

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Manfred Geiger

Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann

Regelung der CO₂- Hochleistungslaseranlage

Michael Kauf

62

Kauf

**Regelung der Laserstrahlleistung
und der Fokusparameter
einer CO₂- Hochleistungslaseranlage**

ISSN 1431-6226
ISBN 3-87525-083-4



Michael Kauf

*Regelung der Laserstrahlleistung
und der Fokusparameter
einer CO₂ - Hochleistungslaseranlage*

Michael Kauf

*Regelung der Laserstrahlleistung
und der Fokusparameter
einer CO₂ - Hochleistungslaseranlage*

Bericht aus dem Lehrstuhl für
Fertigungstechnologie
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Manfred Geiger

LFT



Meisenbach Verlag Bamberg

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 05. November 1996
Tag der Promotion: 20. Dezember 1996
Dekan: Prof. Dr. H. Stoyan
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. M. Geiger
Prof. em. Dr. rer. nat. Jens Christiansen

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Kauf, Michael:

Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-
Hochleistungslaseranlage / Michael Kauf. - Bamberg : Meisenbach,
1997

(Fertigungstechnik - Erlangen ; 62)

Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1996

ISBN 3-87525-083-4

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich
genannten Sonderfälle -, reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 1997

Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf

Printed in Germany

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (LFT) sowie am Bayerischen Laserzentrum (BLZ).

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. **Manfred Geiger** und Herrn Dr.-Ing. **Peter Hoffmann**. Sie haben mit Ihrem Engagement und Einsatz die Realisierung dieses Forschungsprojektes erst ermöglicht. Ihrem Vertrauen ist es zu verdanken, daß ich meine Untersuchungen mit einem hohen Maß an Eigenverantwortung durchführen konnte. Insbesondere möchte ich Herrn Professor Geiger für die Übernahme des Hauptreferats und die konstruktiv-kritische Durchsicht meines Manuskriptes danken.

Herr Prof. em. Dr. rer. nat. **Jens Christiansen** stand mir stets als Diskussionspartner bei allen physikalischen Fragestellungen zur Verfügung. Ich bedanke mich für seine Unterstützung und freue mich besonders, daß er das Koreferat meiner Arbeit übernommen hat. Herr Dr.-Ing. **Joachim Hutfless** hat meine wissenschaftliche Arbeit entscheidend gefördert und geprägt. Ich danke ihm herzlich für seinen persönlichen Einsatz, wertvolle Anregungen und konstruktive Diskussionen.

Die Zusammenarbeit mit meinen Kolleginnen und Kollegen am LFT und BLZ war trotz aller Belastungen immer freundschaftlich und kollegial. Ich möchte mich bei allen für die gute Atmosphäre und die jederzeit erfahrene Unterstützung bedanken und hoffe, den Kontakt auch nach meinem Ausscheiden nicht zu verlieren.

Meinen persönlichen Dank möchte ich Thomas Brüser, Michael Feser, Martina Fleischmann, Sandra Räuchle, Doris Schubart und Helmut Siemon aussprechen. Sie haben einen wesentlichen Anteil zum Entstehen meiner Arbeit beigetragen. Ich wünsche Ihnen viel Erfolg auf Ihrem weiteren Lebensweg.

Erlangen im März 1997

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen, Konstanten und Formelzeichen

1 Einführung	1
2 Stand der Kenntnisse	3
2.1 Merkmale von CO ₂ -Laseranlagen	4
2.1.1 Kenngrößen des Gaußstrahls	4
2.1.2 Aufbau von CO ₂ -Hochleistungslasern	6
2.1.3 Strahlführung und -formung	6
2.1.4 Störeinflüsse der Laserstrahlleistung und der Strahlkaustik	8
2.2 Meß- und Diagnoseeinrichtungen	9
2.2.1 Auskopplung eines Diagnosestrahls	9
2.2.2 Strahlungsnachweis mit Detektoren	10
2.2.3 Meßsysteme für Leistung, Strahlradius und Wellenfrontradius	13
2.3 Stellelemente für die Laserparameter	15
2.3.1 Steuerung der Laserstrahlleistung	15
2.3.2 Steuerung der Strahlkaustik	15
2.4 Regelkonzepte	19
2.4.1 Prozeßregelungen	19
2.4.2 Anlagenregelungen	20
2.4.3 Erweiterungen der klassischen Regelschleife	22
3 Zielsetzung	25
4 Physikalische Grundlagen thermoelektrischer Detektoren	27
4.1 Dünnschicht-Thermosäulen-Detektoren	28
4.1.1 Aufbau von Thermoelementen	28
4.1.2 Strahlungsdetektion mit Thermosäulen	30
4.1.3 Signalverstärkung und Kompensation der thermischen Drift	33
4.2 Atomlagen-Thermosäulen-Detektoren	35
4.2.1 Transversaler Seebeck-Effekt	35
4.2.2 Kristallstruktur von Hochtemperatur-Supraleitern	38
4.2.3 Detektion von CO ₂ -Laserstrahlung	41
5 Versuchseinrichtungen	43
5.1 Lasermaterialbearbeitungsanlage	44
5.1.1 CO ₂ -Hochleistungslaser TLF 2500	44
5.1.2 Laserstrahlführung und -formung	45
5.2 Aufbau der Meßsysteme	46
5.2.1 Meßsystem zur Erfassung der Laserstrahlleistung	47
5.2.2 Strahlradius-Meßsystem	49
5.2.3 Wellenfrontradius-Meßsystem	51

5.3 Stellelemente	52
5.3.1 HF-Generator	52
5.3.2 Piezoelektrische Adaptive Optik	54
5.3.3 Regler und Computersystem	57
6 Störgrößidentifikation	59
6.1 Störgrößen der Laserstrahlleistung	60
6.1.1 Optische Rückkopplung	60
6.1.2 Modulation durch Tastbetrieb	60
6.1.3 Einflüsse der Energie- und Gasversorgung	62
6.1.4 Erwärmung der Resonatorgase	63
6.2 Störgrößen der Fokusparameter	64
6.2.1 Variable Strahlweglänge	64
6.2.2 Statistische Schwankungsbreite	66
6.2.3 Thermische Linseneffekte	69
6.3 Verkopplung der Laserparameter	73
6.3.1 Einfluß der Strahlkaustik auf die Laserstrahlleistung	73
6.3.2 Einfluß der Laserstrahlleistung auf die Strahlkaustik	74
6.4 Diskussion der Störgrößidentifikation	76
7 Regelung der Laserstrahlleistung	77
7.1 Integration des Leistungsmeßsystems	78
7.2 Auswahl der Laserbetriebsart	79
7.3 Schließen des Regelkreises	80
7.4 Ergebnisse der Leistungsregelung	81
8 Regelung der Strahlkaustik	85
8.1 Integration der Meßsysteme	86
8.1.1 Aufbau eines Diagnosekopfes	86
8.1.2 Meßanordnung für den Fokusradius	88
8.1.3 Meßanordnung für die Bildweite	90
8.2 Integration der Adaptiven Optiken	91
8.2.1 Bestimmung optimaler Einbauorte	91
8.2.2 Erforderliche Stellbereiche	94
8.3 Überprüfung der Regelstrecken	98
8.3.1 Anschluß des DSP-Boards	98
8.3.2 Steuerung des Fokusradius	99
8.3.3 Steuerung der Bildweite	102
8.4 Diskussion der Ergebnisse	104
9 Zusammenfassung	105
Anhang: Gaußstrahl-Modell	107
Literaturverzeichnis	115

Abkürzungen, Konstanten und Formelzeichen

Abkürzungen

<i>Abkürzung</i>	<i>Bedeutung</i>
A/D	Analog/Digital
AO 1	Adaptive Optik 1 (Z-Faltung nahe Resonator)
AO 2	Adaptive Optik 2 (Laserkopf)
CNC	Computerized Numeric Control
cw	continuous wave, Dauerstrich
D/A	Digital/Analog
DC	direct current, Gleichstrom
DSP	Digitaler Signal-Prozessor
FFT	Fast Fourier Transformation
HF	Hochfrequenz
I/O	Input-/Output
LLS	Laser-Leistungs-Steuerung
SrTiO ₃	Strontiumtitanat
TEM	Transversal elektromagnetischer Mode
YBaCuO	YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ} Yttriumbarium-Kupferoxid
ZnSe	Zinkselenid
ZPR	Zweipunktregler

Konstanten

<i>Konstante</i>	<i>Größe</i>	<i>Einheit</i>	<i>Bedeutung</i>
ϵ_0	$8,8542 \cdot 10^{12}$	As/Vm	Dielektrizität des Vakuums
μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$	Vs/Am	Permeabilität des Vakuums
c	$2,9979 \cdot 10^8$	m/s	Lichtgeschwindigkeit
e	$1,66022 \cdot 10^{-19}$	As	Elementarladung
h	$6,6261 \cdot 10^{-34}$	As	Plancksches Wirkungsquantum
k	$1,38062 \cdot 10^{-23}$	J/K	Boltzmannkonstante

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
α		Absorptionskoeffizient
a, b, c		Kristall-Koordinatensystem
A_{mn}	V	komplexe Amplitude der elektrischen Feldstärke
β		Verlustfaktor
b		Faktor der Modenordnung
C	J/gK	Wärmekapazität
d	m	Dicke einer HTS-Schicht
d_{AO}	m	Apertur der AO
dt	s	Zeitintervall
ϵ	As/Vm	Dielektrizitätskonstante
E	W/m ²	Leistungsdichte
\mathbf{E}	V/m	Feldstärke-Tensor
E_x	V/m	Feldstärke in x-Richtung
f	Hz	Frequenz
Δf	Hz	Bandbreite
f_t	Hz	Tastfrequenz
f	m	Brennweite einer Optik
f_{AO}	m	Brennweite einer Adaptiven Optik
H	A/m	Magnetische Feldstärke
j		imaginäre Einheit
k	m ⁻¹	Wellenzahl
K		Strahlpropagationsfaktor
λ	m	Wellenlänge
λ_K	m	korrigierte Wellenlänge
l	m	Länge bzw. Breite einer HTS-Schicht
μ	Vs/Am	Permeabilitätskonstante
n		Zählvariable
ω	rad/s	Kreisfrequenz
ψ		Strukturfunktion
P	W	Leistung
P_{max}	W	maximale Laserstrahlleistung
q	m ⁻¹	komplexer Strahlparameter
Q	J	Energie
Q_0	J	absorbierte Energie
Q_V	J	Verlustenergie
R		Reflexionskoeffizient
R	m	Krümmungsradius der Wellenfronten
R_i	Ω	Innenwiderstand
\mathbf{R}_y		Drehmatrix um y-Achse

Verzeichnis der Abkürzungen, Konstanten und Formelzeichen

<i>Formelzeichen</i>	<i>Einheit</i>	<i>Bedeutung</i>
S_{AO}	m	Hub der AO
S	V/K	Seebeck-Koeffizient
S_{AB}	V/K	Thermokraft der Werkstoffpaarung A und B
S	V/K	Seebeck-Tensor
S_{kristall}	V/K	Seebeck-Tensor im Kristall-Koordinatensystem
$S_{\text{Beobachter}}$	V/K	Seebeck-Tensor im Koordinatensystem des Beobachters
Θ	rad	Fernfelddivergenz
$\Theta_{\text{Gauß}}$	rad	Fernfelddivergenz des Gaußstrahls
Θ_{real}	rad	Fernfelddivergenz eines realen Laserstrahls
t	s	Zeit
τ	s	Zeitkonstante
T	K	Temperatur
T_0	K	Umgebungstemperatur
ΔT	K	Temperaturdifferenz
U	V	Spannung
U_{AB}	V	Thermospannung zwischen den Werkstoffen A und B
U_D	V	Spannung eines Differential-Thermoelements
U_S	V	Spannung einer Thermosäule
U_N	V	Rauschspannung
v	m/s	Geschwindigkeit
V		Verhältnis zweier Größen
w	m	Strahlradius
w_{AO}	m	Strahlradius am Ort der Adaptiven Optik AO
w_0	m	Tailenradius des Rohstrahls
w_F	m	Fokusradius (Tailenradius des fokussierten Laserstrahls)
$w_0 \cdot \Theta/2$	rad·m	Strahlparameterprodukt
x, y, z		Kartesisches Koordinatensystem
z	m	z-Koordinate, Ausbreitungscoordinate, Strahlachse
z_{AO}	m	Einbauort der Adaptiven Optik
z_0	m	Objektweite (Rohstrahltaille-Fokussieroptik)
z_F	m	Bildweite (Fokussieroptik-Fokus)
Δz_F	m	Fokusschift/Fokusverschiebung
z_R	m	Rayleigh-Länge
z_{RK}	m	korrigierte Rayleigh-Länge

1 Einführung

Die Internationalisierung der Märkte und die damit verbundene Intensivierung des globalen Wettbewerbs bedeuten für produzierende Unternehmen große Herausforderungen, bieten gleichzeitig aber auch neue Chancen. Es wird erwartet, daß Marktsegmente, mit dem Preis eines Produktes als beherrschendem Kaufkriterium, zunehmend von Unternehmen aus Staaten mit niedrigem Lohnniveau übernommen werden. Märkte hingegen, auf denen die Qualität entscheidet, eröffnen die Chance, durch systematische Planung und Produktion hochwertiger Güter Wettbewerbsanteile zu erobern. Qualität wird dadurch zu einem wichtigen strategischen Erfolgsfaktor [1, 2].

Die Individualisierung der Kundenwünsche und kurzlebige Trendentwicklungen bedingen eine zunehmende Variantenvielfalt und eine Verkürzung der Produktlebenszyklen. Erfolgreich im Markt bestehen Unternehmen, die schnell und flexibel auf sich ändernde Marktbedingungen reagieren und sich durch den Einsatz innovativer Fertigungsverfahren Wettbewerbsvorsprünge sichern [3, 4]. Sie nutzen rationelle Fertigungsverfahren, die sich einerseits durch ein hohes Automatisierungspotential auszeichnen und andererseits eine große Produkt- und Mengenflexibilität aufweisen.

Speziell die Materialbearbeitung mit dem Werkzeug Laserstrahl erfüllt die genannten Anforderungen und kann darüber hinaus eine hohe Fertigungsqualität sicherstellen. Der Laser als thermisches Strahlwerkzeug arbeitet berührungslos und verschleißfrei, zeichnet sich durch ein hohes Automatisierungspotential aus und ist gut steuer- oder regelbar [5]. Diese technischen Möglichkeiten werden jedoch bis heute nicht völlig ausgeschöpft. Nur eine konsequente Umsetzung dieser Potentiale wird die Wirtschaftlichkeit weiter erhöhen. Die zukünftige Entwicklung von Laseranlagen muß sich stärker am Bedarf der Anwender orientieren, deren primäres Interesse eine wirtschaftliche Fertigung bei gleichzeitiger Einhaltung spezifizierter Qualitätsmerkmale ist.

Die weitere Verbreitung des Lasers in der Materialbearbeitung wird entscheidend von der Verfügbarkeit preiswerter, prozeßsicherer und einfach zu bedienender Maschinen abhängen. Auf dem Weg zu intelligenten Fertigungssystemen höchster Zuverlässigkeit bestehen speziell bei CO₂-Hochleistungslasern Defizite auf dem Gebiet der Systemtechnik. Die Realisierung umfassender Regelsysteme für die Strahlführung und -formung von Hochleistungslaserstrahlung in der industriellen Fertigung erfordert insbesondere Sensorik- und Aktorik-Komponenten, die sich durch leichte Integrierbarkeit, hohe Funktionalität und robuste Ausführung auszeichnen. Die Kombination dieser Anforderungen konnte in der Vergangenheit nur unzureichend erfüllt werden und umfassende Anlagenregelungen liegen bestenfalls als Konzepte vor.

Auf der Basis aktueller Entwicklungen der Sensor- und Aktortechnik wird nachfolgend eine Anlagenregelung konzipiert, die unabhängig vom jeweiligen Bearbeitungsprozeß und bei allen Betriebszuständen konstante und reproduzierbare Laserparameter sicherstellt. Aufbauend auf neuartigen thermischen Detektoren mit extrem hoher Dynamik werden innovative Meßsysteme für die Erfassung der Laserparameter entworfen und realisiert. Der Aufbau dieser Komponenten ist konsequent auf den Online-Betrieb in kommerziellen Laseranlagen ausgelegt und zeichnet sich durch kompakte Bauweise und den völligen Verzicht auf bewegte mechanische Bauteile aus. Der Regelkreis wird über die Pumpenergiequelle des Lasers und adaptive optische Komponenten als Stellelemente geschlossen. Die Implementierung des Regelkreises in eine kommerzielle Lasermaterialbearbeitungsanlage beweist schließlich die Realisierbarkeit des vorgestellten Konzeptes.

2 Stand der Kenntnisse

Der Laser hat sich in den hochindustrialisierten Ländern als präzises und flexibles Werkzeug für die Materialbearbeitung etabliert. Betrug das globale Marktvolumen an Lasersystemen für die Materialbearbeitung 1993 weltweit noch zwei Milliarden DM wird bis zum Jahr 2000 eine Steigerung auf fünf Milliarden DM erwartet [6]. Den dominierenden Anteil (56 %) an Strahlquellen nehmen CO₂-Laser im Leistungsbereich über 500 W ein, wobei der Trend eindeutig zu höheren Ausgangsleistungen geht.

CO₂-Laser

Intelligente Fertigungssysteme erfordern neben optimierten Strahlquellen jedoch auch innovative Sensorik- und Aktorik-Komponenten [4]. Online-fähige Meßeinrichtungen sind die Voraussetzung für die Erfassung der Anlagenkenngrößen während des Prozeßablaufs [7]. Im geschlossenen Regelkreis werden über entsprechende Stellelemente die gewünschten Anlagenparameter eingestellt.

Meßeinrichtungen und Stellelemente

Grundlegende Regelkonzepte für die Lasermaterialbearbeitung wie Prozeßregelungen und Anlagenregelungen besitzen jeweils spezifische Vorzüge und Nachteile, die je nach Anwendungsfall vorteilhaft eingesetzt werden können. Ein Querschnitt bereits realisierter Regelsysteme und der Ausblick auf mögliche Erweiterungen der klassischen Regelschleife schließen das Kapitel ab.

Regelkonzepte

2.1 Merkmale von CO₂-Lasieranlagen

Unterschiedliche Bearbeitungsaufgaben in der Lasermaterialbearbeitung erfordern jeweils angepasste Anlagenkonzepte. Allen Laseranlagen ist jedoch der prinzipielle Aufbau gemeinsam, der in Laser, Strahlführung und -formung untergliedert wird. Die Nomenklatur der Anlagenkomponenten und Laserstrahlkenngrößen erfolgt entsprechend der internationalen Norm EN ISO 11145 [8], die sich in Details von der deutschen Vornorm DIN V 18730 [9] unterscheidet.

2.1.1 Kenngrößen des Gaußstrahls

Der Laser bestimmt mit aktivem Medium, Resonator und Anregungstechnik die Kenngrößen des Laserstrahls [5]. Die Beschreibung erfolgt im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit im Modell des Gaußstrahls, **Bild 2-1**. Eine ausführlichere Darstellung findet sich im Anhang.

