derartige Vertiefungen nebeneinander angeordnet und Schicht für Schicht aus dem Werkstück herausgearbeitet, ist auch die Herstellung von komplizierten dreidimensionalen Strukturen möglich. Die Breite und Tiefe einer einzelnen Nut hängt von der Vorschubgeschwindigkeit und von der Intensität der Laserstrahlung ab. Diese Parameter können leicht variiert werden und erlauben so eine hohe Flexibilität des Verfahrens.

Dagegen wird beim *Laserhobeln* (siehe Abbildung 3.1) ein zur Werkstückoberfläche tangentialer Gasstrahl verwendet, um eine möglichst hohe Scherspannung auf die Schmelze auszuüben.

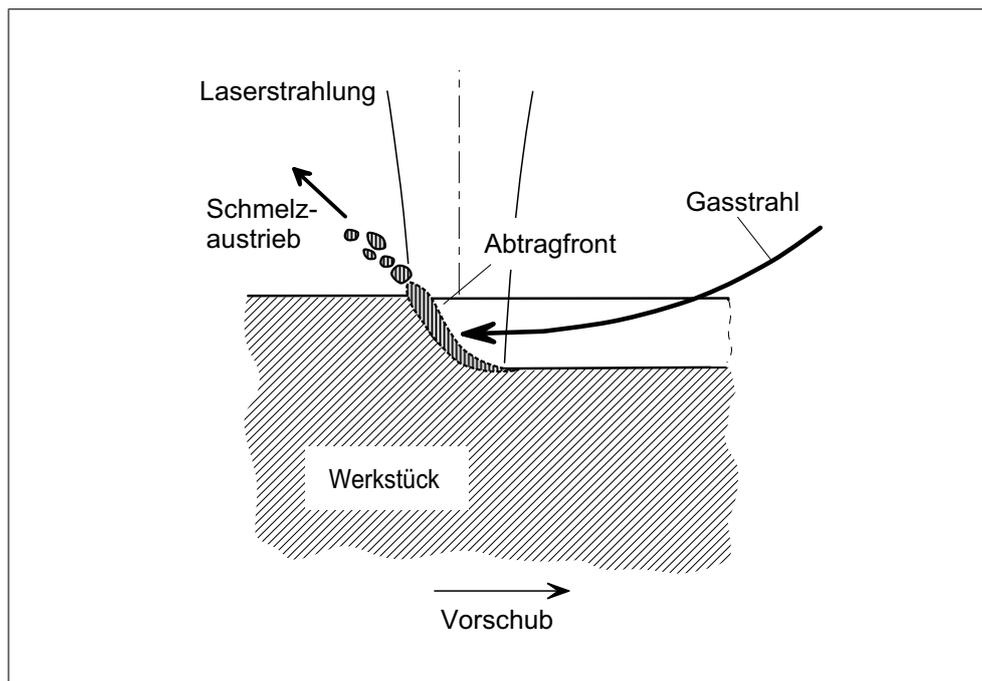


Abbildung 3.1: *Prinzip des Laserhobelns*

Eine entsprechende Vorrichtung wurde vom Institut für spanlose Fertigung und Hochleistungslasertechnik [22] zum Patent angemeldet. Der Vorteil dieser Anordnung liegt darin, dass höhere Abtragraten erzielt werden können, da sich kein Staupunkt der Gass-

trömung im Bereich der Wechselwirkungszone ausbilden kann. Zudem wäre es auch möglich, die gleiche Düse sowohl für das Abtragen als auch für die Pulverzuführung bei einer nachfolgenden Auftragsschweißung, z. B. für die Reparatur eines Risses in einer Druckgussform, zu verwenden. Nachteilig sind die Richtungsabhängigkeit und eine sinnvolle Verwendung eines seitlichen Gasstrahls nur bei einem optimalen Bearbeitungspunkt, welcher genau im Kreuzungspunkt des Gasstrahls mit dem Laserstrahl liegen sollte. Wird der Abstand zwischen Werkstück und Düse variiert, dann ändert sich auch die Effizienz der Gasströmung (siehe Unterabschnitt 4.1.4 auf S. 43).

Bei anderen Materialien wie Kunststoffen, Graphit oder Gummi erfolgt der Abtrag direkt durch **Sublimation** ohne einer Schmelzphase des Werkstoffs. Hierbei ist ein Gasstrahl nur zum Schutz der Fokussieroptik vonnöten bzw. verhindert ein Entflammen von entzündlichen Verdampfungsprodukten. Infolge der hier fehlenden Schmelze ist ein über der Laserleistung gut steuerbarer Abtragprozess erreichbar. Aus diesem Grund können, wie beim **Laserstrahlschneidabtragen** [2], ganze Blöcke aus dem vollen Material herausgeschnitten werden (siehe Abbildung 3.2). Dieses Verfahren ist in Metallen derzeit nicht anwendbar, da das Herstellen von sehr tiefen und schmalen Nuten infolge der komplexen Schmelzdynamik nicht reproduzierbar gelingt.

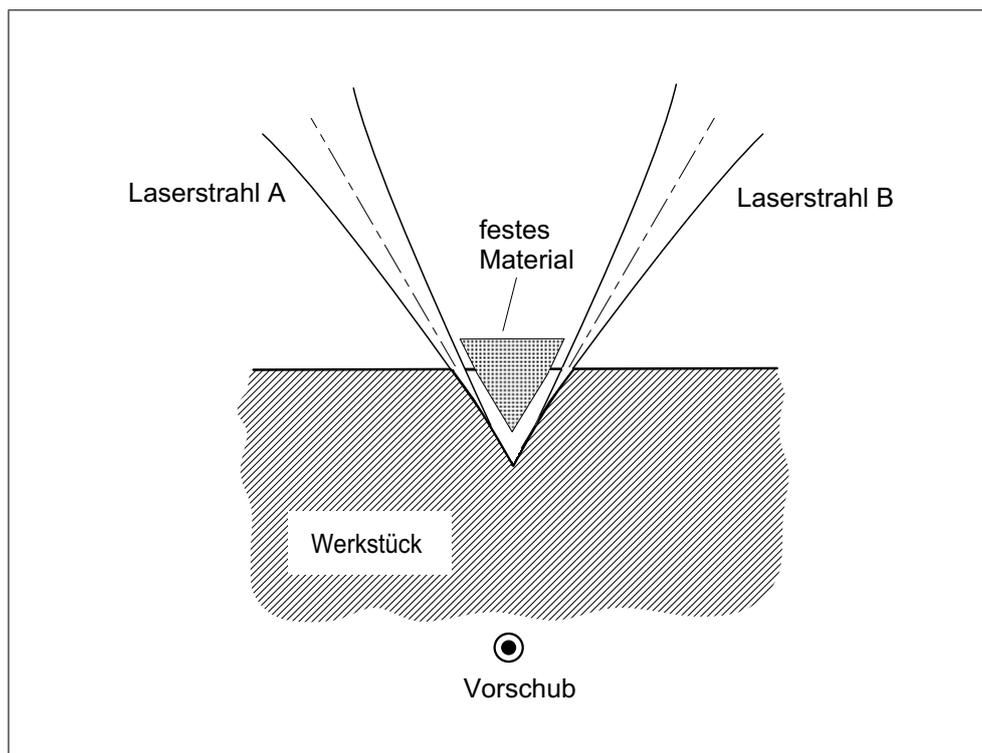


Abbildung 3.2: *Laserstrahlschneidabtragen*

Weiters ist bei Metallen mittels sehr hohen Spitzenintensitäten und kurzen Laserpulsen auch ein Abtrag durch Verdampfung möglich. Durch die dabei entstehende hohe Verdampfungsenergie der Metalle können nur geringe Abtragraten erzielt werden. Es soll hier auch noch einmal auf die bei Metallen erreichbaren höheren Prozesswirkungsgrade durch Verwendung von einem reaktiven Bearbeitungsgas wie z. B. Sauerstoff hingewiesen werden. Es wird dabei infolge der Oxidation eine exotherme Energie eingebracht und auch die Energieeinkopplung der Laserstrahlung verbessert. Bei Oxidschichten von einigen μm steigt die Absorption von ca. 10 % auf ca. 60 % bis 70 % an [17].

Beim **Laseroxidspanen** (siehe Abbildung 3.3) wird der Werkstoff in einer Sauerstoffatmosphäre oxidiert und der verbrannte Werkstoff hebt sich in der Form eines Spanes vom Material ab [5]. Bei diesem Verfahren erreicht man zwar nur geringe Abtragraten, es ist aber wesentlich stabiler als der Schmelzabtrag. Dadurch können Bauteile mit einer höheren Oberflächenqualität und einer besseren Formreproduzierbarkeit hergestellt werden.

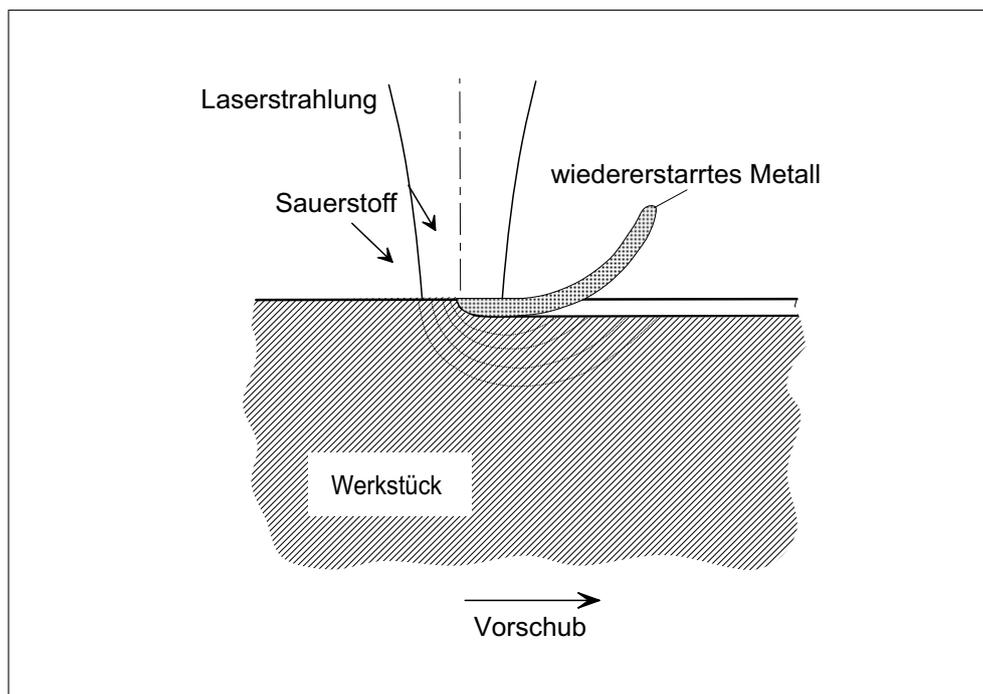


Abbildung 3.3: *Laserstrahloxidspanen*

Bei der **Photoablation** werden (z. B. mit dem Excimer-Laser¹ aufgrund seiner kurzwelligen Strahlung) durch eine sehr hohe Quantenenergie bei bestimmten Materialien chemische Verbindungen aufgebrochen.

¹Excimer ist ein Akronym aus der Wortfolge „excited dimer“.

3.2 Vorteile des Lasers

Die Laserstrahlung hat mehrere charakteristische Merkmale, die für eine Materialbearbeitung von Vorteil sind. Im Folgenden möchte ich auf diese genauer eingehen:

berührungsloses Werkzeug: Die Bearbeitung mit dem Laserstrahlung erfolgt berührungsfrei. Es wird dabei weder das Werkzeug noch das Werkstück einer mechanischen Belastung ausgesetzt. Es wirken also keine Kräfte durch das Werkzeug auf das Bauteil ein und somit werden die Einspannvorrichtungen sowie die Antriebsachsen weniger belastet. Dadurch können kostengünstigere Führungssysteme für die Bearbeitung verwendet werden. Des weiteren ist hierbei die Laserstrahlung auch keiner Abnutzung unterworfen, es tritt also kein Werkzeugverschleiß auf.

präzises Werkzeug: Durch die Kohärenz der Laserstrahlung ergibt sich eine Positioniergenauigkeit im Bereich der Wellenlänge. Mit dieser fokussierten Laserstrahlung können, je nach Strahlquelle, sehr kleine Werkzeugradien (bei CO₂-Laser ca. 60 µm) erzeugt werden. Auch aufgrund der guten Steuerbarkeit der Prozesse und der Laserquelle in Verbindung mit einem CNC gesteuerten Koordinatentisch können Teile mit einer hohen Präzision gefertigt werden.

beliebige Umgebung: Laserstrahlung durchdringt ohne wesentliche Schwächung Luft und andere Gase¹. Die Bearbeitung kann daher in jeder gewünschten Atmosphäre (oxidierend, inert) oder im Vakuum stattfinden. Darüber hinaus ist es sogar möglich abgekapselte Werkstücke durch das Hüllmaterial hindurch bearbeiten zu können, wenn dieses für die Laserstrahlung der gegebenen Wellenlänge transparent ist.

geringe Wärmeeinflusszone: Aufgrund der extrem hohen und genau lokalisierten Leistungsdichten kommt es beim Werkstoff zu einer sehr kurzen und ausschließlichen Behandlung der zu bearbeitenden Stelle. Die Wärmeeinbringung in das Material ist sehr gering. Es kommt also zu einer niedrigen thermischen Belastung außerhalb der zu bearbeitenden Stelle, die wärmebeeinflusste Zone hat damit eine geringe geometrische Ausdehnung. Dies führt zu einer verminderten Veränderung der Werkstoffeigenschaften in der Nähe der Bearbeitungsstelle gegenüber vielen anderen konkurrierenden Verfahren.

hohe Flexibilität: Die Laserstrahlung kann mit Spiegeln und Linsen nahezu beliebig abgelenkt und fokussiert werden. Dies ermöglicht die Einhaltung eines großen Arbeitsabstandes und eine Bearbeitung auch an schwer zugänglichen Stellen. Zudem entfallen der Werkzeugwechsel und Werkzeugbau, da durch ein verändern der Verfahrensparameter das Werkzeug Laserstrahl in einem weiten Bereich verändert

¹Hierbei sei aber auch die hauptsächlich beim Schweißen mit CO₂-Laser auftretende Plasmaabschirmung (sog. „plasma shielding“) erwähnt [6].

werden kann. Man kann ihn ohne Veränderungen an den Maschinenbauteilen sowohl zum „Schruppen“ als auch zum darauffolgenden „Schlichten“ einsetzen. Es besteht auch die Möglichkeit mittels Strahlteiler die Laserstrahlung in mehrere Teilbündel aufzuspalten um verschiedene Stellen gleichzeitig zu bearbeiten. Ein weiterer Vorteil besteht auch in der Verwendbarkeit (abhängig von der Laserquelle) von flexiblen Lichtleitfasern. Die heutigen Laseranlagen sind auch mit geringem Aufwand mit anderen Fertigungsverfahren kombinierbar (entweder unterstützend oder arbeitsteilend).

gute Reproduzierbarkeit: Da die Materialbearbeitung mit Laseranlagen grundsätzlich CNC gesteuert ist, ist die Einhaltung von engen Fertigungstoleranzen gewährleistet. Somit ergibt sich eine gleichbleibende Qualität und eine hohe Reproduzierbarkeit.

hohe Wirtschaftlichkeit: In einer großen Anzahl der Fälle arbeitet der Laser wirtschaftlicher als konkurrierende konventionelle Fertigungsverfahren. Die hohe Flexibilität und die hohen Bearbeitungsgeschwindigkeiten mit den daraus resultierenden niedrigen Taktzeiten bieten wirtschaftliche Vorteile in Kombination mit möglichen technologischen Verbesserungen gegenüber anderen Verfahren. Diese können durch die Verwendung mehrerer Bearbeitungsstationen mit nur einer Laserquelle noch drastisch erhöht werden.

Diesen grundlegenden Vorteilen der Lasermaterialbearbeitung stehen teilweise die folgenden nachteiligen charakteristischen Merkmale gegenüber:

- relativ hohe Investitionskosten
- bei manchen Verfahren noch geringe Bearbeitungsgeschwindigkeiten
- besondere Berücksichtigung der Sicherheit durch die Laserstrahlung bzw. seiner durch Reflexion entstehenden Streustrahlung
- durch den geringen Wirkungsgrad der Laserstrahlerzeugung (5 bis 20 %)

Genauere Erläuterungen zu diesen Problemen werden im nachfolgenden Abschnitt 3.3 besprochen.

3.3 Vergleich Laser mit konventionellen Abtragverfahren

In diesem Abschnitt wird mehr auf die das Abtragen betreffenden Bearbeitungsverfahren eingegangen. Laut DIN 8590 [3] zählt der Formabtrag mit Laserstrahlung (Photoablation ausgenommen) zu den thermischen Abtragverfahren und ist eine Untergruppe der Trennverfahren. Die laserabtragenden Verfahren stehen dabei in direkter Konkurrenz mit den konventionellen Fertigungsverfahren.

In Bezug auf die erreichbare Abtragsrate in niedriglegiertem Stahl soll die folgende Abbildung 3.4 als Vergleich für verschiedene gebräuchliche Verfahren dienen.

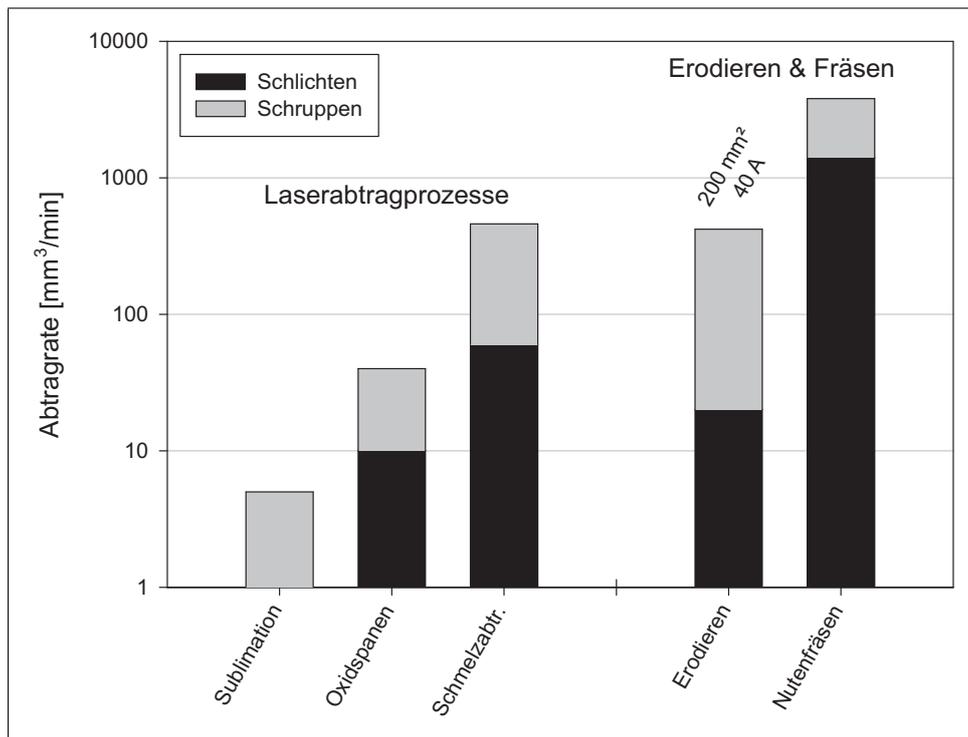


Abbildung 3.4: Abtragsraten unterschiedlicher Verfahren

Dieser Vergleich [17] soll als Anhaltspunkt für die erzielbaren Abtragsraten dienen. Man erkennt sofort, dass das Fräsen bezüglich den anderen Bearbeitungsverfahren eine hohe Überlegenheit aufweist. Die hier dargestellten Werte hängen sehr wesentlich von den Maschinenkonfigurationen ab. So wurde z. B. für die Abschätzung der maximalen Abtragsrate beim Nutenfräsen ein Ti(CN)-beschichteter Hochleistungsfräser mit 4mm Durchmesser, zwei Zähnen und einer Schnittgeschwindigkeit von 60 m/min herangezogen (die Standzeit eines solchen Fräasers beträgt aber laut Hersteller bei diesen Schnittgeschwindigkeiten nur mehr 90 min [13]). Für den Schrubbabtrag mittels Erodieren wird eine Stromstärke von 40 A bei einer Gesenkfläche von 200 mm² angenommen (aus der Betriebsanleitung der Fa. Deckel Multiform [12]).

Um eine genaue Beurteilung der einzelnen Verfahren durchführen zu können muss man sich auf einen konkreten Anwendungsfall beziehen. Ein solcher Vergleich hängt maßgeblich von den folgenden Parametern ab:

- Werkstoff
- Genauigkeit und Reproduzierbarkeit
- Abtragsrate und Flexibilität
- Bedienerfreundlichkeit
- Steuerbarkeit und Automatisierbarkeit
- Investitions- und Betriebskosten¹
- Zuverlässigkeit und Service (Verfügbarkeit)
- Umweltverträglichkeit

Ich möchte hier nur die konventionellen Verfahren betreffend der Metallbearbeitung näher betrachten und deren Stärken und Schwächen gegenüberstellen.

3.3.1 Zerspanende Bearbeitung

Die in der Industrie am häufigsten verwendeten formgebenden Fertigungsverfahren sind das Drehen und das Fräsen. Die für die Bearbeitung von Druckgussformen wichtigere Variante ist das Fräsen. Es können dabei auch Freiformflächen erzeugt werden, da die Schnittbewegung senkrecht bzw. schräg zur Drehachse des Werkzeugs verlaufen kann. Sehr hohe Abtragsraten werden im Bereich der Hochgeschwindigkeits-Zerspanung (dem sog. HSC²) erreicht. Durch die hohen Umdrehungszahlen mittels der Verwendung von Hochgeschwindigkeitsspindeln (Drehzahlen von über 50.000 min^{-1} sind bereits realisiert) werden dementsprechend sehr hohe Arbeitsvorschübe erzielt, welche zu verbesserten Zerspanungsverhältnissen führen. Dadurch können Freiformflächen mit einer hohen Genauigkeit und einer ausgezeichneten Oberflächenqualität generiert werden [8].

Eine weitere wichtige Entwicklung ist die des Hartfräsens. Hierbei werden gehärtete Stahlwerkstoffe mit geometrisch bestimmter Schneide endbearbeitet. Damit entfällt eine Nachbearbeitung der Werkstücke infolge des Verzugs beim Härten. Die erreichten gemittelten Rauhtiefen von $R_z < 3\text{-}5 \mu\text{m}$ können auch eine Substitution des Schleifens ermöglichen [16].

¹Diese sind im Wesentlichen von der Stückzahl abhängig.

²HSC steht für **H**igh-**S**peed-**C**utting.

Vorteile gegenüber dem Laserstrahlabtragen:

Diese Verfahren ermöglichen im Schruppbetrieb sehr große Zerspanungsleistungen. Mit der darauffolgenden Schlichtbearbeitung können sehr hohe Maß- bzw. Formgenauigkeiten und eine exzellente Oberflächengüte erreicht werden. Weiters sind diese Bearbeitungsprozesse einfach zu handhaben und bereits weitgehend ausgereift.

Die Zerspanleistung hängt beim Fräsen stark vom Durchmesser des Fräasers ab. Damit kann das Laserabtragen bezüglich der Abtragrates nur im Bereich kleiner Fräsdurchmesser mit dem Fräsen mithalten (siehe Abbildung 3.4). Es ist somit das Laserstrahlabtragen keine direkte Konkurrenz zu den spanabhebenden Verfahren.

Das Formabtragen mit dem Laser stellt erst bei Werkstücken, die nicht oder nur mit erheblichem Aufwand durch konventionelle Verfahren zu fertigen sind, eine wirtschaftliche Lösung dar.

Nachteile gegenüber dem Laserstrahlabtragen:

Der generelle Nachteil der spanenden Bearbeitungsverfahren ist der immer auftretende Werkzeugverschleiß, der besonders bei der Bearbeitung von sehr harten Werkstoffen noch erheblich an Bedeutung gewinnt.

Hochgeschwindigkeitsfräsanlagen erfordern große Investitionskosten, da die dabei verwendeten hohen Vorschubgeschwindigkeiten (25 bis 35 m/min) auch erhebliche Anforderungen an die Bahnsteuerung stellen, um die geforderten Konturgenauigkeiten einhalten zu können. Dies bedingt wiederum Anlagen mit entsprechenden Antriebsleistungen.

Dem gegenüber wirken bei der Bearbeitung mit dem Laser keine zusätzlichen Kräfte durch das Werkzeug auf das Bauteil und es tritt in weiterer Folge auch kein Werkzeugverschleiß auf. Des Weiteren ist die Programmierung von komplexen dreidimensionalen Werkstückgeometrien beim herkömmlichen Fräsen aufgrund der Kollisionsgefahr und der Berücksichtigung der Drehrichtung schwieriger als bei den berührungslos arbeitenden Verfahren wie dem Laserstrahlabtragen¹.

Zusammenfassend ergeben sich für den Formabtrag mittels Laser folgende sinnvoll einsetzbare Anwendungen, bei denen es mit einer spanenden Bearbeitung konkurrieren kann:

- Bearbeitung von schwer- bzw. nichtspanbaren Werkstoffen
- Herstellung von sehr feinen Konturen
- Einbindung als Teilprozess²
- Fertigung von kleinen, sehr komplexen Geometrien

¹Wobei für die spanende Bearbeitung bereits eine große Anzahl hervorragender Softwarepakete existieren, wie z. B. CATIATM, die die Programmierung solcher Anlagen erheblich erleichtern.

²Z. B. die Integration des Laserstrahlabtragens zum Ausfüllen von Spritzgussformen als Teilprozess des Gesenkreparaturvorganges.

Es ist also eine teilweise Substitution der zerspanenden Bearbeitung durch das Laserstrahlabtragen vorstellbar.

3.3.2 Funkenerosives Abtragen

Die Funkenerosion, kurz EDM¹ genannt, beruht auf dem durch elektrische Entladungsvorgänge zwischen zwei Elektroden (Werkstück- und Werkzeugelektrode) unter einem Arbeitsmedium hervorgerufenen Abtragen von elektrisch leitenden Werkstoffen zum Zwecke der Bearbeitung. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass dieses Abtragen durch räumlich und zeitlich voneinander getrennte, nicht stationäre Entladungen (Funken) verursacht wird [10].

Dabei bildet das Werkstück die Kathode und die formgebende Elektrode die Anode. Bei einem zu geringen Abstand zwischen dem Werkstück und der Elektrode kommt es zum Überschreiten der Durchschlagfestigkeit des Arbeitsmediums (einer dielektrischen Flüssigkeit) und zur Bildung eines Plasmakanals. Die dadurch erzeugte Wärme führt zum Aufschmelzen bzw. Verdampfen des Metalls. Die Kathode nimmt die kinetische und potentielle Energie der Ionen auf, die Anode gewinnt dabei die Energie aus der kinetischen und potentiellen Energie der Elektronen. Durch die unterschiedlichen Massen von Ionen und Elektronen kommt es zu einem wesentlich stärkeren Abtrag am Werkstück als auf der Werkzeugelektrode (99.5 % der Erosion erfolgt am Werkstück).

Vorteile gegenüber dem Laserstrahlabtragen:

Der wichtigste Vorteil des Erodierens liegt in den verfahrensbedingt sehr hohen Oberflächenqualitäten der Werkstücke, welche durch das Laserstrahlabtragen nicht erreicht werden können. Vergleiche von Fertigungskosten und -zeiten haben jedoch gezeigt, dass für Gesenke mit keinem besonderen Anspruch auf die Oberflächenqualität, das Laserabtragen gegenüber dem Funkenerodieren durchaus konkurrenzfähig ist (z. B. [9]). Es ist jedoch bereits am Markt etabliert und es ist auch eine große Auswahl an Maschinen verfügbar.

Nachteile gegenüber dem Laserstrahlabtragen:

Dieses Verfahren ist nur für elektrisch leitende Materialien einsetzbar. Beim Senkerodieren muss durch das abbildende Formgebungsverfahren zuerst eine Elektrode hergestellt werden, die genau der Negativform des herzustellenden Werkstücks entspricht. Dies ist bei komplexen Bauteilen sehr aufwendig und daher kostenintensiv.

¹Electrical-Discharge-Machining.

3.3.3 Zusammenfassung

Es hat sich gezeigt, dass sich die Laserverfahren mit sehr leistungsfähigen und bereits lange am Markt befindlichen sowie stetig weiterentwickelten konventionellen Verfahren messen müssen. Aus diesem Grund wird es dem Laserstrahlabtragen nur in vereinzelten und bestimmten Anwendungen gelingen die herkömmlichen Bearbeitungsmethoden zu verdrängen. Die Laserbearbeitung bietet jedoch einige neue und faszinierende Möglichkeiten, wie z. B. den Vorteil einer verschleißfreien Bearbeitung, die erst in Weiterentwicklungen ihr ganzes Potential ausspielen werden können. Die Konkurrenzfähigkeit hängt von weiteren Prozessoptimierungen und den bei den Laserverfahren notwendigen Investitionskosten ab. In diesen Bereichen ist noch viel Potential vorhanden.

4 Versuchsaufbau

4.1 Bearbeitungsstation

Die folgende Abbildung 4.1 zeigt die Anordnung der Bearbeitungsstation mit der CNC-Verfahreinheit, bestehend aus dem 2-achsigen (X-Y-) Koordinatentisch und der senkrecht dazu auf einer Trägerkonstruktion montierten verfahrbaren (Z-) Achse.

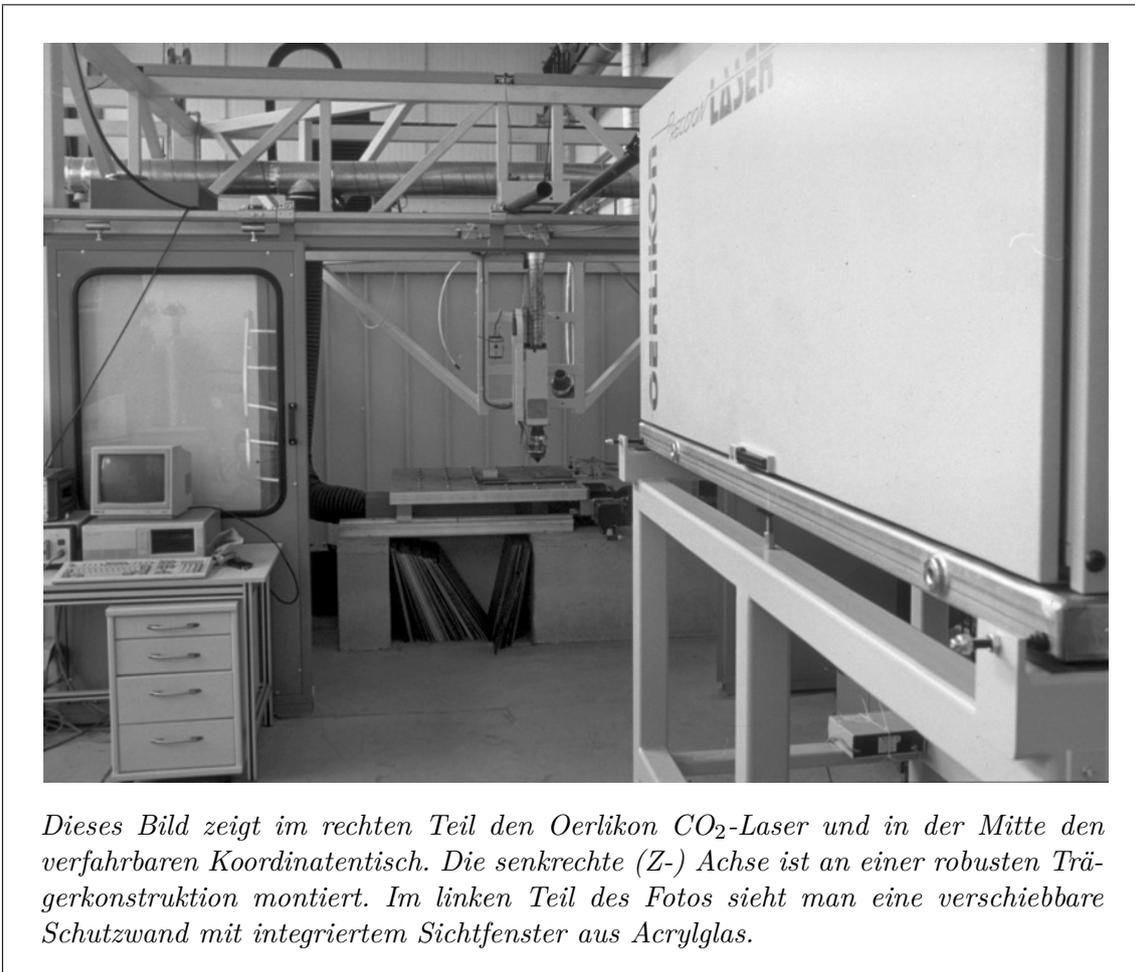


Abbildung 4.1: Ansicht der Bearbeitungsstation

Rechts im Bild ist noch der verwendete CO₂-Laser zu erkennen.