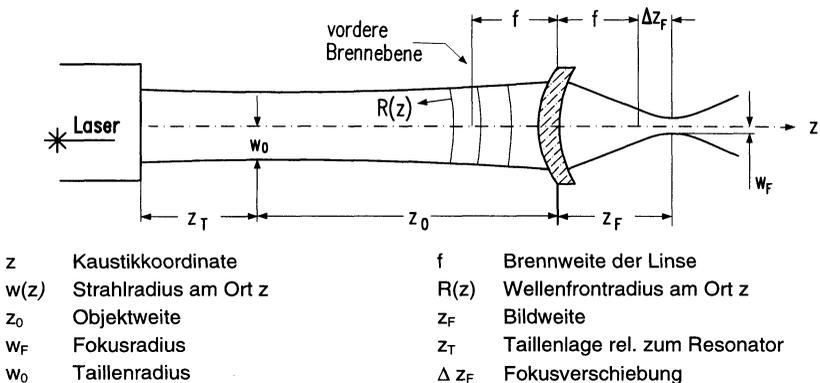


Bild 2-1: Parameter des Gauß'schen Laserstrahls

Der Laserstrahl der Leistung P breitet sich entlang der Strahlachse z aus. An jedem Ort z definiert der Strahlradius w diejenige Strahlquerschnittsfläche A , die einen festen Prozentsatz der Laserstrahlleistung einschließt. Die Einhüllende aller Strahlradien, die Strahlkaustik, weist insbesondere am Ort z_T , der als Taille bezeichnet wird, einen minimalen Radius w_0 auf. Neben dem Strahlradius läßt sich dem Laserstrahl an jeder Position z ein Krümmungsradius der Wellenfront zuordnen, der im weiteren als Wellenfrontradius R abgekürzt wird.

Die Laserparameter **Strahlradius w** und **Wellenfrontradius R** am Ort z beschreiben den Gauß'schen Strahl eindeutig in seiner Ausbreitung.

$$w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_{RK}}\right)^2} \quad (\text{Gl. 2-1})$$

$$R(z) = z \cdot \left[1 + \left(\frac{z_{RK}}{z}\right)^2 \right] \quad (\text{Gl. 2-2})$$

Als **korrigierte Rayleighlänge z_{RK}** wird der Abstand von der Strahltaile w_0 bezeichnet, an dem der Strahlradius um den Faktor $\sqrt{2}$ angewachsen ist und der Wellenfrontradius ein Minimum aufweist. Der Strahlpropagationsfaktor K ($0 \leq K \leq 1$) berücksichtigt höhere Modenordnungen und eignet sich zur Beschreibung des Ausbreitungsverhaltens realer Laser [8].

$$z_{RK} = K \cdot \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda} \quad (\text{Gl. 2-3})$$

Die Transformation des Rohstrahls durch eine fokussierende Optik der Brennweite f in der Entfernung z_0 (Objektweite) zur Strahltaile w_0 , erzeugt eine Kaustik des fokussierten Laserstrahls (Fokuskaustik) mit **Fokusradius w_F** in der Entfernung z_F (Bildweite) von der Linse [10]. Die **Bildweite z_F** setzt sich aus der gegebenen Brennweite f der Fokussieroptik und der Fokusverschiebung Δz_F zusammen.

$$w_F = w_0 \cdot \frac{f}{\sqrt{\left[(z_0 - f)^2 + z_{RK}^2\right]}} \quad z_F = f + \Delta z_F = f + \frac{(z_0 - f) \cdot f^2}{(z_0 - f)^2 + z_{RK}^2} \quad (\text{Gl. 2-4}) \quad (\text{Gl. 2-5})$$

Alternativ können Fokusradius w_F und Bildweite z_F auch in Abhängigkeit von den Werten des Rohstrahlradius w und des Wellenfrontradius R in der vorderen Brennebene der Fokussieroptik ($z_0 - f$) dargestellt werden.

$$w_F = \frac{\lambda}{K \cdot \pi} \cdot \frac{f}{w_{(z_0-f)}} \quad z_F = f + \frac{f^2}{R_{(z_0-f)}} \quad (\text{Gl. 2-6}) \quad (\text{Gl. 2-7})$$

Der resultierende Fokusradius w_F ist invers proportional dem Rohstrahlradius w während die Bildweite z_F invers proportional dem Krümmungsradius der Wellenfronten R des unfokussierten Rohstrahls in der vorderen Brennebene der Fokussieroptik ($z_0 - f$) ist. Beide Arten der Darstellung sind absolut gleichwertig. Je nach Problemstellung kann der geeignetere Formalismus verwendet werden.

2.1.2 Aufbau von CO₂-Hochleistungslasern

In der Materialbearbeitung nehmen CO₂-Laser eine dominierende Stellung ein, da sie hohe Ausgangsleistungen bei hohem Gesamtwirkungsgrad bieten [5, 11]. Die Anregung des Lasergases findet bei industriellen Systemen vorwiegend durch Gleichstrom- (DC) oder Hochfrequenzanregung (HF) statt. Bei der **Gleichstromentladung** erfolgt die Energieeinkopplung in das Lasergas mit einem hohen Wirkungsgrad über metallische Elektroden [12]. Da sich diese im Entladungsraum befinden müssen, kann es zu Verunreinigungen des Lasergases kommen. Im Gegensatz dazu wird die Energie bei der **Hochfrequenzanregung** kapazitiv über ein außenliegendes dielektrisches Material eingekoppelt. Es resultiert eine sehr homogene Entladung, unabhängig von der eingestellten Laserstrahlleistung [13].

Für die Aufrechterhaltung der Besetzungsinversion ist eine effektive Kühlung des laseraktiven Mediums erforderlich. Die Kühlung des Lasergases kann prinzipiell durch Wärmeleitung (Diffusion) oder Gasaustausch (Konvektion) erfolgen. Hohe Ausgangsleistungen (bis 2,5 kW) lassen sich bei **diffusionsgekühlten Lasern** erzielen, indem großflächige Kühlflächen mit geringem Abstand verwendet werden [14]. Unterscheidungskriterium für **konvektionsgekühlte Laser** ist die Orientierung der Resonatorachse zur Strömungsrichtung [15]. Bei Hochleistungslasern haben sich längsgeströmte (fast axial flow) Laser durchgesetzt, die eine hohe Ausgangsleistung bei guter Strahlqualität erreichen. Für die Gasumwälzung werden Drehkolbenverdichter (Roots-Gebläse) oder Radialverdichter eingesetzt.

2.1.3 Strahlführung und -formung

Die Aufgabe der Strahlführung und -formung besteht darin, die gegebene Laserstrahlleistung möglichst verlustfrei zum Werkstück zu übertragen, ohne die Strahlqualität zu beeinträchtigen. Die Laserstrahlführung mittels **Lichtwellenleitern**, wie sie für Nd:YAG-Laser vorteilhaft eingesetzt wird, ist bei CO₂-Lasern auf sehr niedrige Leistungen beschränkt.

Für die Strahlführung höherer Laserleistungen kommen ausschließlich **Spiegel- oder Linsensysteme** in Frage [16], wobei aufgrund thermischer Linseneffekte von transmissiven Komponenten meist reflexive Elemente bevorzugt werden [17]. Neben beschichteten Siliziumspiegeln finden vor allem bei Hochleistungslasern Kupferspiegel Verwendung, die auch ohne Beschichtung einen hohen Reflexionsgrad, eine hohe Zerstörschwelle und eine effektive Kühlung durch die Anordnung von Kühlwasserkanälen im Spiegelkörper bieten [18]. Planspiegel können mit einer sehr guten Oberflächengenauigkeit (Abweichung $\leq \lambda/20$) gefertigt werden, so daß Störungen der Phasenfront und Beeinträchtigungen der Abbildungseigenschaften vermieden werden [26].

Für die Bearbeitung müssen Laserstrahl und Werkstück relativ zueinander positioniert werden. Je nach Funktionsweise lassen sich drei grundsätzlich verschiedene Typen der Strahlführung unterscheiden, **Bild 2-2**.

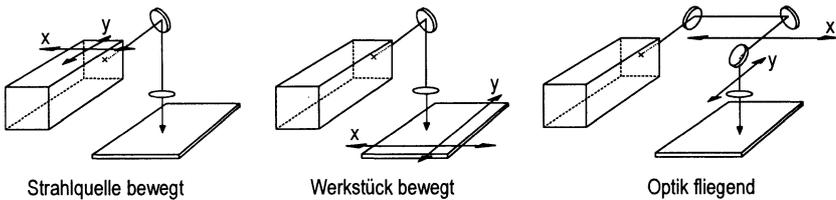


Bild 2-2: Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück

Die Strahlquelle einschließlich aller optischen Komponenten wird relativ zum feststehenden Werkstück bewegt (links). Bei kleinen, leichten Werkstücken ist es vorteilhafter, das Werkstück relativ zum feststehenden Laserstrahl zu verfahren (Mitte). Höchste Positioniergeschwindigkeiten und große Verfahrswege können erreicht werden, indem lediglich die optischen Komponenten bei sowohl fester Position des Lasers als auch des Werkstücks positioniert werden (rechts). Diese Anordnung wird als fliegende Optik bezeichnet.

Für die Fokussierung des Laserstrahls können sowohl Linsen als auch Spiegel eingesetzt werden. Während **Linsen** vor allem in Laserköpfen für Schneidanwendungen verwendet werden, kommen off-axis Paraboloiden zunehmend für die Bearbeitung räumlicher Bauteile zum Einsatz. Zwar ist die Konturgenauigkeit von **Spiegeln** fertigungsbedingt etwas schlechter als die von Linsen, Spiegel weisen jedoch selbst bei hohen Belastungen nur minimale Konturänderungen auf und garantieren aufgrund ihrer effektiven Kühlung konstante Fokussiereigenschaften bis zu Leistungsdichten von 10 kW/cm^2 . Ein maximal zulässiger Dejustagewinkel unter 1 mrad , dessen Überschreitung einen astigmatischen Fehler des Fokus verursachen würde, läßt sich problemlos einhalten [19].

Alle Fokussierelemente, ob als Spiegel oder Linsen ausgeführt, sind Verschleißteile, da Prozeßemissionen, wie Dämpfe oder Schmelzespritzer, die Oberfläche verunreinigen. In Folge steigt einerseits die Absorption, andererseits verschlechtern sich die Abbildungseigenschaften, da sich die punktförmigen Verunreinigungen als Streuzentren auswirken [20].

2.1.4 Störeinflüsse der Laserstrahlleistung und der Strahlkaustik

Bereits bei der Strahlerzeugung treten anlagen- und prozeßbedingte Störeinflüsse auf, welche die Konstanz der **Laserstrahlleistung** beeinträchtigen [21]. Die inkohärente Überlagerung verschiedener Moden im Resonator verursacht Leistungsschwankungen im Frequenzbereich mehrerer hundert Megahertz [22]. Die optische Rückkopplung reflektierter Laserstrahlung vom Bearbeitungsprozeß in den Resonator tritt z. B. zu Beginn einer Schweißnaht vor der Ausbildung des Keyholes auf und bewirkt Leistungsfluktuationen im Frequenzbereich bis zu einigen Megahertz [23].

Im Gegensatz zu diesen hochfrequenten Störeinflüssen können die Versorgungseinrichtungen für Gas und Strom periodische Schwankungen im Frequenzbereich unter einem Kilohertz hervorrufen. Zusätzliche thermische Drift geringer Dynamik beeinflusst die Ausgangsleistung in Abhängigkeit von Einschaltdauer und Sollwertvorgabe der Laserstrahlleistung [24].

Störungen der **Strahlkaustik**, insbesondere Veränderungen von Lage und Radius der Taille bzw. des Fokus, werden hauptsächlich durch das Auskoppelfenster des Resonators verursacht [25]. Die Funktion dieses Elementes, den Resonator gegen die Atmosphäre abzudichten, kann nicht von reflexiven Komponenten übernommen werden. Deshalb ist diese optische Komponente bis auf wenige Ausnahmen wie z. B. aerodynamische Fenster, als transmissives Zink-Selenid (ZnSe)-Fenster ausgeführt.

Neuwertige Fenster weisen eine minimale Volumenabsorption ($< 0,1\%$) auf und heizen sich entsprechend gering auf [26, 27]. Mit der Betriebsdauer nimmt jedoch die Oberflächenabsorption durch Verunreinigungen zu, und es kommt zu einer erhöhten Aufheizung des Fensters durch den transmittierenden Laserstrahl. Einerseits tritt eine Wölbung der optischen Komponente aufgrund der thermischen Ausdehnung auf, andererseits führt die Temperaturerhöhung zu einer Änderung des Brechungsindex. Die resultierende Änderung der optischen Kenndaten mit Zeitkonstanten im Bereich mehrerer Sekunden wird unter dem Begriff thermische Linseneffekte (thermal lensing) zusammengefaßt [7, 25].

Speziell bei der Verwendung fliegender Optiken führt die variable Objektweite zu einer veränderlichen Ausleuchtung der Fokussieroptik. Nach (Gl. 2-4) hängt der Fokusradius von der Strahlweglänge ab und führt somit zu einer mittleren Leistungsdichte in Abhängigkeit vom Bearbeitungsort. Dieser Effekt kann durch eine Strahlaufweitung minimiert werden, bedingt jedoch große Durchmesser der nachfolgenden Komponenten. Diese sind kostenintensiv und erfordern einen Mehraufwand an Antriebsleistung und mechanischer Stabilität der Maschine. Bei der Skalierung von Linsen entstehen zusätzliche thermische Probleme, da diese konstruktionsbedingt nur an ihrer Fassung gekühlt werden können [28].

2.2 Meß- und Diagnoseeinrichtungen

Eine grobe Abschätzung der Kenngrößen Leistungsdichteverteilung, Strahlage und -radius gelingt bereits mit einfachen Methoden wie Einbränden auf Thermopapier oder in Plexiglas. Voraussetzung für eine Regelung ist jedoch die reproduzierbare und kalibrierbare Online-Erfassung der Meßgrößen während des Bearbeitungsprozesses. Die Meßeinrichtungen müssen deshalb so konzipiert sein, daß die Beeinflussung des Hochleistungsstrahls minimal bleibt.

Bedingt durch die hohe Leistungsdichte wird ein direktes Einbringen von Detektoren in den Hochleistungsstrahl meist vermieden. Eine Ausnahme bilden Meßeinrichtungen mit äußerst robusten Detektoren, die mit einer hochreflexiven Beschichtung versehen sind [29] oder nur in den Randbereich des Laserstrahls reichen [30]. Im Großteil der Anwendungsfälle jedoch wird zunächst ein Teilstrahl (Diagnosestrahl) aus dem Hochleistungsstrahl ausgekoppelt.

Die Aufgabe der Meßeinrichtungen wird deshalb im folgenden unterteilt in die Auskopplung eines Diagnosestrahls und dem darauffolgenden quantitativen Nachweis der Strahlung mit kalibrierbaren Detektoren. Die Kombination von Detektoren mit optischen und mechanischen Komponenten ergibt spezielle Meßsysteme für die Erfassung der Laserstrahlleistung, des Wellenfrontradius oder des Strahlradius.

2.2.1 Auskopplung eines Diagnosestrahls

Auskoppelemente übernehmen die Aufgabe, einen Diagnosestrahl aus dem Hochleistungsstrahl auszukoppeln und für die nachgeschalteten Sensoren zur Verfügung zu stellen. Am gebräuchlichsten sind **reflexive Elemente** wie Nadeln [31], Hohlnadeln [32] oder Speichen [33], die durch den Laserstrahl rotieren und einen räumlich eng begrenzten Bereich der Strahlquerschnittsebene ausspiegeln. Die Gesamtverteilung der Leistungsdichte kann durch sequentielles Verschieben des Auskoppelementes gewonnen werden. Ohne den Einsatz bewegter Komponenten gelingt dies mit **Lochspiegeln**, die anstelle der standardmäßigen Umlenkspiegel in den Laserstrahlengang eingebracht werden und repräsentative Anteile aus dem Hochleistungsstrahl auskoppeln [34]. Diese Spiegel sind jedoch aufwendig zu fertigen und unflexibel im Einsatz.

Alternativ zu einer ortsselektiven Auskopplung kann ein bestimmter Anteil der Laserstrahlleistung mit einem **teiltransmissiven Element** aus dem gesamten Strahlquerschnitt ausgekoppelt werden, wobei der Reflexionsfaktor durch Aufbringen geeigneter Schichten in weiten Bereichen eingestellt werden kann. Etabliert sind z. B. rückwärtige Resonatorspiegel mit einer Transmission $T < 1\%$, die einen Diagnosestrahl erzeugen ohne den Hochleistungsstrahl der

Laseranlage zu beeinträchtigen. Bei Verwendung teiltransmissiver Elemente direkt im Hochleistungsstrahl muß aufgrund thermischer Linseneffekte mit Störungen der Strahlkaustik gerechnet werden.

Diffraktive optische Komponenten koppeln einen Teilstrahl mittels Beugungsstrukturen aus dem Hochleistungsstrahl aus. Diese Strukturen können in die Oberflächen sowohl transmissiver als auch reflexiver optischer Komponenten eingebracht werden. Die Integration zusätzlicher optischer Funktionen, z.B. einer Linse in die Beugungsstruktur [35] kann konventionelle optische Komponenten zur Abbildung des Laserstrahls auf die Detektoren überflüssig machen.

2.2.2 Strahlungsnachweis mit Detektoren

Kern jeder Meßeinrichtung sind Detektoren, welche die einfallende Strahlung in elektrische Ausgangssignale wandeln. Nach ihrem Funktionsprinzip lassen sich Quantendetektoren und thermische Detektoren unterscheiden. **Quantendetektoren** setzen die Strahlungsenergie mittels Photoeffekt unmittelbar in elektrische Ladungsträger um und zeichnen sich durch hohe Nachweisempfindlichkeit und extrem kurze Anstiegszeiten aus. Für den Nachweis von CO₂-Laserstrahlung kommen aufgrund der Wellenlänge nur sehr wenige Werkstoffe wie z. B. der ternäre Halbleiter Quecksilber-Cadmium-Tellurid (HgCdTe) in Frage [36, 37]. Ihre volle Leistungsfähigkeit erreichen diese Detektoren nur mit einer aufwendigen Kühlung. Da sie zusätzlich sehr empfindlich auf Schwankungen der Umgebungstemperatur reagieren, werden sie hauptsächlich im Laborbetrieb eingesetzt [38, 39, 40].

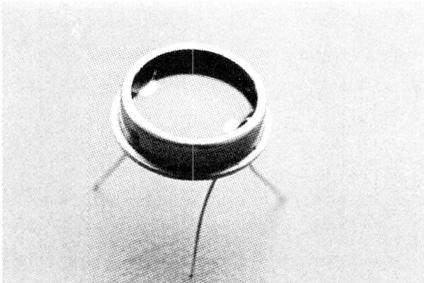
Gebräuchlich für den Einsatz an industriellen CO₂-Lasern sind ausschließlich thermische Detektoren, die bei Raumtemperatur arbeiten. Sie absorbieren die einfallende Laserstrahlung und erzeugen aufgrund eines temperaturabhängigen Effekts ein elektrisches Ausgangssignal. **Passive thermische Detektoren** ändern ihren Widerstand aufgrund der Erwärmung des Detektors durch die Laserstrahlung. Dies können im einfachsten Fall Drähte sein, die in den Laserstrahl eingebracht werden und deren Widerstandsänderung ein Maß für die absorbierte Laserstrahlleistung ist [29, 41]. Kürzere Zeitkonstanten erfordern Detektoren mit möglichst geringer Wärmekapazität wie z. B. Dünnschichtwiderstände (Bolometer) [42].

Im Gegensatz zu passiven Detektoren erzeugen **aktive thermische Detektoren** direkt ein Spannungs- oder Stromsignal in Abhängigkeit von der eingestrahlteten Laserstrahlleistung. Für die Diagnostik von CO₂-Laserstrahlung sind pyroelektrische Einzeldetektoren am weitesten verbreitet [43, 44]. Sie zeichnen sich durch kurze Signalanstiegszeit, hohe Empfindlichkeit, geringes Rauschen und hohe Zerstörschwelle aus. Der pyroelektrische Effekt beruht auf einer thermisch induzierten Umordnung der Gitterstruktur im Detektorkristall [45].

Nur während der Umordnungsphase tritt ein Detektorstrom auf, woraus eine Unempfindlichkeit gegenüber Gleichsignalen resultiert. Dies kann einerseits als Vorteil genutzt werden, weil langsam veränderliche Umgebungseinflüsse unberücksichtigt bleiben, andererseits kann cw-Laserstrahlung nur nachgewiesen werden, wenn der Laserstrahl periodisch unterbrochen wird. Die erforderlichen mechanischen Komponenten (Chopper) erhöhen den Platzbedarf, erschweren die Justage und verringern die Störsicherheit.

Thermoelektrische Detektoren sind demgegenüber auch für Gleichsignale empfindlich. Für den Nachweis von CO₂-Laserstrahlung können z. B. Thermoelemente verwendet werden [7]. Höhere Empfindlichkeit und eine niedrigere Zeitkonstante bieten Thermosäulen, die aus einer Reihenschaltung von Thermoelementen bestehen. Sie sind robust, zuverlässig, preisgünstig [46] und finden daher in vielen kommerziellen Leistungsmeßgeräten standardmäßig Verwendung. Insbesondere Dünnschicht-Thermosäulen zeichnen sich durch Zeitkonstanten bis in den Bereich weniger Millisekunden aus und bieten aufgrund ihrer einfachen Handhabung eine gute Alternative zu pyroelektrischen Detektoren [47].

Ein neuartiger thermoelektrischer Detektor, der **Atomlagen-Thermosäulen-Detektor** [48], eignet sich für den Nachweis von Strahlung vom ultravioletten bis in den fernen infraroten Spektralbereich und zeichnet sich durch extrem kurze Signalanstiegszeiten aus, **Bild 2-3**.



Atomlagen-Thermosäulen-Detektor

Aktive Fläche:	10 x 10 mm ²
Empfindlichkeit:	0,1 bis 1 mV/W
Bandbreite:	DC bis 1 GHz
Spektrale Empf.:	flach vom FIR bis UV
Innenwiderstand:	50 Ω bis 1 kΩ
Arbeitstemperatur:	100 K bis 500 K

Bild 2-3: Atomlagen-Thermosäulen-Detektor [49]

Der Atomlagen-Thermosäulen-Detektor ist, wie für thermoelektrische Detektoren üblich, gleichsignalempfindlich und kann sehr gut bei Raumtemperatur betrieben werden. Eine kurze Signalanstiegszeit und die hohe Zerstörschwelle des Detektors ermöglichen sogar den Nachweis intensiver Laserpulse. Pulsleistungen bis zu 10⁶ W erzeugen Detektorspannungen von mehr als 100 V, so daß bei der Diagnose gepulster Laser oft auf eine Signalverstärkung verzichtet werden kann [50].

Die Detektorspannung ist zudem über viele Dekaden proportional zur eingestrahlenen Laserstrahlleistung, **Bild 2-4**.

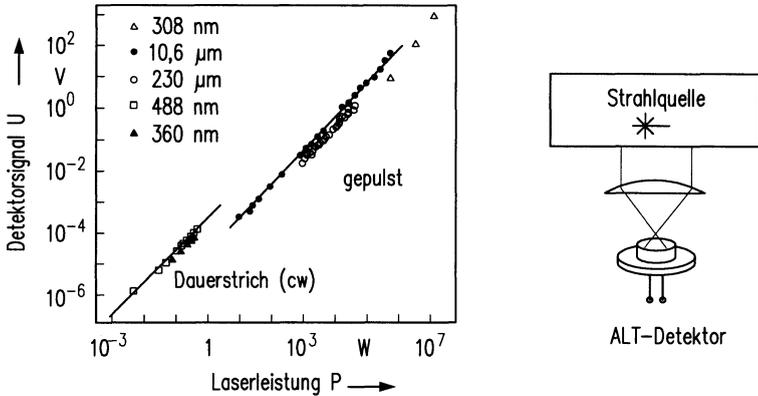


Bild 2-4: Laserstrahlleistungsmessung mit dem Atomlagen-Thermosäulen-Detektor [nach 50]

Für den Nachweis von CO_2 -Laserstrahlung bietet sich der Atomlagen-Thermosäulen-Detektor durch die günstige Kombination seiner Eigenschaften an. Er ist einfach zu handhaben, da er bei Raumtemperatur arbeitet, ist aufgrund seiner großen aktiven Fläche leicht im Strahl zu justieren und eignet sich für den Nachweis sowohl gepulster als auch cw-Strahlung gleichermaßen [51].

Beim späteren Aufbau von Meßsystemen auf der Basis von Atomlagen-Thermosäulen-Detektoren für die Online-Messung der Laserparameter an CO_2 -Hochleistungslasern müssen einige wesentliche Detektoreigenschaften beachtet werden. Der Betrieb des Meßsystems darf nicht auf kurzzeitige Pulsmessungen beschränkt bleiben, sondern muß auf den Dauerbetrieb ausgelegt sein. Die niedrige Empfindlichkeit des Detektors erfordert eine leistungsfähige Signalverstärkung, die einen störсяheren Betrieb auch an hochfrequenzangeregten Lasern ermöglicht.

2.2.3 Meßsysteme für Leistung, Strahlradius und Wellenfrontradius

Im Gauß'schen Modell ist die Propagation eines Laserstrahls mit gegebenem Strahlpropagationsfaktor K durch die Parameter Strahlradius w und Wellenfrontradius R bestimmt. In Verbindung mit der Laserstrahlleistung P können zusätzlich Aussagen über Absolutwerte der Leistungsdichte getroffen werden. Geeignete Meßsysteme, mit denen diese Parameter bestimmt werden können, sind jedoch nur beschränkt verfügbar.

Industrieller Standard bei CO₂-Hochleistungslasern sind lediglich Meßsysteme zur zeitaufgelösten Erfassung der **Laserstrahlleistung**, die am rückwärtigen Resonatorfenster installiert sind. Meßsysteme auf der Basis von Thermoelementen oder konventionellen Thermosäulen haben Signalanstiegszeiten im Bereich von mehreren Sekunden und sind daher für eine Online-Diagnose und eine Regelung nur eingeschränkt geeignet. Kürzere Anstiegszeiten bieten Geräte, die mit einer Kombination mehrerer Detektoren arbeiten [52].

Zur Erfassung des **Strahlradius** können Detektoren wie Drähte [29] oder Thermoelemente [30] in den Randbereich des Laserstrahls gebracht werden. Weitaus verbreiteter ist jedoch die Erfassung der Leistungsdichteverteilung und die nachfolgende indirekte Bestimmung der ableitbaren Laserstrahlparameter wie z. B. Strahlradius und Lage des Strahlschwerpunktes. Da preisgünstige Detektorarrays mit genügend hoher Auflösung für den Spektralbereich von CO₂-Lasern nicht verfügbar sind, erfolgt die Messung meist mit einem Einzeldetektor, der in einer Querschnittsebene des Laserstrahls bewegt wird und die Meßpunkte zeitlich versetzt aufnimmt. Meßsysteme, die auch im Hochleistungsstrahl eingesetzt werden können, basieren auf der Kombination rotierender Nadeln oder Speichen und Linearachsen [53, 54, 55]. Ohne Linearachsen arbeiten Meßsysteme mit rotierenden Lochblenden (z. B. Nipkov-Scheiben) oder Hohlzylindern mit spiralig angeordneten Löchern.

Der **Wellenfrontradius** kann durch die astigmatische Fokussierung des Diagnosestrahls auf einen vierfach segmentierten Detektor (Quadrantendetektor) bestimmt werden [56]. Die Kombination einer sphärischen mit einer langbrennweitigen zylindrischen Linse im Diagnosestrahl erzeugt keinen scharfen Fokuspunkt, sondern zwei, senkrecht zueinander angeordnete Strichfoki, **Bild 2-5**. Diese liegen in der meridionalen bzw. sagittalen Brennebene symmetrisch zum Punkt der größten Schärfe. Der Quadrantendetektor wird in fester Entfernung und Orientierung zur Linsenkombination in der Ebene größter Schärfe eingebaut. Neben dem Wellenfrontradius kann mit dem beschriebenen Meßsystem zusätzlich der Kippwinkel des Laserstrahls zur optischen Achse bestimmt werden.

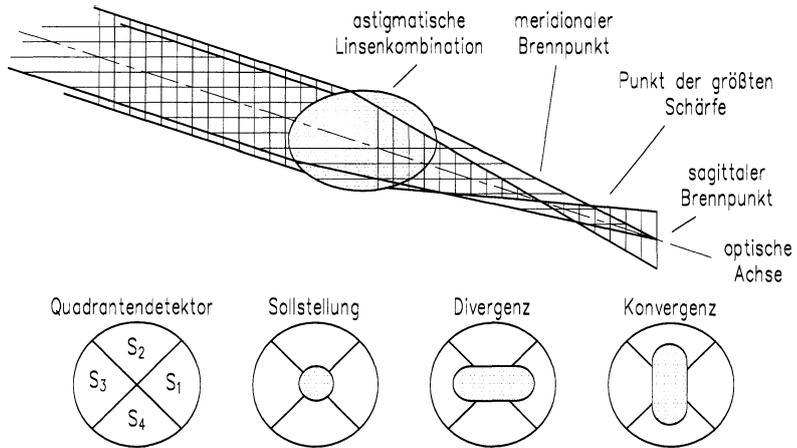


Bild 2-5: Meßsystem für Wellenfrontradius und Strahlkippwinkel [nach 56]

Bei parallelem Diagnosestrahl ($R = \infty$) ergibt sich eine kreisförmige Strahlkontur auf dem Quadrantendetektor und gleiche Bestrahlstärke aller vier Segmente. Eine Änderung des Wellenfrontradius verschiebt die Lage der Strichfoki auf der optischen Achse. Dadurch ändert sich die Kontur der Abbildung auf dem Quadrantendetektor, insbesondere verändert sich das Verhältnis V der Einzelsignale U_i der horizontal (S_1, S_3) und vertikal (S_2, S_4) orientierten Segmente S_i :

$$V = \frac{U_1 + U_3}{U_2 + U_4}$$

(Gl. 2-8)

Die Auskopplung des Diagnosestrahls erfolgt beim beschriebenen Meßsystem mit einem Lochspiegel, der Störungen durch Beugungsstrukturen verursacht. Die Verwendung eines pyroelektrischen Quadrantendetektors erfordert sowohl einen Chopper im Meßstrahlengang (Abschnitt 2.2.2) als auch eine aufwendige elektrische Signalverarbeitung für die vier Einzelsegmente. Bei einer Beschränkung auf die Messung des Wellenfrontradius kann das Meßsystem vereinfacht werden.

2.3 Stellelemente für die Laserparameter

Schlüsselparameter bei der Lasermaterialbearbeitung ist die Leistungsdichte in der Wechselwirkungszone zwischen Laserstrahl und Materie, die sowohl durch die Laserstrahlleistung als auch durch den Strahlradius am Ort des Werkstücks bestimmt ist. Eine Steuerung oder Regelung erfordert deshalb Stellelemente, um sowohl die Leistung als auch die Strahlkaustik flexibel an den Prozeß anpassen zu können.

2.3.1 Steuerung der Laserstrahlleistung

Die Steuerung der Laserstrahlleistung erfolgt über die **Pumpenergiequelle**, da absorbierende Elemente im Laserstrahlengang von CO₂-Hochleistungslasern zur kontrollierten Leistungsreduktion schwer zu realisieren sind und zusätzlich den Wirkungsgrad verschlechtern. Üblich bei CO₂-Lasern ist die elektrische Anregung des Lasergases mittels Gleichstrom (DC) oder Hochfrequenz (HF). Während sich die DC-Anregung durch ihren einfachen, kostengünstigen Aufbau auszeichnet, ist die HF-Anregung der DC-Anregung bzgl. Dynamik überlegen [57]. Sie ermöglicht die schnelle Einstellung der Laserstrahlleistung durch die Tastung der HF-Pumpleistung. Bei vorgegebener Tastfrequenz wird die Leistung durch die Variation des Tastverhältnisses bestimmt. Mit diesem Stellelement wurden bereits Regelungen für die Laserstrahlleistung entwickelt, die eine Bandbreite von mehreren hundert Hertz aufweisen und der Regelung von gleichspannungsangeregten Lasern überlegen sind [58].

2.3.2 Steuerung der Strahlkaustik

Stellelemente zur Steuerung der Strahlkaustik können transmissiv oder reflexiv ausgeführt werden. **Elektromotorisch bewegte Planplatten**, Linsen oder Kombinationen dieser Elemente können für die Strahlführung und -formung eingesetzt werden. Als Prototyp realisiert wurde der gezielte Parallelversatz des Laserstrahls durch Verkippung von Planplatten und die Fokusssteuerung mit einem dreilinsigen Abbildungssystem [7]. Kommerziell erfolgreich eingesetzt wird ein Teleskop mit elektromotorischem Stellsystem (Behrens: Opticut), das direkt nach dem Resonatorfenster integriert ist [59]. Die Kopplung an die Maschinensteuerung liefert zu jedem Zeitpunkt die Achspositionen und resultierend die Strahlweglänge. Eine konstante Ausleuchtung der Fokussieroptik wird erreicht, indem die Rohstrahltaile gemeinsam mit der „fliegenden“ Fokussieroptik verschoben wird. Prinzipielle Nachteile aller transmissiven Systeme sind mit zunehmender Laserstrahlleistung auftretende thermische Linseneffekte und Vielfachreflexionen an den Oberflächen der optischen Komponenten.

Spiegel mit annähernd **sphärisch deformierbarer Oberfläche** (sog. adaptive Spiegel) sind transmissiven Komponenten bezüglich Strahlungsbelastbarkeit und Dynamik überlegen [60]. Die Formung der Spiegelfläche erfolgt entweder mittels variablem Kühlwasserdruck [61, 62] oder durch den Einsatz eines Piezoaktuators [63, 64]. Während die Druckerzeugung und -regelung durch Ventile die Frequenzbandbreite auf ca. 60 Hz beschränkt, wird mit piezoelektrischem Antrieb eine wesentlich höhere Dynamik (bis ca. 200 Hz) bei kompakter Bauform erreicht. Die Integration dieser Adaptiven Optik (AO) in den Laserstrahlengang erfolgt leicht anstelle von Planspiegeln.

Die Brennweite läßt sich, bei gegebenem Durchmesser der Spiegelplatte, über den Hub des piezoelektrischen Aktuators einstellen, der zentrisch an der Rückseite der metallischen Spiegelplatte angebracht ist. Resultat ist eine rotationssymmetrische Verformung der Spiegeloberfläche, **Bild 2-6**. Die 3D-Darstellung (links) zeigt die Oberflächenkontur der Adaptiven Optik bei einem Hub des Piezoaktuators von $3\ \mu\text{m}$ und einer Apertur des Spiegels von 40 mm. Das Interferogramm (rechts) weist nur geringe Abweichungen von der Rotationssymmetrie nach. Insbesondere läßt sich die Oberflächenkontur im Bereich der Spiegelmitte gut durch eine Sphäre annähern und dadurch einer Brennweite f_{AO} zuordnen.

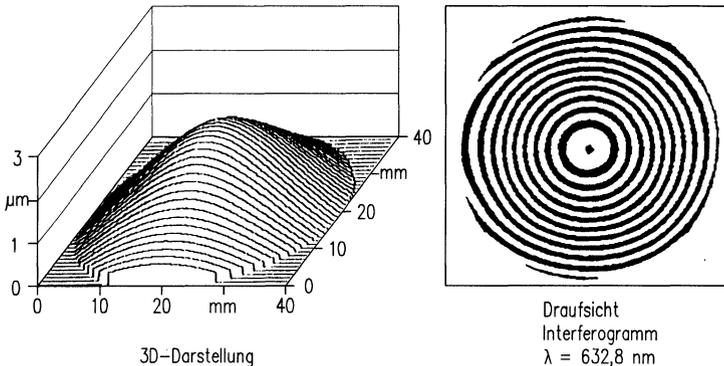


Bild 2-6: Oberflächenkontur der Adaptiven Optik [65]

Der Arbeitspunkt (Steuerspannung: 0 V) Adaptiver Optiken kann verschoben werden, indem anstelle von Planspiegeln sphärische (konkave) Oberflächen verwendet werden. Dadurch lassen sich bei vorgegebenem Hub des Piezoaktuators unterschiedliche Stellbereiche und korrespondierende Brennweiten erzielen.

Die Funktionsweise von Adaptiven Optiken zur Steuerung der Strahlkaustik zeigt **Bild 2-7**. Der einfallende Laserstrahl mit Tailenradius w_0 und Objektweite z_0 wird über die Adaptive Optik AO 1 mit einstellbarer Brennweite f_{AO1} in einen Strahl mit modifiziertem Radius w_1 (Gl. 2-4) und Bildweite z_1 (Gl. 2-5) abgebildet.

Für einen fest vorgegebenen einfallenden Strahl lassen sich alle Kombinationen möglicher Radien und Bildweiten der transformierten Strahltaile auf einer Kurve darstellen, **Bild 2-7** links. Der Einbauort der Adaptiven Optik z_{AO1} legt den Basispunkt, der Strahlradius am Ort der Adaptiven Optik w_{AO1} den oberen Scheitelpunkt der Kurve fest. Bei planer Oberfläche der Optik sind Radius w_1 und Bildweite z_1 des ausfallenden Laserstrahls identisch zu denen des einfallenden Laserstrahls. Mit zunehmendem Hub der Adaptiven Optik können die resultierenden Tailenparameter des ausfallenden Laserstrahls aus dem berechneten Verlauf der Kurve abgelesen werden.