Die Anlage setzt sich zusammen aus:

- der Strahlquelle samt Strahlführungssystem
- der Verfahrereinheit mit der CNC-Steuerung
- dem Gasversorgungssystem

Wobei die Laserquelle aufgrund seiner Größe räumlich von der Bearbeitungszelle getrennt aufgestellt und mittels eines Strahlschutzrohres verbunden wurde. Zum Schutz des Bedienungspersonals wurde der Bearbeitungsbereich mit Schutzwänden umgeben und Sichtfenster aus Acrylglas integriert.

Um etwaige Fehlbedienungen zu vermeiden wurden Interlocks¹ in den Schiebetüren eingebaut, welche bei Aktivierung den Bearbeitungsprozess unmittelbar unterbrechen bzw. bereits den Start eines solchen verhindern. Dabei wird sowohl die Bewegung der Verfahranlage als auch ein Austritt von Laserstrahlung verhindert.

4.1.1 Strahlquelle und Strahlführungssystem

Als Quelle diente ein gleichspannungsangeregter, schnell längsgeströmter CO₂-Laser der Firma Oerlikon mit einer charakteristischen Wellenlänge von 10,6 μm (dargestellt in der Abbildung 4.2 auf der S. 33). Die maximale Nennleistung beträgt 2 kW im cw-Modus. Dieser Laser kann bis zu einer Pulsfrequenz von 5 kHz (Gated bzw. Normalpuls) betrieben werden. Dabei kann zwischen den folgenden Betriebsmodi unterschieden werden:

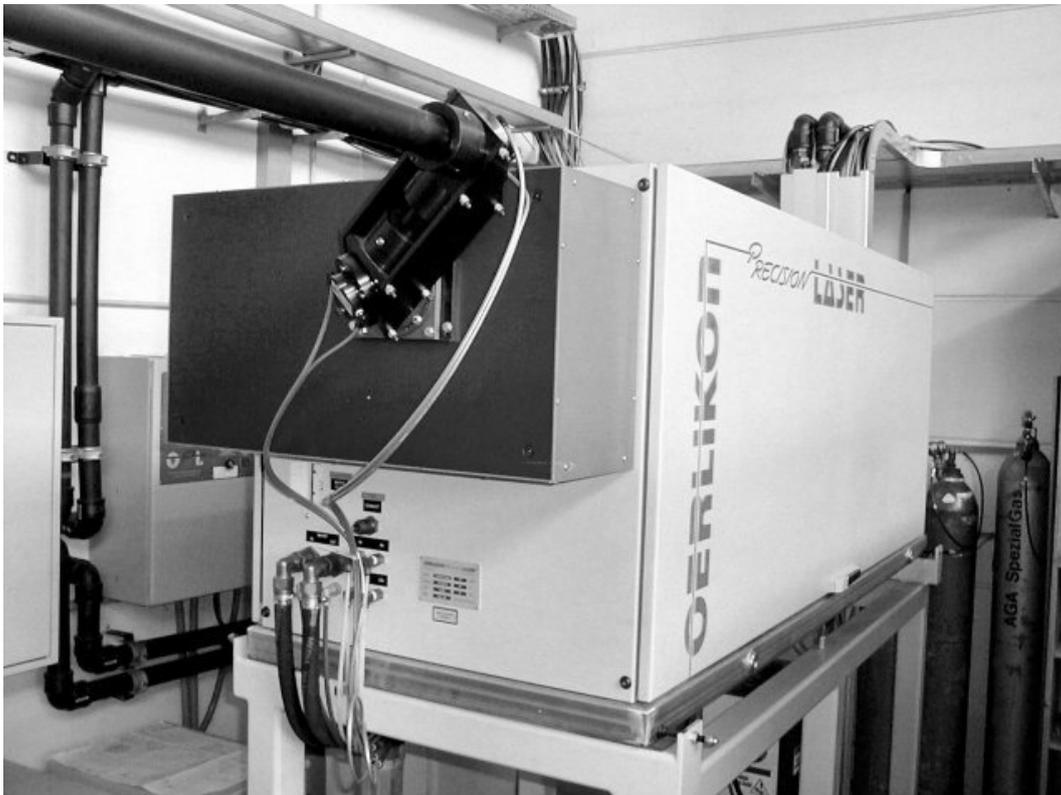
- cw-Modus (continuous wave)
- Puls-Modus
- Superpuls-Modus
- Hyperpuls-Modus

Die technischen Spezifikationen des verwendeten Lasergerätes sind in der Tabelle 4.2 auf der S. 34 aufgelistet.

Diese als Schneidlaser konzipierte Strahlquelle eignet sich aufgrund seiner Strahleigenschaften ausgezeichnet für die Anforderungen bezüglich des Abtragens von verschiedenen Materialien, vor allem für Gesenke im Formenbau. Aufgrund seiner Resonatorkonzeption (längsgeströmt) bildet sich eine als Gaußstrahlung bezeichnete Laserstrahlung aus. Er arbeitet damit im sogenannten Grundmode, der auch als TEM₀₀² bezeichnet wird.

¹Auch als Verriegelungsschalter bezeichnet.

²Transversaler **E**lektromagnetischer **M**ode.



Hier sieht man den verwendeten CO_2 -Laser der Firma Oerlikon. Rechts im Hintergrund stehen die Gasflaschen zur Bereitstellung des Lasergasgemisches. Weiters kann man auch die Depolarisationseinheit am Strahlausgang des Lasers sowie einen Teil des Strahlenschutzrohres erkennen. In der rechteckigen Box zwischen Depolarisationseinheit und Laser befinden sich der Shutter^a. Ebenso wurde darin der HeNe-Justierlaser untergebracht.

^aAuch als Verschluss bezeichnet. Geschlossen unterbricht er den Strahlengang des Lasers und es gelangt keine Strahlung zum Bearbeitungskopf.

Abbildung 4.2: Ansicht des verwendeten CO_2 -Lasers

Das Strahlführungssystem besteht aus fixen Spiegeln und als letztes Bauteil beinhaltet es noch eine Fokussierlinse, die im Bearbeitungskopf untergebracht ist. Diese Hochdruckschneidlinse aus Zinkselenid (als Meniskuslinse gefertigt) hat eine Brennweite von 5 Zoll und ist mittels einer Antireflektionsbeschichtung entspiegelt.

Um einen größeren Abstand zwischen Linse und Werkstück zu erreichen habe ich die 5 Zoll Linse in einen 2,5 Zoll Linsenhalter eingesetzt. Zinkselenidlinsen bieten einen sehr

Technische Daten	
Wellenlänge	10.6 μm
Garantierte Leistung	2000 W im cw-Modus
Leistungsstabilität	$\pm 0.5\%$ des Nennwertes über 24 h
Gütefaktoren	M2=2.2; K=0.45
Polarisation	vertikal, linear
Richtungsstabilität	0.2 mrad/24 h
Rohstrahldurchmesser (Laser-Austritt)	15 mm
Divergenz (vollständiger Winkel)	2 mrad
Gepulste Betriebsarten	
Gated (Frequenz, Anstiegszeit)	50-5000 Hz, 30 μs
Superpulse (Frequenz, Anstiegszeit)	50-2000 Hz, 30 μs
Maximale Spitzenleistung	3800 W
Hyperpulse [®] (Frequenz, Anstiegszeit)	50-2000 Hz, 30 μs
Maximale Spitzenleistung	3300 W

Tabelle 4.2: Technische Daten des Oerlikon OPL 2000 [14]

hohen Transmissionsgrad¹ und haben außerdem den Vorteil der Transparenz für das rote Licht des Justierlasers², der aufgrund der unsichtbaren Strahlung des CO₂-Lasers für das Einstellen des Bearbeitungspunktes unverzichtbar ist.

Zusätzlich ist noch eine Depolarisationseinheit³ im Strahlengang implementiert worden (gut sichtbar in der Abbildung 4.2). Diese wandelt mittels eines $\lambda/4$ -Spiegels⁴ einen linear polarisierten Laserstrahl in einen zirkularpolarisierten um. Dadurch erhält man zwar eine niedrigere Absorption als bei linearpolarisiertem Licht, dafür ist man nicht mehr von der Bearbeitungsrichtung abhängig.

Des Weiteren wurde noch ein von mir gefertigter *Crossjet* (siehe Abbildung 4.3 auf S. 35) in den vorhandenen Bearbeitungskopf integriert. Dieses Bauteil dient zum Schutz der Fokussierlinse vor dem aus der Bearbeitungszone auszublasenden geschmolzenen Material und ist unbedingt für eine längere Lebensdauer der Linse notwendig.

Normalerweise wird in der Lasermaterialbearbeitung der Prozessgasstrahl über Atmosphärendruck coaxial mit dem Laserstrahl durch eine Düse im Bearbeitungskopf geführt. Durch diesen Gasstrahl wird die Linse, vor allem bei höheren Drücken, sehr effektiv vor Verunreinigungen geschützt. Da beim Laserhobeln aber eine seitliche Düse für den Materialantrieb verwendet wird ist die Fokussierlinse ungeschützt. Den Versuchsaufbau

¹Transmissionsgrad ist das Verhältnis von eingekoppelter zu ausgekoppelter Leistung.

²Üblicherweise werden HeNe-Laser aufgrund ihres gut sichtbaren roten Lichtes (fokussierter roter Laserspot) für diese Aufgabe verwendet.

³Auch Zirkularpolarisator bzw. Phase Retarder genannt.

⁴Dieser erzeugt eine Phasenverschiebung um $\pi/2$.

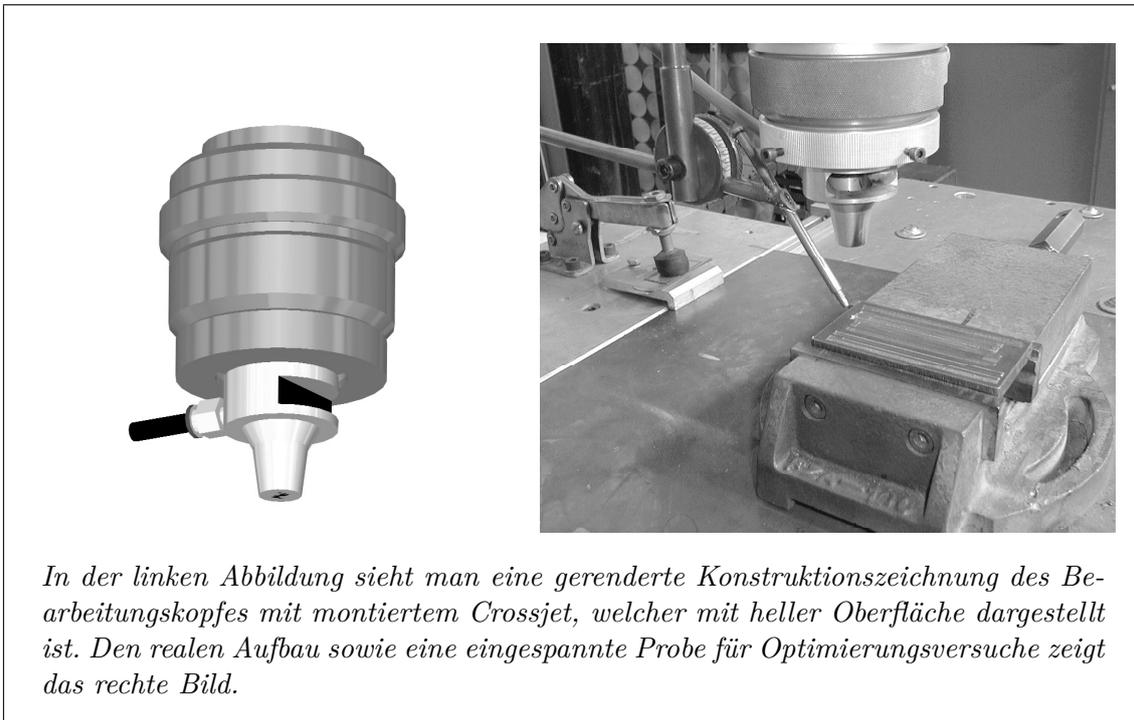


Abbildung 4.3: Crossjet zum Schutz der Fokussierlinse

rund um die Bearbeitungsstelle zeigt die Abbildung 4.4 auf der S. 36.

Man erkennt hier vor allem sehr gut die seitlich angebrachte Düse für den Prozessgassstrahl sowie den Sitz des Manometers für die Druckmessung. Verschlimmernd kommt noch hinzu, dass die Öffnung im Bearbeitungskopf aufgrund eines größeren Durchmessers des Laserstrahles beim Austritt um ein vielfaches größer ist als z.B. beim Schneiden. Dies lässt sich wegen eines für den Prozess notwendigen hohen Abstandes (bedingt durch die Verwendung einer großen Brennweite¹) zwischen Bearbeitungskopf und Werkstück leider nicht umgehen.

Ein zusätzliches Problem stellen auch noch die annähernd senkrechten Kanten (bzw. steilen Seitenbegrenzungen) des Gesenkes dar. Dort wird das ausgetriebene Material während der Bearbeitung annähernd senkrecht nach oben bzw. direkt in Richtung der Fokussierlinse abgelenkt. Um all dies zu verhindern wird beim verwendeten Crossjet ein konzentrierter Pressluftstrahl unter hohem Druck quer zur Ausbreitungsrichtung des Laserstrahl eingesetzt. Es wird dadurch eine Verunreinigung der Linse erfolgreich verhindert.

¹Um bei komplexen Formen eine bessere Zugänglichkeit des Laserstrahles zum Bearbeitungspunkt zu erreichen.



Dieses Bild zeigt den Aufbau rund um die Bearbeitungsstelle. Links oben wurde die Absaugung montiert. Hier erkennt man auch sehr gut die abgewinkelte Prozessgasdüse und die Anbringung des Manometers für die Messung des Gasdruckes.

Abbildung 4.4: Aufbau rund um die Bearbeitungsstelle

4.1.2 Verwendete Düsen

In der folgenden Abbildung 4.5 sind die von mir aus Kupferrohren gefertigten und beim Laserhobeln eingesetzten Prozessgasdüsen sowie auch der für die Justage benötigte Düsenhalter dargestellt.

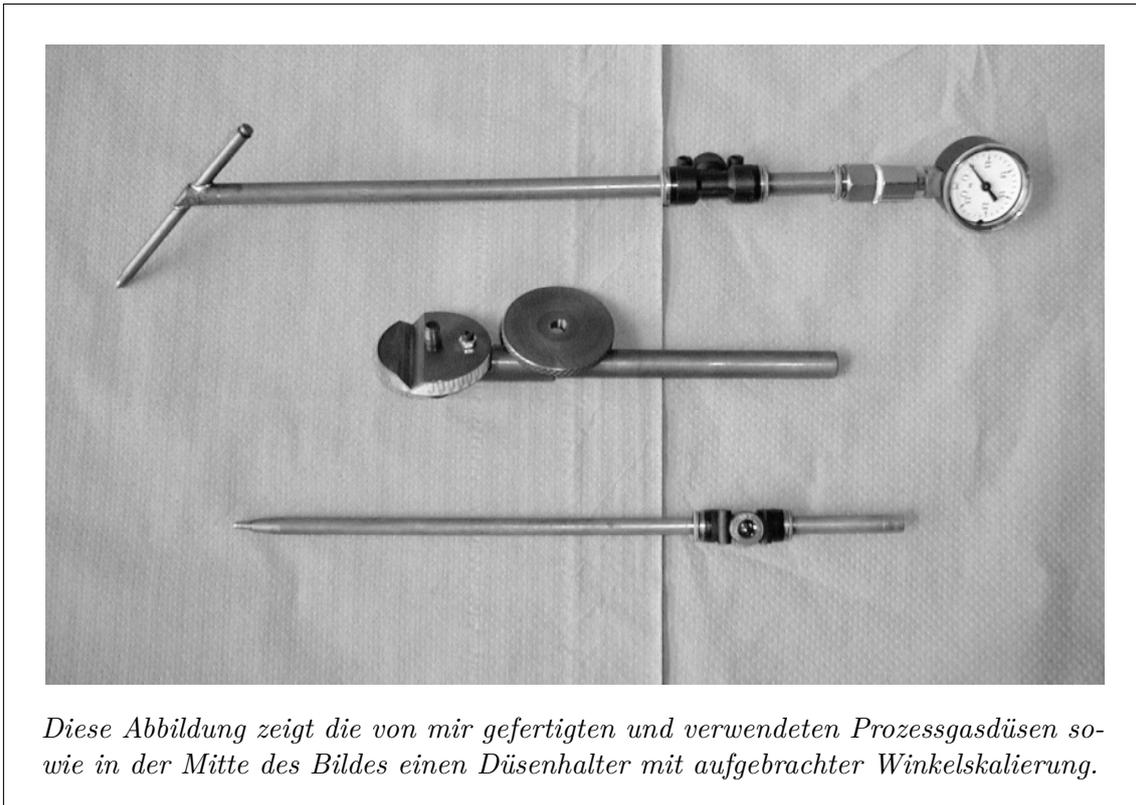


Abbildung 4.5: Die verwendeten Prozessgasdüsen sowie ein Düsenhalter

Die im Bild unten gezeigte gerade Düse diente hauptsächlich für Grundlagenversuche. Für die Reparatur an den Druckgussformen war jedoch zur Gewährleistung einer guten Zugänglichkeit zu der Bearbeitungsstelle eine verbesserte Düsengeometrie vonnöten (siehe obere Prozessgasdüse in der Abbildung 4.5).

Die Justage der auf dem Bearbeitungskopf montierten Düse erfolgte mittels einer Sichtkontrolle durch das hintere Ende der Düse bei der geraden Form bzw. eines Blickes durch den vorderen abgewinkelten Teil der optimierten Prozessgasdüse. Dabei musste der durch den roten Brennfleck des He-Ne-Positionierlasers angezeigte Bearbeitungspunkt in den Mittelpunkt der Düsenöffnung justiert werden. Aufgrund dessen musste jedoch bei der letztgenannten Form noch ein zusätzlicher geschraubter Verschluss, der mittels O-Ring abgedichtet wurde, gefertigt werden. Nach dem Einrichten der Düse wur-

de am hinteren Ende ein Manometer zur Kontrolle des eingestellten Prozessgasdruckes angebracht.

In der Mitte des Bildes (in Abbildung 4.5 auf der S. 37) sieht man die verwendete Halterung für die Düsen. Diese wurde an dem unteren Ende, an dem die Düse angebracht war, mit einer Winkelskalierung versehen. Hier konnte man den optimalen Winkel für die jeweilige Prozessgasdüse einstellen (genauer dazu im Abschnitt 5.8 auf S. 71, insbesondere in der Abbildung 5.14 auf S. 72). Um eine genaue Justage der Düse zu erreichen, habe ich den Düsenhalter am anderen Ende in einen zweiachsigen Linearverstelltisch mit Mikrometerschrauben eingespannt. Man musste beim Justieren aber auch beachten, dass der Abstand der Düse zum Werkstück eingehalten wurde.

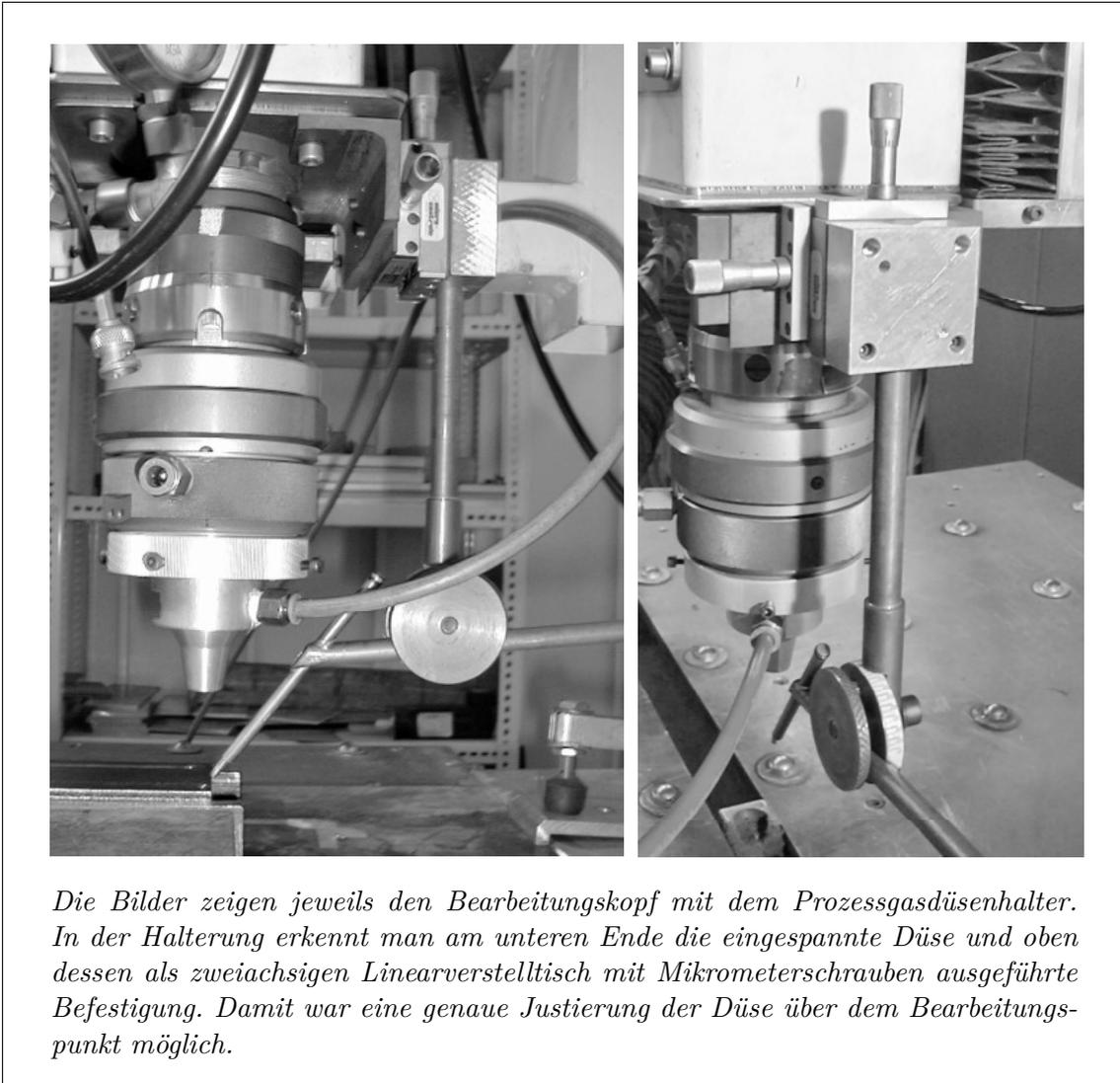


Abbildung 4.6: Ansicht des Prozessgasdüsenhalters und des zweiachsigen Linearverstelltisches

4.1.3 Verfahrenheit und Steuerung

4.1.3.1 Verfahrenheit

Als Verfahrenheit diente ein 2-achsiger (X-Y-) Koordinatentisch mit einer darauf montierten senkrechten (Z-) Achse, welche von einer CNC-Steuerung angesprochen wurden. Der Großteil der Versuche fand mit einer Steuerung von der Firma SCHLEICHER statt. Die letzten Ergebnisse, sowie einen Großteil der bearbeiteten Druckgussformen, erlangte ich mit der CNC-Einheit NUM 1050 von der Firma NUM-Güttinger (siehe Abbildung 4.7 auf der S. 41).

4.1.3.2 Steuerung

Die neue Steuerung wurde als Baukastensystem eingekauft und zu einem Großteil von meiner Person in die bestehende Verfahranlage integriert und an deren Gegebenheiten angepasst. Dies waren z. B. die Belegung der Ein- und Ausgänge für die Verknüpfung des Lasers mit der SPS¹, Einbau von Hardware-Endschalter für alle Achsen sowie die Erstellung eines neuen Postprozessors.

Ein Postprozessor ist eine Art Übersetzungsprogramm und sorgt für das Erstellen eines NC-Programms im korrekten Format für die jeweilige Maschinen-Steuerung aus vorhandenen Geometrie- (des Werkstücks) und Maschinendaten (hier des Werkzeugs Laser) sowie zur Steuerung weiterer prozessrelevanter Geräte (z. B. der Magnetventile für die Gasversorgung). Es gibt zwar eine DIN/ISO-Norm für NC-Programme (mit sogenannten G-Codes), leider werden aber in der Praxis bei fast allen Steuerungen mehr oder weniger unterschiedliche Formate verwendet. In meinem Fall war leider der Unterschied zwischen den beiden CNC-Systemen sehr groß, welches einen völligen Neuaufbau des Postprozessors nach sich zog. Mit diesem war es aber dann möglich aus CAD-Zeichnungen und einem speziellen Programm² mittels Konturverfolgung eine automatische Generierung des CNC-Programmkodes zu erreichen.

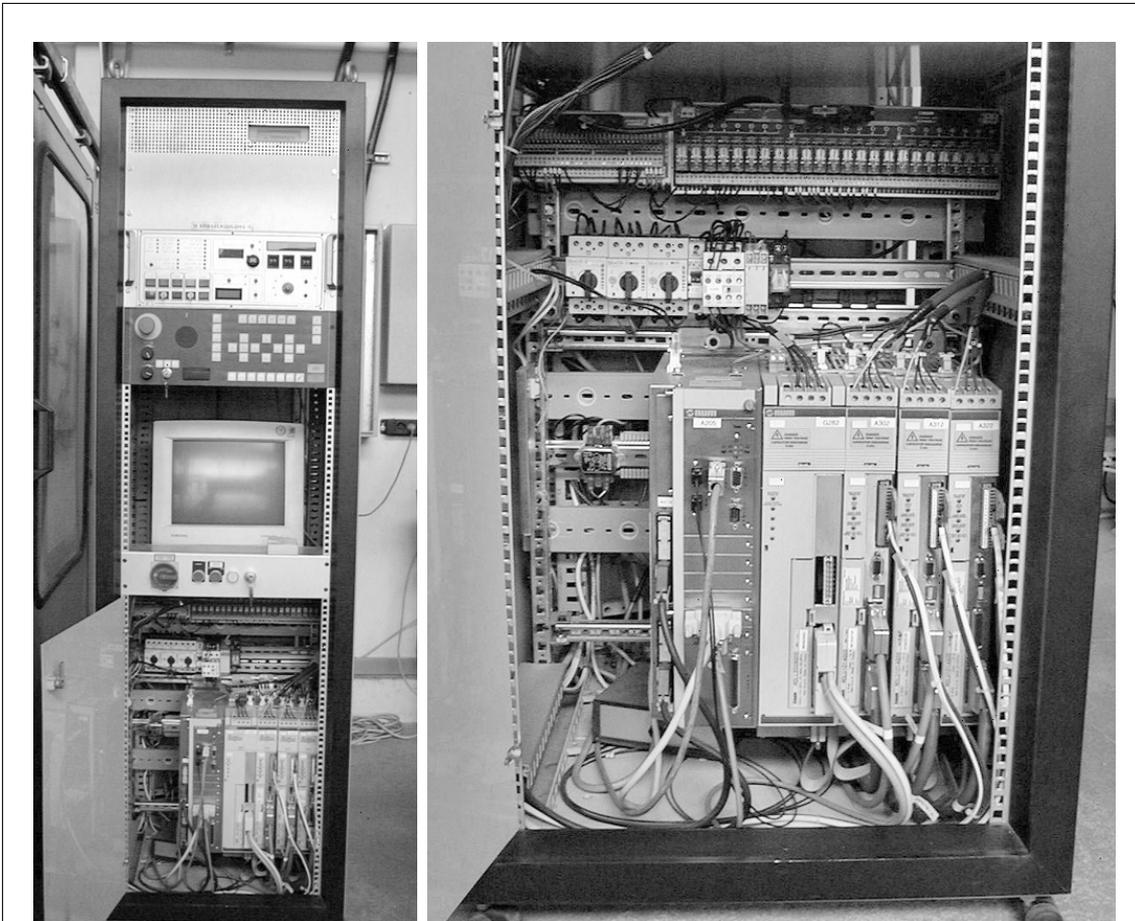
Bei der vorliegenden Anordnung wurde das Werkstück bewegt, wobei der auf der Z-Achse angebrachte Schneidkopf pro Abtragsschicht (bzw. Layer) still stand. Wenn tiefere Fugen - als die durch die Qualitätsvorgaben ermöglichbare Layerdicke - benötigt werden, erreicht man dieses durch einen Abtrag von mehreren Schichten hintereinander. Genaueres erläutere ich im Abschnitt 6.2 auf der S. 85.

Die maximal möglichen Verfahrswege der einzelnen Achsen betragen:

- in x-Richtung 800 mm
- in y-Richtung 500 mm
- in z-Richtung 300 mm

¹Steht für **S**peicher**p**rogrammierbare **S**teuerung.

²Filou-CNC99 von der Firma FILOU Software GmbH.



In der linken Abbildung sieht man einen 19 Zoll Schaltschrank mit von unten beginnend: eingebauter CNC-Einheit NUM 1050, Monitor für das PC-MMI, das Maschinenbedienpult für die CNC, gleich darüber das Laserbedienfeld sowie den abschließend hinter einem Lüftungsgitter befindlichen PC für die CNC-Programme und den Steuerungsdaten. Im rechten Bild ist noch einmal die CNC-Einheit vergrößert dargestellt. Von links zuerst das Basissteuerungsgerät (mit darin befindlicher CNC, SPS und MMI samt deren Speichermodulen sowie den Schnittstellen zur Peripherie), dann das Netzteil für die darauffolgenden drei Achsverstärkereinheiten. Im obersten Teil des rechten Bildes erkennt man noch links das Schnittstellenmodul für 32 Eingänge und rechts davon ein Schnittstellenmodul für 24 Ausgänge.

Abbildung 4.7: Laserpanel mit Steuerungseinheit

Die größtmögliche Auflösung der Steuerung beträgt $1\ \mu\text{m}$ und sie erreicht eine maximale Verfahrgeschwindigkeit von $20\ \text{m}/\text{min}$ in X- bzw. Y-Richtung. Die verwendete Software zur Achssteuerung stammt ebenfalls von der Firma NUM-Güttinger, die eingesetzten Programme lauten NUM HMI¹, NUM Edit-Part-Tool² (EditPP), NUM PLCTool³ und NUM SETTool⁴. Eine übliche Bedienperson der Laseranlage kommt aber normalerweise nur mit dem PC-Bedienpanel HMI in Kontakt (siehe Abbildung A.1 im Anhang auf der S. 94).

Es wurde hier am Institut aus Gründen der Flexibilität sowie aus Kostensicht die Variante eines PC-Bedienpanels gewählt. Andere Möglichkeiten über diverse Kompaktbedienfelder mit integrierten Monitoren wären doch deutlich teurer gewesen. Diesbezüglich waren zu Beginn noch die eingeschränkten Zugriffsmöglichkeiten auf verschiedene Parameter ein Problem, welches jedoch mit fortlaufenden Softwareupdates beseitigt wurde. Die Inbetriebnahme war zu Beginn der Integration der neuen Steuerung aber nur über ein bereitgestelltes Kompaktbedienfeld möglich. Ausführlichere Informationen bezüglich der verwendeten Software und deren Funktionen habe ich im Anhang in Abschnitt A.2 auf der S. 94 zusammengestellt. Mit einer solchen Steuerung besteht die Möglichkeit die wichtigsten Maschinenparameter in das CNC-Programm aufzunehmen und mittels der SPS - über die jeweiligen Aus- bzw. Eingänge - anzusprechen.

Als Nachteil muss hier noch das Fehlen einer angepassten Leistungsregelung erwähnt werden. Deren Einsatz macht es möglich die Streckenenergie (siehe folgende Gleichung 4.1) konstant zu halten und damit den Einfluss des Beschleunigens und Abbremsens zu verhindern.

$$E_s = \frac{P_m}{v_s} \quad (4.1)$$

E_s	Streckenenergie [J/m]
P_m	mittlere Laserleistung [W]
v_s	Geschwindigkeit [m/s]

Um dies trotz fehlender Regelung zu erreichen wurde versucht den Laserstrahl erst nach dem Beschleunigen einzuschalten bzw. vor dem Abbremsen auszuschalten, also ein sogenanntes „Überschießen“ anzuwenden. Eine genauere Erläuterung dazu findet man im Abschnitt 5.2 auf 53.

¹Human-Machine-Interface, die eigentliche Oberfläche für die Bedienung der CNC-Steuerung.

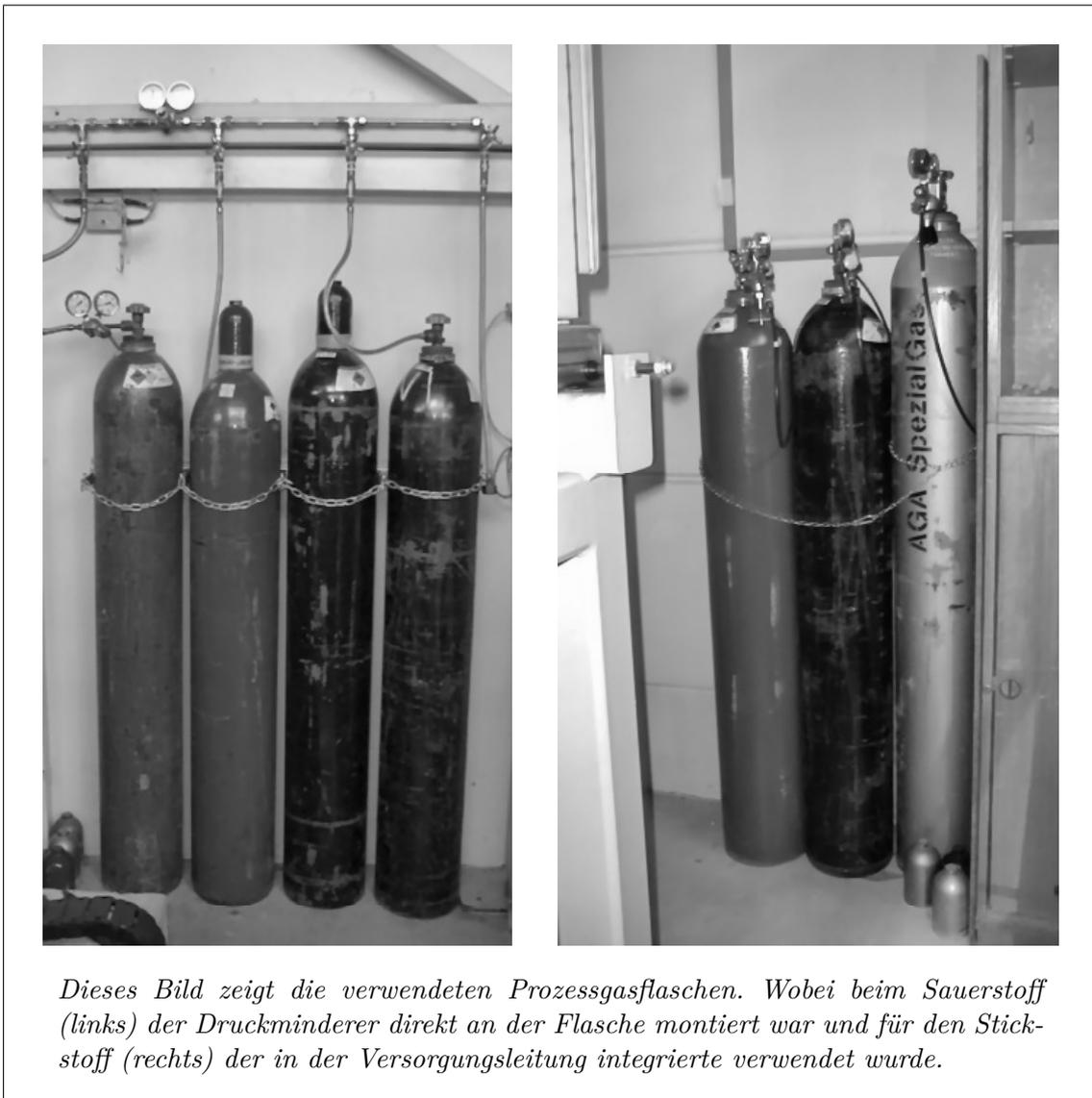
²Software für die Programmverwaltung und Kommunikation zwischen PC der SPS.

³Software zur Programmierung der Automatisationsfunktionen der CNC-Steuerung.

⁴Software zur Integration der Maschinenparameter.

4.1.4 Gasversorgungssystem

Gase werden sowohl für die Funktion des Lasers benötigt als auch zur Herstellung der Abtragproben herangezogen. Für den Betrieb der von mir verwendeten Strahlquelle werden die für CO₂-Laser üblichen Gase CO₂, He und N₂ benötigt. Als Prozessgase kamen Pressluft, N₂ und O₂ sowie deren Gemische zur Anwendung. Weiters habe ich auch noch Pressluft für den Crossjet verwendet. Alle von mir verbrauchten Gase (ausgenommen der Pressluft) wurden aus den üblich erhältlichen Gasflaschen entnommen (siehe dazu in der Abbildung 4.8).



Dieses Bild zeigt die verwendeten Prozessgasflaschen. Wobei beim Sauerstoff (links) der Druckminderer direkt an der Flasche montiert war und für den Stickstoff (rechts) der in der Versorgungsleitung integrierte verwendet wurde.

Abbildung 4.8: Anordnung der Prozessgasflaschen

Man muss hierbei aber auf die verschiedenen erhältlichen Reinheiten der Gase achten und zwischen Lasergasen und Prozessgasen unterscheiden. Für den Betrieb des Lasers werden Gase mit höherem Reinheitsgrad (oft auch als Lasergase bezeichnet) verwendet. Als Prozessgase werden schlechtere Qualitäten herangezogen, welche auch deutlich billiger sind als Gase mit hoher Reinheit.

Wie üblich wurde bereits bei den Gasflaschen mittels eines Druckminderers der Flaschendruck von in etwa 200 bar auf ca. 15 bar erniedrigt und zu verstellbaren Ventilen geleitet, mit welchem der jeweils benötigte Prozessgasdruck exakt eingestellt werden konnte.

Von dort aus wurden die verschiedenen Gasströme zu den Magnetventilen geführt. Diese Ventile kann man sowohl manuell als auch über die Steuerungseinheit (mittels sogenannter Maschinenparameter im CNC-Programm) betätigen.

4.2 Messgeräte

4.2.1 Strahlvermessung

Um die Strahlparameter des verwendeten Lasers ermitteln zu können, wurde das Laserstrahl-Diagnostiksystem Laserscope UFF 100 der Firma Prometec eingesetzt (dargestellt in der Abbildung 4.9).

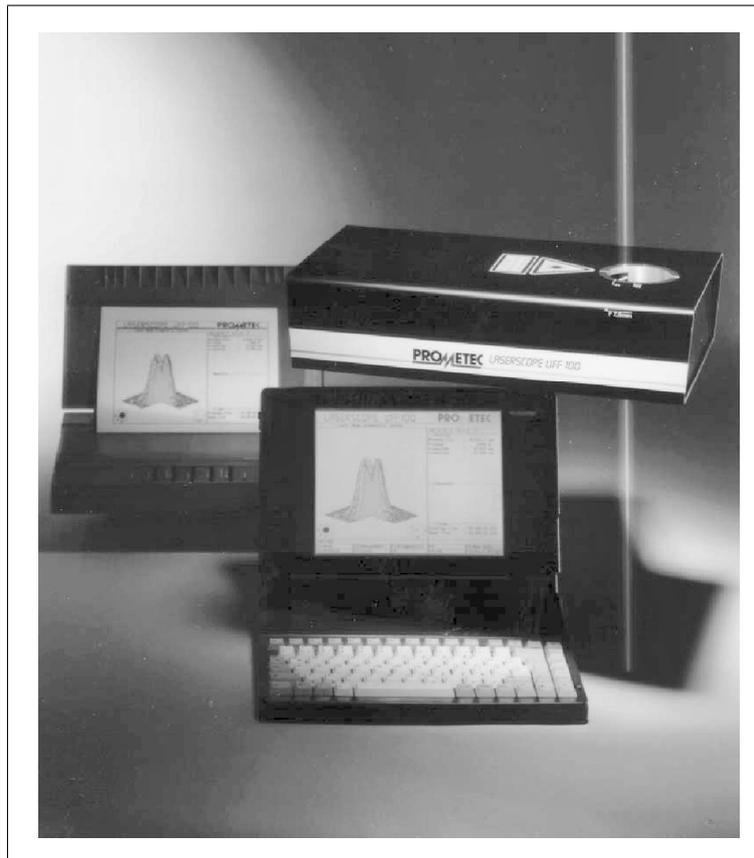


Abbildung 4.9: Laserstrahl-Diagnostiksystem Laserscope UFF 100 der Firma Prometec

Dieses System ist bestens geeignet für CO₂- und Nd:YAG-Laser, kann aber auch für andere energiereiche Strahlungen eingesetzt werden. Es ist sowohl für gepulste Laserstrahlung als auch für Messungen im Dauerstrichbetrieb (dem sog. cw-Modus) anwendbar. Dabei besteht die Möglichkeit, die gewünschte Laserstrahlung unfokussiert als auch fokusnah zu untersuchen (siehe dazu die folgende Abbildung 4.10 auf S.46). Bei fokussierter Strahlung darf man damit Leistungsdichten bis zu 10^7 W/cm^2 erreichen.

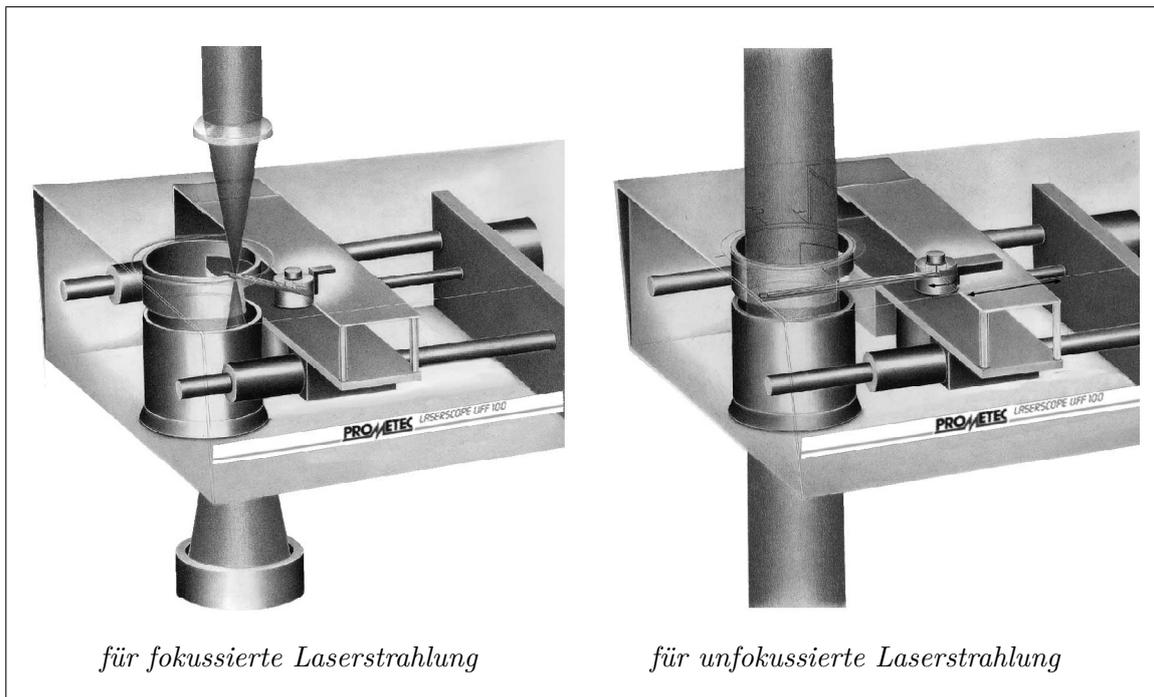


Abbildung 4.10: Darstellung des Messprinzips eines Laserscope UFF 100 für fokussierte und unfokussierte (Rohstrahl) Laserstrahlung

Die Strahlvermessung eines solchen Gerätes funktioniert folgendermaßen:

Eine Hohlneedle (siehe dazu die folgende Abbildung 4.11 auf S.47) rotiert durch den Strahl. Durch eine kleine - koaxial zum Laserstrahl angebrachte - Lochblende tritt Strahlung ein und wird über zwei spiegelnde schräge Flächen in einen auf der Drehachse des Rotationskopfs liegenden Detektor gelenkt. Zusätzlich wird mittels einer präzise gesteuerten Vorschubbewegung der Drehachse der gesamte Strahlquerschnitt von der Hohlneedle durchlaufen und entlang der Schnittlinien abgetastet.

Für die Diagnostik des fokussierten Strahls wird eine kurze schräg angestellte Nadel (wie in der Abbildung 4.11 auf S.47 ersichtlich) verwendet und alternativ dazu eine lange horizontale für die unfokussierte Strahlung. Durch einfaches Umstecken der Rotationsköpfe kann man rasch zwischen diesen beiden Messmöglichkeiten wechseln. Über einen PC können aus der Position der Blende und der gemessenen Intensität Werte $I(x, y)$ erfasst und in verschiedener Form (2- bzw. 3D) dargestellt werden. Eine typische Kaustik eines mit einer Fokussierlinse gebündelten Laserstrahls ist in Abbildung 4.12 auf S. 47 dargestellt.

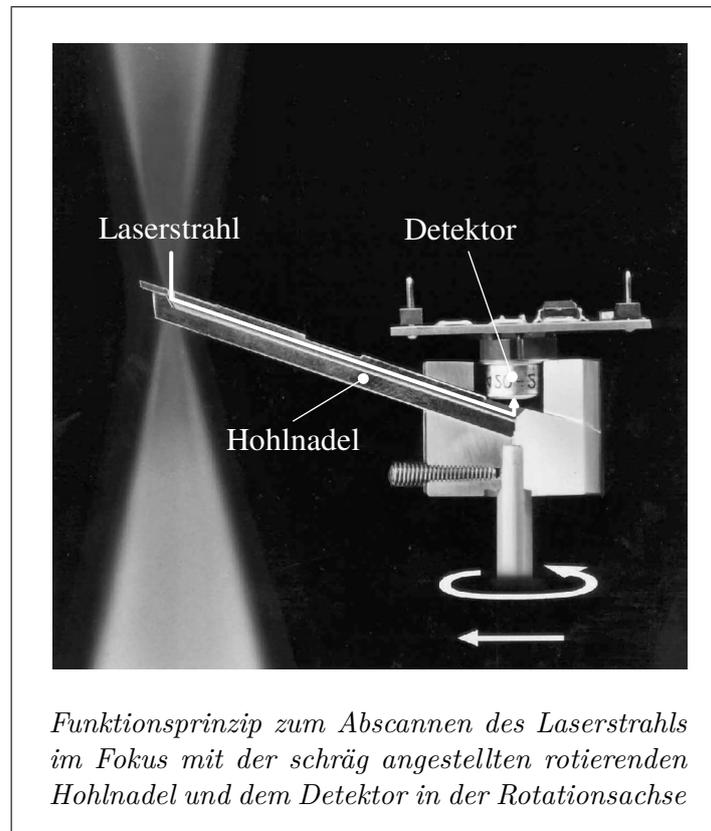


Abbildung 4.11: Darstellung eines Rotationskopfs mit Hohlnadel für Messung im Fokus

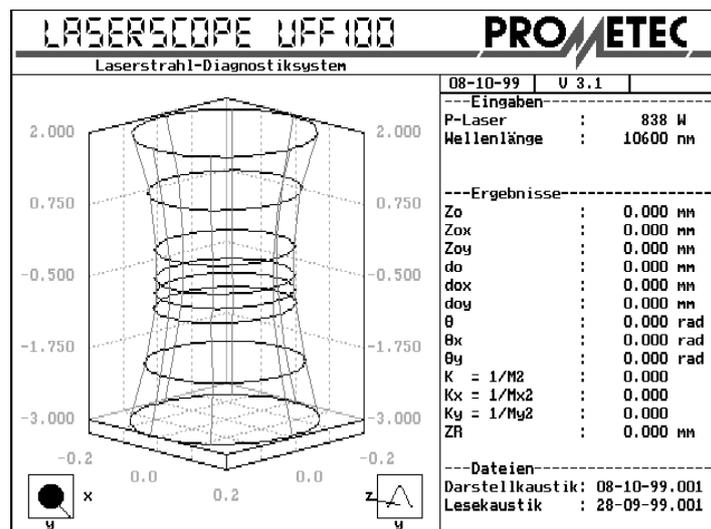


Abbildung 4.12: Kaustik der verwendeten Linse mit Darstellmodus 3D-Radius

Eine zweidimensionale Darstellung der Strahlentaille zeigt die folgende Abbildung 4.13.

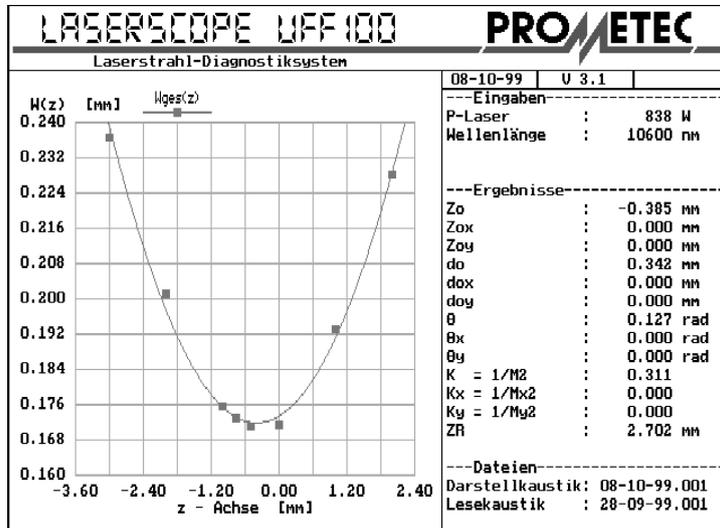


Abbildung 4.13: Strahlentaille in der Nähe des Fokus

Weiters kann man in der Abbildung 4.14 die 3-dimensionale Darstellung der Intensitätsverteilung einer mit einer Meniskuslinse fokussierten Laserstrahlung betrachten.

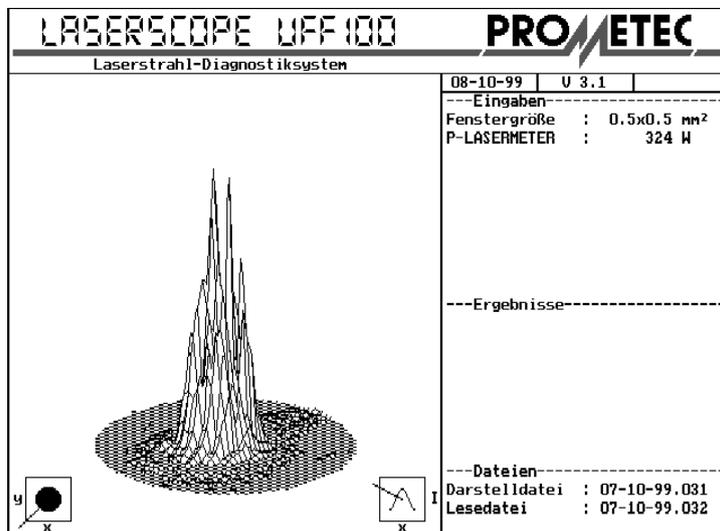


Abbildung 4.14: Intensitätsverteilung der verwendeten Linse

4.2.2 Leistungsmessgerät

Die Leistungsvermessung der Laserstrahlung erfolgte mit dem Leistungsmessgerät Powermeter, das ebenfalls wie das Strahlvermessungsgerät von der Firma Prometec stammt. Mit diesem Gerät dürfen CO₂-Laser bis zu einer maximal zulässigen Strahlleistung von 20 kW vermessen werden. Die Leistungsmessung erfolgt über die Messung der Erwärmung von Wasser. Dazu wird in einem wassergekühlten Strahlvernichter neben dem Wassermassenstrom die Wassertemperatur im Zulauf und im Ablauf gemessen. Mit der Temperaturdifferenz und dem Durchfluss kann leicht die Leistung ermittelt werden:

$$P = c_p \cdot \Delta T \cdot \dot{m} \quad (4.2)$$

P	angezeigte Laserleistung [W]
c_p	spezifische Wärmekapazität [J/kg K]
ΔT	Temperaturdifferenz [K]
\dot{m}	Massenstrom [kg/s]

Diese Art der Leistungsmessung ist sehr genau, reagiert jedoch eher träge auf Leistungsänderungen.

Die mit dem Messgerät erhaltenen Daten sind im Anhang A.3 aufgelistet. Es wurden die Kaustiken und Fokuslagen aller am Institut für diesen Laser verfügbaren Linsen und der Zusammenhang zwischen Laserstrom und Laserleistung aufgenommen.

Zur Kontrolle der erhaltenen Werte wurde die Strahlleistung auch mit einem „Knochen“ vermessen. Dies ist ein einfaches Messgerät, das für eine bestimmte Zeit (meist 10 oder 20 Sekunden) in den unfokussierten Strahl gehalten wird und dann auf einer Skala die Strahlleistung angibt. Es wird dabei ein Hohlkörper erwärmt und die Druckerhöhung des eingeschlossenen Gases gemessen, alternativ kann auch die Erwärmung direkt gemessen werden (elektrischer Knochen).

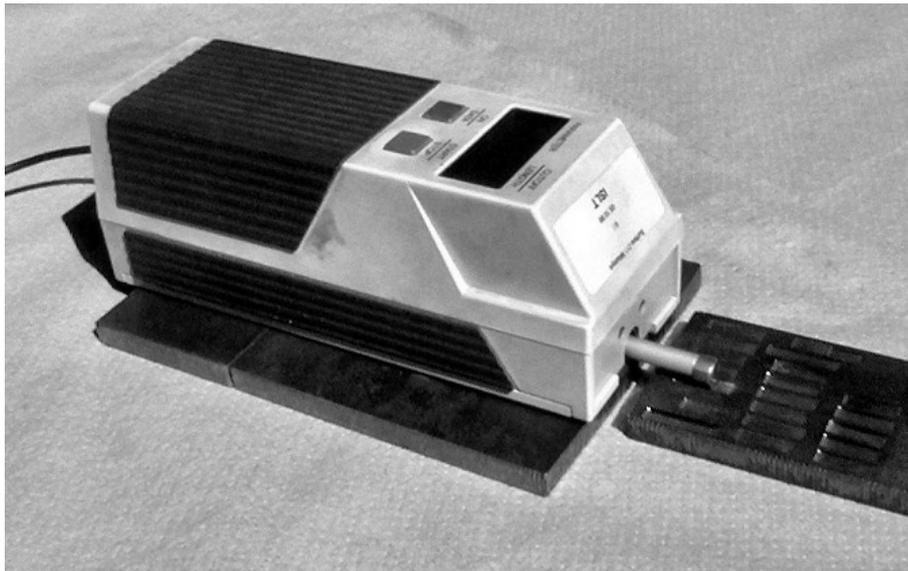
Die aus [18] stammenden technischen Daten des Powermeters können in Tabelle 4.3 abgelesen werden.

Messgenauigkeit	1% vom jeweiligen Messwert im Bereich bis 20 kW
Nullpunktsfehler	max. 6 W
Zeitkonstante für 90/98/99% des Messwertes	10/60/90 s
max. zulässige Strahlleistung	20 kW cw-Strahlung bei CO ₂ -Laser
max. zulässige Leistungsdichte	25 kW/cm ²
Apertur	70 mm, in Kombination mit UFF100 60 mm

Tabelle 4.3: Technische Daten des Leistungsmessgerätes [18]

4.2.3 Oberflächenrauheits-Messgerät

Um die Versuchsergebnisse miteinander vergleichen zu können, wurde die gemittelte Rauhtiefe R_z ermittelt. Dies erfolgte mit dem Rauheitsmessgerät Surftest 211 der Firma Mitutoyo. Dabei handelt es sich um ein portables Oberflächenrauheits-Messgerät (siehe die folgende Abbildung 4.15).



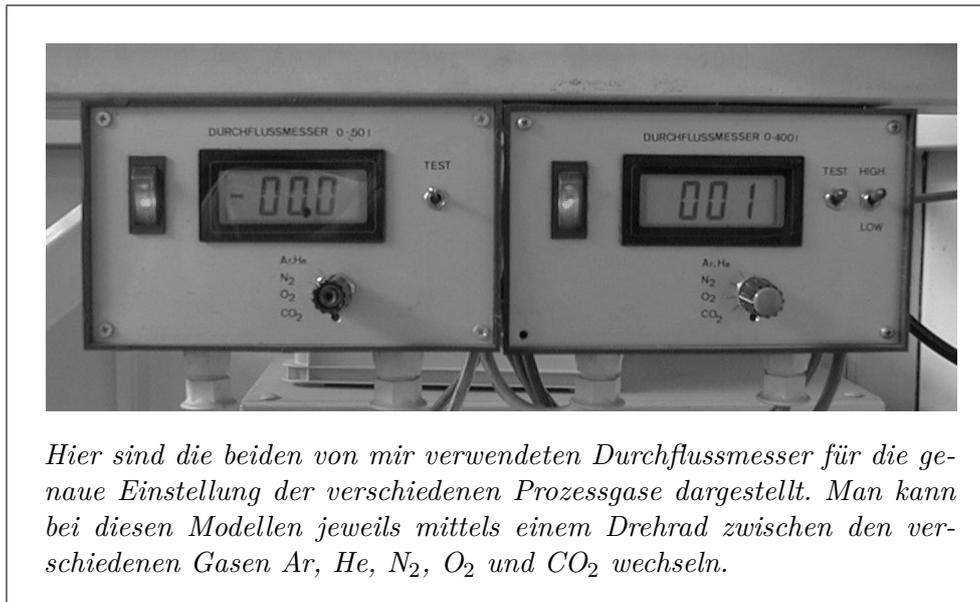
Dieses Bild zeigt das Oberflächenrauheitsprüfgerät Surftest-211 von Mitutoyo beim Vermessen der Rauhtiefe an der Oberfläche einer angefertigten Abtragprobe.

Abbildung 4.15: Das verwendete Oberflächenrauheitsprüfgerät

Die Aufnahme der Oberflächenstruktur erfolgte mit einer diamantbesetzten Spitze, die auf einem kleinen Hebel sitzt. Auf diesem Hebel befindet sich ein induktiver Sensor der die Winkelabweichungen des Hebels misst und somit ein Signal zur Berechnung des Rauheitswertes liefert. Das Gerät erlaubt Messungen mit einer Länge von bis zu 15 mm mit einer Geschwindigkeit von $0.5 \frac{mm}{s}$. Zur Kalibrierung des Gerätes wird ein im Lieferumfang enthaltenes Rauheitsnormal verwendet. Wenn hierbei der gemessene Rauheitswert nicht mit dem auf dem Normal befindlichen Wert übereinstimmt, so muss diese Differenz durch Verstellen des Verstärkers eliminiert werden.

4.2.4 Durchflußmessgerät

Für die Messung des Prozessgasdurchflusses verwendete ich zwei Durchflussmessgeräte mit digitaler Anzeige, die jeweils auf die verwendeten Gase (bevor diese vermischt wurden) eingestellt werden konnten. Diese beiden Messgeräte wurden hier am Institut gefertigt. Die dabei erzielten Durchflussraten kann man dabei in $\frac{l}{min}$ von der Digitalanzeige ablesen. Eine Darstellung dieser beiden Messgeräte zeigt die Abbildung 4.16.



Hier sind die beiden von mir verwendeten Durchflussmesser für die genaue Einstellung der verschiedenen Prozessgase dargestellt. Man kann bei diesen Modellen jeweils mittels einem Drehrad zwischen den verschiedenen Gasen Ar, He, N₂, O₂ und CO₂ wechseln.

Abbildung 4.16: Die verwendeten Durchflussmessgeräte

5 Versuchsdurchführung

5.1 Allgemein

Jegliche Laserbearbeitung beinhaltet eine große Anzahl zu berücksichtigender Verfahrens- und Prozessparameter. Diese kann man in Parametergruppen zusammenfassen [17]:

Werkstoff: Werkstoffart, Gefüge, Oberfläche

Geometrie: Gesenktiefe, Flächenwinkel, Bauteilgröße

Gaszufuhr: Düsengeometrie und -winkel, Zugänglichkeit

Strahlquelle: Wellenlänge, Strahlqualität, Pulsbarkeit, Polarisierung

Strahlformung: Linsenbrennweite, Fokusslage, Strahlaufweitung

Prozessregelung: Leistungsregelung, Stabilität, Tiefenmessung

Führungssystem: Beschleunigung, Genauigkeit, Lagefehler

Einstellparameter: Laserleistung, Vorschub, Pulsfrequenz

Wie man daraus leicht ersieht, gibt es für die Laserbearbeitung eine Vielzahl von Einflussfaktoren. Somit kann die Findung der optimalen Verfahrensparameter unter Umständen sehr aufwendig werden. Dabei bezeichnet man jene Parameter als Verfahrensparameter, die durch den Anwender direkt beeinflusst werden (wie z.B. Laserleistung oder Vorschub). Jene Größen, die sich durch die gewählten Verfahrensparameter in Abhängigkeit von den Materialparametern einstellen, werden als Prozessparameter bezeichnet (z. B. Temperaturverteilung oder der Winkel der Abtragfront).

Nun besteht, je nach dem erwünschten Bearbeitungsziel (Qualität, Geschwindigkeit), die Möglichkeit der Wahl verschiedener Einstellungen für die Verfahrensparameter. Aus diesem Grunde erscheint es als sinnvoll, zuerst prinzipielle Abhängigkeiten herauszufiltern und damit Grenzbereiche einzelner Parameter in Form von Prozessfenstern schematisch darzustellen. Dann kann man konkrete experimentelle Ergebnisse und ihre Besonderheiten diskutieren.

Von zentraler Bedeutung sind neben den *Laserparametern* und der *Vorschubgeschwindigkeit* noch das *Bearbeitungsgas* sowie die Art der *Prozessgaszufuhr*.

Als eines der wichtigsten Beurteilungskriterien für das Laserabtragen gilt die Abtragleite. Diese ergibt sich aus dem Produkt von der Vorschubgeschwindigkeit mit dem Versatz und der Abtragleite (siehe Gleichung 5.1).

$$V_w = v_s \cdot \Delta y \cdot \Delta a_t \quad (5.1)$$

V_w	Abtragleite [mm ³ /min]
v_s	Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]
Δy	Versatz [mm]
Δa_t	Abtragleite [mm]

5.2 Anlagenspezifische Einstellungen

Um mit einem Laser Flächen abtragen zu können, werden die Konturen in der Regel mäanderförmig - wie in der Abbildung 5.1 dargestellt - abgefahren. Damit man nun in den Voruntersuchungen vergleichbare Werte für die beim Laserstrahlabtragen erzielten Ergebnisse erhält, wurde dabei das Prinzip des „Überschießens“ angewandt. Hierbei wird der Laserstrahl erst nach dem Erreichen der eingestellten Geschwindigkeit aktiviert und vor dem Beginn des Abbremsvorganges wieder ausgeschaltet. Durch diese Einbeziehung der Beschleunigungs- und Verzögerungswegen werden eindeutige Werte für die Abtragleite sowie für die Streckenenergie sichergestellt.