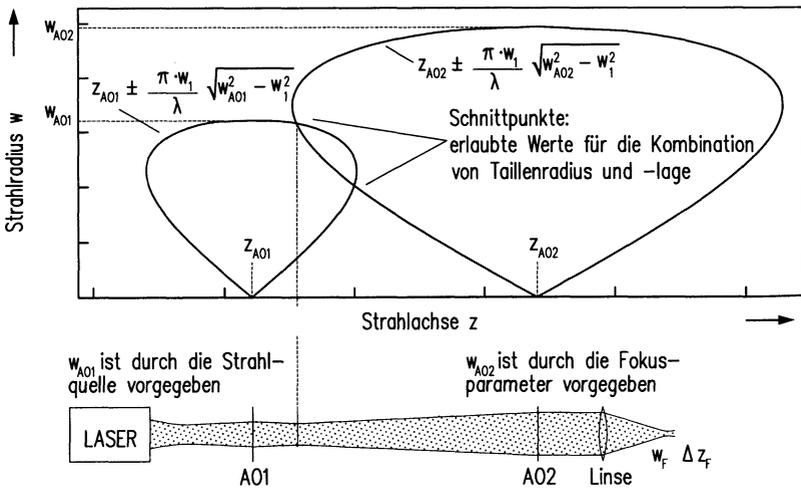


Bild 2-7: Kombination von zwei Adaptiven Optiken [63]

Das Ziel, aus einem gegebenen Rohstrahl einen Fokusstrahl mit wählbarem Fokusradius w_f und Bildweite z_f zu generieren, erfordert im allgemeinen den Einsatz zweier Adaptiver Optiken. Die Kaustik des unfokussierten Rohstrahls ist von der Strahlquelle vorgegeben und hat am Einbauort z_{AO1} der Adaptiven Optik AO 1 den Strahlradius w_{AO1} . Die Form der linken Kurve beschreibt somit alle Tailenlagen und -radien, die durch die Transformation an AO 1 erzeugt werden können.

Ausgehend vom Fokus, gegen die Laserstrahlrichtung, werden die gewählten Parameter des Fokustrahls zuerst durch die Fokussieroptik fester Brennweite und danach von der Adaptiven Optik AO 2 transformiert. Am Einbauort z_{AO2} der zweiten Adaptiven Optik AO 2 hat der Laserstrahl den Radius w_{AO2} (rechte Kurve).

Die Aufgabenstellung besteht darin, die Brennweiten der Adaptiven Optiken AO 1 und AO 2 so zu kombinieren, daß genau die Abbildung des gegebenen Rohstrahls in den gewählten Fokustrahl erreicht wird. Diese Bedingung ist an den Schnittpunkten der beiden Kurven erfüllt. Diese theoretische Überlegung zeigt, daß im allgemeinen zwei Möglichkeiten existieren, aus einem gegebenen Rohstrahl den gewählten Fokustrahl zu generieren.

Der Einfluß variabler Strahlweglängen läßt sich durch die Verschiebung der rechten Kurve entlang der Strahlachse z bei festem Einbauort der linken Adaptiven Optik darstellen. Resultat ist eine Verschiebung der Schnittpunkte beider Kurven. Bisherige Systeme für den Strahlweglängenausgleich fragen die aktuellen Achspositionen ab und berechnen die Strahlweglänge bzw. den momentanen Abstand der beiden Adaptiven Optiken. Jedem Abstand kann eine Kombination von Brennweiten bzw. Hüben der Piezoaktuatoren beider Adaptiver Optiken zugeordnet werden. Der Einfluß fliegender Optiken kann mit diesem Vorgehen erfolgreich ausgeglichen werden [66, 67].

Die Auswirkungen der Stellelemente auf den weiteren Strahlverlauf erfassen diese Steuerungen jedoch nicht. Die konsequente Weiterentwicklung muß ein Regelsystem sein, das die Auswirkungen der Nachstellung permanent erfaßt. Nur so können auch alle thermischen Effekte, die vom Alter der optischen Komponenten, der eingestellten Laserstrahlleistung und der Einschaltdauer des Lasers abhängen, erfaßt und beseitigt werden.

2.4 Regelkonzepte

Aufgabe einer Regelung ist die Angleichung der Ausgangsgröße eines störgrößenbehafteten, dynamischen Systems an eine vorgegebene Sollgröße [68]. Diese Aufgabenstellung kann durch eine Rückführungsstruktur gelöst werden, indem die zu regelnde Größe durch eine Meßeinrichtung erfaßt und mit der Führungsgröße verglichen wird. Ein Regler generiert abhängig von der Regeldifferenz die Reglerausgangsgröße und wirkt über ein Stellglied auf die Regelstrecke zurück. Idealerweise wird durch diese Rückkopplung der Einfluß der Störgröße vollständig beseitigt. Zentrale Anforderungen an eine Regelung sind ausreichende Genauigkeit bei einem der Regelstrecke angepaßten Zeitverhalten.

Je nach Funktionsweise lassen sich verschiedene Reglertypen wie schaltende oder stetige Regler unterscheiden. Während **stetige Regler** ein Ausgangssignal liefern, das zwischen Anfangs- und Endwert alle Zwischenwerte annehmen kann, besitzt z.B. speziell der **Zweipunktregler** nur zwei Schaltzustände. Die Regelung erfolgt nicht über die Amplitude des Ausgangssignals, sondern über das Einschalt- oder Tastverhältnis. Zweipunktregler zeichnen sich durch einen robusten und störsicheren Aufbau aus, sind aber hystereseebehaftet.

Grundsätzlich können Regelsysteme für Materialbearbeitungsanlagen in Anlagen- und Prozeßregelungen unterteilt werden [69]. Werden Prozeßemissionen wie Plasma- oder Temperaturstrahlung als Rückführgrößen verwendet, spricht man von einer Prozeßregelung. Eine Anlagenregelung liegt vor, wenn die Rückführgrößen zwar während des Bearbeitungsprozesses gewonnen werden, sich aber auf Meßgrößen der Anlagendiagnostik beschränken.

2.4.1 Prozeßregelungen

Der Entwicklung einer Prozeßregelung liegt die **Analyse des jeweiligen Bearbeitungsprozesses** zugrunde. Durch eine theoretische Modellbildung [70] oder experimentell gewonnenes Technologiewissen [71, 72, 73, 74] werden den Prozeß beschreibende, meßbare Verfahrensparameter abgeleitet, die mit dem resultierenden Bearbeitungsergebnis korreliert sind. Basierend auf diesen Meßgrößen erfolgt der anschließende Regelkreisentwurf [7, 75, 76].

Als Rückführgrößen eignen sich z. B. das zeitlich oder spektral aufgelöste Plasmasignal [71, 73, 75, 76, 77, 78], die Temperatur der Werkstückoberfläche am Bearbeitungsort [69] oder akustische Signale des Prozesses [72, 74]. Über die Pumpleistung der Anregung [75, 76], seltener über dämpfende Elemente im Laserstrahlengang [77, 79], läßt sich die Laserleistung dem Prozeß anpassen. Prozeßregelungen für die Lasermaterialbearbeitung wurden z.B. für das Härten [80, 81, 82], das Schweißen [75, 83] oder das Abtragen [72, 76] entwickelt.

Neueste Prozeßregelungen für die Fokussachführung beim Laserstrahlschweißen arbeiten auch mit adaptiven optischen Komponenten als Stellelemente [84, 85], **Bild 2-8**.

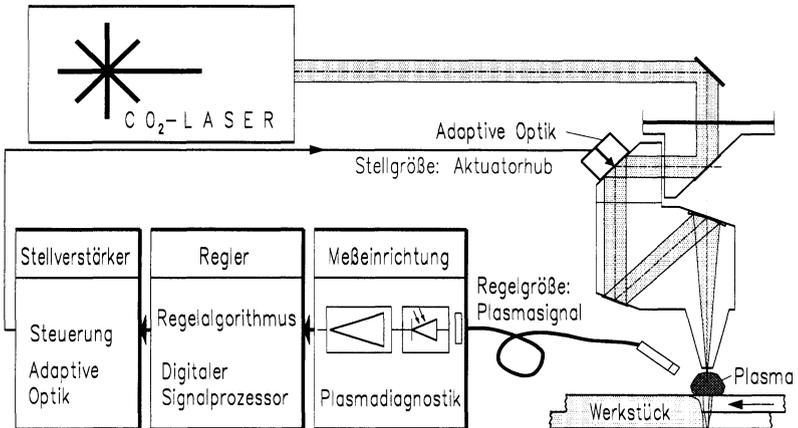


Bild 2-8: Prozeßregelung für das Laserstrahlschweißen [84]

Charakteristisch für Prozeßregelungen ist die **prozeßspezifische Auslegung** und Optimierung des Regelsystems. Alle Rückführgrößen werden direkt von der Bearbeitungsstelle gewonnen. Dies hat den entscheidenden Vorteil, daß sämtliche Prozeßfluktuationen einfließen und vom Regelsystem erfaßt werden. Dieser Vorteil wird durch die Spezialisierung auf einen bestimmten Prozeß erkauft, die eine Übertragung auf alternative Bearbeitungsaufgaben meist ausschließt. Eine Veränderung im Prozeßablauf bedingt in der Regel eine Modifikation der Prozeßregelung. Dies kann den Austausch von Meßeinrichtungen und Stellelementen erfordern und hohe Rüstzeiten und -kosten verursachen.

2.4.2 Anlagenregelungen

Die Rückführgrößen einer Anlagenregelung sind die **Anlagenkenngrößen**. Neben Parametern der Werkzeugmaschine wie Positionen und Geschwindigkeiten der Achsen haben bei der Lasermaterialbearbeitung die Kenngrößen des Laserstrahls (Abschnitt 2.1.1) entscheidenden Einfluß auf den Bearbeitungsprozeß [86, 87]. Bestimmender Faktor für maximal erreichbare Prozeßgeschwindigkeiten und Bearbeitungsqualität sind neben der Laserstrahlleistung die Fokussparameter [56, 88]. Die Entwicklung von **Regelkreisen für die Fokusskontrolle** ist deshalb Gegenstand zahlreicher Arbeiten [89, 90, 91].

Ein Regelsystem mit Autofokus-Sensor [92] stellt eine konstante Fokusslage relativ zur Werkstückoberfläche beim Laserstrahlschweißen sicher, **Bild 2-9**. Aus dem Hochleistungslaserstrahl wird durch einen diffraktiven Strahlteiler ein Diagnosestrahl (ca. 1 %) um einen geringen Winkel abgelenkt und dadurch nach dem Fokussierspiegel etwas versetzt auf die Werkstückoberfläche fokussiert.

Der Diagnosestrahl trifft ca. 3 mm vor dem Hochleistungsstrahl auf das Werkstück und wird dort zu einem gewissen Anteil von der Oberfläche zurück in den Laserstrahlengang reflektiert. Der diffraktive Strahlteiler lenkt diesen reflektierten Anteil auf eine Sensoranordnung, welche die Divergenz des Diagnosestrahls erfaßt und daraus die Fokusslage berechnet.

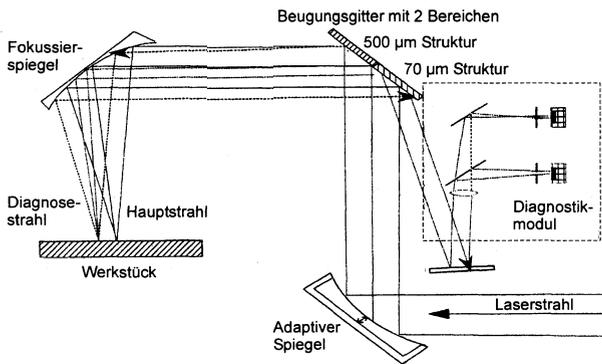


Bild 2-9: Autofokus-Sensor für das Laserstrahlschweißen [92]

Mit Hilfe des vorlaufenden Diagnosefokus kann kontinuierlich der Abstand des Fokus zur Werkstückoberfläche gemessen und durch einen adaptiven Spiegel nachgestellt werden. Vorteile des Systems sind der Verzicht auf einen zusätzlichen Pilotlaser, die Einbeziehung des Fokussierspiegels und die direkte Erfassung der Fokusslage.

Einschränkungen entstehen durch die richtungsabhängige Messung, die eine zusätzliche Drehachse erforderlich macht. Bei der Materialbearbeitung dreidimensionaler Werkstücke kann der vorlaufende Diagnosefokus Probleme an Konturelementen mit engen Radien verursachen. Auch werden weitere Einflußgrößen auf den Fokus, wie z. B. Schwankungen des Fokusradius, nicht erfaßt.

Für eine umfassende Anlagenregelung stellt sich die Aufgabe, sowohl Fokuslage als auch Fokusradius zu regeln und damit die **Leistungsdichte in der Werkstückebene** konstant zu halten. Die Funktion der Regelung bei beliebigen Bearbeitungsvorgängen und Bauteilkonturen stellt hohe Anforderungen an Konzipierung und Ausführung, sichert aber die universelle Verwendbarkeit, was als großer Vorteil gegenüber speziellen Prozeßregelungen zu werten ist.

2.4.3 Erweiterungen der klassischen Regelschleife

Neben dem klassischen einschleifigen Regelkreis können, je nach Komplexität der Regelstrecke, erweiterte Konzepte erforderlich sein. Besteht z. B. die Aufgabe, mehrere physikalisch verkoppelte Ausgangsgrößen parallel und simultan zu regeln, kann eine **Mehrgrößenregelung** [93] vorteilhaft eingesetzt werden. Es ergeben sich kompliziertere Rückführungsstrukturen, dargestellt in einer allgemeinen Regelungsstruktur, **Bild 2-10**.

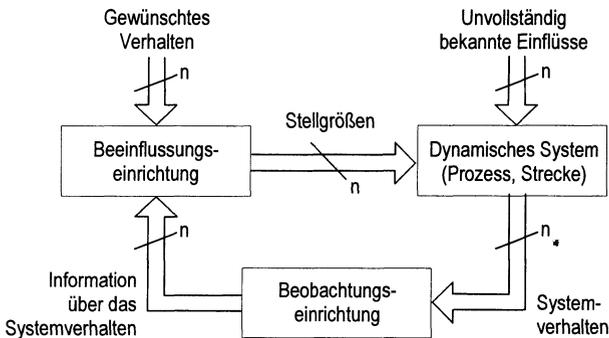


Bild 2-10: Allgemeine Regelstruktur

Die Regelung weist zwar das gleiche strukturelle Grundprinzip auf wie ein einschleifiger Regelkreis, die Bedeutung der Blöcke in der Rückführschleife muß jedoch erheblich allgemeiner gefaßt werden. Die Signalpfade werden durch n -dimensionale Signalvektoren ersetzt [68, 93, 94].

Bei der Synthese von Mehrgrößenregelungen können, verglichen mit Einzelregelkreisen, zusätzliche Probleme auftreten, weil die Änderung einer Stellgröße neben der erwünschten Auswirkung auch unerwünschte Änderungen der übrigen Regelgrößen zur Folge haben kann. Dieses Verhalten ist in der inneren Struktur der Regelstrecke begründet und wird als **Verkopplung** bezeichnet. Das Aufsplitten einer Mehrgrößenregelung in mehrerer Einzelregelkreise ist dadurch oft nicht ohne weiteres möglich. Das Gesamtsystem kann Koppelschwingungen ausführen, die zur Instabilität des Gesamtsystems führen, selbst wenn alle Einzelregelkreise ordnungsgemäß ausgelegt sind [68, 93, 94, 95].

Die Entscheidung für eine Anlagen- bzw. Prozeßregelung muß nicht ausschließlich gefällt werden. Es sind viele Anwendungsfälle denkbar, bei denen sich die Kombination einer Anlagen- mit einer Prozeßregelung im Rahmen einer **kaskadierten Regelung** [95] anbieten würde, **Bild 2-11**.

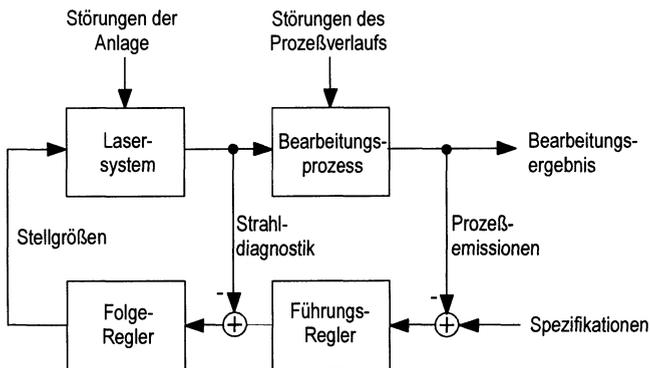


Bild 2-11: Kaskadierte Regelung

Die unterlagerte Anlagenregelung gewährleistet die zuverlässige Einhaltung der vorgegebenen Kenngrößen des Werkzeugs Laserstrahl, während die Prozeßregelung aus der Analyse der Prozeßemissionen die geeigneten Strahlparameter berechnet und als Führungsgrößen der Anlagenregelung vorgibt. Mit diesem Vorgehen könnte die Regelgüte vieler der bereits realisierten Prozeßregelungen deutlich verbessert werden.

3 Zielsetzung

Die Materialbearbeitung mit CO₂-Hochleistungslasern hat sich auf Anwendungsgebieten, die eine hohe Fertigungsqualität und ein hohes Maß an Flexibilität erfordern, etabliert. Laseranlagen stehen mit hoher Ausgangsleistung und guter Strahlqualität zur Verfügung und insbesondere HF-angeregte Laser bieten prinzipbedingt eine schnelle Steuerbarkeit der Laserstrahlleistung. Diese Möglichkeiten werden bisher jedoch noch nicht konsequent genutzt.

Die sichere Beherrschung der Bearbeitungsprozesse als notwendige Voraussetzung für eine konstant hohe Fertigungsqualität erfordert neben leistungsfähigen Laseranlagen intelligente Regelsysteme. Prozeßregler werden erfolgreich für spezifische Bearbeitungsprozesse eingesetzt, beeinträchtigen jedoch die Flexibilität der Laseranlage. Einen allgemeineren Lösungsansatz bieten umfassende Anlagenregelungen, die unabhängig vom jeweiligen Bearbeitungsprozeß die sichere Einhaltung der vorgegebenen Laserparameter garantieren.

Die Realisierung scheiterte bisher an der Verfügbarkeit leistungsfähiger Meßsysteme für die Strahlcharakterisierung. Kommerziell erhältliche Systeme sind entweder nicht für die Integration in die Strahlführung geeignet, oder haben für hochdynamische Strahlführungssysteme zu große Zeitkonstanten. Seit kurzem verfügbare, innovative Sensoren auf der Basis von Hochtemperatursupraleitern, die sich durch große Dynamik und hohe Zerstörschwelle bei einfacher Handhabung auszeichnen, eröffnen neue Möglichkeiten für die Erfassung der Laserstrahlkenngrößen.