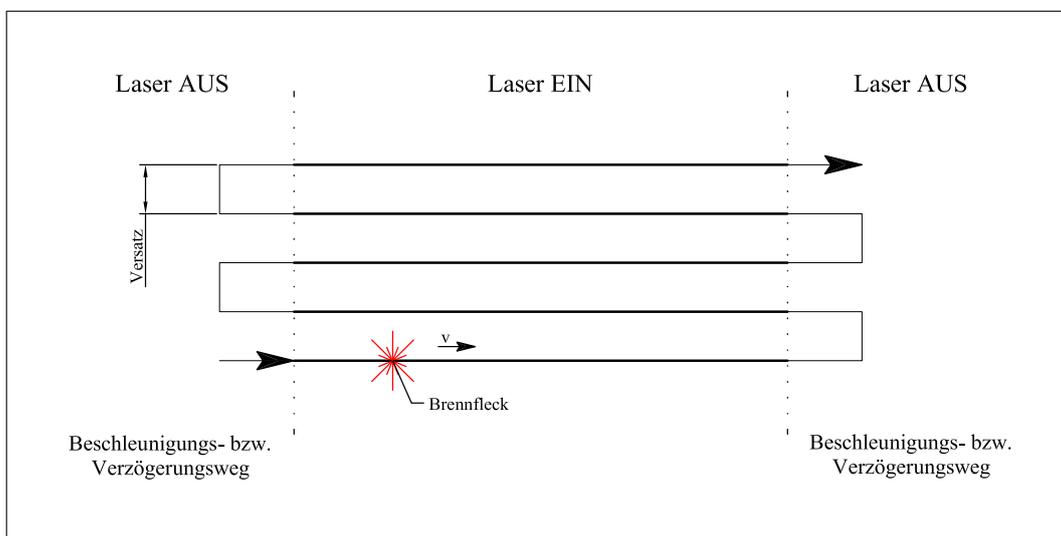


Abbildung 5.1: Bahnverlauf und das sog. „Überschießen“

Für das Laserhobeln konnten an der verwendeten Verfahrenanlage die einzelnen Spuren je-

doch nur unidirektional abgetragen werden, da aufgrund der stechenden Anordnung¹ der seitlichen Düse eine Richtungsabhängigkeit besteht und ein Drehen des Bearbeitungskopfes samt Düse in meinem Fall nicht möglich war (siehe Versuchsaufbau in Abbildung 4.4 auf S. 36).

5.3 Strahlparameter

Wenn man wie zuvor erwähnt ein passendes Parameterfenster für die Laserbearbeitung wählt, so ist die Abtragtiefe in Gesenken in weiten Bereichen über die Laserleistung variierbar. Es müssen dabei keine weiteren Verfahrensparameter mehr verändert werden. Bei Stahl zeigt die Abtragrates in Abhängigkeit von der Laserleistung eine deutliche untere Leistungsschwelle, die für das Aufschmelzen des Werkstoffs überschritten werden muss. Diese Schwellenenergie ist bei defokussierter Laserstrahlung infolge der geringen Leistungsdichte besonders hoch und kann bis zu einigen 100 W mittlerer Laserleistung betragen.

Beim Laserstrahlabtragen wird, zur Vermeidung von zu hohen Streckenenergien und damit entstehender Überhitzung mit darauffolgendem unkontrollierten Abbrand durch den beigemischten Sauerstoff in den meisten Fällen mit defokussierter Laserstrahlung gearbeitet. Oberhalb dieser Leistungsschwelle steigt die Abtragrates mit zunehmender Laserleistung stetig an. Die Krümmung der Kennlinie hängt vom gewählten Parameterfenster und auch von der gewählten Legierung ab.

Ein schematisches Beispiel eines solchen Prozessfensters für die Abtragrates in Abhängigkeit von der Laserleistung zeigt die Abbildung 5.2 [17] auf der S. 55. Im Diagramm sind auch die Auswirkungen der für die Grenzen des Fensters zuständigen Haupteinflussgrößen tendenziell eingetragen.

¹Dabei ist die Richtung der Prozessgasströmung entgegen der Vorschubrichtung.

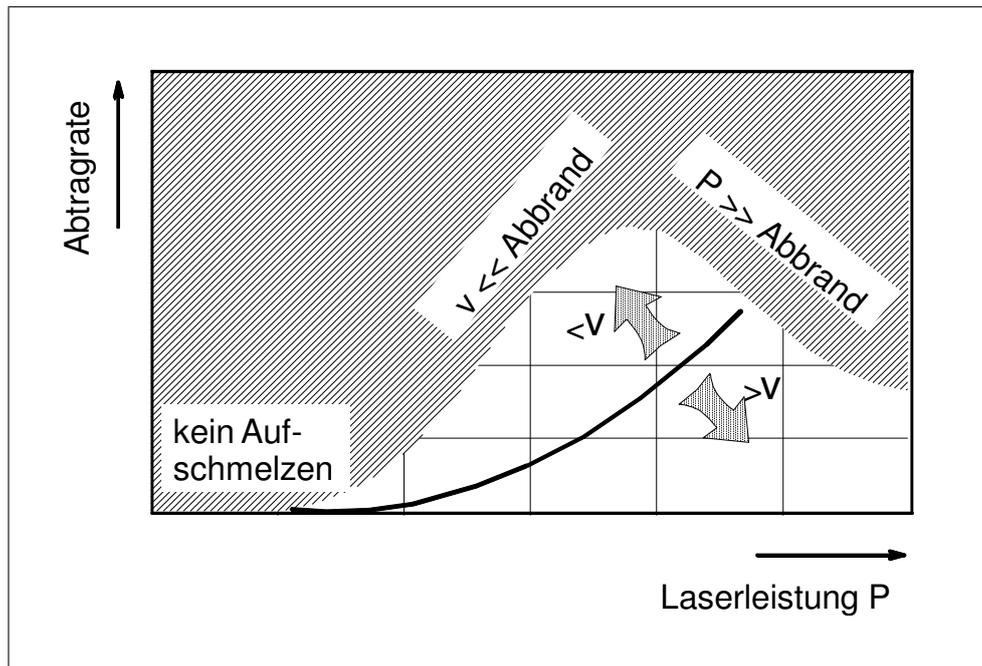


Abbildung 5.2: Prozessfenster der Abtragsrate über der Laserleistung

In der folgenden Abbildung 5.3 auf der S. 56 ist die Abtragsrate beim Laserhobeln in Abhängigkeit von der mittleren Laserleistung für verschiedene Stahlsorten dargestellt. Eine genauere Erläuterung dieses Diagramms wird im darauffolgenden Abschnitt 5.4 auf S.58 gegeben.

Tatsächlich mittels Laserhobeln gefertigte Proben aus Baustahl zeigt die Abbildung 5.4 auf S. 57. Hierbei wurde jeweils ein Abtragprozess bei drei unterschiedlichen mittleren Laserleistungen auf dem selben Werkstück (bestehend aus dem Material QStE 380) durchgeführt. Die dabei verwendeten Parameter sind in der Darstellung mit eingetragen. Weiters habe ich hier immer zwei Abtragversuche mit den gleichen Einstellungen nebeneinander hergestellt, um auch die sehr gute Reproduzierbarkeit eines solchen Prozesses vorzeigen zu können.

Man sieht darin gut die unterschiedlichen Tiefen aufgrund der bei höherer Laserleistung auch steigenden Abtragsrate der verschiedenen Proben. Des weiteren kann man die für das Laserhobeln (vor allem bei hohen Strahlleistungen) typischen einzelnen Spuren der Abbildung entnehmen. Genaueres diesbezüglich wird weiter unten im Abschnitt 5.6 auf S. 63 dargelegt, insbesondere auf deren Einfluss bezüglich der Oberflächenqualität. Auch die damit zusammenhängenden größer werdenden Rauheitswerte der bearbeiteten Oberflächen ist zu erkennen.

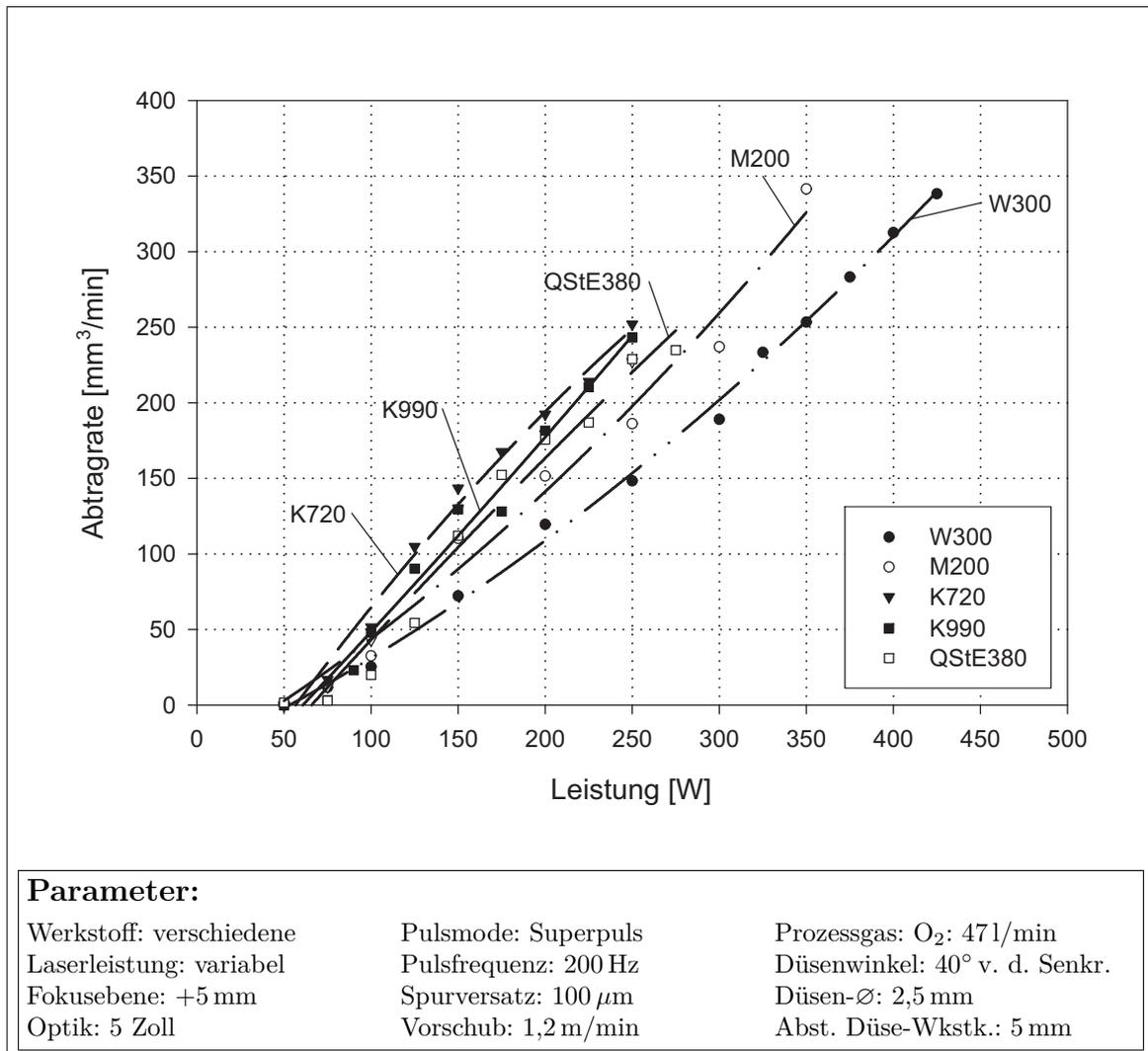


Abbildung 5.3: Abtragrate über der Laserleistung bei verschiedenen Stahlsorten und mit niedriger Verfahrensgeschwindigkeit

Bei einer sehr hohen Laserleistung kommt es zu einem unkontrollierten Abbrennen des Werkstoffs. Es werden dabei größere Volumina - leider von Form und Größe unbeeinflussbar - aus dem Material regelrecht „ausgebrannt“. Die maximale Laserleistung hängt neben der Intensitätsverteilung und der Vorschubgeschwindigkeit auch in einem sehr hohen Maße von der Prozessgaszusammensetzung und der Werkstofflegierung ab.

Wenn nun reiner Sauerstoff verwendet wird, führen schon geringe Leistungen zu einem instabilen Prozess. Durch Verwendung von kurzen Pulsfrequenzen (und damit langen Pulspausen) können höhere mittlere Leistungen genutzt werden. Ein Nachteil dieser Methode ist bedingt durch die dabei entstehende Pulsüberlappung begrenzt. Auch ein hoher

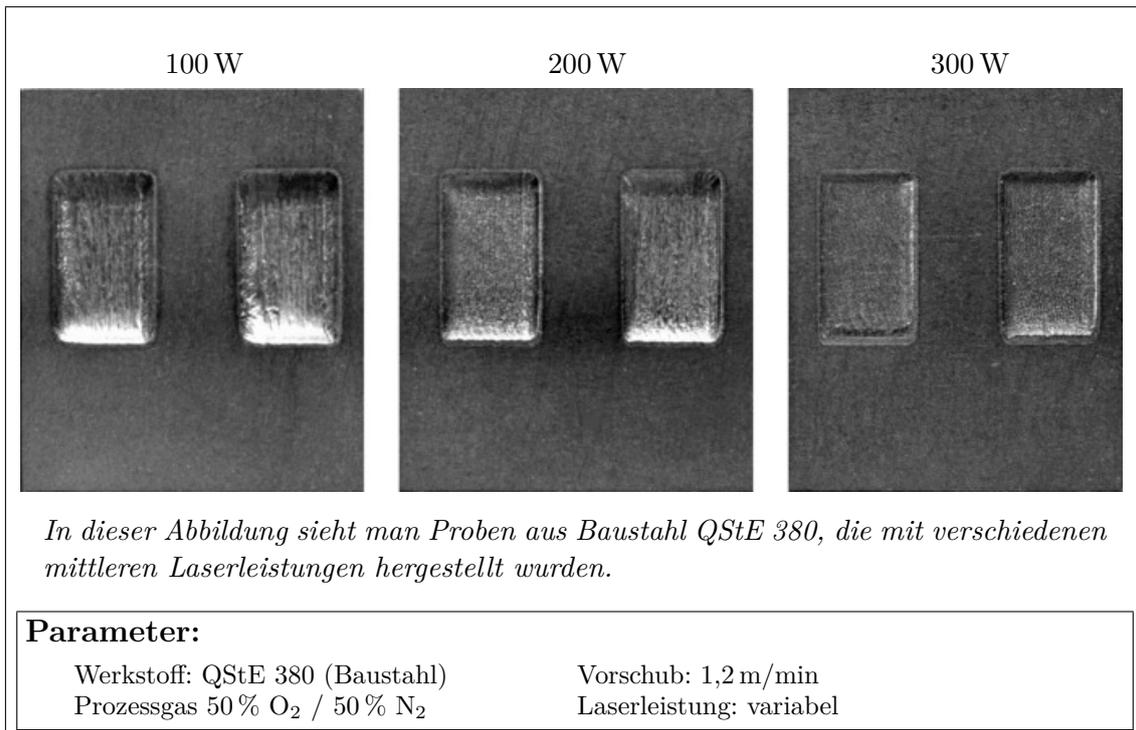


Abbildung 5.4: Proben die mit verschiedenen Laserleistungen gefertigt wurden

Chromgehalt des Stahles hemmt die Sauerstoffdiffusion in der Schmelze.
Damit möchte ich auf den Einfluss der Legierungselemente insbesondere bei der Verwendung von Warmarbeitsstählen übergehen.

5.4 Legierungselemente

Für die Werkstoffcharakterisierung ist der Einfluss der Legierungselemente auf die Abtrage rate von besonderem Interesse. In Versuchen hat sich gezeigt, dass ein zunehmender Chromgehalt des Stahles die Abtrage rate deutlich senkt.

Wie bereits im Abschnitt zuvor angeführt, ist in der Abbildung 5.3 auf S. 56 die Abtrage rate beim Laserhobeln in Abhängigkeit von der Laserleistung für verschiedene Stahlsorten dargestellt. Auf diese Darstellung soll im folgenden etwas genauer eingegangen werden. Man verwendete dabei Kaltarbeitsstähle mit unterschiedlichen Gehalten an Kohlenstoff, die auch für die Herstellung von Matrizen zur Anwendung kommen, sowie zwei Stahlsorten mit unterschiedlichem Chromgehalt, die sehr oft im Formenbau eingesetzt werden. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass bei zunehmendem Chromanteil die Abtrage rate deutlich sinkt.

Die höchsten Abtrage rates werden dabei von den Stählen mit hohem Kohlenstoffgehalt und ohne Chromanteile erreicht. Weiters erkennt man, wenn man die Kaltarbeitsstähle betrachtet, dass in dem gewählten Parameterfenster pro einer mittleren Leistung (oberhalb der Leistungsschwelle) von ca. 1 W eine Abtrage rate von $1 \text{ mm}^3/\text{min}$ erzielt wird. Da bei diesem Versuch mit reinem Sauerstoff gearbeitet wurde, kommt es bereits bei Laserleistungen über 200 W zu einem unkontrollierten Abbrennen des Werkstoffs.

Bei der Verwendung von chromhaltigen Stählen können wesentlich höhere Laserleistungen erreicht werden, was auch darauf hinweist, dass das Chrom die Oxidation des Eisens bremst und sich die verringerte Abtrage rate nicht nur auf die Bildung einer zähflüssigen und hochschmelzenden Chromoxidschicht zurückführen lässt [17].

Bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten und einem höherem Stickstoffanteil, der ebenso wie der Chromgehalt die Diffusion hemmt, sinkt der Einfluss der Werkstoffzusammensetzung. Hierbei können wir die Abbildung 5.5 auf S. 59 betrachten. Dieses Diagramm zeigt Abtrage rate und die Rauhtiefe in Abhängigkeit von der Laserleistung bei einer wesentlich höheren Vorschubgeschwindigkeit (nämlich 5 m/min) und einem Stickstoffanteil von 50 % im Prozessgas. Dabei sind die auftretenden Unterschiede in den Abtrage rates gering und die gemittelte Rauhtiefe R_z steigt mit zunehmender Laserleistung ebenfalls an. Die gemittelte Rauhtiefe R_z ist bei Leistungen unter 200 W mit Werten um die $10 \mu\text{m}$ bereits in der Nähe des Schlichtfräsens.

5 Versuchsdurchführung

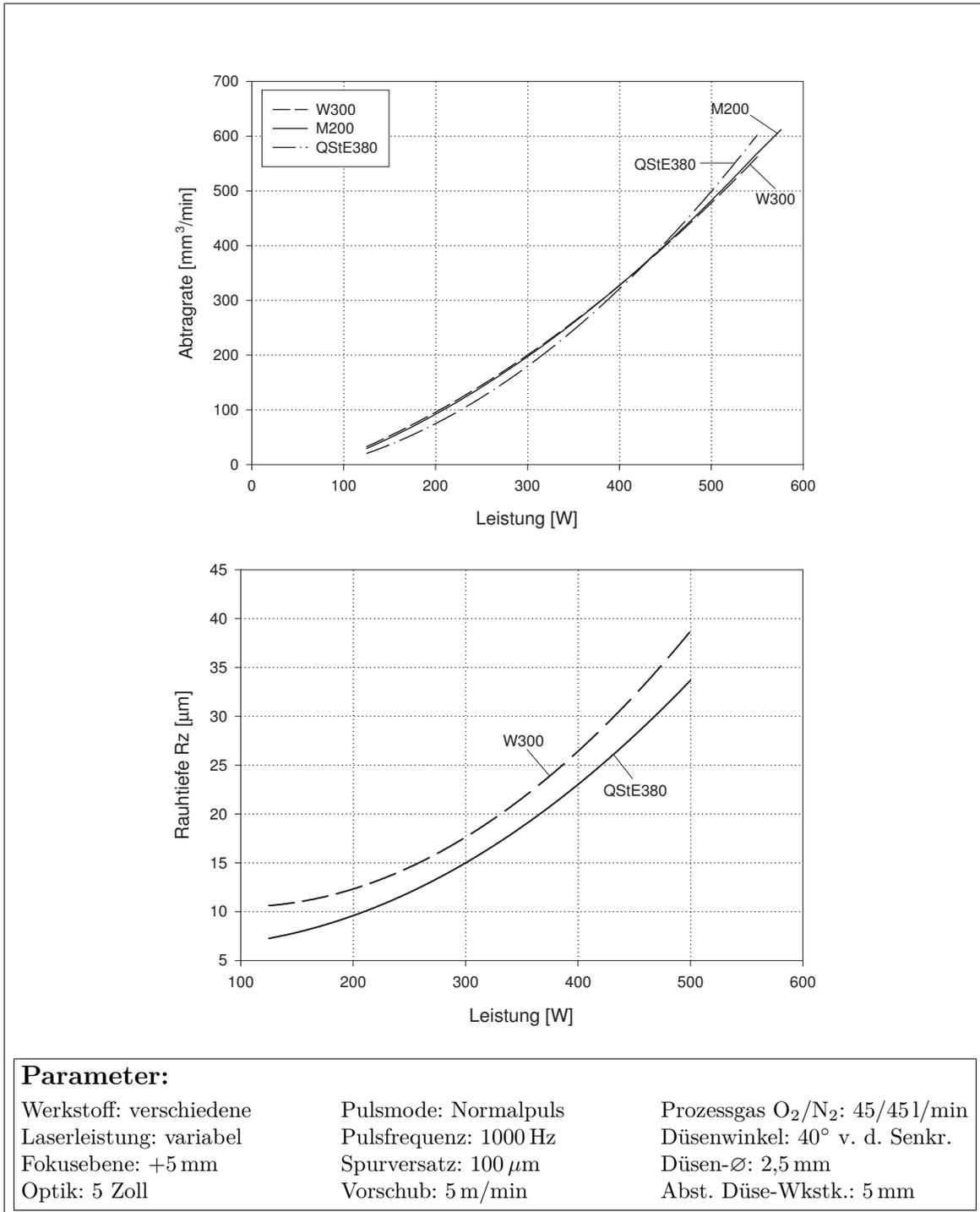


Abbildung 5.5: Einfluss der Laserleistung auf die Abtragrate und die Rauhtiefe bei der Verwendung verschiedener Stahlsorten bei hoher Verfahrensgeschwindigkeit

5.5 Spurversatz

Wie bereits im Unterabschnitt 5.2 auf S. 53 dargestellt, muss zum Abtragen von Flächen deren Kontur mittels einzelner jeweils um den Spurversatz quer zur Vorschubrichtung verstellter Bahnen vom Bearbeitungskopf abgefahren werden.

In der Abbildung 5.6 auf S. 61 sind die Oberflächenstrukturen von Bau- und Warmarbeitsstahl für mittlere Laserleistungen über 200 W dargestellt. Man erkennt dabei die bessere Oberflächenqualität sowie die einzelnen Spuren im Baustahl, die der Laserstrahl während der Bearbeitung der Oberfläche abscaant. Beim Warmarbeitsstahl ist (wie bereits oben erwähnt) durch den Chromanteil und der damit zäheren Schmelze die Oberflächenstruktur nicht so gleichmäßig ausgebildet. Trotz der Verwendung des gleichen Spurversatzes erkennt man beim W300 keine einzelnen Linienzüge mehr.

Nach diverser Versuche hat sich herausgestellt, dass der Spurversatz in dem von mir verwendeten Leistungsbereich (zwischen 200 und 400 W) nur einen geringen Einfluss auf die Abtrage rate hat. Bei einem großen Spurversatz steigt in erster Linie die Rauhtiefe der bearbeiteten Fläche.

Die Geometrie und dabei vor allem der Flankenwinkel einer Spur kann in großem Maße durch die Intensität der Laserstrahlung beeinflusst werden. Hohe Intensitäten führen dabei zu Spuren mit einem großen Tiefe-zu-Breite Verhältnis.

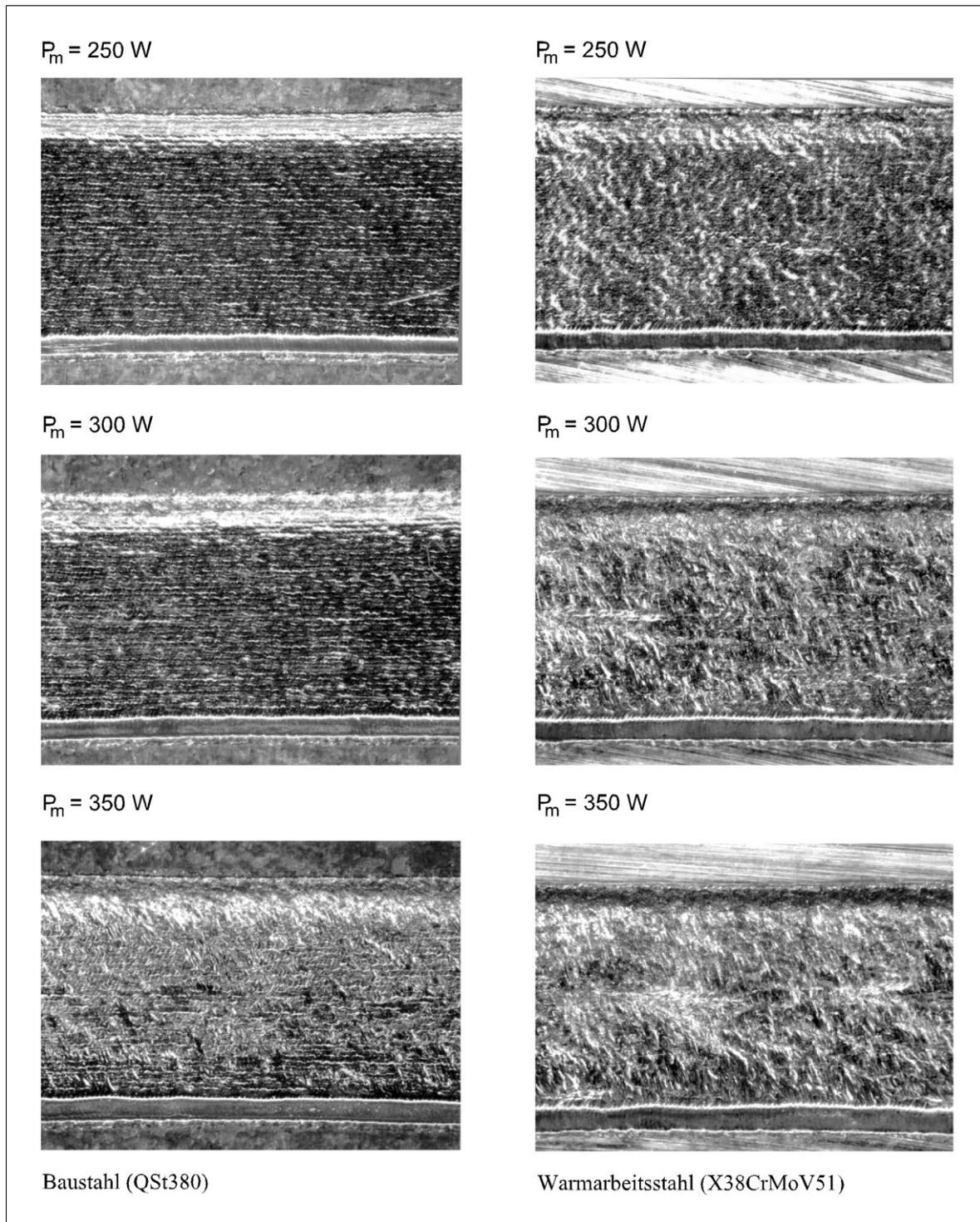


Abbildung 5.6: Oberflächenstrukturen von Baustahl und Warmarbeitsstahl

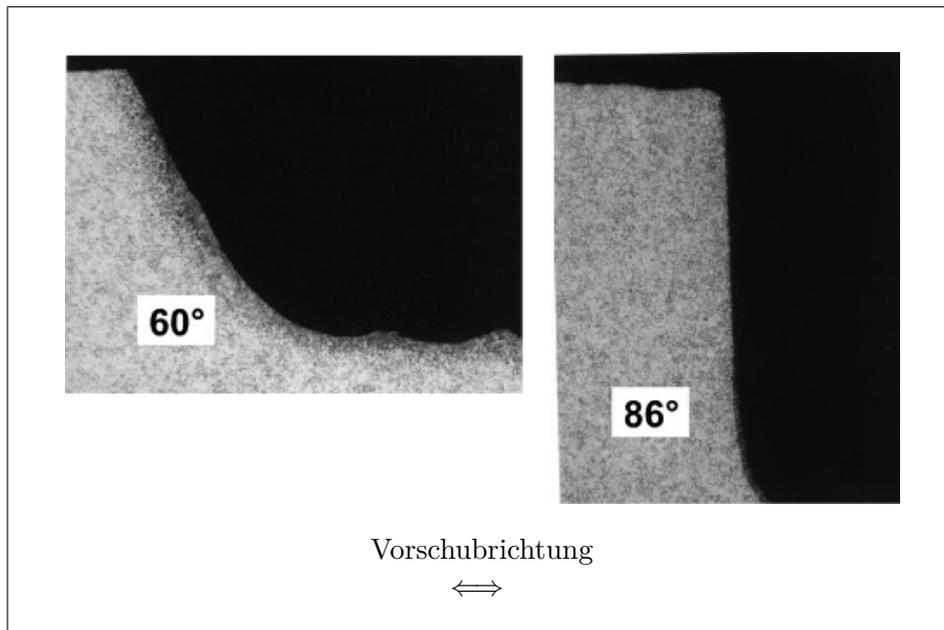


Abbildung 5.7: *Flankensteilheit bei geringer und hoher Spitzenintensität*

Wie man in der obigen Abbildung 5.7 erkennt, stellt das linke Bild eine Bearbeitung mit defokussierter Laserstrahlung und die rechte Abbildung ein im Fokus erzeugte Abtragung von Material aus einer Druckgussform dar. Es können somit mittels fokussierter Strahlung sehr steile Flanken in Gesenken hergestellt werden ohne dabei den Winkel zwischen Bearbeitungskopf (Laserstrahlung) und Werkstückoberfläche verändern zu müssen. Das heißt, dass prinzipiell ein 3-achsiges Bewegungssystem zur Erstellung von steilen Gesenkkonturen völlig ausreichend ist. Jedoch lässt sich im Fokus aus dem bereits vorherig erläuterten Gründen keine hohe Abtragraten erzielen.

Weiters konnte die Geometrie im linken Bild mit nur einer einzigen Schicht abgetragen werden, wohingegen die in der rechten Abbildung gezeigte Form mittels vier Abtragschichten herausgearbeitet werden musste. Für die gestellten Anforderungen bei der Reparatur von Formen hat sich ein idealer Wert von $100\ \mu\text{m}$ pro Layer bezüglich der Oberflächenqualität für die verwendeten Werkstoffe ergeben.

5.6 Fokusslage

In der folgenden Abbildung 5.8 [17] ist die Abtragtiefe über der mittleren Laserleistung für verschiedene Fokusslagen dargestellt. Bei diesem Versuch wurde das Prozessgas koaxial und mit einem lateralen Versatz zum Laserstrahl zugeführt.