Mit dem Ziel konstante Laserparameter und einen prozeßsicheren Betrieb zu gewährleisten, werden in dieser Arbeit innovative Sensorik- und Aktorikkomponenten zu einer umfassenden Anlagenregelung kombiniert. Meßsysteme auf der Basis schneller, thermoelektrischer Detektoren erfassen die Laserparameter und ermöglichen die Berechnung der Leistungsdichte in der Werkstückebene. Abweichungen von den Sollgrößen werden mittels schneller Stellglieder ausgeregelt. Die Auslegung des gesamten Regelsystems ist auf die Integration in kommerzielle Anlagen zur Lasermaterialbearbeitung ausgerichtet, was eine robuste Ausführung und kompakte Abmessungen der Sensorik- und Aktorikkomponenten erfordert.

In einem ersten Schritt werden kommerziell verfügbare Sensoren auf ihre Eignung zur Erfassung der Laserparameter von CO₂-Hochleistungslasern überprüft. Auf der Basis dieser Sensoren werden neue Meßsysteme entworfen und aufgebaut. Hauptanforderungen sind Online-Fähigkeit sowie leichte Handhabung und Integrierbarkeit in bestehende Laseranlagen.

Eine optimale Auslegung des Regelsystems erfordert die Analyse aller wesentlichen Störgrößen der Fokusparameter von CO₂-Hochleistungslaseranlagen. Als Ursache sind einerseits Schwankungen der Laserstrahlleistung, andererseits veränderliche Parameter Radius und Bildweite des Fokus bekannt. Intensität und Frequenz der Störgrößen werden quantitativ erfaßt.

Der Störgrößenanalyse folgt der Entwurf des Regelkreises. Gefordert ist neben dem Verzicht auf bewegte mechanische Bauteile eine ausreichende Dynamik, um alle wesentlichen Störgrößen effektiv zu unterdrücken. Grundlegende Bedingung ist der Online-Betrieb während der Materialbearbeitung bei unveränderter Leistungsfähigkeit der Laseranlage. Dieses prozeß-unabhängige Regelsystem hält sowohl die Laserstrahlleistung als auch die Kaustik des fokussierten Laserstrahls, insbesondere Radius und Bildweite des Fokus an allen Arbeitsraumpositionen und unter allen Betriebszuständen konstant.

Die Stellelemente werden mit der Maßgabe ausgewählt, ausreichende Dynamik für die identifizierten Störungen zu gewährleisten. Das Zusammenspiel der Stellelemente wird simuliert und Einbauorte für eine minimale Verkopplung der Stellgrößen werden ausgewählt. Die Funktionalität des Konzeptes und die Leistungsfähigkeit der entwickelten Komponenten wird anhand der Implementierung des Regelsystems in eine kommerzielle Lasermaterialbearbeitungsanlage nachgewiesen. Der Regelkreis wird geschlossen, und Messungen der wesentlichen Kenngrößen erlauben die Beurteilung der Funktionsfähigkeit des Regelsystems.

4 Physikalische Grundlagen thermoelektrischer Detektoren

Thermoelektrische Detektoren bestehen aus zwei Werkstoffen mit unterschiedlichen Werten auf der thermoelektrischen Spannungsreihe. Sie eignen sich nicht nur für Kontakttemperaturmessungen, sondern bieten sich auch für den Nachweis von CO₂-Laserstrahlung (10,6 μm) an. Während konventionelle Thermosäulen Zeitkonstanten im Bereich mehrerer Sekunden aufweisen und sich nur für die Erfassung sehr langsamer Vorgänge eignen, haben Dünnschicht-Thermosäulen wesentlich kürzere Zeitkonstanten und weitaus höhere Empfindlichkeiten.

Neuartige thermische Detektoren auf der Basis von Hochtemperatur-Supraleitern, sogenannte Atomlagen-Thermosäulen-Detektoren, weisen extrem kurze Zeitkonstanten und hohe Zerstörschwellen auf. In Verbindung mit ihrer Gleichsignalempfindlichkeit eröffnen sie neue Möglichkeiten bei der Detektion von CO₂-Laserstrahlung.

**Dünnschicht-
Thermosäule**

**Atomlagen-
Thermosäule**

4.1 Dünnschicht-Thermosäulen-Detektoren

Ein Thermoelement besteht aus zwei unterschiedlichen metallischen Werkstoffen, die an einer Kontaktstelle verschweißt oder verlötet sind. Die resultierende, thermoelektrische Spannung dieser Detektoren ist bei gegebener Werkstoffpaarung von der Temperatur der Kontaktstelle abhängig. Ausgangsspannung und Empfindlichkeit können durch die Reihenschaltung von Thermoelementen zu Thermosäulen (thermopiles) skaliert werden.

Eine wesentliche Verbesserung stellt die Herstellung von Thermosäulen in Dünnschicht-technik dar. Ergebnis ist eine verringerte Wärmekapazität und, im Vergleich mit konventionellen Thermosäulen, eine erheblich geringere Signalanstiegszeit. Neueste Entwicklungen von Detektoren auf Siliziumbasis nutzen die hochentwickelten Herstellungsverfahren der Halbleitertechnik und erzielen äußerst reproduzierbare Detektoreigenschaften.

4.1.1 Aufbau von Thermoelementen

Ein Temperaturgradient führt in leitfähigen Werkstoffen zur Diffusion von Ladungsträgern. Dieser Effekt wurde von Seebeck 1822 (T. J. Seebeck, 1770-1831) entdeckt und erklärt die Funktionsweise von Thermoelementen, Thermogeneratoren und Peltierelementen [45]. Bei Metallen sind zwei Mechanismen für die Thermokraft verantwortlich [96]. **Die Phonon-drag-Thermokraft**, die bei niedrigen Temperaturen (< 100 K) maßgeblich ist, verschwindet mit zunehmender Temperatur (proportional $1/T$). Bei technischen Einsatztemperaturen (> 100 K) dominiert die **Diffusions-Thermokraft** der Ladungsträger [97].

Werden zwei Werkstoffe A und B mit unterschiedlichem Fermi-Niveau E_A und E_B in Kontakt gebracht, findet an der Kontaktstelle ein Ausgleich der Ladungsträger durch einen Diffusionsstrom statt [45]. Der Kontaktpartner mit dem höheren Fermi-Niveau gibt Elektronen ab und wird positiv, während der Kontaktpartner mit dem niedrigeren Fermi-Niveau Elektronen aufnimmt und entsprechend negativ geladen wird. Der auftretende Diffusionsstrom baut eine entgegengesetzt wirkende Kontaktspannung auf. Die Kontaktstelle befindet sich genau dann im Gleichgewicht, wenn die Fermi-Niveaus an der Kontaktstelle auf gleichem Energieniveau liegen.

Die **Kontaktspannung** $U_{AB}(T)$ ist durch die Differenz der Fermi-Niveaus $E_B - E_A$ und die Temperatur der Kontaktstelle T bestimmt, **Bild 4-1**. Die Ausdehnung der Übergangsschicht und damit die Zahl der diffundierten Ladungsträger verringert sich mit steigender Temperatur der Kontaktstelle. Entsprechend wird die Kontaktspannung verringert.

$$T_1 < T_2 \Rightarrow U_{AB}(T_1) > U_{AB}(T_2)$$

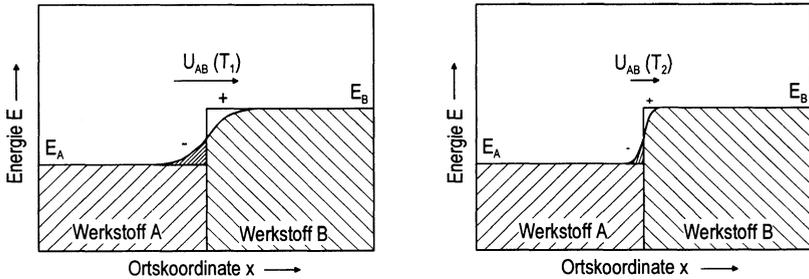
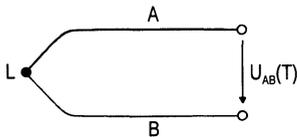


Bild 4-1: Temperaturabhängigkeit der Diffusions-Thermokraft

Dieser Effekt wird zur Temperaturmessung verwendet, indem zwei Metalle unterschiedlicher Austrittsarbeit z. B. durch Lötten oder Schweißen fest verbunden werden, **Bild 4-2**. Die temperaturabhängige Spannung dieser Verbindungsstelle zwischen den beiden Werkstoffen A und B wird als **Thermospannung** $U_{AB}(T)$ bezeichnet.

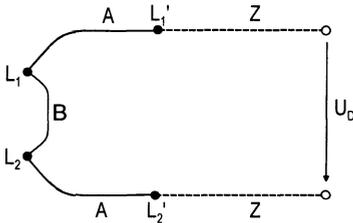


$$U_{AB}(T) = -U_{BA}(T) \tag{Gl. 4-1}$$

Bild 4-2: Thermoelement und Thermospannung

Die Änderung der Thermospannung in Abhängigkeit von der Temperatur der Kontaktstelle bestimmt die Empfindlichkeit oder **Thermokraft** dU_{AB}/dT der Werkstoffpaarung. Bei Metallen ergeben sich Thermokräfte von einigen Mikrovolt pro Kelvin. Extreme Werte ($110 \mu V/K$) findet man bei Antimon und Wismut sowie bei besonderen Halbleiterwerkstoffen. Eine Auflistung der thermoelektrischen Spannungsreihe üblicher Thermoelement-Werkstoffe, aus deren Differenz die Thermokräfte abgelesen werden können, ist z. B. aus [45] zu entnehmen.

Zur Messung absoluter Temperaturen können Differentialthermoelemente eingesetzt werden, **Bild 4-3**. Die Kontaktstellen L_1 und L_2 der thermoelektrisch wirksamen Leiter A und B werden zu Hauptlötstellen verbunden. Während eine der Lötstellen der zu messenden Temperatur ausgesetzt wird, dient die zweite Lötstelle als Referenz und wird auf konstanter Temperatur gehalten.



$$\begin{aligned} U_D &= U_{AB}(T_1) + U_{BA}(T_2) + U_{AZ}(T_0) + U_{ZA}(T_0) = \\ &= U_{AB}(T_1) - U_{AB}(T_2) \\ &= S_{AB} \cdot \Delta T \end{aligned}$$

mit Seebeck-Koeffizient

$$S_{AB} = S_B - S_A$$

(Gl. 4-2)

Bild 4-3: Differentialthermoelement

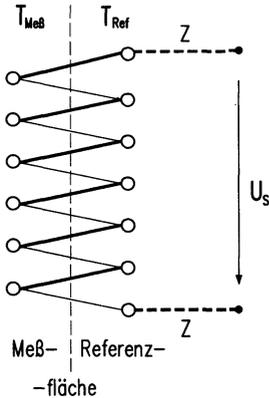
Die verbleibenden Enden werden über die Anschlußdrähte Z einem Spannungsmeßgerät zugeführt. Die Thermospannung U_D dieses Differenzialelements mit gegebener Werkstoffpaarung ergibt sich aus der Temperaturdifferenz der beiden Hauptlötstellen (Gl. 4-2). Insbesondere ist ersichtlich, daß die entstandenen Nebenlötstellen L' keinerlei Einfluß auf die Meßwerte haben, solange sich beide auf gleicher Temperatur befinden.

4.1.2 Strahlungsdetektion mit Thermosäulen

Für eine Messung optischer Strahlung kann prinzipiell jeder Vorgang, der eindeutig von der eingestrahlten Leistung abhängt und mit dieser quantitativ in Beziehung gesetzt werden kann, verwendet werden [98]. Insbesondere kann ein Strahlungsfluß hoher Leistungsdichte mit Thermoelementen detektiert werden [7]. Diese sind einfach herzustellen, robust und die Meßspannung ist bei bestimmten Werkstoffen über einen weiten Temperaturbereich nahezu linear abhängig von der Temperaturdifferenz ΔT .

In ausgedehnten Strahlungsfeldern geringer Leistungsdichte reicht die Empfindlichkeit einzelner Thermoelemente jedoch nicht aus. Deshalb wird diese durch eine Reihenschaltung von mehreren Thermoelementen zu einer Thermosäule erhöht.

Der Aufbau einer Thermosäule ist schematisch in **Bild 4-4** dargestellt. Eine Kontaktreihe des Strahlungsempfängers (**Meßfläche**) wird mit einer Absorptionsschicht versehen und dem Strahlungsfeld ausgesetzt, während die zweite Kontaktfläche (**Referenzfläche**) gegen einfallende Strahlung abgeschirmt und auf konstantem Temperaturniveau gehalten wird.



$$U_s = n \cdot S_{AB} \cdot \Delta T \tag{Gl. 4-3}$$

Bild 4-4: Aufbau und Struktur einer Thermosäule

Die resultierende Gleichgewichtstemperatur der Meßfläche hängt einerseits von der absorbierten Leistung, andererseits von den Verlusten durch Wiederabstrahlung, Wärmeleitung und Konvektion ab. Bei einem Absorptionsvermögen α ergibt sich der von einer Leistungsdichte E im Zeitintervall dt **zugeführte Energiebetrag dQ_0** zu:

$$dQ_0 = \alpha \cdot E \cdot dt \tag{Gl. 4-4}$$

Hiervon wird der **Verlustanteil dQ_v** durch Wärmeleitung an die Umgebung abgegeben. Bei kleinen Temperaturdifferenzen $\Delta T = T - T_0$ wird dieser Anteil proportional zu ΔT angenommen:

$$dQ_v = \beta \cdot \Delta T \tag{Gl. 4-5}$$

Der **Gesamtenergiezuwachs dQ/dt** durch Bestrahlung ergibt sich somit pro Zeiteinheit:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_0}{dt} - \frac{dQ_v}{dt} = \alpha \cdot E - \beta \cdot (T - T_0) \tag{Gl. 4-6}$$

Bei gegebener Wärmekapazität $C = dQ/dT$ des Strahlungsempfängers gilt:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C} \cdot \frac{dQ}{dt} = \frac{\alpha \cdot E}{C} - \frac{\beta}{C} \cdot (T - T_0) \quad (\text{Gl. 4-7})$$

Die Lösung dieser Differentialgleichung ergibt:

$$T - T_0 = \Delta T = \frac{\alpha \cdot E}{\beta} \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{\beta}{C} \cdot \Delta t\right) \right] \quad (\text{Gl. 4-8})$$

Dabei bedeutet $\Delta t = t - t_0$ die Zeitdauer der Bestrahlung und T_0 die Ausgangstemperatur, im allgemeinen die Umgebungstemperatur zum Zeitpunkt $t = 0$. Als Meßgröße resultieren eine **Temperaturerhöhung ΔT** und eine **Zeitkonstante τ** :

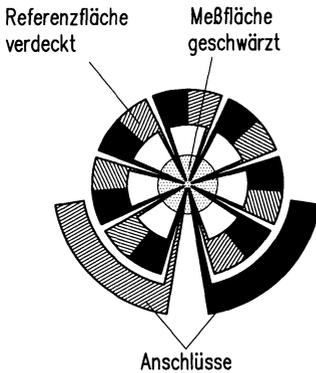
$$\Delta T = \frac{\alpha \cdot E}{\beta} \qquad \tau = \frac{C}{\beta} \quad (\text{Gl. 4-9})$$

Maximale Empfindlichkeit, d. h. maximale Temperaturdifferenz ΔT zwischen den Kontaktstellen, erfordert bei gegebener Leistungsdichte E des Strahlungsfeldes einen maximalen Absorptionskoeffizienten ($\alpha \approx 1$) und einen minimalen Verlustfaktor β . Ein maximaler Verlustfaktor β ist neben einer geringen Wärmekapazität C jedoch Voraussetzung für eine **minimale Zeitkonstante**. Maximale Empfindlichkeit und minimal erreichbare Zeitkonstante verhalten sich demnach komplementär. Während Absorptionskoeffizient und Wärmekapazität unabhängig optimiert werden können, muß für die Größe des Verlustfaktors jeweils ein Kompromiß bezüglich Empfindlichkeit und Zeitkonstante des Detektors gefunden werden.

Zum **Schutz gegen Umgebungseinflüsse** und um die Konvektion als störenden Faktor auszuschließen, wird der Detektor in ein hermetisch dichtes Gehäuse mit Inertgasfüllung eingeschlossen. Durch die Auswahl der Füllgase mit unterschiedlicher thermischer Leitfähigkeit kann der Verlustfaktor in einem weiten Bereich eingestellt werden. Dadurch besteht die Möglichkeit, die Detektorkennwerte Empfindlichkeit und Anstiegszeit an die jeweilige Meßaufgabe anzupassen. Der spektrale Empfindlichkeitsbereich, der bei offenem Detektorgehäuse nur von der Absorberschicht bestimmt ist, wird bei geschlossenem Gehäuse maßgeblich von der Transmissionskurve des Eintrittsfensters beeinflusst.

Seit 1934 werden Thermosäulen auf der Basis überlappender Antimon-Wismut-Schichten, sogenannte **Dünnschicht-Thermosäulen**, hergestellt. Die Dünnschichttechnik reduziert die Wärmekapazität der Kontaktflächen, was erheblich kürzere Anstiegszeiten bis in den Bereich weniger Millisekunden gestattet.

Bild 4-5 zeigt die Struktur einer kommerziellen Dünnschicht-Thermosäule. Um die absorbierende Meßfläche im Zentrum sind die großflächig ausgeführten Referenzflächen zu erkennen, die auf einem Keramik-Substrat (Wärmesenke) aufgebracht und gegen Strahlung abgedeckt sind.



Dünnschicht-Thermosäule

Modell:	Dexter 1 M
Zahl der Kontakte:	$n = 15$
Aktive Fläche:	$\varnothing = 1 \text{ mm}$
Empfindlichkeit:	$S = 20 \text{ V/W}$
Zeitkonstante:	$\tau = 32 \text{ ms}$
Innenwiderstand:	$R_i = 3 \text{ k}\Omega$

Bild 4-5: Struktur und Kennwerte einer kommerziellen Dünnschicht-Thermosäule

Detektoren mit Kontakten auf Silizium-Basis besitzen gegenüber Antimon-Wismut-Detektoren eine fünffach höhere Thermokraft und eine um den Faktor drei kürzere Anstiegszeit [99]. Fertigungsverfahren der Halbleiter-Technologie ermöglichen zudem die Herstellung dieser Detektoren mit sehr geringer Serienstreuung.

4.1.3 Signalverstärkung und Kompensation der thermischen Drift

Der Innenwiderstand von Dünnschicht-Thermosäulen verdient besondere Beachtung. Während metallische Thermosäulen gewöhnlich Innenwiderstände unter 100Ω aufweisen, liegt dieser bei Dünnschicht-Thermosäulen im Bereich mehrerer $\text{k}\Omega$. Das **Rauschsignal** U_N , das vom thermischem Rauschen (Johnson-Rauschen) bestimmt ist, ergibt sich bei einem Innenwiderstand R_i , einer Frequenzbandbreite Δf und der Umgebungstemperatur T zu:

$$U_N = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R_i \cdot \Delta f} \quad \text{mit Boltzmann-Konstante } k \quad (\text{Gl. 4-10})$$

Die Rauschspannung nimmt einerseits mit dem Innenwiderstand, andererseits mit der Bandbreite zu. Die nachfolgende Auswerteschaltung muß deshalb dem Innenwiderstand und der Anstiegszeit des Sensors angepaßt sein, um ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis zu erreichen.

Das Ausgangssignal von Thermosäulen ist proportional zur Temperaturdifferenz ΔT zwischen Meß- und Referenzfläche (Gl. 4-3). Die Thermospannung hängt demnach nicht nur von der einfallenden Strahldichte E , sondern auch maßgeblich von der Umgebungstemperatur T_0 ab. Dieser unerwünschte Einfluß läßt sich durch eine Temperaturstabilisierung des Sensors (z. B. durch Heizung/Kühlung) ausschließen, was jedoch einen erheblichen konstruktiven Aufwand bedeutet. Auf einfachere Weise läßt sich die **Kompensation der Umgebungstemperatur** durch eine Kontaktmessung des Absolutwertes T_0 an der Thermosäule und eine elektronische Korrektur des Sensorsignals erreichen, **Bild 4-6**. Voraussetzung ist die Kenntnis der Thermospannung in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur bei fester Strahldichte E .

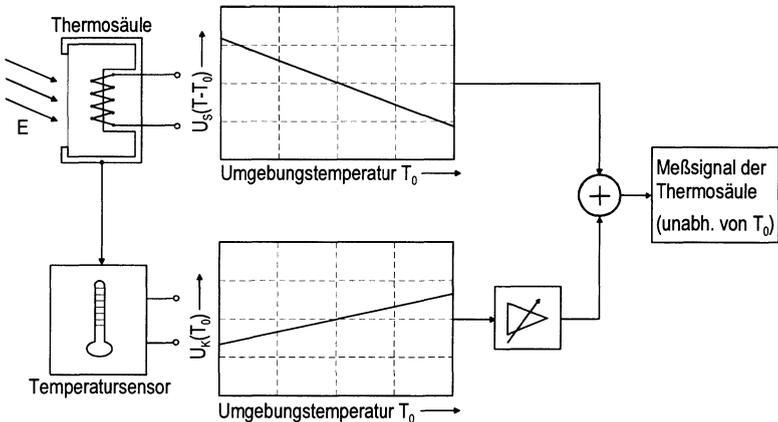


Bild 4-6: Kompensation der Umgebungstemperatur bei Thermosäulen

Bei dieser konstanten Strahldichte E ergibt das Meßsignal $U_S(T - T_0)$ der Dünnschicht-Thermosäule bei steigender Umgebungstemperatur T_0 eine linear fallende Kennlinie. Die Umgebungstemperatur T_0 wird durch eine Kontaktmessung $U_K(T_0)$ bestimmt und weist eine linear steigende Kennlinie auf. Die Steigung dieser Kennlinie ist i. a. nicht exakt invers zur Steigung der Thermosäulenkennlinie. Dies wird durch einen nachgeschalteten, einstellbaren Verstärker erreicht. Die Addition der Meßsignale eliminiert den Einfluß der Umgebungstemperatur. Einmal kalibriert können mit dieser Schaltung absolute Werte für die Leistungsdichte E angegeben werden.

4.2 Atomlagen-Thermosäulen-Detektoren

Seit 1911 ist der Effekt der **Supraleitung bei Metallen** bekannt [100]. Er beschreibt den Verlust des elektrischen Widerstandes bei Unterschreiten einer sogenannten Sprungtemperatur, die bei Metallen im Bereich weniger Kelvin liegt. Die Entdeckung des supraleitenden Effektes bei vergleichsweise hohen Temperaturen (ca. 90 K) an keramischen Substanzen erregte 1986 weltweites Aufsehen [101]. Diese sogenannten **Hochtemperatursupraleiter (HTS)** zeichnen sich durch einen geschichteten Aufbau aus, der zu einer extremen Richtungsabhängigkeit der physikalischen Eigenschaften (Anisotropie) führt.

Atomlagen-Thermosäulen-Detektoren arbeiten mit einer derartigen Schicht einer HTS-Substanz [102]. Für die Detektion von Laserstrahlung bei Raumtemperatur spielt die Supraleitung keine Rolle, wohl aber die Anisotropie im Aufbau. Diese ist verantwortlich für das Auftreten einer transversalen Thermospannung bei der Absorption von Laserstrahlung auf der Schichtoberfläche.

4.2.1 Transversaler Seebeck-Effekt

In Kristallen werden die physikalischen Größen wie z. B. die Thermokraft nicht durch Skalare sondern allgemeiner durch Tensoren 2. Stufe repräsentiert. Analog (Gl. 4-2) verursacht ein Temperaturgradient ∇T ein elektrisches Feld \mathbf{E} :

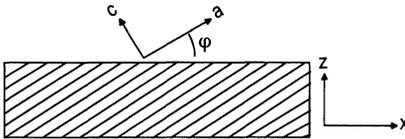
$$\mathbf{E} = \mathbf{S} \cdot \nabla T \quad \text{mit Seebeck-Tensor } \mathbf{S} \quad (\text{Gl. 4-11})$$

Gegeben sei eine Kristallsymmetrie mit identischen Beträgen der Gittervektoren in a-, b-Richtung und einen davon abweichenden Betrag des Vektors in c-Richtung. In diesem Kristallgitter besitzt der **Seebeck-Tensor** $\mathbf{S}_{\text{Kristall}}$ nur Elemente auf der Hauptdiagonale, wobei die Elemente der a- und b-Richtung identisch sind:

$$\mathbf{S}_{\text{Kristall}} = \begin{pmatrix} S_{ab} & 0 & 0 \\ 0 & S_{ab} & 0 \\ 0 & 0 & S_c \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. 4-12})$$

Die Thermospannung wird jedoch nicht parallel zu den Gittervektoren, sondern parallel zu den makroskopischen Außenkanten des Festkörpers gemessen.

Gegenüber diesem kartesischen Koordinatensystem des Beobachters ist das Kristallgitter um die y-Achse mit dem positiven Winkel φ verdreht. Von der Drehung sind die beiden Vektoren a und c des Kristallgitters betroffen. Die kristallographische b-Richtung fällt mit der y-Richtung des Koordinatensystems zusammen, **Bild 4-7**.



$$\mathbf{S}_{\text{Beobachter}} = \mathbf{R}_y(\varphi) \cdot \mathbf{S}_{\text{Kristall}} \cdot \mathbf{R}_y(-\varphi)$$

$$\text{mit } \mathbf{R}_y = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix}$$

(Gl. 4-13)

Bild 4-7: Transformation der Kristallachsen in das kartesische Koordinatensystem

Die Beschreibung des thermoelektrischen Effektes im **Koordinatensystem des Beobachters** $\mathbf{S}_{\text{Beobachter}}$ erfolgt durch eine Transformation des Seebeck-Tensors $\mathbf{S}_{\text{Kristall}}$ mit der Rotationsmatrix \mathbf{R}_y . Ist die Kristallsymmetrie niedriger als kubisch, wie die im vorliegenden Beispiel orthorhombische Gitterstruktur, treten im Koordinatensystem auch Einträge neben der Hauptdiagonale im Seebeck-Tensor $\mathbf{S}_{\text{Beobachter}}$ auf:

$$\mathbf{S}_{\text{Beobachter}} = \begin{pmatrix} S_{xx} & 0 & S_{xz} \\ 0 & S_{yy} & 0 \\ S_{zx} & 0 & S_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{ab} \cos^2 \varphi + S_c \sin^2 \varphi & 0 & (S_{ab} - S_c) \sin \varphi \cos \varphi \\ 0 & S_{ab} & 0 \\ (S_{ab} - S_c) \sin \varphi \cos \varphi & 0 & S_c \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi \end{pmatrix}$$

(Gl. 4-14)

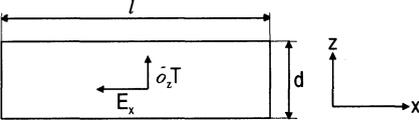
Wird in einem Festkörper mit anisotroper Thermokraft ein Temperaturgradient in z-Richtung $\partial_z T$ erzeugt, ergibt sich das resultierende elektrische Feld \mathbf{E} zu:

$$\mathbf{E} = \mathbf{S}_{\text{Beobachter}} \cdot \nabla T = \begin{pmatrix} S_{xx} & 0 & S_{xz} \\ 0 & S_{yy} & 0 \\ S_{zx} & 0 & S_{zz} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \partial_z T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{xz} \cdot \partial_z T \\ 0 \\ S_{zx} \cdot \partial_z T \end{pmatrix}$$

(Gl. 4-15)

Der Temperaturgradient in z-Richtung $\partial_z T$ verursacht also auch eine zur z-Richtung transversale Komponente des elektrischen Feldes. Diese Transversalkomponente ist in x-Richtung orientiert und berechnet sich zu $E_x = S_{xz} \cdot \partial_z T$.

Es resultiert die **thermoelektrische Spannung** U , die in x -Richtung abgegriffen werden kann:



$$U = -E_x \cdot l = -S_{xz} \cdot \frac{l}{d} \cdot \partial_z T \quad (\text{Gl. 4-16})$$

Bild 4-8: Transversalkomponente der Thermospannung

Bei großem **Geometriefaktor** l/d , d. h. kleiner Schichtdicke im Vergleich zur Abmessung des Kristalls, können sehr große Thermospannungen resultieren, selbst wenn die Anisotropie der Thermokraft nur kleine Elemente S_{xz} neben der Hauptdiagonale liefert. Aus (Gl. 4-14) ist abzulesen:

$$S_{xz} = (S_{ab} - S_c) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \quad (\text{Gl. 4-17})$$

Dieses **Nebendiagonalelement** S_{xz} ist einerseits physikalisch durch die Seebeck-Koeffizienten in a - b -Richtung bzw. c -Richtung des Kristalls vorgegeben, kann andererseits aber durch die Wahl des Kippwinkels φ beeinflusst werden. Ein Maximum wird bei $\varphi = 45^\circ$ erreicht. Für kleine Winkel φ , d.h. $\sin \varphi \cdot \cos \varphi \approx \varphi$, kann (Gl. 4-17) vereinfacht werden:

$$S_{xz} = \Delta S \cdot \varphi \quad \text{mit} \quad \Delta S = (S_c - S_{ab}) \quad (\text{Gl. 4-18})$$

Die Thermokraft wächst demnach in diesem Bereich proportional mit dem Winkel φ der Moleküllagen an. Die resultierende **Thermospannung** U (Gl. 4-16) läßt sich durch Einsetzen von (Gl. 4-18) in (Gl. 4-16) auch durch die Hauptachsenwerte der Thermokraft ausdrücken:

$$U \approx \Delta S \cdot \varphi \cdot \Delta T \cdot \frac{l}{d} \quad (\text{Gl. 4-19})$$

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Thermospannung transversaler Thermoelemente ganz wesentlich von der Struktur des Elements abhängt. Neben der werkstoffabhängigen Differenz der Hauptachsenwerte ΔS hängt die Thermospannung vom Geometriefaktor l/d und dem Kippwinkel φ zwischen den Gittervektoren und den Oberflächennormalen des Kristalls ab.

4.2.2 Kristallstruktur von Hochtemperatur-Supraleitern

Werkstoffe, die einen transversalen Seebeck-Effekt aufweisen, sind z. B. die Hochtemperatur-supraleiter **Yttrium-Barium-Kupfer-Oxid** (chem: $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$; Abk: YBaCuO) und **Thallium-Cuprat** (TlBaCaCuO). Am Beispiel von YBaCuO als bestuntersuchtem Vertreter der HTS werden Struktur und physikalische Kennwerte beschrieben, **Bild 4-9**.

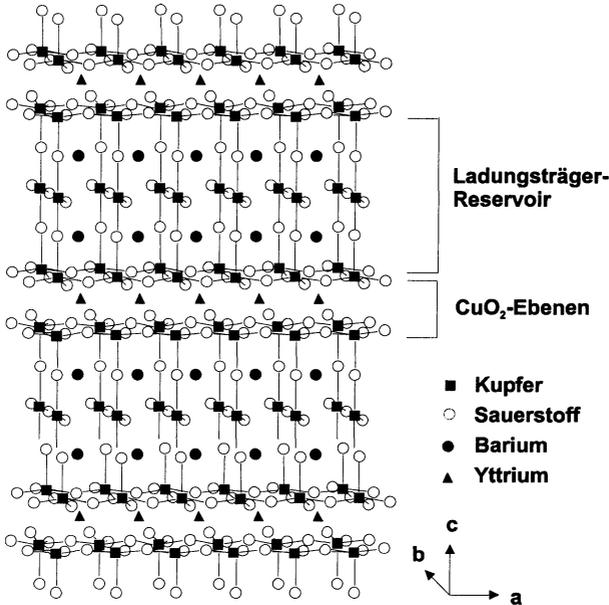


Bild 4-9: Gitterstruktur von $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ [nach 102 und 103]

Die Kristallstruktur von YBaCuO bei maximalem Sauerstoffgehalt, d. h. $\delta = 0$ in der Formel $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, weist gut leitende Kupferoxid-Ebenen (CuO_2), getrennt durch schlechter leitende Zwischenebenen auf. Diese Schichtung verursacht die starke Richtungsabhängigkeit der thermischen und elektrischen Eigenschaften. Gleichwertige Gitterparameter parallel zu den Kupfer-Sauerstoff-Ebenen in a-b-Richtung ($a = 0,382 \text{ nm}$; $b = 0,389 \text{ nm}$) und senkrecht auf diesen Ebenen ein abweichender Gitterparameter in c-Richtung ($c = 1,167 \text{ nm}$) kennzeichnen die orthorhombische Symmetrie des Kristalls [106].

Einkristalline YBaCuO-Schichten werden durch Elektronenstrahlablation [104, 105] oder Laserstrahlablation [102] auf einkristallinen Substraten wie Strontiumtitanat (SrTiO_3) oder Magnesiumoxid (MgO) aufgewachsen. Nachfolgend wird die Herstellung epitaktischer Schichten durch Pulsed Laser Vapour Deposition (PLVD) diskutiert. Bei diesem Verfahren trägt ein Excimerlaserstrahl eine stöchiometrische, polykristalline YBaCuO-Sintertablette höchster Reinheit ($> 99,99\%$) ab. Es entsteht ein stöchiometrisch expandierendes Plasma, das unter Sauerstoffatmosphäre auf dem geheizten, der Probe gegenüber liegenden, Substrat als epitaktische YBaCuO-Schicht aufwächst, **Bild 4-10**.

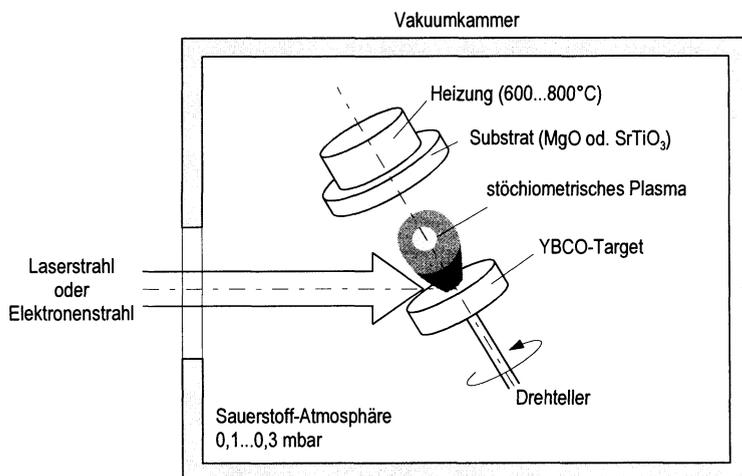


Bild 4-10: Herstellung einkristalliner YBaCuO-Schichten

Pro Laserpuls wächst die YBaCuO-Schicht um Bruchteile eines Nanometers. Die Dicke der Schicht läßt sich durch Vorgabe der Laserfrequenz und der Ablationsdauer einstellen. Es werden Schichtdicken zwischen 35 nm und 500 nm erzielt [106]. Somit kann der **Geometriefaktor l/d** (Elementlänge durch Schichtdicke) in weitem Rahmen variiert werden. Bei dünnen Schichten erreicht dieser Faktor Werte, die nach Gleichung (Gl. 4-19) extrem hohe Thermospannungen erwarten lassen:

$$\left(\frac{l}{d}\right)_{\text{YBCO}} = \frac{100 \text{ nm}}{10 \text{ mm}} = 10^5$$

(Gl. 4-20)

Während des anschließenden Abkühlvorgangs wird Sauerstoff unter Atmosphärendruck bis zur Sättigungsgrenze im Kristall eingelagert. Der Koeffizient δ im chemischen Aufbau $\text{YBaCu}_3\text{O}_{7-\delta}$ geht gegen Null [106]. Die Eigenschaften der YBaCuO -Schicht werden wesentlich vom Sauerstoffgehalt bestimmt. Bis $\delta < 0,5$ zeigt YBaCuO metallische, unmagnetische Eigenschaften, für $\delta = 1$ ist der Kristall isolierend und antiferromagnetisch [107]. Da der Sättigungsgrad des Sauerstoffs auch die Leitfähigkeit der Schicht beeinflusst, läßt sich die einwandfreie Funktion des Atomlagen-Thermosäulen-Detektors auch im späteren Betrieb leicht durch eine Messung des Innenwiderstandes überprüfen.

Die Thermokraft einkristalliner Proben in Richtung der Kristallachsen wurde von verschiedenen Autoren bestimmt [108, 109, 110, 111, 112, 113]. Demnach geht die Thermokraft parallel zu den Kupferoxid-Ebenen bei Raumtemperatur gegen Null, während die Komponente senkrecht zu diesen Ebenen Werte von 6 bis $30 \mu\text{V/K}$ annimmt. Direkte Messungen [114] an YBaCuO -Schichten mit $\delta \approx 0$ zeigen eine **Anisotropie der Thermokraft** ΔS_{YBCO} :

$$\Delta S_{\text{YBCO}} = S_c - S_{ab} \approx 10 \text{ mV} / \text{K} \quad (\text{Gl. 4-21})$$

Eine kohärente, d. h. über die gesamte Oberfläche gleichmäßige Verkippung der Moleküllagen in der YBaCuO -Schicht um den Winkel φ zur Oberflächennormalen wird durch definiertes Anschneiden des Substrats vor der Bearbeitung erreicht. Bis zu einem Winkel von ca. 40° erfolgt die Ausrichtung der aufwachsenden Moleküllagen bis auf wenige Grad Abweichung parallel zu den kristallographischen Substratebenen.