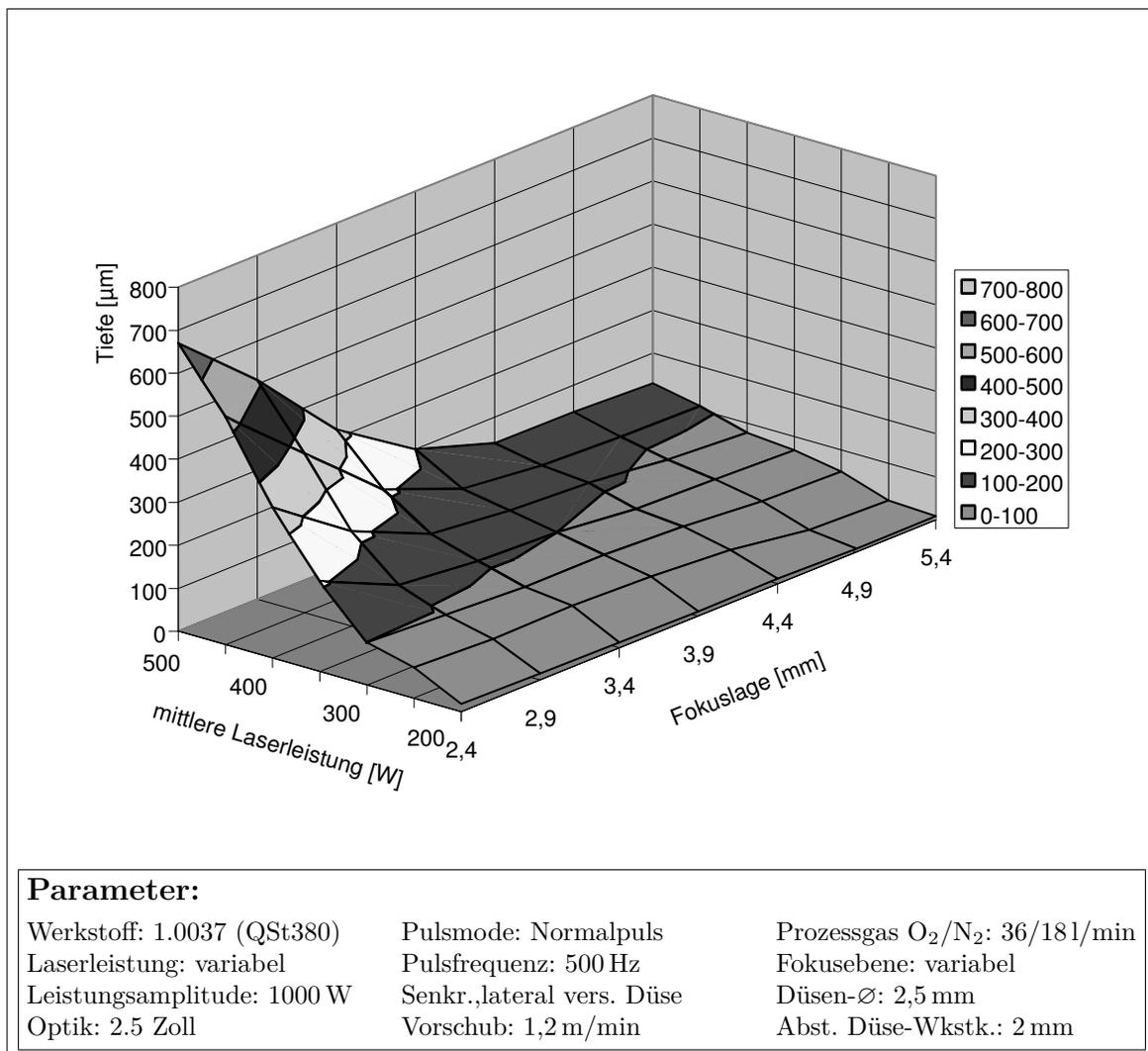


Abbildung 5.8: Abtragtiefe in Abhängigkeit der mittleren Laserleistung und der Fokusslage bei Einzelspuren

Es ist daraus ersichtlich, dass die Spurtiefe bei zunehmender Fokussierung stark abfällt. Aus diversen Versuchen hat sich eine Fokusslage von $z_f = +5 \text{ mm}$ als optimaler Wert für

das Abtragen gefunden¹. Diese Defokussierung bietet eine relativ hohe Sicherheit gegen den Ausbrand von Material aufgrund einer zu hohen Intensität an der Bearbeitungsstelle. Es können sich nämlich während des Prozesses an verschiedenen Stellen geringe Veränderungen des Abstandes zwischen dem Bearbeitungskopfes und dem Werkstück (z. B. in Wandnähe durch Gussradien oder bei räumlich komplexen Flächen) ergeben. Ebenso können aber auch Änderungen der Fokusslage wegen einer Erwärmung der Linse durch die Laserstrahlung im Bereich von bis zu 0,5 mm entstehen². Des weiteren sind bei der gewählten Fokusebene die nötigen mittleren Leistungen für einen CO₂-Laser leicht erreichbar und stellen auch für Nd:YAG-Laser kein Problem dar.

¹Dabei bedeutet $z_f > 0$ eine Lage der Fokusebene über dem Werkstück und $z_f < 0$ kennzeichnet die Lage des Fokus im Werkstück.

²Bei älteren bzw. verschmutzten Linsen sind durchaus noch höhere Werte möglich.

5.7 Vorschubgeschwindigkeit

Mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit nimmt die eingebrachte Streckenenergie und somit auch die Größe der Schmelzisotherme ab. Es ergeben sich damit Tiefen die reziprok zu der verwendeten Vorschubgeschwindigkeit der abgetragenen Spur sind.

Des Weiteren wird durch Erhöhen der Vorschubgeschwindigkeit weniger Material aufgeschmolzen und wegen der limitierten Oxidationsgeschwindigkeit¹ ein immer geringerer Anteil der Schmelze oxidiert. Dies reduziert wiederum den Anteil der exothermen Energie, und durch die dünnere Oxidschicht wird die Absorption der Laserstrahlung (bei Schichtdicken kleiner einigen μm) signifikant herabgesetzt. Diese nichtlinearen Effekte führen, insbesondere bei einem geringen Sauerstoffanteil im Bearbeitungsgas, zu einer starken Abnahme der Abtragtiefe über der Vorschubgeschwindigkeit. Nach diesem raschen Abfallen der Abtragtiefe bleibt diese unter Umständen bei Vorschubgeschwindigkeiten im Bereich von einigen Metern pro Minute nahezu konstant.

Einen qualitativen Eindruck dessen soll die folgende Abbildung 5.9 vermitteln.

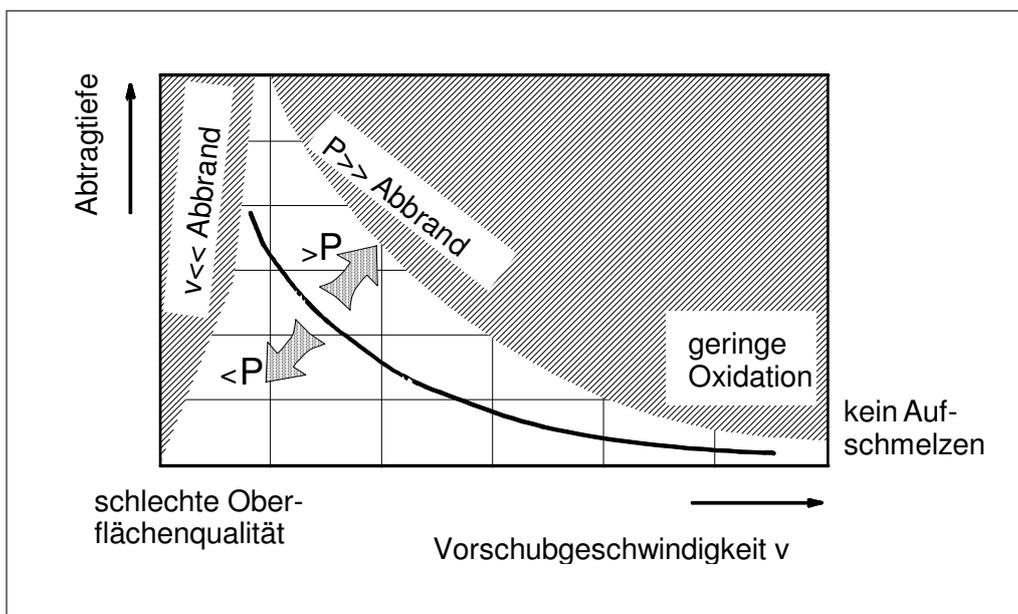


Abbildung 5.9: Prozessfenster Abtragtiefe in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit

¹Siehe dazu auch den Abschnitt 5.9 auf S. 78 bzgl. Oxidation.

Einen weiteren Einfluss bei der Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit stellt das Sinken der Wärmeleitungsverluste ins Grundmaterial dar [17]. Dies führt bei der Abtragrate zu einem lokalen Maximum und damit zu einer optimalen Vorschubgeschwindigkeit, wie in der folgenden Abbildung 5.10 gut zu erkennen ist.

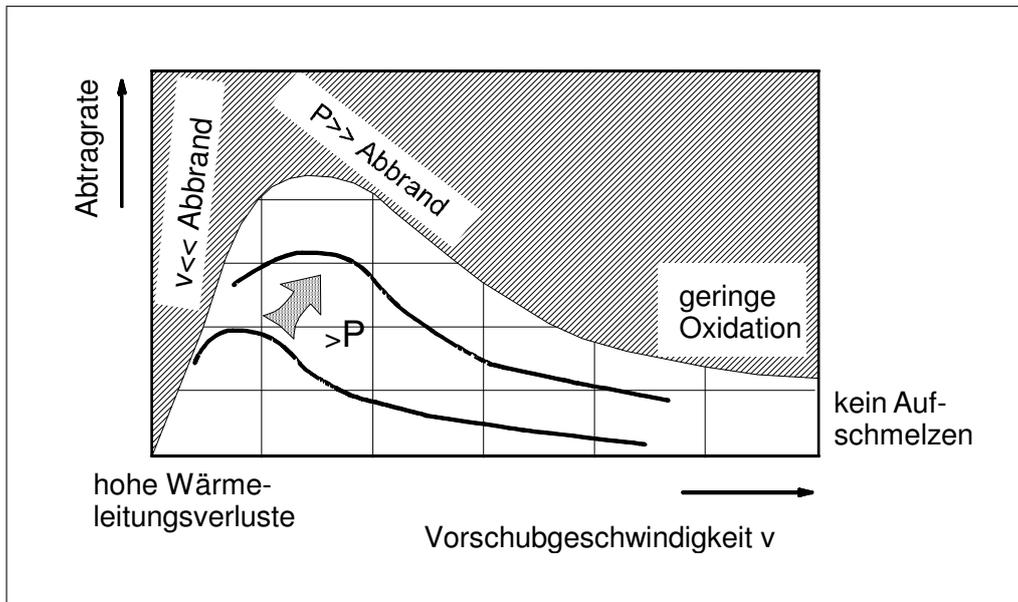


Abbildung 5.10: Prozessfenster Abtragrate in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit

Bei zu hohen Vorschubgeschwindigkeiten kommt es verständlicherweise zu keinem Abtrag mehr, da die Schmelztemperatur nicht mehr erreicht werden kann. Im Gegensatz dazu besteht bei sehr geringen Geschwindigkeiten, und der damit verbundenen hohen Streckenenergie, die Gefahr eines unkontrollierten Abbrands des zu bearbeitenden Materials. Wird die Zündtemperatur des Eisens erreicht, so kommt der Verbrennungsvorgang erst außerhalb des sauerstoffhaltigen Gasstrahls selbsttätig zum Erliegen.

Da der Düsendurchmesser verhältnismäßig groß gegenüber dem Brennfleckdurchmesser¹ ist, und da das Laserabtragen einen dreidimensionalen Bearbeitungsprozess darstellt, kommt es im Gegensatz zum Laserschneiden zu keiner verstärkten Riefenbildung, sondern gleich zum Abbrand großer Volumina. Dies führt entweder zur Zerstörung des Bauteils (Ausschuss) bzw. bei den teuren und meistens großen Druckgussformen zu einer weiteren Nachbearbeitung der betroffenen Stellen. Da aber gerade durch die Verwendung des Lasers die Reparatur solcher Gesenke verbessert werden soll, ist bei den Verfahrensparametern auf eine hohe Prozessstabilität zu achten, welche bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten leichter erreicht werden kann.

¹Der Brennfleck ist der Auftreffpunkt der Laserstrahlung an der Materialoberfläche. Dieser muss nicht gleich dem Fokus der Laseroptik sein, wie im Falle des Laserhobeln.

Eine andere Möglichkeit wäre auch ein höherer Stickstoffanteil im Bearbeitungsgas. Dieser hemmt jedoch die Sauerstoffdiffusion sehr stark, wodurch die Abtragraten auch bei geringen Vorschubgeschwindigkeiten klein bleiben.

In Abbildung 5.11 auf S. 68 ist die Abtragrate über der Vorschubgeschwindigkeit für den Warmarbeitsstahl W300 (X38CrMoV51) und für Baustahl (QStE 380) im oberen Diagramm ersichtlich. Im unteren Teil ist die Rauhtiefe für Baustahl über der Vorschubgeschwindigkeit aufgetragen. Als Bearbeitungsgas wurde hier eine Mischung von jeweils 45 l/min der Gase Sauerstoff und Druckluft verwendet. Die Abtragrate zeigt dabei bei beiden Werkstoffen ein deutliches Maximum. Man erkennt jedoch, daß die Abtragrate für den W300 bei geringen Werten für den Vorschub annähernd gleich der dem Baustahl ist. Bei höheren Vorschüben sinkt die Abtragrate für den Warmarbeitsstahl jedoch weniger rasch ab. Die gemittelte Rauhtiefe R_z nimmt mit zunehmender Geschwindigkeit ab und pendelt sich knapp oberhalb der $10\ \mu\text{m}$ -Marke ein.

5 Versuchsdurchführung

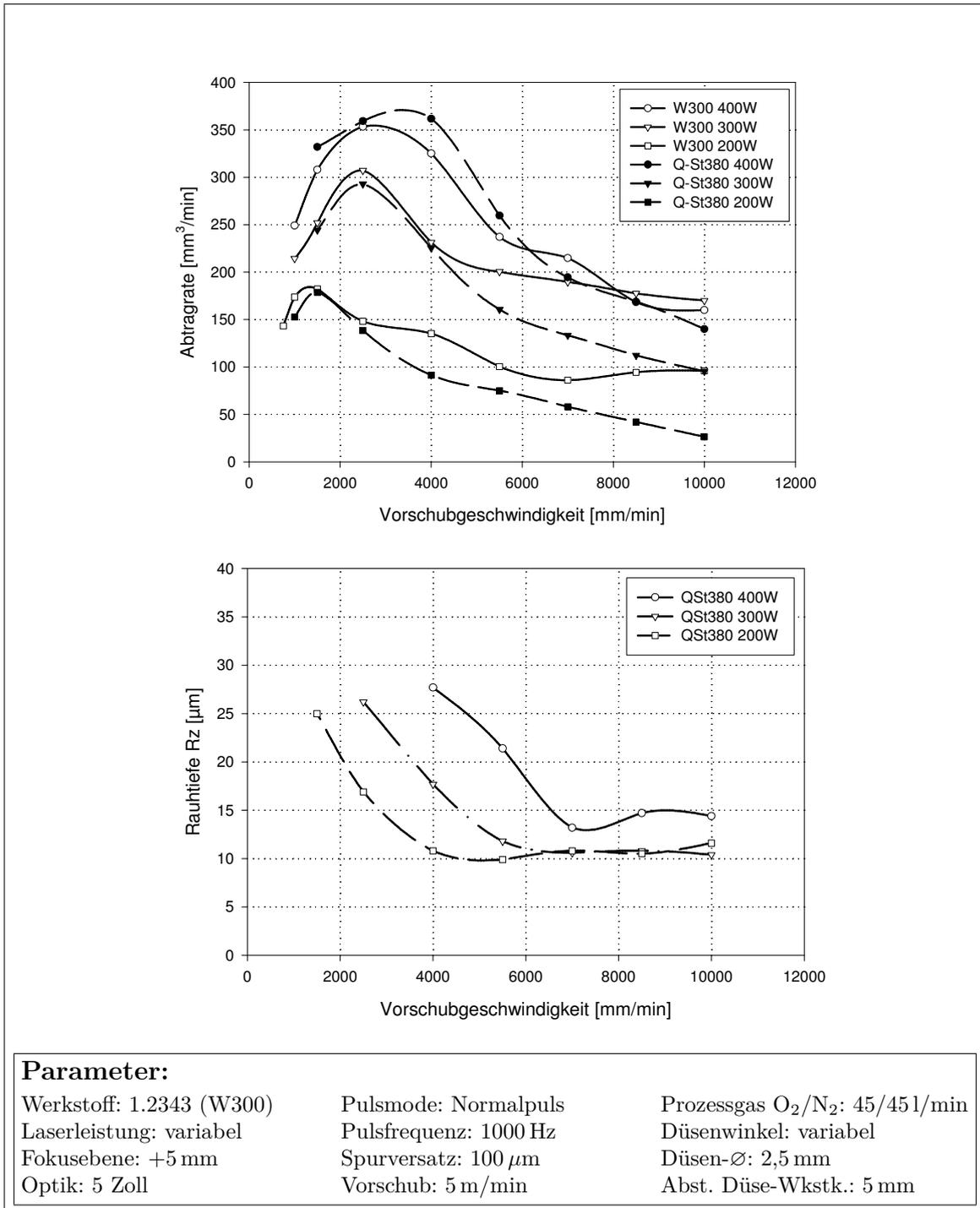


Abbildung 5.11: Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf die Abtragrate und die Rauhtiefe für verschiedene Leistungen bei Baustahl und Warmarbeitsstahl

Abbildung 5.12 [17] auf dieser Seite zeigt die Abtragate in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Gasmischungen und bei drei verschiedenen Laserleistungen. Wie man erkennt, wird bei Druckluft (Sauerstoffanteil von ca. 20%) nur ein schlechter Wirkungsgrad erreicht. Bei reinem Sauerstoff hingegen besteht die Gefahr des Abbrands des zu bearbeitenden Materials.

Es kann generell gesagt werden, dass bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten und geringen Sauerstoffanteilen leichter gute Oberflächenqualitäten erzielt werden können. Man muss also je nach den konkret gegebenen Aufgabenstellungen das Mischungsverhältnis entweder auf eine hohe Oberflächenqualität oder eine große Abtragate hin optimieren.

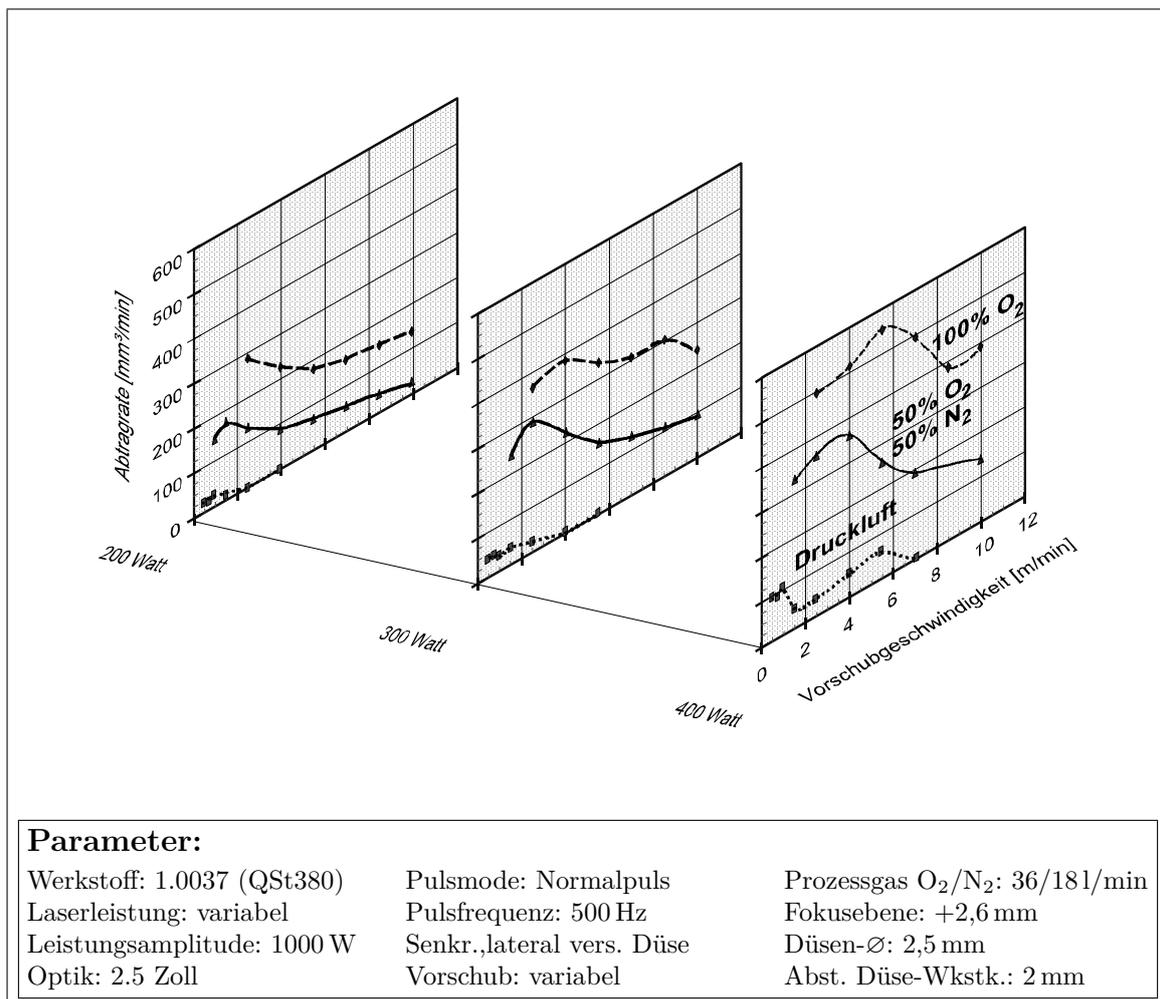


Abbildung 5.12: Abtragate in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Gasmischungen und Laserleistungen

In den hier vorliegenden Fall für die Reparatur von Gussgesenken ist die Abtragrate wichtiger als eine sehr gute Beschaffenheit der Oberfläche. Es ist auch aus der Abbildung 5.12 ersichtlich, dass die Abtragrate für höhere Stickstoffanteile in Richtung niedrigerer Vorschubgeschwindigkeiten zu einem abrupten Anstieg mit einem ausgeprägten Maximum führt. Dadurch erhält man aber einen relativ schmalen Bereich, der neben einer hohen Abtragrate auch einen einigermaßen stabilen Prozeß ergibt (z. B. ca. $350 \text{ mm}^3/\text{min}$ bei 400 W und einem Mischungsverhältnis von gleichen Teilen O_2 und N_2).

Die nächste Abbildung 5.13 [17] zeigt wiederum eine dreidimensionale Darstellung der Schichttiefe in Abhängigkeit von der mittleren Laserleistung und der Vorschubgeschwindigkeit. Bei diesem Versuch konnte der Prozess durch die Wahl einer geringen Pulsfrequenz von 500 Hz trotz der dabei verwendeten geringen Geschwindigkeiten über den gesamten Einstellbereich stabil gehalten werden.

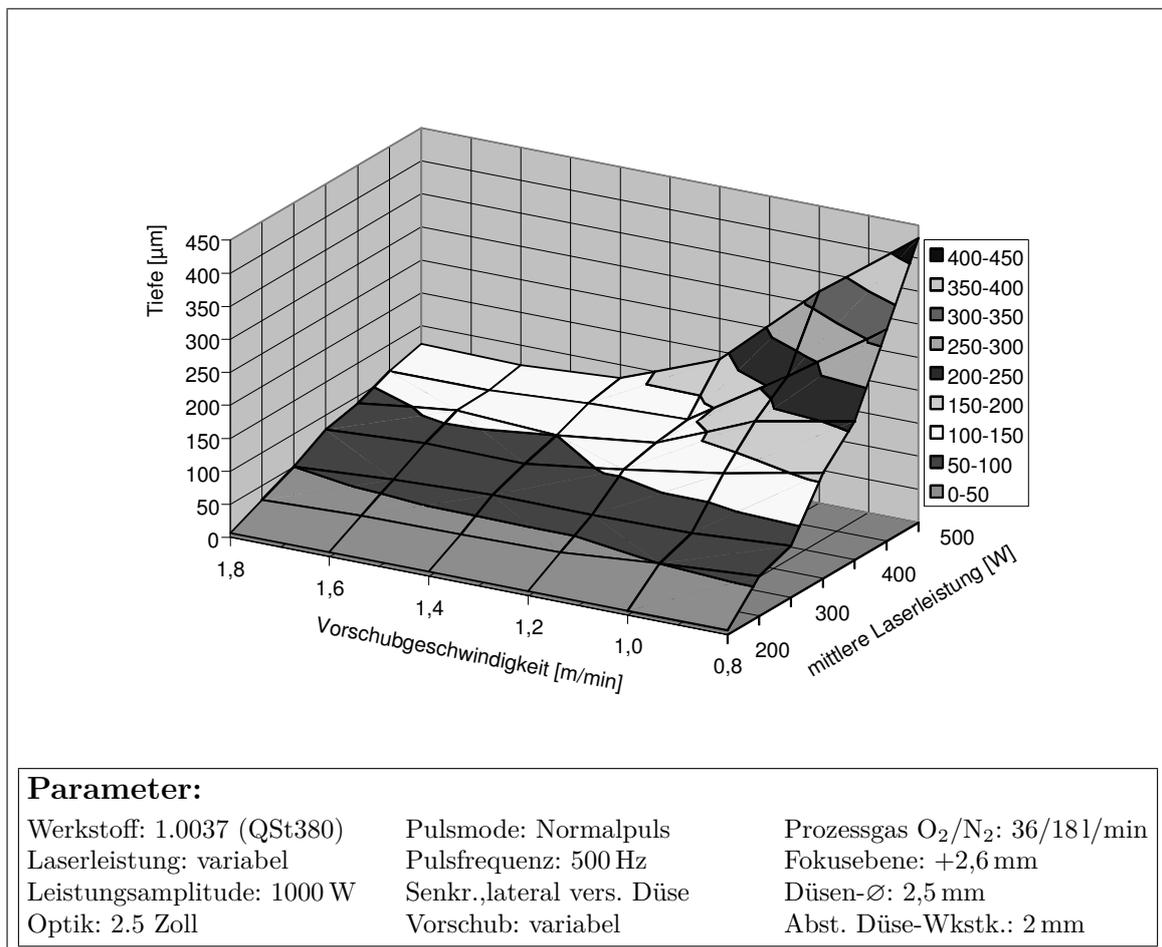


Abbildung 5.13: Abtragtiefe in Abhängigkeit der mittleren Laserleistung und der Vorschubgeschwindigkeit bei Einzelspuren

5.8 Gasströmung

Um einen Austrieb der Schmelze zu ermöglichen benötigt man die mechanische Wirkung des Gasstrahls. Dies geschieht mittels Druck- und Scherkräften die der Gasstrahl auf das geschmolzene Material ausübt. Bei der beim Laserhobeln verwendeten seitlichen (off-axis) Düsenanordnung ist außer dem Abstand der Düse zum Bearbeitungspunkt auch der Einfluss des Winkels unter dem der Gasstrahl auf die Oberfläche auftritt von Bedeutung. Sowohl eine sehr steile als auch eine sehr flache Justierung der Prozessgasdüse verringern die Effizienz des Abtragprozesses.

Bei einer nahezu parallel zur Werkstückoberfläche einfallenden Gasströmung stellt sich nur ein sehr geringer Druckgradient im Bereich der Abtragfront ein. Es ist aber die Reibung des Gases mit der Schmelze und die damit einwirkende Scherspannung von der Geschwindigkeit und dem Turbulenzgrad der Strömung abhängig. Bei der parallelen Gasströmung löst sich diese aber bereits vor der Abtragfront ab. Dadurch stellt sich an der Abtragfront nur eine geringe Geschwindigkeit ein (die Strömung gleitet über der Front ab), welches zu einer unzureichenden Impulsübertragung des Gasstrahls auf die Schmelze führt (siehe [17], Kapitel 4.4). Die tatsächliche Ausformung der Gasströmung über der Abtragfront und die daraus resultierende Impulsübertragung des Gasstrahls auf die Schmelze hängt daher auch von der Geometrie der Abtragfront ab.

Bei einem flachen Winkel der Gasdüse erhalten wir einen flachen Kantenwinkel des Gesenkes in Vorschubrichtung, wodurch die Formgenauigkeit des Gesenkes verschlechtert wird. Wenn man einen steilen Winkel des Gasstrahls (direkt auf den Brennfleck gerichtet) einstellt, resultiert daraus ein hoher Staudruck über der Wechselwirkungszone. Jedoch gleitet die Gasströmung seitlich über dem Staupunkt ab und führt im Zentrum des Auftreffpunkts zu einer geringen Gasgeschwindigkeit und einem kleinen Druckgradienten. Es muss also ein optimaler Anstellwinkel für die Düse gefunden werden. Hierauf hat aber auch die Tiefe einer abzutragenden Schicht einen Einfluss. Weiters müssen Einschränkungen des maximalen Winkels durch die geometrischen Gegebenheiten der Bauteile wie z. B. die des Bearbeitungskopfes oder dem Durchmesser der Düse berücksichtigt werden. Bei einer flachen Einstellung des Düsenwinkels bekommt man Probleme mit der Zugänglichkeit zu den Nuten. Auch die Einstellungstoleranz für den Brennfleck ist schwieriger einzuhalten, da bei geänderter Lage der Werkstückoberfläche der Gasstrahl nicht mehr in dessen Zentrum auftritt. Von mir wurde hauptsächlich die „stechende Gaszufuhr“ verwendet (Gasströmung entgegen der Vorschubrichtung, Abbildung 5.16 auf S. 76 oben). Eine „schleppende Gaszufuhr“ (Gasströmung in Vorschubrichtung) sollte man nur bei geringen Gesenktiefen anwenden. Es verringert sich dabei die Oberflächenqualität. Wenn kürzestmögliche Bearbeitungszeiten unumgänglich sind, kommt man um eine „bidirektionale“ (stechend und schleppend) Bearbeitung nicht herum.

Wie bereits weiter oben erwähnt hat der Anstellwinkel der Prozessgasdüse einen Einfluss auf den Abtragprozess. Vor allem bei der von mir gewählten Variante einer off-axis Gasdüse zeigten die Experimente ein ausgeprägtes Maximum der Abtragrate in Abhängigkeit des Düsenwinkels (siehe folgende Abbildung 5.14).

5 Versuchsdurchführung

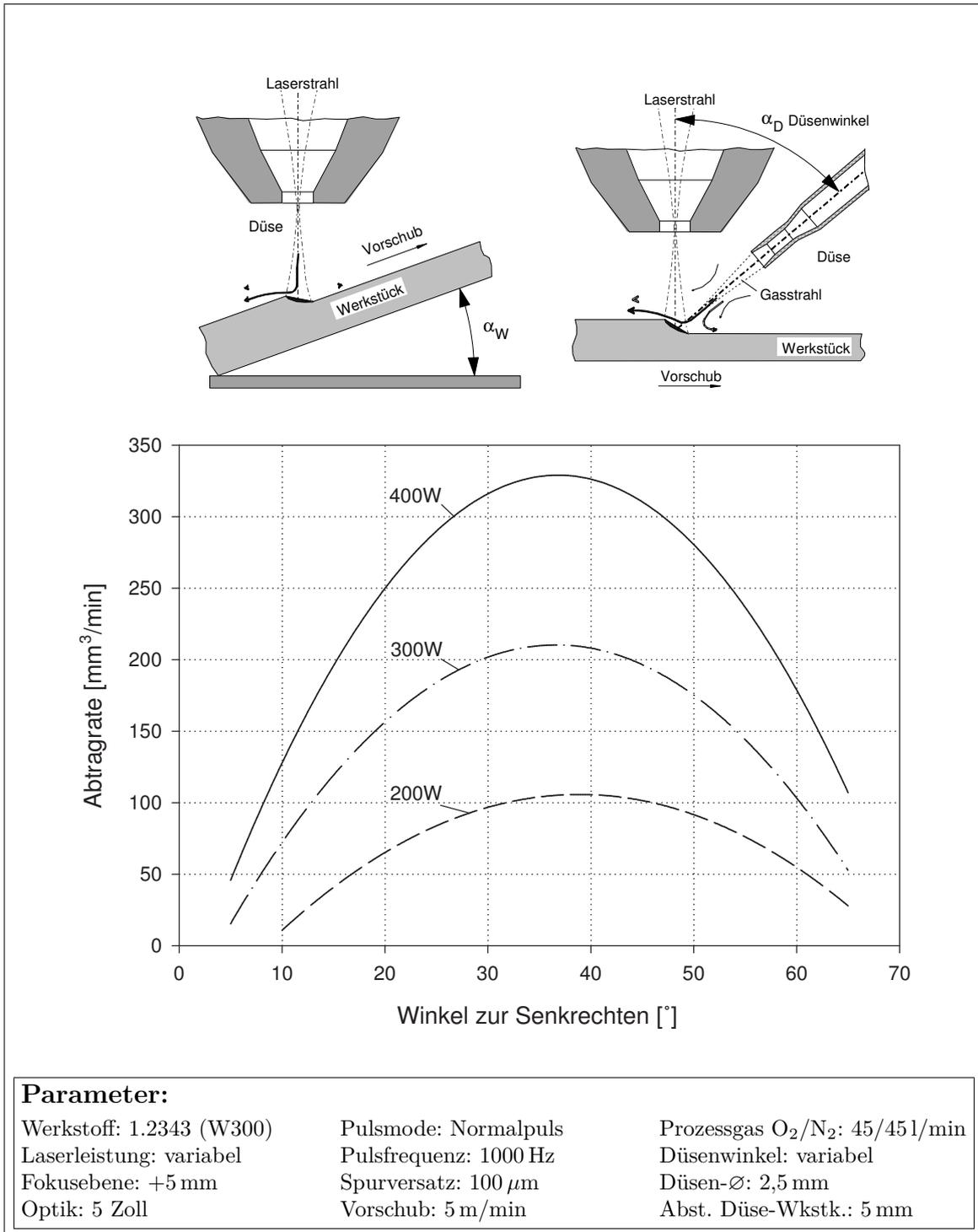


Abbildung 5.14: Abtragrate über den Winkel der Düse v. d. Senkrechten

Man erkennt bei steilen Anstellwinkeln den starken Abfall der Kurven, welches einen großen Einfluss auf die Prozesseffizienz darstellt. Dies gilt allerdings in diesem Ausmaß nur, wenn man den Gasstrahl direkt auf den Brennfleck am Werkstück einjustiert und damit die Gasströmung im Bereich der Wechselwirkungszone staut. Versetzt man hingegen die Düse lateral (d. h., es liegt der geometrische Schnittpunkt der Laserstrahl- und der Gasstrahlachse nachlaufend im Material)¹, so steigt die Geschwindigkeit und der Druckgradient an der Abtragfront (siehe [17], Kapitel 4.4). Dies erkennt man sehr gut in der Abbildung 5.15 auf S. 74.

Bei verschiedenen Anwendungen, wie z. B. bei der Reparatur von Dauerformen, soll Material auch in engen Spalten abgetragen werden, womit die Zugänglichkeit zu der Bearbeitungsstelle eine wichtige Rolle einnimmt. Um dies erreichen zu können, braucht man steile Düsenanstellwinkel. Bei dieser Konfiguration muss man jedoch eine Begrenzung des Maximalwinkels durch den Bearbeitungskopf berücksichtigen, d. h. man benötigt einen möglichst schmalen Bearbeitungskopf (zumindest im Bereich des Crossjets, siehe dazu Abbildung 4.3 auf S. 35).

Man muss auch darauf achten, dass die Gasdüse bei sehr steilen Winkeln nicht den Laserstrahl streift. Es sind also keine steileren Winkel als ca. 20° von der Senkrechten möglich, welches aber aufgrund der hier bereits stark abgefallenen Abtragraten (siehe hierzu Abbildung 5.14 auf S. 72) ohnehin nicht erstrebenswert ist.

Will man jedoch den gesamten Bearbeitungsvorgang auch noch um die Möglichkeit einer dem Abtragprozess folgenden Reparaturschweißung mittels ein und dem selben Bearbeitungskopfs erweitern, so muss man die Eigenheiten einer zur Pulverzuführung integrierten off-axis Düse² mit einbeziehen. Diesbezüglich sollte aber der Anstellwinkel der zur Pulverförderung notwendigen Düse nicht zu steil sein, sowie auch der Abstand der Pulveraustrittsöffnung infolge einer Aufweitung des Pulverstrahles nicht zu groß werden. Bei diesen widersprüchlichen Anforderungen an den einzustellenden Düsenwinkel bei mehrstufigen Bearbeitungsverfahren überwiegt jedoch die Begrenzung durch die Auftragsschweißung.

¹Durch geringfügiges vertikales Absenken der Düse gegenüber dem Bearbeitungskopf, ohne dabei den optimal eingestellten Winkel zu verändern.

²Bei einer koaxialen Pulverzufuhr wäre ein Verkleben des schmelzflüssigen Pulvers in der Düse von Nachteil.

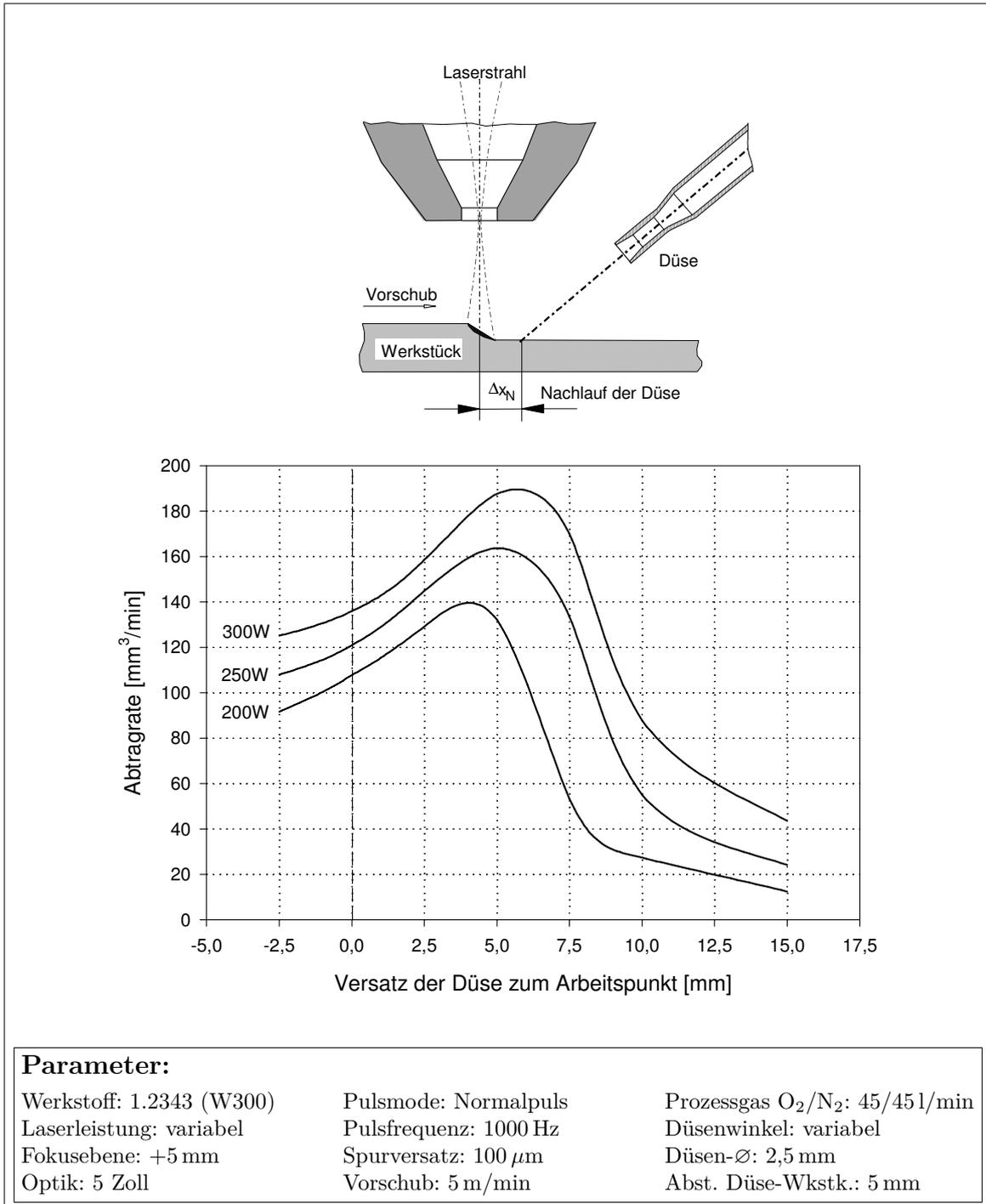


Abbildung 5.15: Verlauf der Abtragrate bei Versatz der Prozessgasdüse zum Bearbeitungspunkt entgegen der Vorschubrichtung

Wie vorher bereits erwähnt können bei einer off-axis Düsenanordnung Anstellwinkel unterhalb von ca. 20° , aufgrund der geometrischen Begebenheiten des Bearbeitungskopfs bzw. der Gefahr eines Streifens der Düse mit dem einfallenden Laserstrahl, nicht eingestellt werden. Um nun doch Messwerte für kleinere Winkel in der Abbildung 5.14 auf S. 72 zu erhalten, wurde das Werkstück bei gleichzeitig koaxialer Prozessgaszufuhr geneigt (siehe dazu das linke Bild oben). Dies erfordert jedoch ein mitführen der z-Achse während der Vorschubbewegung um den Abstand zwischen Düse und Werkstück konstant halten zu können bzw. um eine unveränderte Fokuslage zu gewährleisten.

Trotz der doch sehr unterschiedlich anmutenden Anordnung der beiden Versuche gehen die Kurven ineinander über. Man kann also zeigen, dass es einen optimalen Anstellwinkel für die Gasstrahldüse gibt und dieses Optimum mit zunehmender mittlerer Laserleistung immer ausgeprägter wird.

Abbildung 5.16 auf S. 76 zeigt den Einfluss des Abstandes der Prozessgasdüse zur Abtragfront auf die Abtrage rate.

Um eine gute Zugänglichkeit zu den Nuten in den Formen zu erreichen, sollte der Abstand möglichst in einem weiten Bereich variiert werden können. Man erkennt, dass bis zu einem Abstand von in etwa 15 mm die Prozesseffizienz nur geringfügig beeinflusst wird. Jedoch ist eine flache Düsenanordnung sehr anfällig für Fehler bei der Winkeleinstellung, da bereits durch geringe Abweichungen dieser Einstellung der Schnittpunkt zwischen Düsen- und Laserstrahlachse stark verschoben wird.

Weiter oben wurde bereits der positive Einfluss eines lateralen Versatzes der Prozessgasdüse auf die Strömungsverhältnisse in der Umgebung der Abtragfront erwähnt. In der Abbildung 5.17 auf S. 77 wurde dies für eine senkrechte Prozessgasströmung genauer verifiziert.

Bei einer zur Laserstrahlung exakt koaxialen Gasströmung erhält man eine unbrauchbar geringe Abtrage rate. Dagegen ist bereits bei einer geringfügigen Einstellung eines Versatzes in positiver Richtung von der Abtragfront weg (siehe Abbildung) ein starker Anstieg der Abtrage rate und damit der Prozesseffizienz zu erkennen. Das Minimum ist bei diesem Versuch um etwa 0,2 mm nach rechts verschoben. Dies kann von der entstehenden Abtragfront bzw. von einer Unsymmetrie der Gasstrahldüse herrühren.

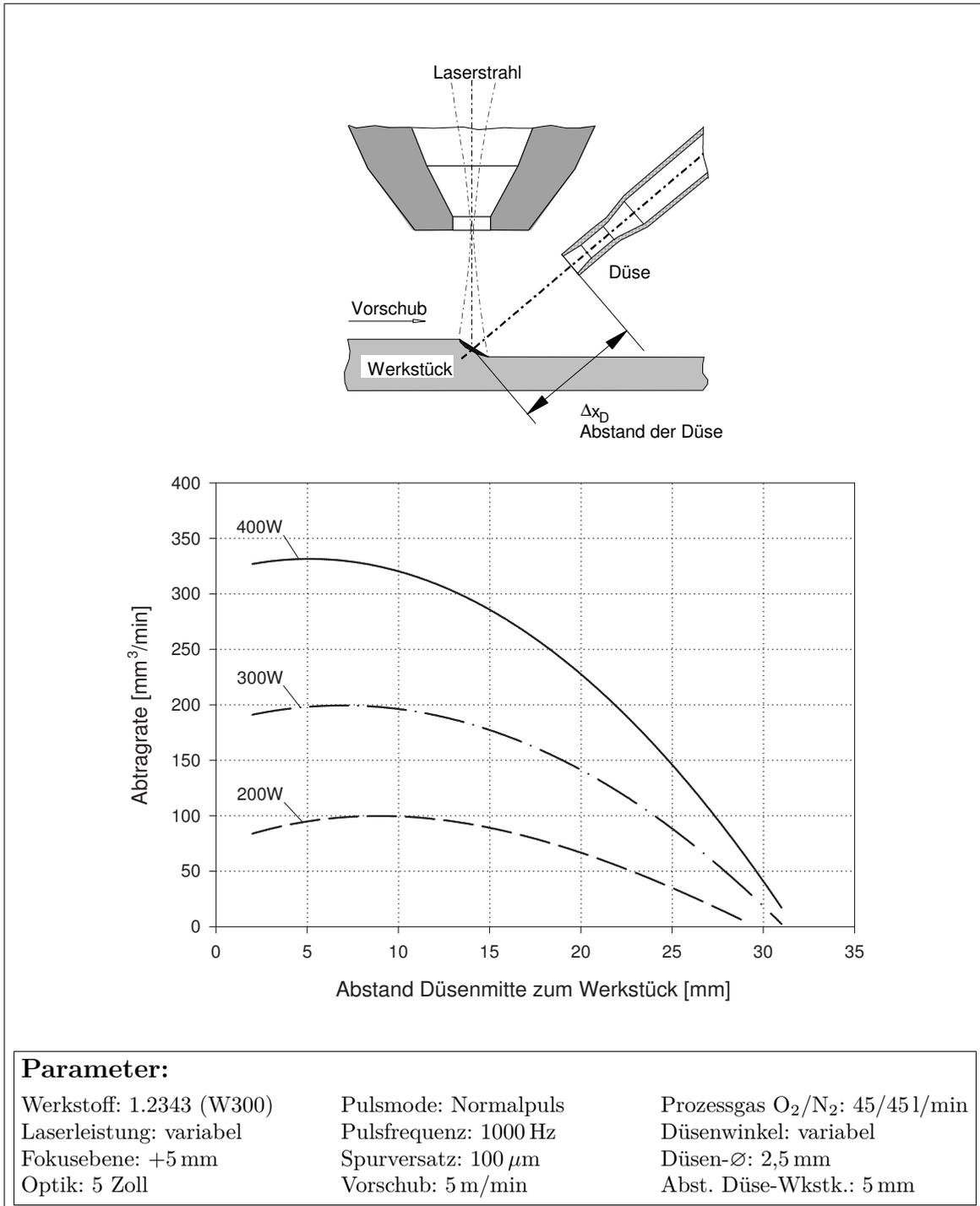


Abbildung 5.16: Änderung der Abtragrate durch Variation des Abstandes der Düse vom Werkstück für verschiedene Leistungen

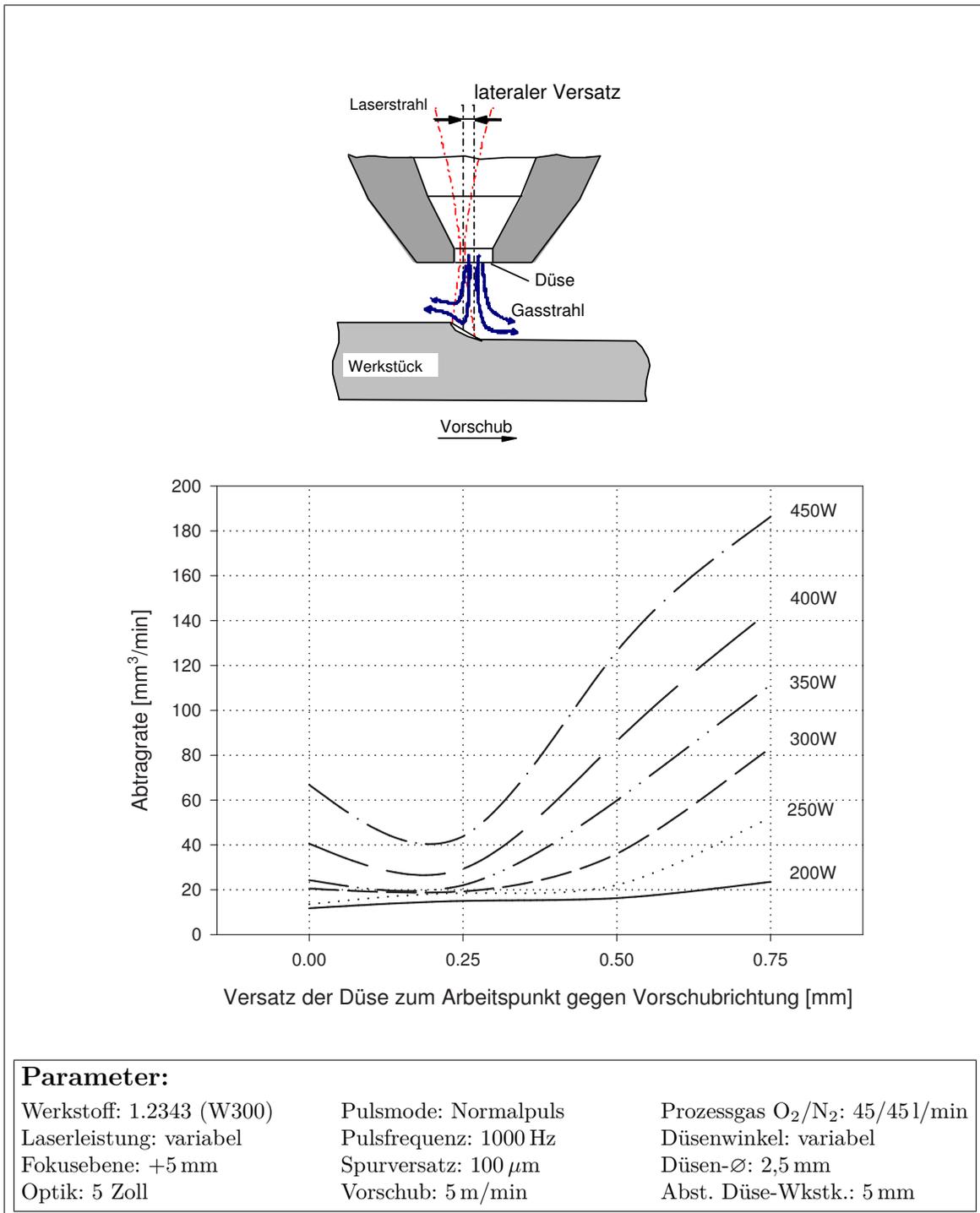


Abbildung 5.17: Verbesserung der Abtragrate durch lateralen Versatz der Düse zum Bearbeitungspunkt bei coaxial zum Laserstrahl zugeführtem Prozessgas

5.9 Oxidation

Bei Stahl wird durch die Beimischung von Sauerstoff in das Bearbeitungsgas der Abtragprozess verbessert. Dies geschieht durch mehrere vom Sauerstoff verursachten Effekte:

Steigerung der Absorption: Dadurch wird ein höherer Anteil von der Leistung der Laserstrahlung in das Werkstück eingekoppelt.

Energiegewinn: Es wird dabei durch die stattfindende exotherme Reaktion mehr Energie freigesetzt. Bei der vollständigen Verbrennung von Eisen zu Eisenoxid wird viermal soviel Energie frei, wie zum Erwärmen und Schmelzen des Volumens nötig wäre (keine Wärmeleitungsverluste berücksichtigt).

Herabsetzung der Viskosität: Bei höheren Temperaturen wird die Schmelze dünnflüssiger. Die Viskosität von Eisenoxid halbiert sich gegenüber reinem Eisen bei einer Temperatur von ca. 2100 K. Bei Temperaturen knapp über der Schmelztemperatur ist jedoch die Viskosität einer oxidierten Schmelze in etwa um das Dreifache größer als die einer nicht oxidierten Schmelze [11].

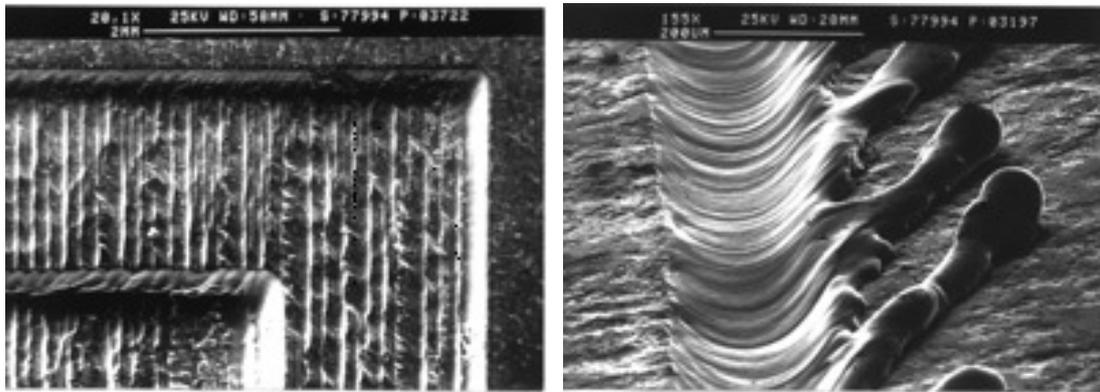
Verringerung der Oberflächenspannung: Durch diesen Einfluss wird der Austrieb der Schmelze von der Bearbeitungsstelle vereinfacht. Es lösen sich dabei die „Tropfen“ leichter von der Schmelze ab. Die Oberflächenspannung von Eisenoxid sinkt um fast 70 % gegenüber reinem Eisen. Bei einer Temperatur von 1840 K beträgt die Oberflächenspannung von Eisen ca. 1,8 N/m, die von Eisenoxid jedoch nur mehr 0,58 N/m [11].

Den Einfluss des Sauerstoffs auf die physikalischen Eigenschaften der Schmelze beim Abtragen von Metall soll die Abbildung 5.18 auf S. 79 verdeutlichen.

Im rechten Bild ist eine mit reinem Stickstoff hergestellte Spur zu sehen. Man erkennt hier deutlich die anhaftende Schmelze, die trotz eines hohen Gasdruckes von 1,5 MPa nicht restlos ausgetrieben werden konnte. Das linke Bild zeigt zwei mit einem Gasgemisch von Stickstoff und Sauerstoff (15/30 l/min N₂/O₂) unter einem Druck von 0,08 MPa abgetragene Schichten. Außerdem sieht man hier sehr deutlich die einzelnen Strukturen und die gratlosen Kanten. Für den Einfluss auf die Absorption ist die Dicke der Oxidschicht ein wesentlicher Faktor. Auf Grund der verbleibenden Oxidschichtdicke an der Randschicht kann abgeschätzt werden, ob diese ausreicht, um die Absorption beträchtlich zu verbessern [17].

Metallurgische Schliffbilder haben bei Baustahl eine Schlackendicke von 2 bis ca. 5 µm ergeben, der Großteil des schmelzflüssigen Materials wird aber während des Bearbeitungsprozesses ausgetrieben. Tatsächlich werden zumindest Oxidschichtdicken von einigen µm gebildet, wie man der Abbildung 5.19 auf S. 80 entnehmen kann.

Das linke Schliffbild zeigt eine Oxidschicht von ca. 2 µm bei einer mittleren Laserleistung von $P = 500 \text{ W}$ und einer Vorschubgeschwindigkeit von $v = 1,2 \text{ m/min}$. Besonders interessant ist im linken Bild eine Überlagerung der Schlackenschichten. Dieser Effekt



Die linke Abbildung zeigt eine mit reinem Sauerstoff abgetragene Spur. Es ist deutlich eine starke Gratbildung zu erkennen. Obwohl mit einem sehr hohen Gasdruck von 1,5 MPa gearbeitet wurde, war es nicht möglich die Schmelze vollständig auszutreiben. Das rechte Bild zeigt einen Abtrag von zwei Lagen mit einem Stickstoff-Sauerstoff Gasgemisch.

Parameter:

Werkstoff: 1.0037

Prozessgas O₂/N₂: 30/15 l/min

Prozessgasdruck linkes Bild: 1,5 MPa

Prozessgasdruck rechtes Bild: 0,08 MPa

Abbildung 5.18: Einfluss des Sauerstoffs auf das Abtragergebnis

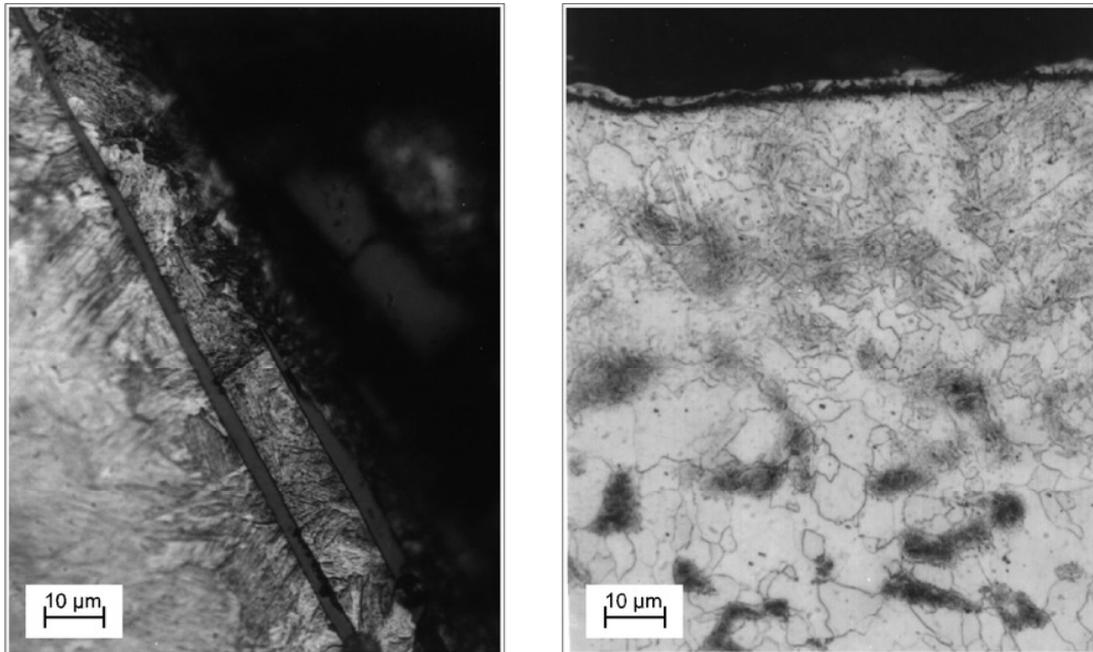
wurde wahrscheinlich durch die externe Gasströmung verursacht, welche eine turbulente Schmelzbadströmung nach sich zieht. Die tatsächliche Dicke der verbleibenden Oxidschicht hängt jedoch noch von einer Reihe verschiedener Parameter ab. Bei geeigneter Prozessführung¹ sind metallisch glänzende und damit fast oxidfreie Oberflächen machbar. Dies jedoch mit wesentlich geringeren Abtragraten.

Einen weiteren wesentlichen Einfluss auf den Abtragprozess hat neben der Oxidation auch die Wärmeleitung. Diese beiden Einflussfaktoren wirken sich jedoch gegenläufig aufeinander aus. Eine höhere Wärmeleitfähigkeit reduziert und eine stärkere Oxidation begünstigt den Schmelzabtrag.

Die genaue Erfassung der Oxidation ist derzeit noch schwierig, da einige Parameter noch nicht ausreichend bekannt sind. Aus einer umfangreichen Reihe von Untersuchungen zum Laserstrahlbrennschneiden z. B. [11] geht hervor, dass die Reinheit des Sauerstoffs einen sehr großen Einfluss auf die maximal erzielbare Vorschubgeschwindigkeit hat.

Beim Laserstrahlschmelzabtragen wird eine Stickstoff-Sauerstoff Mischung als Bearbeitungsgas verwendet, um damit gezielt den Prozess zu stabilisieren. Die hierbei entstehende Grenzschicht von Stickstoffatomen an der Schmelzoberfläche hemmt stark die

¹D. h. bei einem hohen Stickstoffanteil im Bearbeitungsgas bzw. einer hohen Vorschubgeschwindigkeit.



Die linke Abbildung zeigt ein Schliffbild mit einer Oxidschicht von ca. $2\ \mu\text{m}$. Man erkennt auch eine schichtweise Ablagerung der Schlacke. Im rechten Bild ist die Gefügeänderung in der Wärmeeinflusszone dargestellt.

Parameter:

Werkstoff: QStE 380 Baustahl
Prozessgas O_2/N_2 : 17/36 l/min

Vorschub: 1,2 m/min
Laserleistung: 500 W

Abbildung 5.19: *Oxidation und Gefügeänderung in der Randschicht*

Sauerstoffdiffusion [7].

Ein Vergleich der maximalen Schnittgeschwindigkeit beim Laserstrahlbrennschneiden mit beigemischem Stickstoff erlaubt Rückschlüsse auf die Wirkung des Stickstoffanteils beim Schmelzabtragen. Wie man in der Abbildung 5.20 auf S. 81 erkennt, kommt es bereits bei sehr geringen Verunreinigungen zu einer deutlichen Verminderung der maximal erreichbaren Vorschubgeschwindigkeit.

Bei Stickstoffanteilen von 15 % bis 70 % reduziert sich die mögliche Schnittgeschwindigkeit auf die Hälfte der Maximalgeschwindigkeit, die man bei reinem Sauerstoff erreichen würde. Bei geringen Stickstoffgehalten steigt jedoch die Qualität der Schnittkante [11].

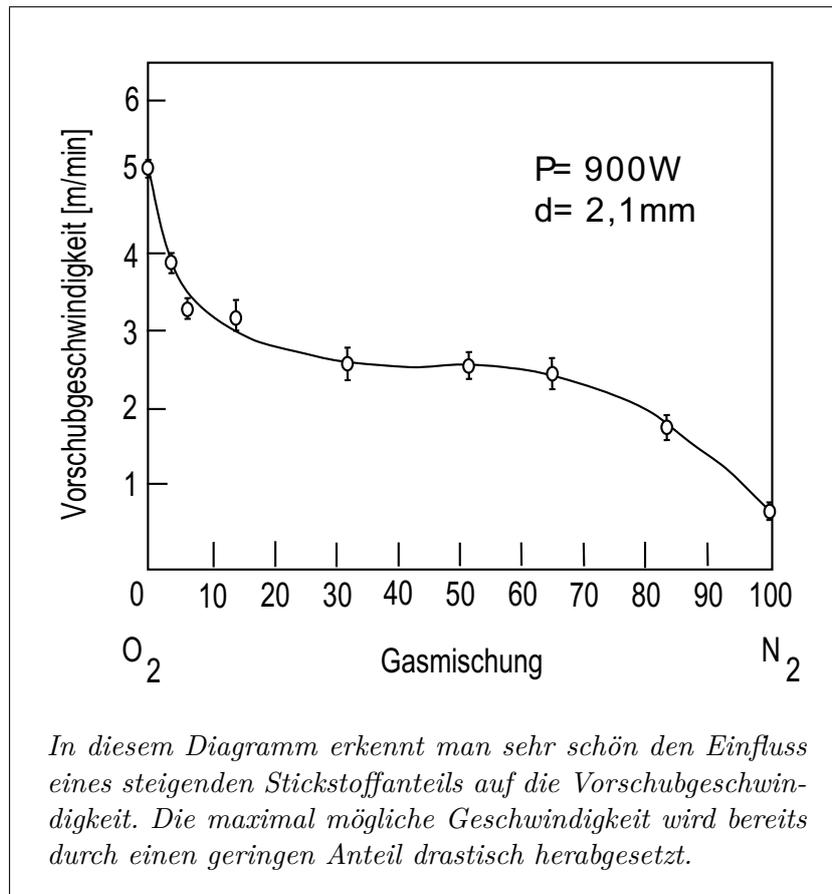


Abbildung 5.20: Maximale Schnittgeschwindigkeit in Abhängigkeit des O₂/N₂ Mischungsverhältnisses

5.10 Gefügeänderung und Wärmeeinflusszone

Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Wärmeeinflusszone und die damit verbundenen Gefügeänderungen in der Randschicht des Gesenkes. Durch den beim Laserstrahlschmelzabtragen auftretenden raschen Abkühlvorgang erreicht man ein sehr feinkörniges Gefüge.