Der Kippwinkel φ bestimmt nach (Gl. 4-17) die Größe der Elemente neben der Hauptdiagonale des Seebeck-Tensors. Diese **transversale Thermokraft** S_{xz} der YBaCuO -Schicht steigt mit Zunahme des Kippwinkels und erreicht ein Maximum bei 45° . Durch den für kleine Winkel annähernd linearen Zuwachs der transversalen Thermokraft (Gl. 4-18) werden bereits bei moderaten Winkeln (z.B. $\varphi = 20^\circ$) beachtliche Thermokräfte beobachtet:

$$S_{xz}(\varphi = 20^\circ) = 3,5 \text{ mV} / \text{K} \quad (\text{Gl. 4-22})$$

In Verbindung mit dem Geometriefaktor l/d (Gl. 4-20) resultieren **Thermokräfte** $U/\Delta T$ an YBaCuO -Schichten, die um den Faktor 100 über denen konventioneller Thermoelemente liegen (Abschnitt 4.1.1) und YBaCuO als ideales transversales Thermoelement ausweisen:

$$\frac{U}{\Delta T} = S_{xz} \cdot \frac{l}{d} = 350 \text{ mV} / \text{K} \quad (\text{Gl. 4-23})$$

4.2.3 Detektion von CO₂-Laserstrahlung

Für den elektrischen Abgriff der Thermospannung wird der Atomlagen-Thermosäulen-Detektor mit metallischen Kontakten versehen. Hierfür wird auf die YBaCuO-Oberfläche in den Randbereichen der aktiven Fläche (10 x 10 mm) jeweils eine Metallschicht aus Aluminium oder Gold eindiffundiert oder aufgedampft, **Bild 4-11**. Auf diesen Metalloberflächen können die Zuführungsdrähte des Detektors angebracht werden [106].

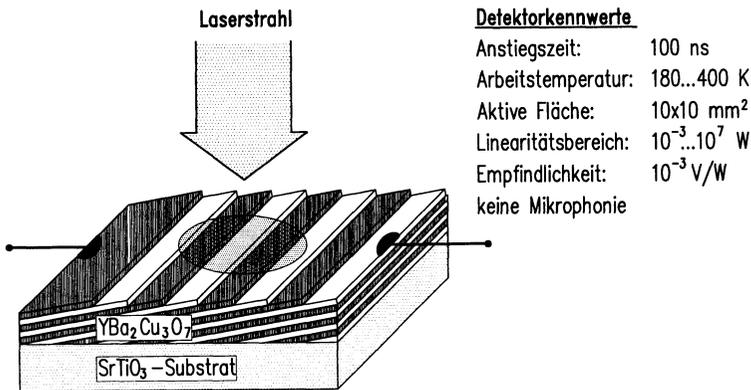


Bild 4-11: Struktur und Kennwerte des Atomlagen-Thermosäulen-Detektors [49]

Die Detektion von einfallender CO₂-Laserstrahlung mit ALT-Detektoren findet analog dem Mechanismus von konventionellen Thermosäulen statt (Abschnitt 4.1.2). Zunächst erfolgt die Absorption der Strahlungsleistung und die Umwandlung in Wärme auf der Schichtoberfläche. Der resultierende Temperaturgradient zwischen Schichtober- und -unterseite verursacht die transversale Thermospannung senkrecht zur Laserstrahlachse.

Laserpulse können mit dem Atomlagen-Thermosäulen-Detektor ohne nachgeschalteten Verstärker mit hoher zeitlicher Auflösung erfaßt werden. Der Betrieb an CO₂-Lasern im Dauerstrich-Betrieb erfordert aufgrund der niedrigen Empfindlichkeit des Detektors jedoch eine leistungsfähige Verstärkerschaltung. Diese muß in ihrer Bandbreite an die jeweilige Meßaufgabe angepaßt werden, um ein möglichst hohes Signal-Rausch-Verhältnis zu gewährleisten.

Bei der Konzipierung von Meßsystemen auf der Basis von Atomlagen-Thermosäulen müssen einige besondere Eigenschaften berücksichtigt werden. Für CO₂-Laserstrahlung weist die Oberfläche der aktiven YBaCuO-Schicht einen Reflexionsfaktor von ca. 80 % auf, d.h. der weitaus größte Anteil der einfallenden Laserstrahlung wird reflektiert und leistet keinen Beitrag zum Detektorsignal. Überdies kann dieser reflektierte Anteil Sachschäden verursachen oder Personen gefährden.

Im thermischen Gleichgewicht muß die gesamte absorbierte Laserleistung über das Substrat abgeführt werden. Eine Temperaturerhöhung des Substrates würde zu einem abnehmenden Detektorsignal führen. Bei Überschreiten einer kritischen Tempertur (ca. 400 K) diffundiert zudem Sauerstoff aus dem YBaCuO-Kristall und führt zu einer Änderung der Detektoreigenschaften (Abschnitt 4.2.2). Das Substrat muß deshalb in gutem thermischen Kontakt zu einer Wärmesenke stehen.

5 Versuchseinrichtungen

Für die Auslegung der nachfolgenden Anlagenregelung müssen sowohl die Eigenschaften der verwendeten Laseranlage als auch die einwirkenden Störeinflüsse untersucht werden. Die Implementierung erfolgt an einer kommerziellen Laseranlage für die dreidimensionale Materialbearbeitung mit einem hochfrequenzangeregten CO₂-Laser der Leistungsklasse 2,2 kW.

Auf der Basis thermoelektrischer Detektoren werden Meßsysteme mit hoher Dynamik für die Erfassung der Laserparameter Leistung, Fokusradius und Bildweite entworfen und realisiert. Aufbau und technische Daten dieser Meßsysteme werden beschrieben und ihre Eignung für den Online-Nachweis der Laserparameter getestet.

Die Steuerung der Laserstrahlleistung erfolgt über die Pumpenergiequelle, während die Strahlkaustik mit Adaptiven Optiken gesteuert wird. Die Verarbeitung und Aufbereitung der Meßsignale für die Ansteuerung der Stellelemente übernimmt neben analogen elektronischen Komponenten ein digitaler Regler auf der Basis eines Digitalen Signal Prozessors (DSP).

Laseranlage

Aufbau neuer Meßsysteme

Stellelemente

5.1 Lasermaterialbearbeitungsanlage

Die Versuche werden an einer kommerziellen Laseranlage für die dreidimensionale Materialbearbeitung (Trumpf: L 5000) durchgeführt, **Bild 5-1**. Für die Sensorik und Regelung von Bedeutung sind die realisierbaren Achspositionen relativ zur Laserstrahlquelle sowie die Maximalwerte für die Achsgeschwindigkeit (0,5 m/s) und die Beschleunigung ($1,31 \text{ m/s}^2$). Eine eingehende Beschreibung der Anlage ist bei P. Hoffmann [115] zu finden.

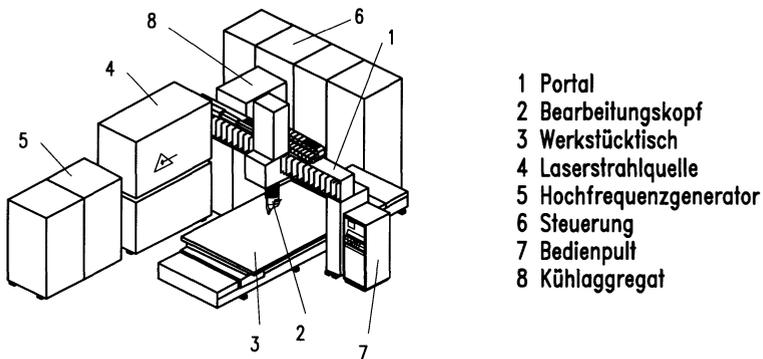


Bild 5-1: Aufbau der Lasermaterialbearbeitungsanlage Trumpf L 5000 [nach 115]

5.1.1 CO₂-Hochleistungslaser TLF 2500

Die Materialbearbeitungsanlage ist mit einem **HF-angeregten CO₂-Laser** der Ausgangsleistung 2,2 kW (Trumpf: TLF 2500) ausgerüstet. Die Anregungsenergie für die Laserstrahlquelle stellen zwei HF-Generatoren der Frequenz 13,56 MHz zur Verfügung. Einem quartz-erregten Transistoroszillator sind jeweils eine transistorisierte Treiberstufe mit 600 W und eine Röhrendstufe mit 11 kW Ausgangsleistung [116] nachgeschaltet. Die Hochfrequenzleistung wird kapazitiv über Dielektrika in die Entladungsstrecken eingekoppelt. Der Austausch der Lasergase erfolgt axial schnellgeströmt mittels Drehkolbenverdichter (roots-blower).

Der Laser verfügt über die drei Betriebsarten **Puls-, cw-Tast- und cw-Betrieb**. Nur im cw-Tastbetrieb ist die Laserleistungssteuerung (LLS) nutzbar, welche unter anderem die Einstellung der mittleren Leistung durch Befehle im Programm der Maschinensteuerung gestattet. Das Tastverhältnis kann dadurch in Abhängigkeit von der Zeit, der Position des Laserkopfes im Bearbeitungsraum oder der momentanen Verfahrensgeschwindigkeit gewählt werden. Diese Funktion dient der Anpassung der Laserstrahlleistung an den Prozeß, z.B. beim Bearbeiten komplexer räumlicher Bauteile.

5.1.2 Laserstrahlführung und -formung

Bild 5-2 zeigt das Strahlführungssystem der Bearbeitungsmaschine mit den Abständen zwischen den optischen Komponenten, wie es als Ausgangssituation für die Versuche zur Verfügung stand.

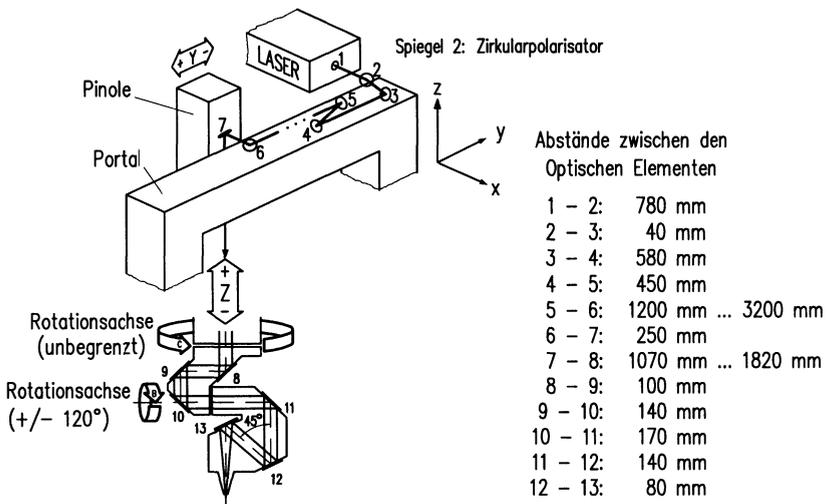


Bild 5-2: Laserstrahlführung der verwendeten Laseranlage

Der Laser ist in eine Werkzeugmaschine (**Portalsystem** mit fünf Freiheitsgraden) integriert, wobei die relative Positionierung des Laserstrahls zum Werkstück durch ein Handhabungssystem in **Hybridbauweise** realisiert wird. Während die x-Achse den Werkzeuggestisch bewegt, wird der Laserstrahl in der y- und z-Achse über fliegende Optiken geführt.

Der **Hochleistungsstrahl** wird durch ein Zinkselenid-Fenster mit einer Transmission von 40 % aus dem Resonator ausgekoppelt, ist linear polarisiert und weist eine Leistungsdichteverteilung auf, die als TEM₀₁₊-Mode bezeichnet wird. Am rückwärtigen Galliumarsenid-Spiegel stehen 0,5 % der Resonatorleistung (maximal 27,5 W) als **Nebenstrahl** für Diagnosezwecke zur Verfügung. Dieser wird im allgemeinen für die Messung der Laserstrahlleistung mittels Thermosäulen verwendet, deren Zeitkonstante im Bereich einiger Sekunden liegt.

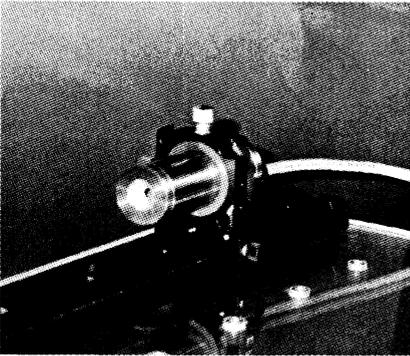
Über insgesamt 13 optische Komponenten wird der Laserstrahl zum Werkstück geführt. Der Umlenkspiegel an Position 2 ist als Zirkularpolarisator ausgeführt, der richtungsunabhängige Bearbeitungsergebnisse sicherstellt. Teleskopachsen zwischen den optischen Komponenten an Position 5 und 6 sowie zwischen Position 7 und 8 führen zu einer **variablen Strahlweglänge**, die von der Position des Laserkopfes im Bearbeitungsraum abhängt. Im Laserkopf wird die Orientierung des Laserstrahls zum Werkstück durch zwei Rotationsachsen eingestellt. Die optische Komponente an Position 13, die Fokussieroptik mit einer Brennweite von 150 mm, ist ein wassergekühltes Offaxis-Paraboloid, das unter einem Ablenkwinkel von 45 ° eingebaut ist.

5.2 Aufbau der Meßsysteme

Die Beschreibung der Laserstrahlausbreitung im Gaußstrahlmodell erfordert die Bestimmung von Leistung, Strahlradius und Wellenfrontradius (Abschnitt 2.1.1). Kommerzielle Meßsysteme für diese Kenngrößen sind erheblichen Einschränkungen bezüglich ihrer Integrationsfähigkeit in kommerzielle Anlagen unterworfen (Abschnitt 2.2.3). Deshalb werden neue Meßsysteme auf der Basis thermoelektrischer Detektoren entworfen und aufgebaut, die sich durch einen robusten, störsicheren Aufbau auszeichnen, eine hohe Dynamik aufweisen und leicht in den Laserstrahlengang integriert werden können. Die Kalibrierung der Meßsysteme für die Online-Erfassung von Leistung, Fokusradius und Bildweite in der Bezugsebene des Werkstücks erfolgt mit einem Hohladelmeßgerät (Prometec: Laserscope UFF 100).

5.2.1 Meßsystem zur Erfassung der Laserstrahlleistung

Das Meßsystem zur Bestimmung der Laserstrahlleistung mit hoher zeitlicher Auflösung basiert auf einem Atomlagen-Thermosäulen-Detektor, arbeitet bei Raumtemperatur und eignet sich gleichermaßen zur Erfassung kontinuierlicher und gepulster Laserstrahlung, **Bild 5-3**. Das Meßsystem ist insbesondere für den Einsatz an HF-angeregten CO₂-Hochleistungslasern ausgelegt [117].



Leistungsmeßsystem [117]

Apertur:	∅ = 4 bis 8 mm
Empfindlichkeit:	2 V/W
Zerstörschwelle:	10 W
Bandbreite:	DC bis 20 kHz
Arbeitstemperatur:	10°C bis 60°C
Detektor:	Atomlagen- Thermosäule

Bild 5-3: Leistungsmeßsystem mit Atomlagen-Thermosäulen-Detektor

Die Oberfläche des Atomlagen-Thermosäulen-Detektors ist mit einer **absorbierenden Schicht** versehen. Im Vergleich zur unbeschichteten Detektoroberfläche verringert sich die gerichtete Reflexion der auftreffenden CO₂-Laserstrahlung um den Faktor 20. Neben Vorteilen in der Bediener- und Anlagensicherheit resultiert ein wesentlich höheres Signal-Rausch-Verhältnis. Die im Meßkopf **integrierte elektronische Verstärkerschaltung** ist an den Innenwiderstand des Atomlagen-Thermosäulen-Detektors angepaßt. Sowohl der Verstärkungsfaktor als auch die Bandbreite können auf die jeweilige Meßaufgabe abgestimmt werden.

Das massive Gehäuse aus Edelstahl dient gleichzeitig der **HF-Abschirmung** von Detektor und Verstärker und der effektiven Wärmeableitung der eingestrahelten Energie. Dadurch kann das Meßsystem auch ohne eine weitere Kühlvorrichtung mit Laserstrahlleistungen bis zu 10 W im Dauerstrichbetrieb belastet werden. Die große Apertur erlaubt eine **leichte Justage** im Laserstrahl, während die Integration in bestehende Laseranlagen durch die Kompatibilität mit kommerziellen optischen Systemen (Spindler & Hoyer: Mikrobanksystem) sichergestellt ist.

Für einen Funktionstest wird das Meßsystem am rückwärtigen Resonatorspiegel angebracht und der Diagnosestrahl mit einer Linse auf die Sensorapertur abgebildet, **Bild 5-4**. Mit der LLS wird im Tastbetrieb bei einer Tastfrequenz von 100 Hz eine Rampe von 0 % auf 100 % der Laserausgangsleistung programmiert.

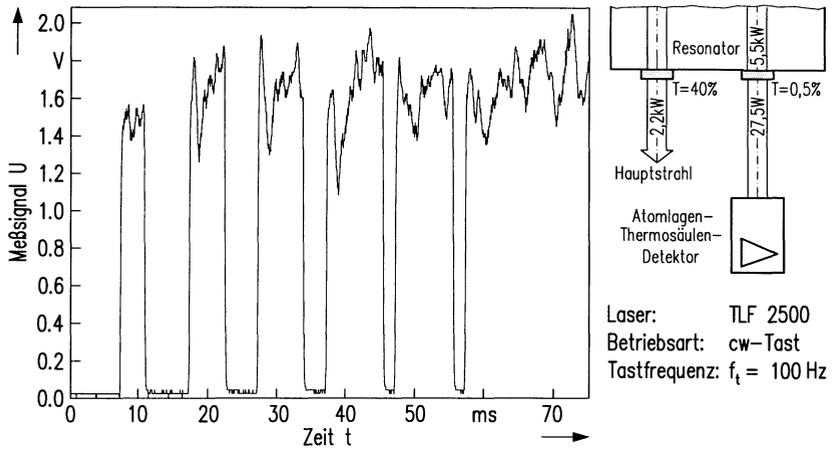


Bild 5-4: Messung der Laserstrahlleistung im Tastbetrieb

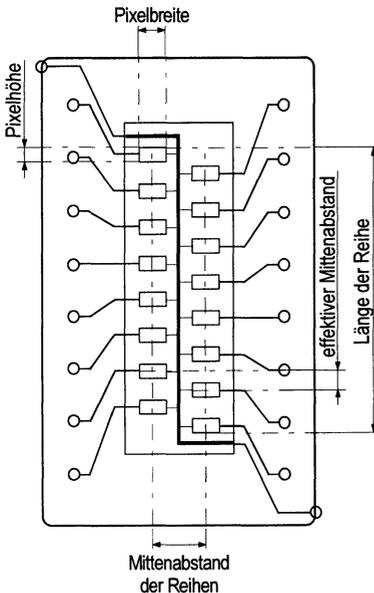
Die mittlere Laserstrahlleistung steigt mit dem Tastverhältnis. Deutlich ist die stetige Zunahme der Pulslänge zu erkennen, bis schließlich der kontinuierliche Betrieb mit 100 % Laserleistung erreicht ist. Das Meßsystem erfährt alle Leistungsbereiche mit hoher zeitlicher Auflösung.