Das rechte Bild in der Abbildung 5.19 auf S. 80 zeigt eine wärmebeeinflusste Randschicht in Baustahl. Das ferritisch-perlitische Gefüge des Grundwerkstoffs zeigt eine Perlitauflösung (Temperatur oberhalb A_{c1}) und eine Feinkornzone (Temperatur oberhalb A_{c3}) an der Randschicht. Diese Änderungen hängen entscheidend vom einwirkenden Temperaturzyklus sowie von einer eventuellen Wärmebehandlung auch noch sehr stark von den enthaltenen Legierungsbestandteilen ab [23]. Aus diesem Grund und wegen der raschen Abkühlung bedingten feinen Gefüges tritt auch eine Steigerung der Härte auf. Im vergüteten Werkstoff X38CrMoV51 (W300) mit einer Härte im Grundwerkstoff von

504 HV10 konnte bei einigen Proben eine Neuhärtung und damit ein Härteanstieg in der Randschicht auf ca. 680 bis 700 HV0,3 gemessen werden¹. Dieses feinkörnige Gefüge weist sehr gute abrasive Verschleiß Eigenschaften auf.

In der Abbildung 5.21 auf S. 82 sieht man ein sehr feines dispersiv ausgebildetes Gefüge. Des Weiteren sind die einzelnen Abtragspuren in der Wärmeeinflusszone deutlich erkennbar (eingestellter Spurversatz betrug $100\ \mu\text{m}$). Bei dieser Probe war jedoch ein Härteabfall in der Randschicht feststellbar. Das vergütete Grundgefüge hatte eine Härte zwischen 600 HV0,3 und 650 HV0,3, die Wärmeeinflusszone in den hellen Bereichen 600 HV0,3 und in den dunklen Gebieten 500 HV0,3.

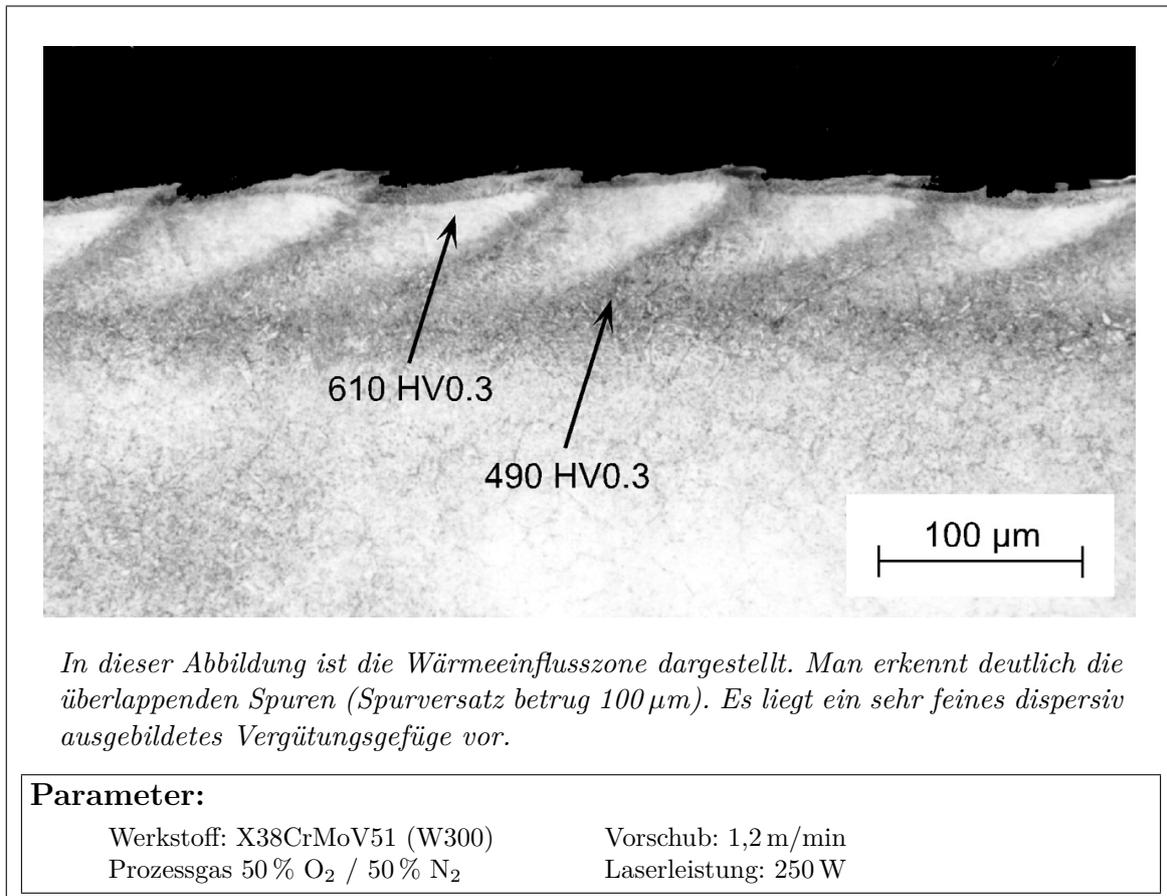


Abbildung 5.21: Wärmeeinflusszone im Werkstoff X38CrMoV51 (W300)

¹Die Prüflast musste aufgrund der schmalen Wärmeeinflusszone (ca. $120\ \mu\text{m}$) sehr klein gewählt werden.

6 Prozessoptimierung und Abtragstrategie

6.1 Prozessoptimierung

Eine Prozessoptimierung ist auch immer mit dem Ziel einer Minimierung der Verfahrenskosten verbunden. Im Falle des Laserhobelns will man möglichst hohe Abtragraten erzielen. Dies ist aber nur mit einer dementsprechend hohen Laserleistung erreichbar. Hohe Strahlleistungen der Laseranlagen bedeuten aber auch dementsprechende Investitionskosten für den Laser, der Verfahrenanlage sowie der Bereitstellung der notwendigen Peripherie in Form von Sicherheitseinrichtungen, Kühlkreisläufen und so weiter. Einschränkung kommt hier noch hinzu, dass man meist aufgrund der geforderten Oberflächenqualität die vorhandene Strahlleistung eines Schneidlasers meist nicht voll ausnützen kann.

Ein weiterer wichtiger und immer bei Fertigungsprozessen auftretender Ansatzpunkt für Optimierungen stellt die Fertigungszeit (in diesem Fall die Reparaturzeit) dar. Diese ist natürlich direkt mit der Abtragrate verknüpft, aber es kommen auch noch andere Faktoren wie z. B. die leichte Bedienbarkeit der Laseranlage zum Tragen. Bezüglich einer maximalen Abtragrate muss ein Optimum zwischen der Laserleistung, der Verfahrensgeschwindigkeit und der damit erreichbaren Oberflächenqualität gefunden werden.

Einer der wichtigsten Möglichkeiten um die Fertigungszeit von lasergehobelten Druckgussformen zu verbessern, ist das Schaffen der Möglichkeit einer bidirektionalen Bearbeitung der Bauteile. Hier möchte ich auch auf den Unterabschnitt 5.2 auf der S. 53 verweisen. Bei der unidirektionalen Variante kann man erst nach zurückfahren in die Ausgangslage und erfolgtem Spurversatz mit der nächsten Spur beginnen. Es besteht auch hierbei die Möglichkeit eines Abtrags beim Zurückfahren, aber aufgrund der schleppenden Anordnung bringt ein schnelleres verfahren ohne Austrieb in die Anfangsposition mehr, als eine deutlich geringerer Abtragrate bei niedriger Verfahrensgeschwindigkeit. Eine bidirektionale Bearbeitung bringt also nur wirklich Vorteile, wenn man den ganzen Prozess über mit einer stehenden Düsenanordnung¹ arbeiten kann.

Eine solche Anordnung ist aber nicht trivial zu bewerkstelligen, da man entweder zwei Düsen verwendet, welches wiederum die Zugänglichkeit zu der Bearbeitungsstelle beeinträchtigt, oder den Bearbeitungskopf drehbar ausführt. Letzteres ist aber wegen der geforderten hohen Geschwindigkeit beim Wenden, das nur in der Phase des „Überschießens“ möglich ist, der genauen Justage der Düse auf den Bearbeitungspunkt sowie der Berücksichtigung diverser Anschlüsse für die benötigten Gase, mit einem hohen Aufwand verbunden.

¹Damit entfällt der „Leerweg“ beim Zurückfahren in die Ausgangslage.

Aufgrund des nachträglichen Schweißvorgangs bzw. der sich daraus ergebenden nicht extremen Anforderungen an die Maßgenauigkeit, Formgenauigkeit, Lagegenauigkeit und der Oberflächenqualität der hergestellten Bauteile ist eine Optimierung in Richtung geringerer Fertigungszeiten einfacher zu bewerkstelligen. Trotzdem möchte ich noch die vorher erwähnten geometrischen Qualitätsmerkmale etwas genauer erläutern [10]:

Maßgenauigkeit: Bezeichnet die Einhaltung eines vorgeschriebenen Fertigungsmaßes. Maßfehler sind die Abweichungen zwischen dem Soll- und Istmaß.

Lagegenauigkeit: Wird als die Einhaltung von Kanten, Flächen oder Mantellinien zur Solllage bezeichnet.

Formgenauigkeit: So wird die Einhaltung der vorgeschriebenen geometrischen Grundform (Gerade, Kreis, Ebene usw.) bezeichnet.

Oberflächenqualität: Abgetragene Oberflächen sind mit mehr oder minder großen Unebenheiten versehen, die als Rauheit bezeichnet werden.

Zusätzlich zu dieser Qualitätsbeurteilung muss bei lasergefertigten Werkstücken auf folgende Einflüsse Rücksicht genommen werden:

Oxidbildung: Durch den beigemischten Sauerstoff im Bearbeitungsgas oxidiert die Schmelze und es verbleibt an der bearbeiteten Werkstückoberfläche eine dünne Oxidschicht. Diese beeinträchtigt die Korrosionseigenschaften von hochlegierten Stählen. Genauer dazu findet man im Abschnitt 5.9 auf der S. 78.

Gefügeänderung & Wärmeeinflusszone: Laserhobeln ist ein thermisches Abtragverfahren bei dem eine wärmebeeinflusste Zone entsteht, in der Gefügeänderungen gegenüber dem Grundwerkstoff möglich sind (z. B. Aufhärtung, Nitrierung). Bei Hartguss können zudem in der Randschicht auch Risse auftreten (siehe Abschnitt 5.10 auf S. 81).

Reproduzierbarkeit: Durch die hohe Anzahl an Einflussfaktoren beim Laserstrahlabtragen erreicht man nur in bestimmten Prozessfenstern eine sehr gute Reproduzierbarkeit. Für den Fall der Reparatur von Druckgussformen ist diese jedoch absolut ausreichend.

6.2 Abtragstrategie

Eine optimale Abtragstrategie wird genau dann erreicht, wenn man die geforderte Werkstückgeometrie mit den entsprechenden Qualitätsmerkmalen in der kürzest möglichen Fertigungszeit erzielt. Deshalb muss diese dem Werkstoff und den geforderten Qualitätsmerkmalen angepasst werden. Bei dieser Optimierung sind eine große Anzahl von Parametern zu berücksichtigen. Dies ist - wie bereits oben erwähnt - nicht immer einfach zu bewerkstelligen.

Grundsätzlich sind breite und flache Spuren leichter abzutragen als schmale und tiefe, bei denen der Schmelzaustrieb aufgrund der steilen Flanken besonders schwierig von-statten geht. Aber gerade beim Laserhobeln von Gussgesenken sind für die Erstellung der Reparaturschweißnuten meist tiefere Ausnehmungen, die mit zunehmender Tiefe immer schmaler werden, herauszuarbeiten. Diesem Problem kann man sehr gut mit entsprechender Wahl von passenden Schicht- bzw. Layerdicken entgegentreten. Wenn nun mehrere Schichten abgetragen werden müssen, besteht die Möglichkeit mit einem „Schruppabtrag“ einzelner Schichten zu beginnen und die letzten Schichten der Kontur mittels eines „Schlichtabtrags“ zu finalisieren. Mit diesem Schlichtabtrag erreicht man sehr gute Oberflächenqualitäten und man kann damit die geforderten Toleranzen einhalten.

Man muss nun - den Qualitätsanforderungen der folgenden Schweißung als auch der Oberflächengüte für die Form entsprechend - eine optimale Strategie ausarbeiten. Dabei sind natürlich die vorher aufgezeigten Erkenntnisse je nach Relevanz und Einfluss miteinzubeziehen.

7 Ausblick

Da gerade in der Materialbearbeitung mit dem Laser die Entwicklung schnell voranschreitet, sind Weiterentwicklungen in verschiedene Richtungen denkbar. Eine Variante wäre die Verwendung von Festkörperlasern in Zusammenhang mit Lichtwellenleiter. Einerseits ergibt sich durch diese Kombination die Möglichkeit einer 3D-Bearbeitung unter der Zuhilfenahme eines Roboters, welches eine sehr flexible Lösung auch für komplizierte Geometrien darstellt. Andererseits besteht auch die Option einen Bearbeitungskopf für den vollständigen Reparaturprozess zu entwickeln. Also sowohl das Ausfugen der Risse in der Form als auch die darauffolgende Schweißung selbst mit nur einem Kopf zu bewerkstelligen.

Denn gerade bei den Festkörperlasern, die aufgrund ihrer Wellenlänge eine deutlich höhere Absorption bei Stahl aufweisen¹, hat sich durch Neuentwicklungen (z. B. Scheiben- bzw. Faserlaser) in Bezug auf die Strahlqualität eine signifikante Steigerung ergeben. Große Probleme bei der Verwirklichung dieses Ansatzes stellen die Unterbringung von der Prozessgaszufuhr für das Laserhobeln und der Pulverzuführung für den Schweißvorgang in einem sehr begrenzten Bereich um den Bearbeitungskopf dar, wenn die Zugänglichkeit nicht verloren gehen soll.

Eine völlig andere Zugangsweise wäre die Verwendung von einer sogenannten Scanneroptik. Dabei erfolgt die Strahlführung über sehr schnell bewegliche Spiegel, die senkrecht zueinander stehen. Bei Verwendung mit speziellen Optiken² wird ein definierter Arbeitsbereich aufgespannt, der sehr schnell mit dem Laserstrahl abgefahren werden kann, da nur die Spiegel selbst und nicht der ganze Kopf (bzw. die Scanneroptik) bewegt werden muss. Ein großer Nachteil dieses Konzeptes liegt jedoch in der Zuführung des Prozessgases. Denn gerade ein Vorteil der Scanneroptik liegt im relativ großen Abstand zwischen Optik und Bearbeitungspunkt, um auch einen entsprechenden Arbeitsbereich zu erhalten.

Es stehen also noch genügend zu lösende Probleme einer erfolgreichen Weiterentwicklung im Wege. Aber gerade deren Beseitigung stellt auch einen Anreiz für weitere Forschungstätigkeit in diesem Bereich dar.

¹Siehe dazu Abbildung 2.6 auf S. 17.

²Sogenannte Planfeldobjektive. Diese bestehen aus mehreren übereinanderliegenden Einzellinsen.

Literaturverzeichnis

- [1] BÖHLER: *Edelstahl-Handbuch*. Böhler GesmbH, Mariazeller Strasse 25, A-8605 Kapfenberg, 06 1989.
- [2] CHRYSSOLOURIS, G., P. SHENG und W. C. CHOI: *Three-Dimensional Laser Machining of Composite Materials*. Journal of Engineering Materials, Technology, 11 1990. Vol. 112, S. 387-392.
- [3] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN 8590, Fertigungsverfahren Abtragen (Einordnung, Unterteilung, Begriffe)*, 06 1978. Vornorm.
- [4] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V.: *DIN 32540, Thermisches Abtragen mit dem Laserstrahl (Definition, Einflußgrößen, Durchführung)*, 1996. Vornorm.
- [5] EBERL, G., P. HILDEBRAND, M. KUHL, H. HÜGEL, E. MEINERS, M. WIEDMAIER und TH. ZELLER: *Laserspanen eine neue Technologie zum Abtragen*. Laser und Optoelektronik, 25:80–87, 1993.
- [6] HÜGEL, H.: *Strahlwerkzeug Laser*. Maschinenbau. B. G. Teubner, Stuttgart, 1992.
- [7] IVARSON, A.: *On the Physics and Chemical Thermodynamics of Laser Cutting*. Doctoral Theses, Lulea University of Technology, 1993.
- [8] KERNER, S.: *HSC im Automatikbetrieb im Werkzeugbau*. Carl Hanser Verlag, München, 1996. Werkstatt und Betrieb.
- [9] KUHL, M.: *Grundlegende Untersuchungen zum Laserabtragen von Werk- und Formstählen*. Broschüre zur Abschlußpräsentation des BMBF-Verbundprojektes. VDI-Technologiezentrum, Düsseldorf, 1996.
- [10] KÖNIG, W.: *Fertigungsverfahren*, Band 3 der Reihe *Studium und Praxis*. VDI Verlag, Düsseldorf, Abtragen Auflage, 1990.
- [11] MIYAMOTO, I. und H. MARUO: *Mechanism of Laser Cutting*. Welding in the World, Pergamon Press plc IIW/IIS, 29(9/10):283–294, 1991.
- [12] N, N.: *Deckel Multiform Betriebsanleitung*. Fa. Deckel, Munich, Germany. Produktinformation der Sandvik International.
- [13] N, N.: *Rotierende Werkzeuge, Produkte zur Materialbearbeitung*. Sandviken, Schweden, 1996. Produktinformation der Sandvik International.

- [14] OERLIKON: *Handbuch Oerlikon OPL 2000 Laser*. Oerlikon Precision Laser SA, Route des Avouillons 16, CH-1196 Gland, Schweiz, 11 1993.
- [15] PATEL, C.K.N.: *Selective excitation trough vibrational energy transfer and optical maser action in N₂-CO₂*. Phys. Rev. Lett., 13:617, 1964.
- [16] PATZ, M.: *Fräsen statt Schleifen*. Carl Hanser Verlag, München, 1996. Werkstatt und Betrieb.
- [17] PENZ, A.: *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Relief- und Gesenkherstellung mit CO₂-Laserstrahlung*. Dissertation, Technische Universität Wien, Mai 1998.
- [18] PROMETEC GMBH: *PROMETEC Laserscope UFF 100*, 1996. Handbuch, Bedienungsanleitung.
- [19] SCHUÖCKER, D.: *Handbook of the Eurolaser Academy*, Band 1, first edition der Reihe *Eurolaser Academy*. Chapman & Hall, London SE1 8HN, UK, 1998. Edited by Dieter Schuöcker.
- [20] SCHUÖCKER, D.: *High Power Lasers in Production Engineering*. Imperial College Press, World Scientific, London SW7 2BT, UK, 1999. Includes bibliographical references and index.
- [21] SCHUÖCKER, D.: *Mechanische Technologie II - Spanlose Bearbeitung*. Institut für spanlose Fertigung und Hochleistungslasertechnik, Arsenal Objekt 207, A-1030 Wien, 1999. Vorlesungsskriptum.
- [22] SCHUÖCKER, D. und K. SCHRÖDER: *Laserbearbeitungsvorrichtung*. Österreichische Patentamt, 12 1995. Österreichische Patentschrift AT 401 247.
- [23] VEES, G.: *Umschmelzhärten von Extruderschnecken mit dem CO₂-Hochleistungslaser*. Dissertation, Technische Universität Wien, November 1994.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Laserhobeln im Einsatz	6
1.2	Bearbeitete Proben	8
2.1	CO ₂ Molekül	11
2.2	Übergangsschema des CO ₂ -Lasers	12
2.3	Prinzipskizze längsgeströmter CO ₂ -Laser	14
2.4	Mögliche Bauformen von Gaslaser	15
2.5	Einfluss der Intensität	16
2.6	Absorption über Wellenlänge	17
2.7	Energieeinkopplung über Intensität	18
3.1	Prinzip des Laserhobelns	21
3.2	Laserstrahlschneidabtragen	22
3.3	Laserstrahloxidspanen	23
3.4	Verfahrensvergleich	26
4.1	Bearbeitungsstation	31
4.2	Ansicht des Laser	33
4.3	Crossjet	35
4.4	Aufbau mit seitlicher Düse	36
4.5	Verwendeten Prozessgasdüsen	37
4.6	Ansicht Düsenhalter und Mikrometertisch	39
4.7	CNC	41
4.8	Prozessgasflaschen	43
4.9	Laserscope UFF 100 Ansicht	45
4.10	Laserscope UFF 100 Schema	46
4.11	Laserscope UFF 100 Nadel	47
4.12	Kaustik der verwendeten Linse	47
4.13	Strahltaille in der Nähe des Fokus	48
4.14	Intensitätsverteilung der verwendeten Linse	48
4.15	Oberflächenrauheitsprüfgerät	50
4.16	Durchflussmessgerät	51
5.1	Überschießen	53
5.2	Prozessfenster für Laserleistung	55
5.3	Abtragrate verschiedener Stahlsorten	56

5.4	Proben verschiedener Leistungen	57
5.5	Abtragate und Rauhtiefe über Leistung	59
5.6	Oberflächenstruktur abgetragener Schichten	61
5.7	Flankensteilheit	62
5.8	Abtragtiefe über Leistung und Fokuslage	63
5.9	Prozessfenster Abtragtiefe über Vorschubgeschwindigkeit	65
5.10	Prozessfenster Abtragate über Vorschubgeschwindigkeit	66
5.11	Abtragate und Rauhtiefe über Vorschubgeschwindigkeit	68
5.12	Abtragate über Vorschubgeschwindigkeit, Leistung und unterschiedli- chen Gasmischungen	69
5.13	Abtragtiefe über Leistung und Vorschubgeschwindigkeit	70
5.14	Abtragate über Winkel der Düse	72
5.15	Abtragate über Versatz der Düse	74
5.16	Abtragate über Abstand der Düse vom Bearbeitungspunkt	76
5.17	Abtragate über lateralen Versatz der Düse	77
5.18	Einfluss Sauerstoff auf das Abtragen	79
5.19	Oxidschicht	80
5.20	Max. Schnittgeschw. in Abh. des O ₂ /N ₂ Mischungsverhältnisses	81
5.21	Wärmeeinflusszone	82
A.1	NUM HMI	94
A.2	NUM Edit-Part-Program	96
A.3	NUM PLCTool	97
A.4	NUM SETTool	98
A.5	Fokuslage	99
A.6	Kaustik 2.5, 3D	100
A.7	Kaustik 2.5	100
A.8	Kaustik 2.5, 3D, 86%	101
A.9	Kaustik 2.5, 2D, 86%	101
A.10	Kaustik 5, 3D	102
A.11	Kaustik 5	102
A.12	Kaustik 5, 3D, 86%	103
A.13	Kaustik 5, 2D, 86%	103
A.14	Kaustik 7.5, 3D	104
A.15	Kaustik 7.5	104
A.16	Kaustik 7.5, 3D, 86%	105
A.17	Kaustik 7.5, 2D, 86%	105

Tabellenverzeichnis

4.2 Daten des Lasers 34
4.3 Daten Prometec 49
A.1 Chemische Zusammensetzung der Stähle 93
A.2 Fokusabstände 99

Anhang

A Anhang

A.1 Werkstoffkennzahlen

DIN	Bezeichnung	Fa.bez.	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V
1.2343	X38CrMoV51	W300	0,36	1,10	0,40	5,00	1,30	-	0,40
1.2312	40CrMnMoS86	M200	0,40	0,40	1,50	0,07	1,90	0,20	-
1.0978	QStE 380 TM	-	0,18	0,50	1,60	-	-	-	-
1.2842	90MnCrV8	K720	0,90	0,25	2,00	0,35	-	-	0,13
1.1545	C105W1	K990	1,05	0,20	0,20	-	-	-	-

Tabelle A.1: *Chemische Zusammensetzung der verwendeten Stähle in %*

Hauptanwendungsgebiete dieser Stähle: [1]

X38CrMoV51 Warmarbeitsstahl (W300): Für hochbeanspruchte Warmarbeitswerkzeuge wie Druckgießwerkzeuge, Pressmatrizen, Formteilpressgesenke, Pressdorne und Warmfließpresswerkzeuge. Sowie auch für Werkzeuge in der Schrauben-, Mutter-, Nieten- und Bolzenerzeugung

40CrMnMoS86 Kunststoffformenstahl (M200): Für mittlere und große Formen für die Kunststoffverarbeitung, Formrahmen für Kunststoff- und Druckgussindustrie, sowie Teile für den allgemeinen Maschinen- und Werkzeugbau.

QStE 380 TM Feinkornbaustahl: Für die allgemeine Verwendung im Maschinenbau, wie z. B. Rahmenkonstruktionen, Längsträger sowie Kaltpressteile und -profile.

90MnCrV8 Kaltarbeitsstahl (K720): Wird für Schnitt- und Stanzwerkzeuge, Gewin- deschneidringe und -backen, Reibahlen sowie Kunststoff- und Gummipressformen verwendet.

C105W1 Unlegierter Werkzeugstahl (K990): Für Scherenmesser, Press- und Prägestempel, Lochstempel, Dorne, Durchschläge, Schlaghämmer sowie Hobel- messer und Polierwalzen.

A.2 Software der NUM CNC-Steuerung

Die verwendete Software der Firma NUM-Güttiner AG ist für IBM PC sowie Kompatible Computer entworfen worden. Die Systemvoraussetzungen für das verwendete Programmpaket werden im allgemeinen von allen heute verfügbaren PCs erfüllt, sofern ein Windows-Betriebssystem (Windows 3.0 oder höher bzw. MS-DOS ab der Version 3.1) verwendet wird.

A.2.1 NUM PC-Bedienpanel HMI

Die Oberfläche der NUM HMI¹ Software stellt die Kommunikationsschnittstelle zwischen der CNC-Steuerung und dem Bedienpersonal bei der Verwendung eines Personalcomputers dar.

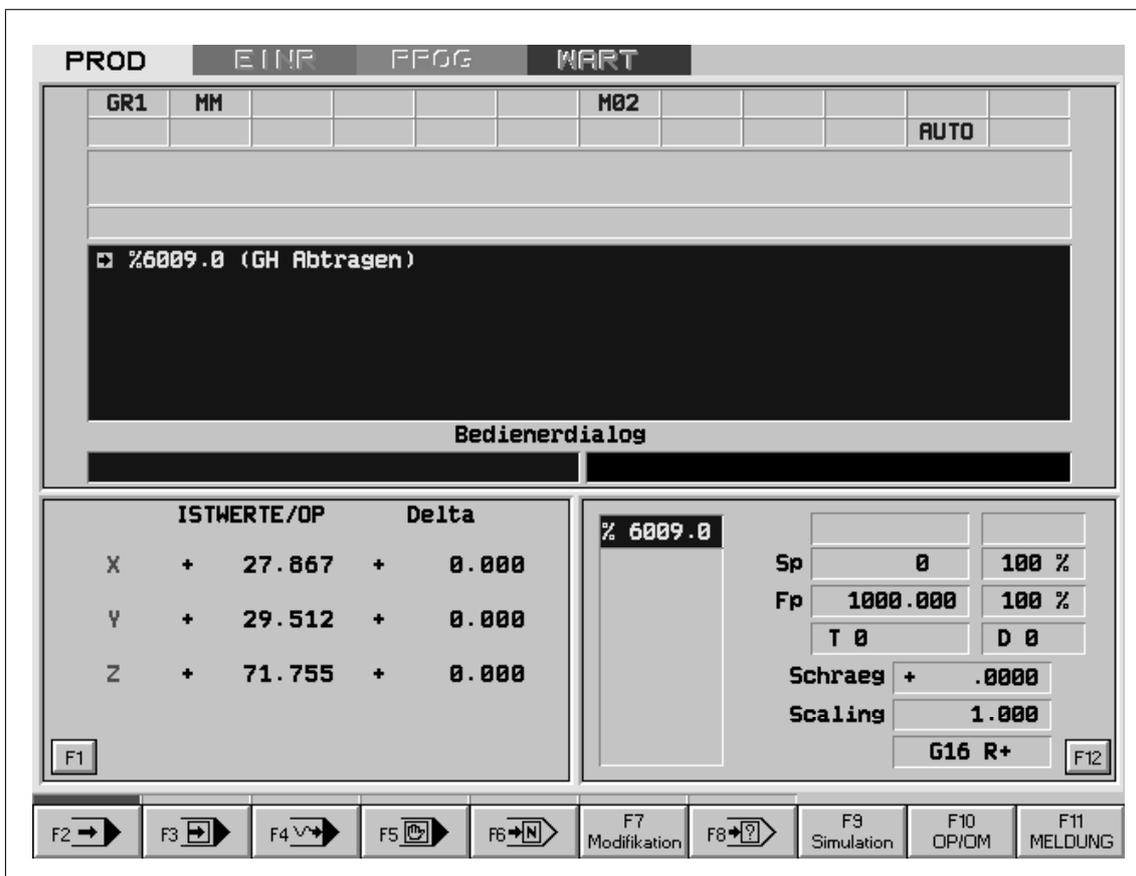


Abbildung A.1: PC-Bedienpanel NUM HMI

¹NUM Human-Machine-Interface.

In der Abbildung A.1 auf der S. 94 erkennt man (oben im Bild) die Unterteilung in die Reiter:

- „**PROD**“ ⇒ Produktion (Achsanzeigen, NC und SPS Meldungen)
- „**SET**“ ⇒ Settings (Werkzeugkorrekturen, Nullpunktsverschiebung)
- „**PROG**“ ⇒ Programme (Programmauswahl)
- „**UTIL**“ ⇒ Hilfsprogramme (Anzeige Systemvariablen und -fehler sowie Identifikation und Initialisierung der Steuerung)

Im unteren Teil des Bildes sind die einzelnen Buttons für die Betriebsartwahl (Auto, Satzweise, Eilgang, Test, ...) als auch Umschaltung Programm- Maschinennullpunkt integriert worden. Die HMI-Bedienoberfläche ist gänzlich über die Tastatur - vorzüglich mittels der Funktionstasten - zu benutzen.

A.2.2 NUM Edit-Part-Program EditPP

Die Software EditPP ist ein Programm zur Verwaltung, zum Editieren und zum Transfer von Werkstückprogrammen zwischen einer CNC-Steuerung der Baureihe NUM 1050 und einem Computer. Dieser Programmreditor ermöglicht alle Operationen für den Transfer von Teileprogrammen zwischen dem PC-Bedienfeld und der CNC, und ist auch zuständig für die Bearbeitung der Programme.

Wie man der Abbildung A.2 aus S. 96 entnehmen kann ist der linke Bereich für die Anzeige der in der CNC gespeicherten Werkstückprogramme (Nummer und Titel) zuständig. Im rechten Teil des Bildes ist hingegen die Darstellung der im PC vorhandenen Programme möglich. Hier gibt es auch mehrere Möglichkeiten zur Programmverwaltung, wobei hier vor allem die Möglichkeit der Zuweisung eines Titels (Programmnamen) zusätzlich zu der bei CNC-Steuerungen verwendeten Nummerierung möglich ist. Zwischen diesen beiden Bereichen befinden sich die Buttons für die Übertragung von bzw. zum Speicher der CNC-Steuerung.

Die Verwaltung der Werkstückprogramme umfasst dabei:

- den Transfer
- die Bearbeitung
- das Kopieren und Löschen von Dateien und Verzeichnissen

Es ist auch eine Öffnung von eigenen PC-Applikationen durch frei programmierbare Funktionstasten integrierbar.

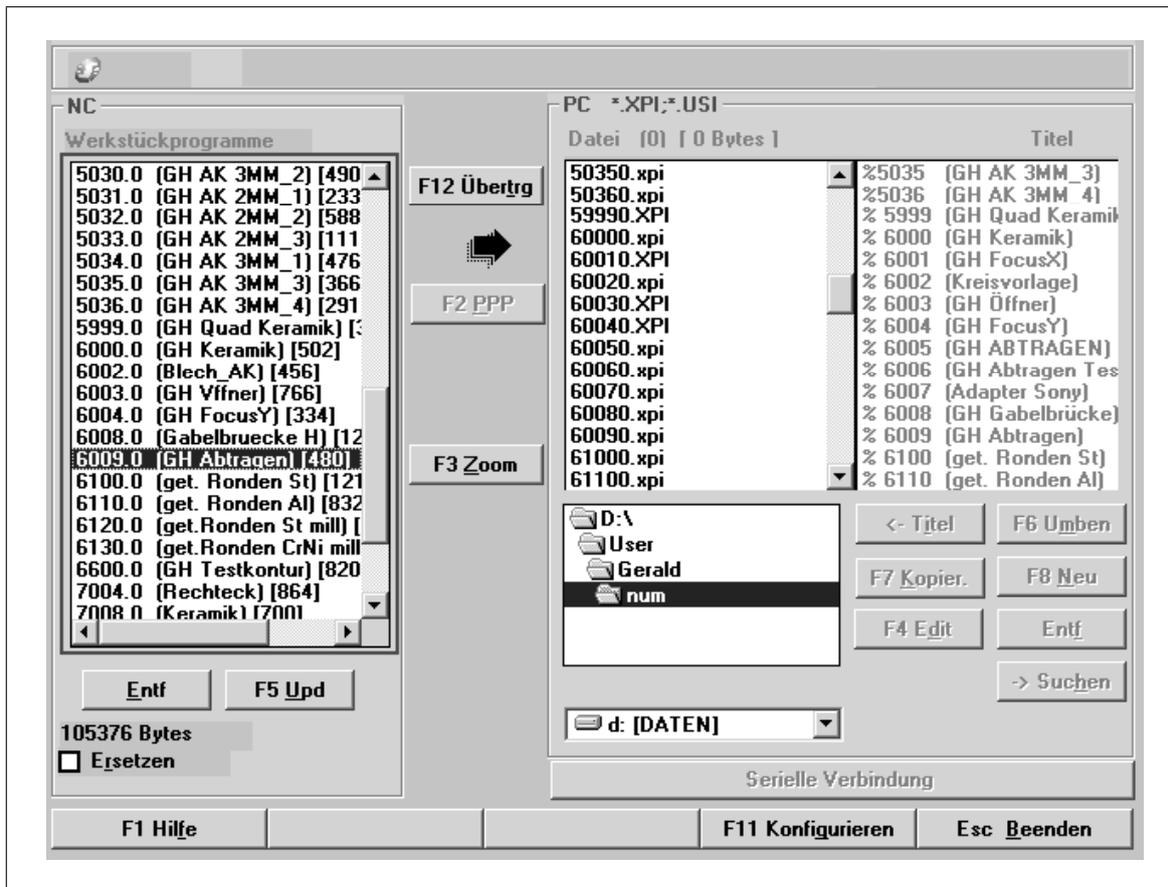


Abbildung A.2: NUM Edit-Part-Program

A.2.3 NUM PLCTool

Die Abbildung A.3 zeigt die Programmoberfläche des PLCTool Applikationssoftwarepaketes. Dieses dient hauptsächlich zur Programmierung der Automatisierungsfunktionen der CNC-Steuerung NUM 1050 in der Kontaktsprache „Ladder“. Es besteht aber auch die Möglichkeit die Programmiersprache „C“ für diese Zwecke heranzuziehen. Zur Umwandlung der geschriebenen Module von „C“ nach „Ladder“ wurde ein Compiler¹ in den Lieferumfang mit aufgenommen.

Weiters ermöglicht diese Software:

- das Editieren der Maschinenparametertabellen und Teileprogramme
- den Transfer von Parametertabellen, Archivierungsdateien und Teileprogrammen an die CNC

¹Compiler MCC68K von Microtec Research.

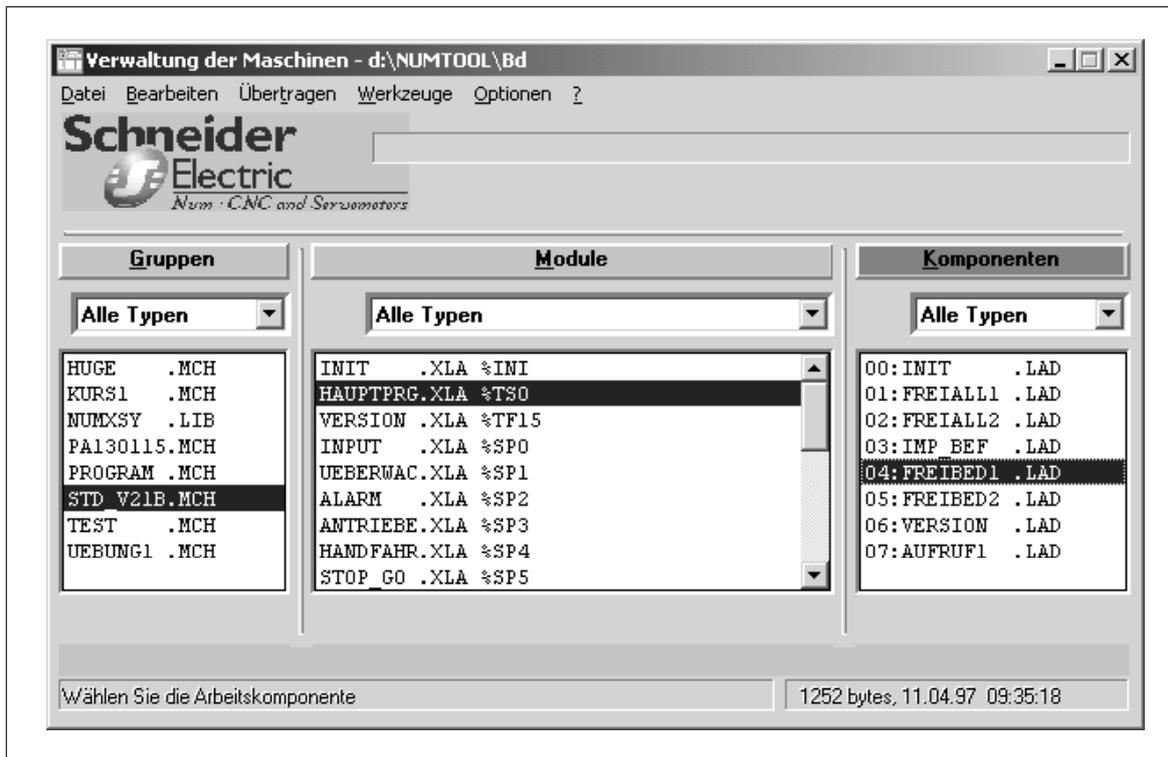


Abbildung A.3: NUM PLCTool

A.2.4 NUM SETTool

Die Software SETTool ist ein Hilfsprogramm zur Integration der CNC und der Antriebsverstärker in die Maschine. Es erleichtert erheblich die Inbetriebnahme und ist auch für Optimierungen der Einstellungen zu verwenden. Man kann bei der Verwendung zwischen zwei Betriebsarten wählen. Entweder arbeitet man im „Lokalen Modus“¹ bzw. „Offline Mode“ oder wählt den „Verbundenen Modus“ bzw. „Online Mode“.

Es besitzt drei Funktionsbereiche:

- „**Konfiguration**“ ⇒ Die Konfiguration der CNC und der digitalen Antriebsregler
- „**Einstellung**“ ⇒ Die Einstellung von Achs- und Spindelregelkreisen
- „**Tools**“ ⇒ Tools für spezielle Funktionalitäten (digitales Oszilloskop)

¹Dabei werden die geänderten Parameter in Parametermodulen abgespeichert und können später mittels dem „Machine Manager“ zur CNC übertragen werden.

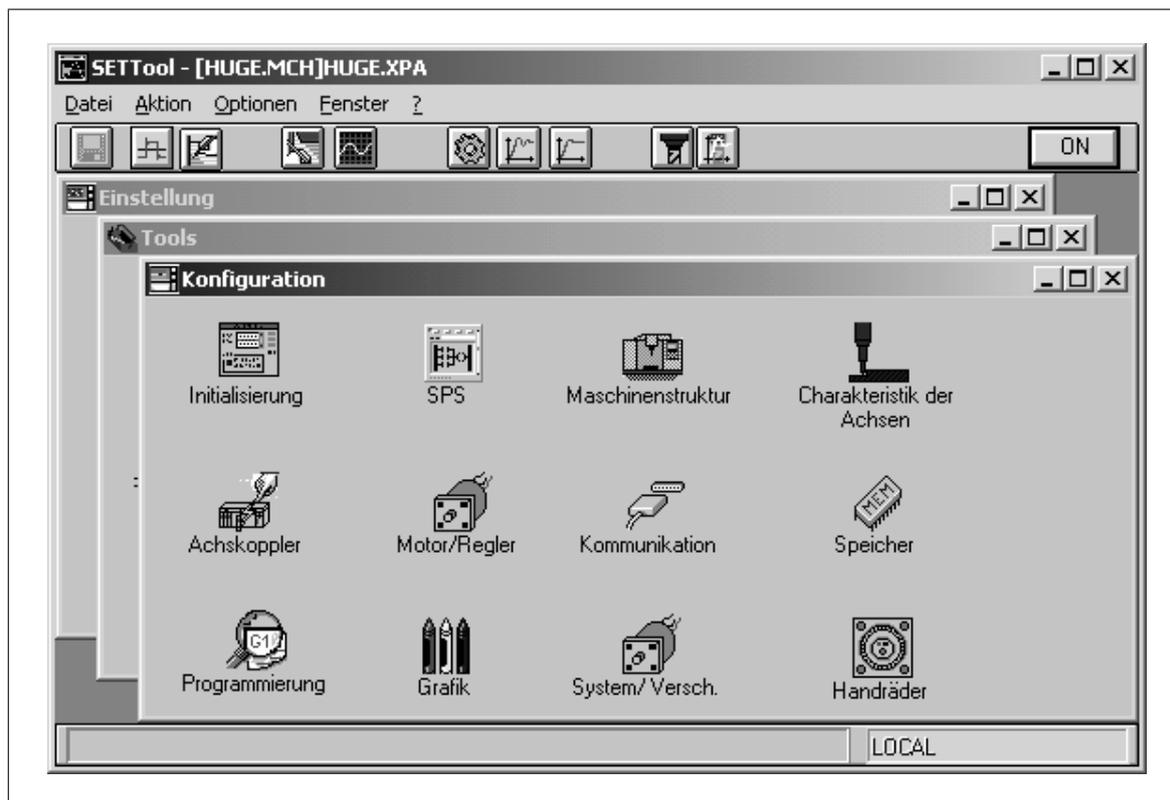


Abbildung A.4: NUM SETTool

A.3 Prometec-Messung

Die Laserstrahlung wurde mit einem Leistungsmessgerät der Firma Prometec vermessen. Auf den nun folgenden Seiten sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen dargestellt. Es wurde mit diesem Messgerät außerdem die Strahlkaustik und die exakte Fokusslage ermittelt.

Die nun folgenden Seiten zeigen die aufgenommenen Daten der drei für diesen Laser verfügbaren Linsen. Es ist die Strahlkaustik in verschiedenen Darstellmoden wiedergegeben.

A.3.1 Fokusslage

Die Fokusslagen sind in der folgenden Abbildung dargestellt. Das Maß „X“ gibt den Abstand von der Düsenunterkante bis zur Fokusslage bei Nullstellung der Verstelleinheit an. Die Fokusslagen wurden außerdem noch mit Einbränden in Plexiglas kontrolliert.

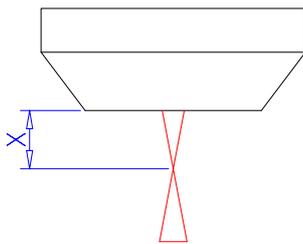


Abbildung A.5: Fokusslagen

Düsendurchmesser	Maß „X“
2.5"	-2
5"	4
7.5"	4

Tabelle A.2: Fokussabstände der verschiedenen Linsen

A.3.2 Kaustiken

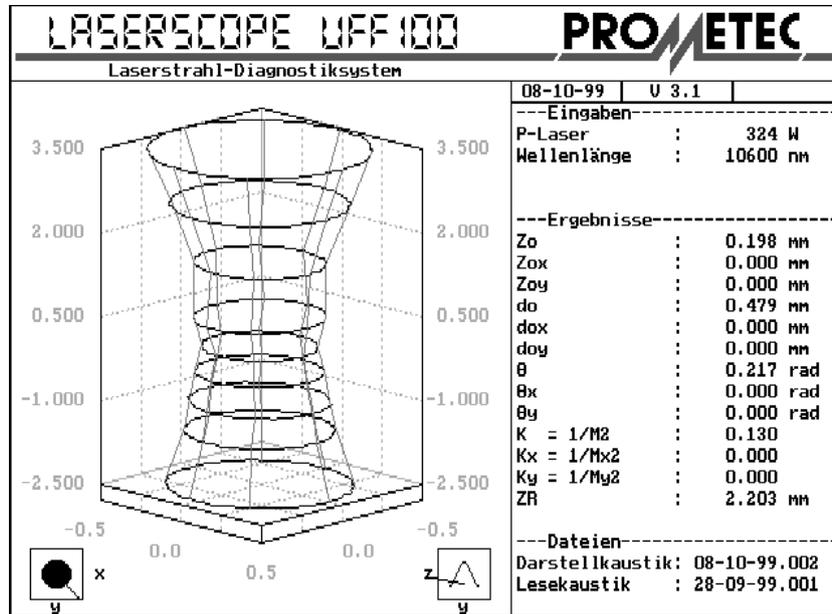


Abbildung A.6: Kaustik der 2.5 Linse mit Darstellmodus 3D-Radius

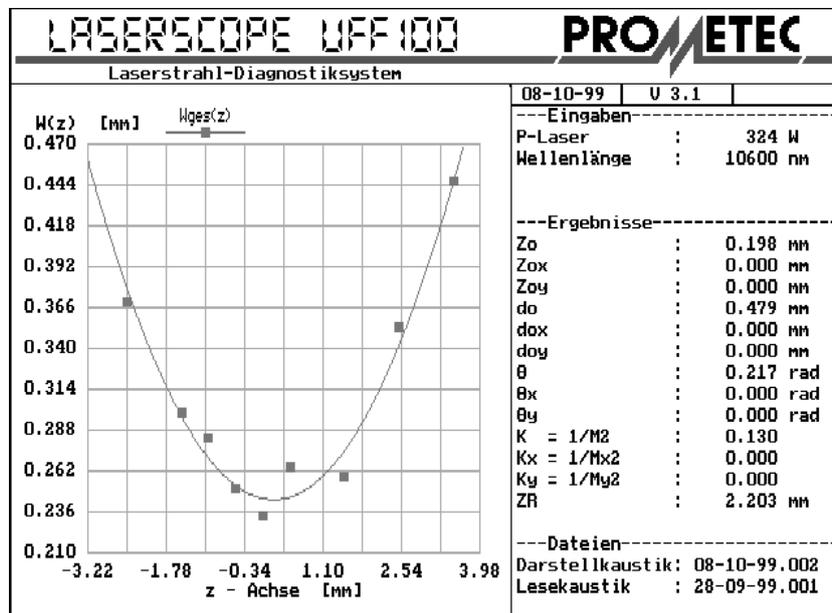


Abbildung A.7: Kaustik der 2.5 Linse

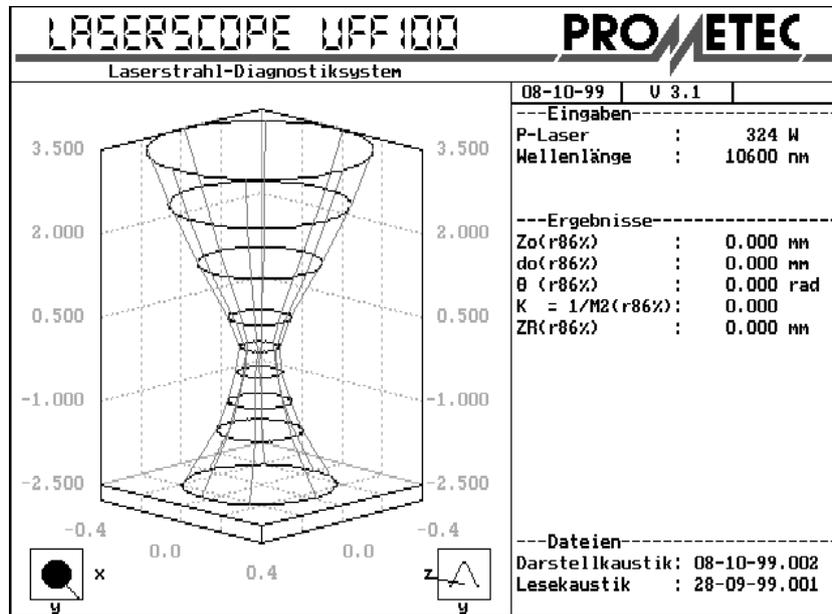


Abbildung A.8: Kaustik der 2.5 Linse mit Darstellmodus 3D - 86% - Radius

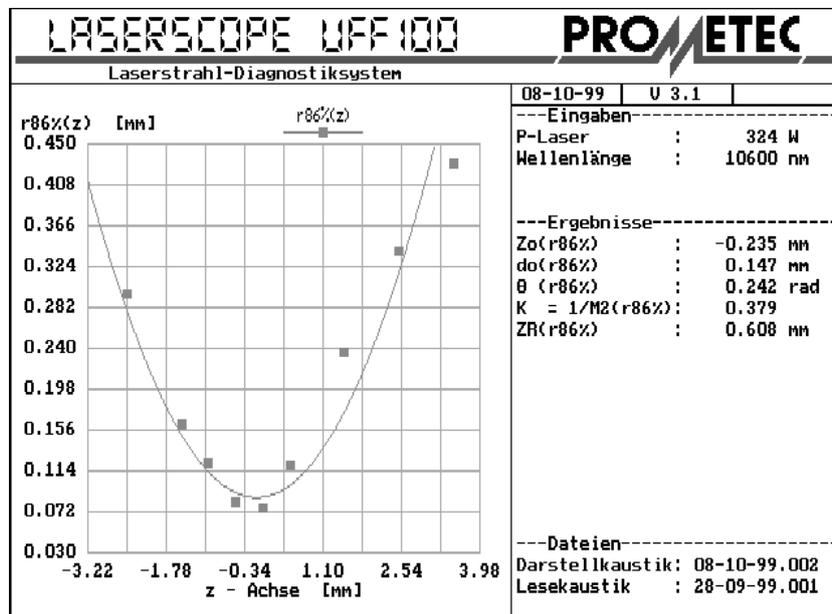


Abbildung A.9: Kaustik der 2.5 Linse mit Darstellmodus 2D - 86% - Radius

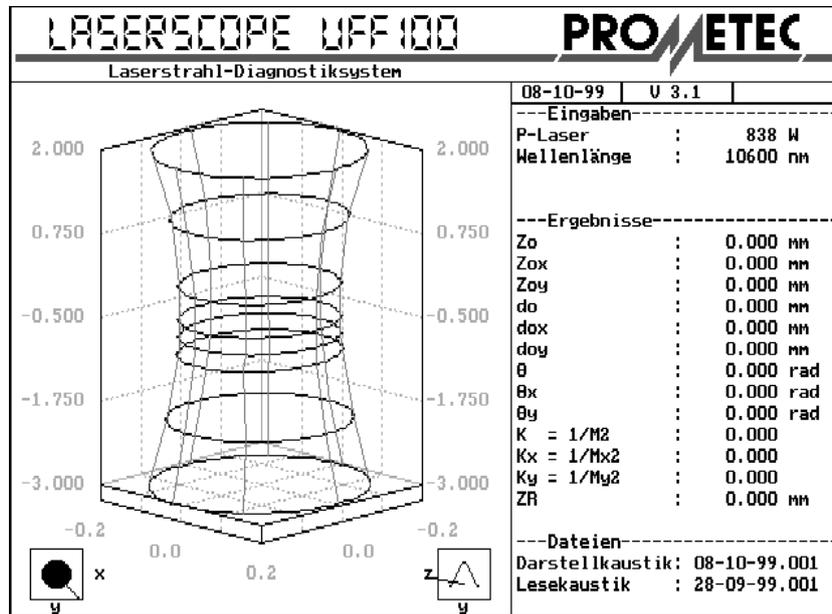


Abbildung A.10: Kaustik der 5 Linse mit Darstellmodus 3D-Radius

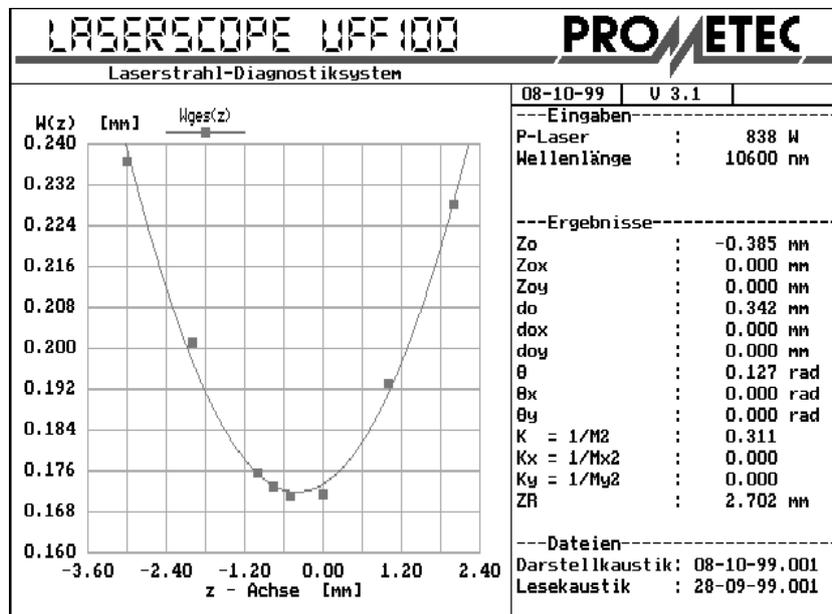


Abbildung A.11: Kaustik der 5 Linse

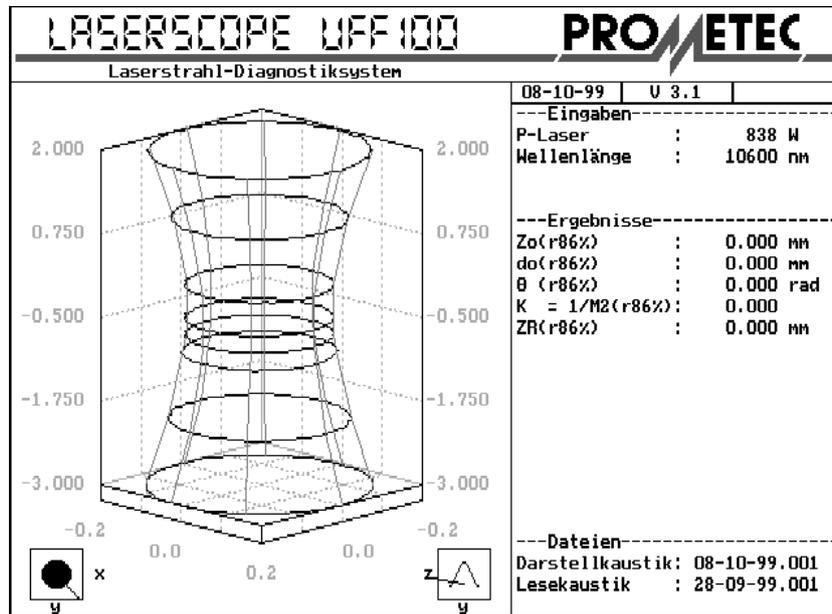


Abbildung A.12: Kaustik der 5 Linse mit Darstellmodus 3D - 86% - Radius

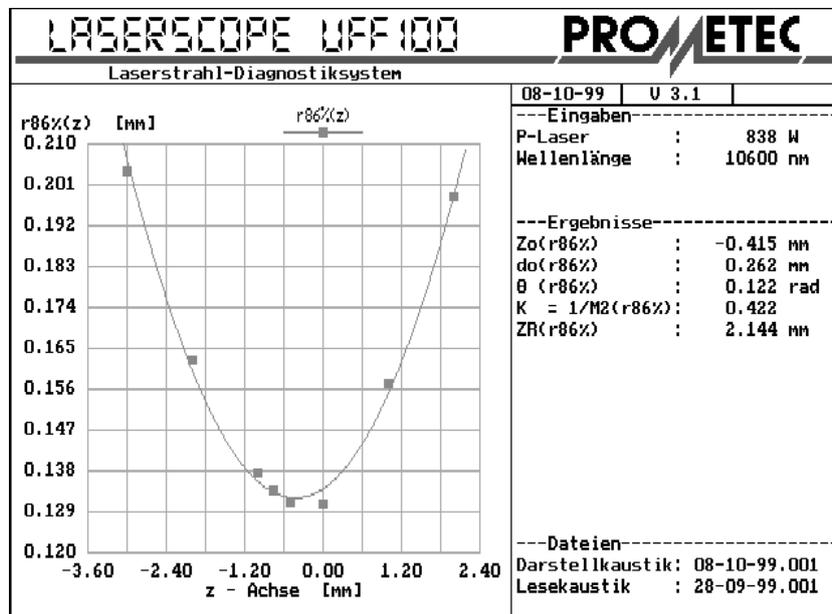


Abbildung A.13: Kaustik der 5 Linse mit Darstellmodus 2D - 86% - Radius

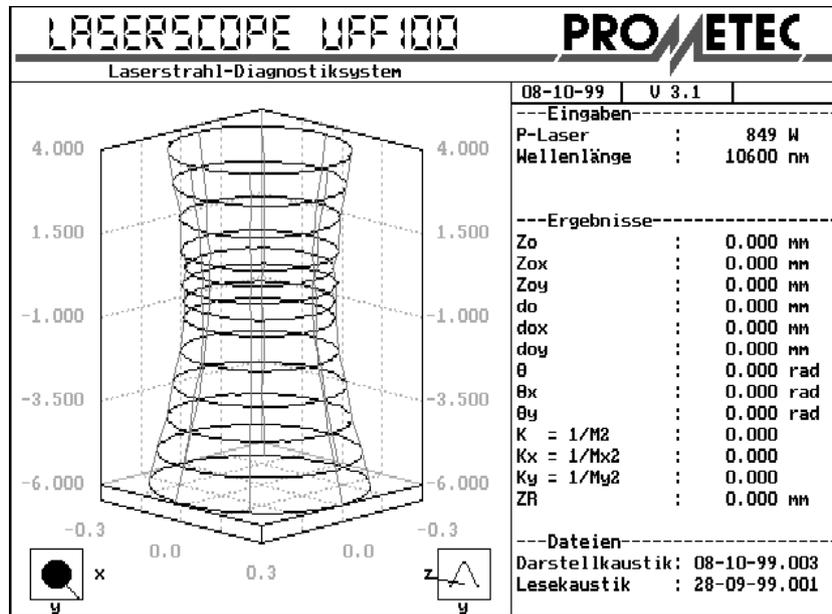


Abbildung A.14: Kaustik der 7.5 Linse mit Darstellmodus 3D-Radius

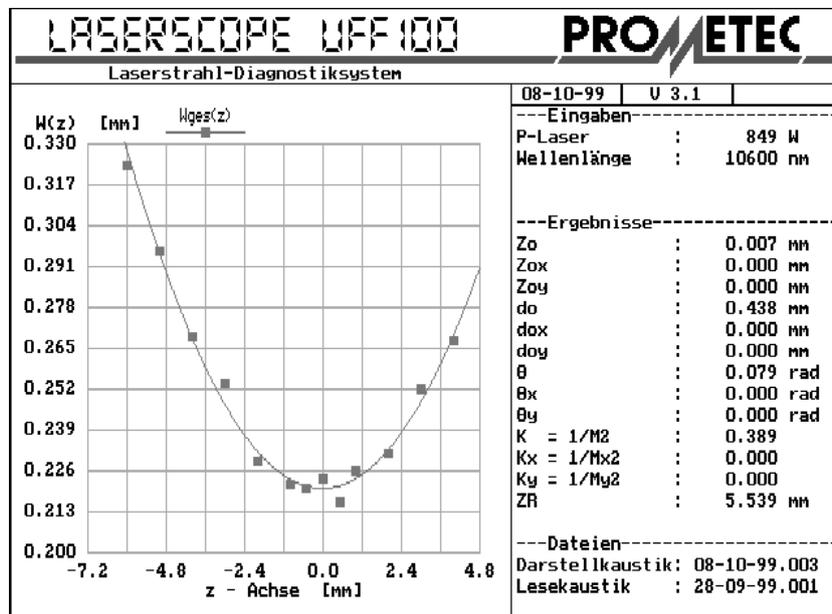


Abbildung A.15: Kaustik der 7.5 Linse

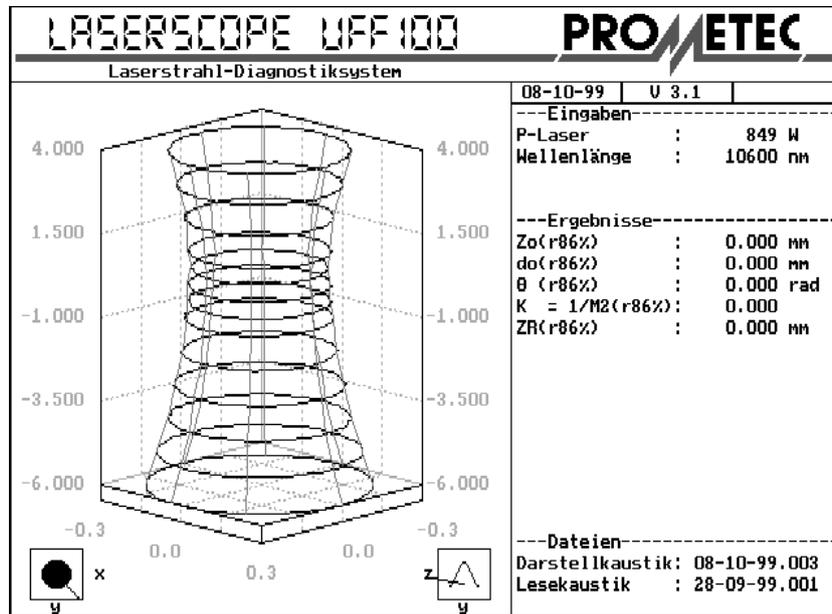


Abbildung A.16: Kaustik der 7.5 Linse mit Darstellmodus 3D-86%-Radius

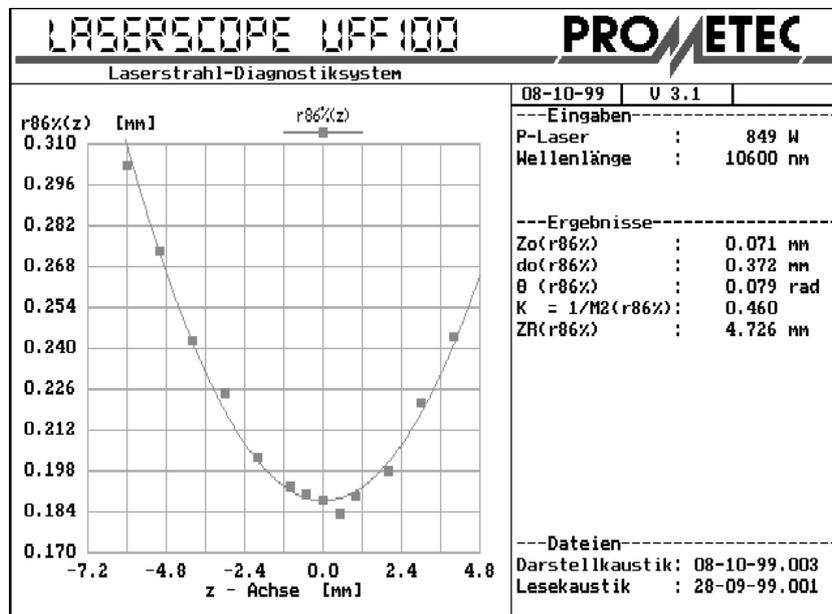


Abbildung A.17: Kaustik der 7.5 Linse mit Darstellmodus 2D-86%-Radius