Ein abschließender Funktionsvergleich mit schnellen Sensorsystemen auf der Basis von pyroelektrischen Detektoren [69, 115] zeigt anhand spektraler Analysen der Sensorsignale völlig übereinstimmende Ausgangssignale im interessierenden Frequenzbereich bis 10 kHz. Frequenzen oberhalb von 20 kHz können vom Meßsystem mit dem Atomlagen-Thermosäulen-Detektor nicht mehr erfasst werden. Für alle nachfolgenden Untersuchungen ist diese Bandbreite des Leistungsmeßsystems völlig ausreichend.

5.2.2 Strahlradius-Meßsystem

Ein einfaches Meßprinzip zur Bestimmung des Strahlradius ist die Projektion des Laserstrahls auf eine Detektorzeile. Die Auflösung der Messung wird durch die Anzahl der Einzelemente der Zeile bestimmt. Bei rotationssymmetrischem Strahl liefert die Signalverteilung über die Detektorzeile einen repräsentativen Querschnitt des Laserstrahls, anhand dessen der Strahlradius bestimmt werden kann.

Da zum Zeitpunkt der Untersuchungen noch keine strukturierten Atomlagen-Thermosäulen erhältlich waren, wurde ein Meßsystem auf Basis einer Dünnschicht-Thermosäulen-Zeile entwickelt, **Bild 5-5**. Der verwendete Zeilen-Detektor (IPHT Jena: ZS 2 x 8) besteht aus 16 Einzelementen, die in zwei Reihen zu je 8 Pixeln angeordnet und jeweils um einen halben Pixelabstand verschoben sind.



Zeilendetektor ZS2x8 (Dünnschicht-Thermosäulen-Zeile)

thermoelektrisches Material:
Antimon dotiertes Wismut und Antimon

Pixelzahl:	2 x 8
Länge der Reihe:	15 mm
Mittenabstand der Reihen:	3,86 mm
Pixelmittenabstand:	0,75 mm
Pixelfläche:	0,25 x 2 mm ²
Zeitkonstante:	15 - 20 ms
Innenwiderstand:	13 - 18 kΩ
Rauschspannung:	16 nV / $\sqrt{\text{Hz}}$

Bild 5-5: Struktur des Zeilen-Detektor ZS 2x8 [118]

Jedes Pixel stellt eine separate Dünnschicht-Thermosäule mit jeweils 67 Thermoelementen dar, die in Reihe geschaltet sind. Daraus resultiert ein relativ hoher Innenwiderstand pro Pixel (ca. 15 k Ω), der bei der nachfolgenden Signalverstärkung beachtet werden muß [119]. Das Ausgangssignal eines einzelnen Pixels liegt im Bereich weniger Millivolt. Für eine störreichere Übertragung wird pro Pixel ein Verstärker nachgeschaltet, dessen Bandbreite der Zeitkonstante des Detektors von ca. 20 ms angepaßt ist.

Der Zeilendetektor und die Verstärker werden zur Abschirmung von Störstrahlung in ein Metallgehäuse eingebaut, **Bild 5-6**.

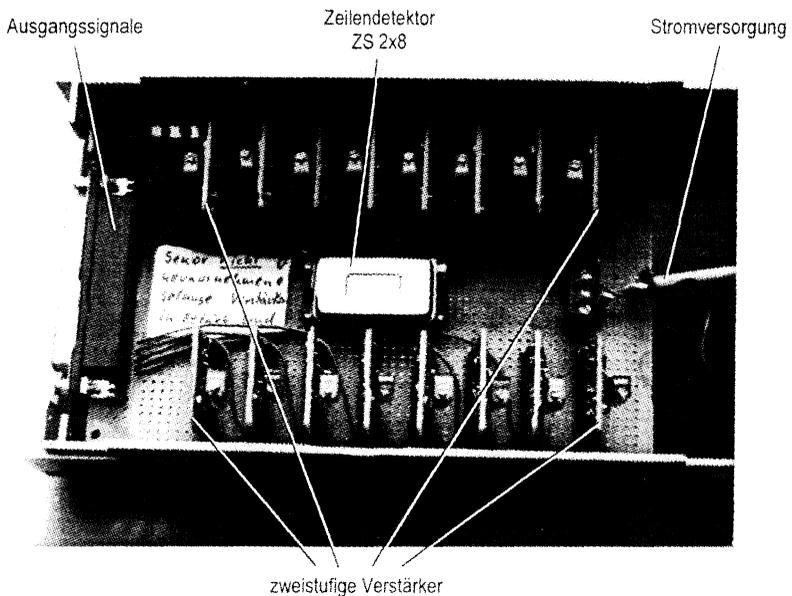


Bild 5-6: Strahlradius-Meßsystem

Die Kenndaten der einzelnen Pixel sind Toleranzen unterworfen. Deshalb wird jeder einzelne Verstärker kalibriert. Als homogene Strahlquelle dient ein Schwarzkörperstrahler, der alle Pixel gleichmäßig beleuchtet. Ein abschließender Funktionstest des Meßsystems ergibt Zeitkonstanten der einzelnen Pixel von ca. 20 ms. Damit liegt die Dynamik des Radius-Meßsystems aufgrund der verwendeten Dünnschicht-Thermosäulen deutlich unter der Dynamik des Leistungsmeßsystems mit Atomlagen-Thermosäulen-Detektoren (Abschnitt 5.2.1).

5.2.3 Wellenfrontradius-Meßsystem

M. Gorritz [28] verwendet für die Erfassung von Strahlage, Kippung und Divergenz eines Laserstrahls ein Meßsystem mit pyroelektrischem Quadrantendetektor (Abschnitt 2.2.3). Der dort verwendete Aufbau erfordert einen Chopper im Meßstrahlengang und eine elektrische Signalverarbeitung von vier Einzelsegmenten. Aufbauend auf diesen Vorarbeiten wird in der vorliegenden Arbeit ein Meßsystem entwickelt, das nur den Wellenfrontradius erfaßt, auf bewegte Bauteile völlig verzichtet und mit einem Einzeldetektor arbeitet, **Bild 5-7**.

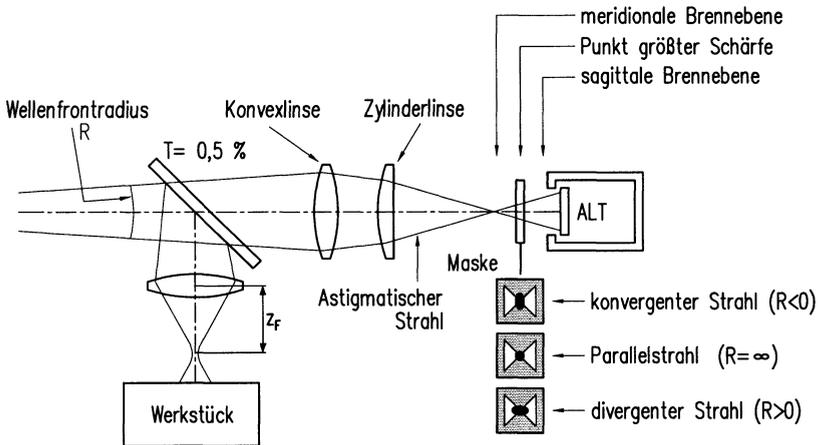


Bild 5-7: Aufbau und Funktionsweise des Wellenfrontradius-Meßsystems

Aus dem Hochleistungsstrahl wird ein Diagnosestrahl ausgekoppelt und durch eine Linsenkomposition fokussiert. Eine Zylinderlinse langer Brennweite versieht den resultierenden Fokus mit einem definierten astigmatischen Fehler [45]. Symmetrisch zum Punkt der größten Schärfe entstehen in der meridionalen bzw. sagittalen Brennebene zwei senkrecht zueinander angeordnete Strichfoki.

In fester Entfernung zur Linsenkomposition wird eine Maske mit Durchbrüchen definierter Kontur und Orientierung im Strahlengang positioniert. In Abhängigkeit von der Form des Strahlquerschnitts am Ort der Maske wird ortsselektiv ein Anteil der einfallenden Laserstrahlung absorbiert. Der Nachweis des transmittierten Anteils erfolgt mit einem Meßsystem mit Atomlagen-Thermosäulen-Detektor (Abschnitt 5.2.1).

Bei parallelem Diagnosestrahl ($R = \infty$) resultiert eine kreisförmige Kontur des Laserstrahls auf der Maske und 50 % der einfallenden Strahlung werden absorbiert. Eine Änderung des Wellenfrontradius verschiebt die Lage der Foki insgesamt entlang der optischen Achse. Dadurch ändert sich die Kontur des Laserstrahls auf der Maske und gleichzeitig der Prozentsatz der transmittierten Laserstrahlung. Das Ausgangssignal des Meßsystems ist somit ein Maß für den Wellenfrontradius und kann durch eine Vergleichsmessung der Bildweite im Fokus des Hochleistungslaserstrahls Offline kalibriert werden.

Wie beim Leistungmeßsystem (Abschnitt 5.2.1) wird ein Atomlagen-Thermosäulen-Einzel-detektor verwendet. Der ähnliche mechanische Aufbau und die elektronische Beschaltung stellen einen störsicheren Einsatz auch an HF-angeregten CO_2 -Lasern sicher. Messungen des Wellenfrontradius sind mit diesem System mit hoher zeitlicher Auflösung ($1 \mu\text{s}$) sowohl an gepulsten als auch an cw-Lasern möglich. Die Zeitkonstante kann, je nach Aufgabenstellung, zugunsten der Empfindlichkeit erhöht werden.

5.3 Stellelemente

Die schnelle Ansteuerung der Laserstrahlparameter erfordert geeignete Stellelemente. Während die Laserstrahlleistung sehr effektiv über die Pumpenergie der Laserstrahlquelle beeinflusst wird, kommen zur Steuerung der Strahlkaustik Adaptive Optiken zum Einsatz.

5.3.1 HF-Generator

Die Anregung der Lasergase erfolgt bei der verwendeten Laseranlage mittels HF-Generatoren in zweistufigem Aufbau. Der **Oszillator** dient der quartzerregten Erzeugung und Modulation des HF-Signals, das durch den nachfolgenden **Verstärker** auf Hochspannung transformiert wird, **Bild 5-8**. In der ersten Stufe, dem Oszillator, kann die Leistung auf zwei grundsätzlich verschiedene Arten gesteuert werden [120]. Entweder wird über ein Analogsignal die HF-Amplitude eingestellt oder über ein Rechtecksignal der HF-Generator getastet.

Die Einstellung der HF-Signalamplitude über ein Analogsignal (0 bis 10 V) ist nur im Dauerstrichbetrieb (cw) möglich. Über ein Dämpfungsglied kann die Ausgangsleistung des Lasers zwischen 75 % und 100 % der Maximalleistung eingestellt werden. Alternativ kann in der Betriebsart cw-Tast ein Ringmodulator mit einem unipolaren Tastsignal angesteuert werden. Die rechteckförmige Modulation der HF-Anregung erfolgt mit wählbarer Frequenz bewirkt eine Einstellung der mittleren Laserstrahlleistung von 0 % bis 100 % der Maximalleistung.

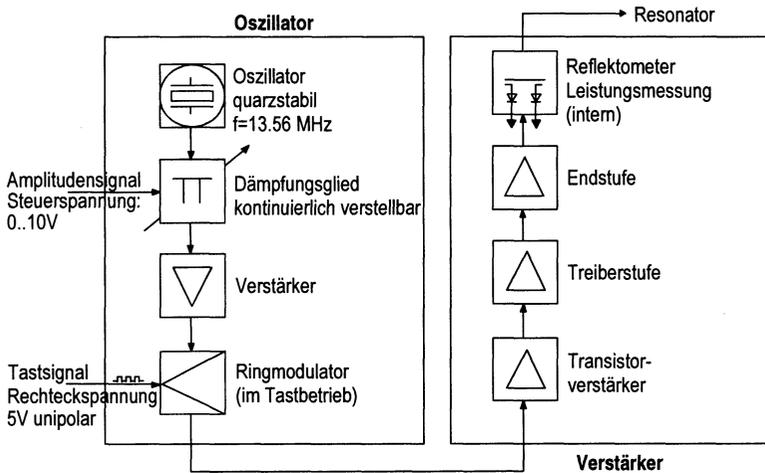


Bild 5-8: HF-Generator als Stellelement der Laserstrahlleistung

In der Betriebsart cw-Tast kann die sogenannte **Laserleistungssteuerung (LLS)** genutzt werden. Dieses Zusatzmodul generiert ein Tastverhältnis abhängig von einer analogen Steuerspannung. Gemäß der Vorgabe eines Spannungssignals zwischen 0 V und 10 V kann der gesamte Bereich von 0 bis 100 % der Laserstrahlleistung eingestellt werden. Die LLS erstellt Führungsgrößen, die in Abhängigkeit von der verstrichenen Prozeßzeit, der Position des Laserkopfes im Arbeitsraum oder der momentanen Verfahrensgeschwindigkeit programmiert werden. Diese Optionen kommen vorwiegend beim Schneiden und Schweißen dreidimensionaler Werkstücke zum Einsatz.

Zu beachten ist, daß die Laserstrahlleistung bei festem Tastverhältnis zusätzlich von der eingestellten Tastfrequenz abhängt, **Bild 5-9**. Bei niedrigen Tastfrequenzen (< 500 Hz) ergibt sich ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Tastverhältnis und resultierender Laserstrahlleistung. Nachteil ist hier der hohe Modulationsgrad des Ausgangssignals (bis zu 100 %). Mit steigender Tastfrequenz verringert sich der Modulationsgrad der Laserstrahlleistung. Der Wirkungsgrad des Lasers und damit die Ausgangsleistung sinken jedoch gleichzeitig ab. Dieser Effekt ist am ausgeprägtesten bei kleinen Tastverhältnissen unter 20 % zu beobachten.

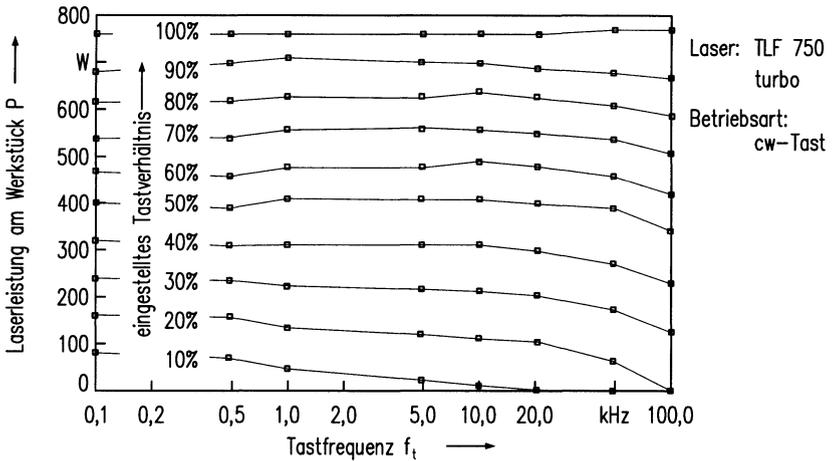


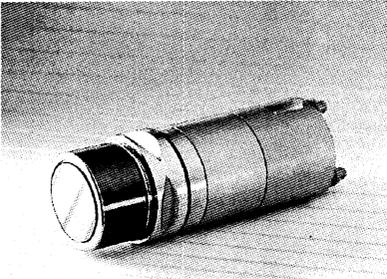
Bild 5-9: Laserstrahlleistung bei variablem Tastverhältnis

Als guter Kompromiß zwischen hohem Wirkungsgrad und geringem Modulationsgrad erweisen sich Tastfrequenzen um 10 kHz [69, 115]. Bei diesen Frequenzen ergibt sich ein akzeptabler Wirkungsgrad und die Auswirkungen der Leistungsfluktuation auf den Bearbeitungsprozess bzw. das Bearbeitungsergebnis sind weitgehend vernachlässigbar.

5.3.2 Piezoelektrische Adaptive Optik

Für die gezielte Beeinflussung der Strahlkaustik werden Adaptive Optiken verwendet, die von der Firma Diehl entwickelt und in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie optimiert werden, **Bild 5-10**.

Eine Spiegelplatte mit einer freien Apertur von 40 mm wird von einem zentrisch angeordneten Piezoaktuator verformt. Je nach Vorspannung der Spiegelfläche sind verschiedene Einstellbereiche und korrespondierende Brennweiten verfügbar. Die spezielle Beschichtung der Spiegelfläche garantiert einen Reflexionsgrad des Spiegelwerkstoffs von mehr als 99 % und ermöglicht den Einsatz bis zu einer maximalen Laserstrahlleistung von 3 kW.



Adaptive Optik

Spiegelwerkstoff:	Kupferlegierung
Reflexion (10,6 μm):	$R > 99 \%$
Apertur:	$d_{AO} = 40 \text{ mm}$
Aktuatorhub:	$s_{AO} = 0 \dots + 40 \mu\text{m}$
Positioniergenauigkeit:	$\Delta s_{AO} < 1 \mu\text{m}$
max. Laserleistung:	$P_{\text{max}} = 3 \text{ kW}$
Abmaße:	$\varnothing 72 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$

Bild 5-10: Adaptive Optik mit Piezoaktuator

Die elektronische Steuereinheit, ein Laborgerät für hohe Stellfrequenzen, erlaubt zwei Betriebsarten, die sich in Dynamik und Genauigkeit unterscheiden. In der Betriebsart **Voltage Control** wird ein analoges Spannungssignal vorgegeben, das zur Auslenkung des Piezoaktuators führt [121]. Die intrinsische Hysterese des Piezokristalls verhindert jedoch die reproduzierbare Einstellung der Brennweite. Die Betriebsart **Expansion Control** stellt eine exakte und reproduzierbare Einstellung der Brennweite sicher. Mit Dehnmeßstreifen wird die aktuelle Länge des Piezoaktuators erfaßt und auf den Sollwert geregelt. Dies kompensiert die Hysterese des Piezostapels, reduziert jedoch die Dynamik des Systems.

Bisher wurde die Grenzfrequenz nur mit Triangulationssensoren bestimmt. Dadurch konnte lediglich der Hub des Aktuators, nicht jedoch die Funktion der Adaptiven Optik überprüft werden. Im nachfolgenden Test wird die Adaptive Optik mit einem sinusförmigen Signal in der Betriebsart Voltage Control angesteuert und erstmals die resultierende **Änderung des Wellenfrontradius** im Fernfeld erfaßt, **Bild 5-11**. Die Auslenkung der Spiegelplatte erfolgt mit $\pm 20 \mu\text{m}$ um die Mittelstellung ($20 \mu\text{m}$).

Das Ausgangssignal des Meßsystems für den Wellenfrontradius U_R ist über dem Stellsignal der Adaptiven Optik U_{AO} aufgetragen. Bei sehr niedrigen Frequenzen (z. B. 1 Hz) weist das Signal des Wellenfrontradius-Meßsystems eine Amplitude von ca. 2 V auf und ist in Phase zum Stellsignal. Bei höheren Stellfrequenzen bleibt die Amplitude konstant und das Meßsignal wird lediglich durch statistische Abweichungen beeinträchtigt. Bei 200 Hz nimmt die Signalamplitude des Wellenfrontradius-Meßsystems geringfügig ab, was als Indikator für die Annäherung an die Grenzfrequenz gewertet wird. Bei einer weiteren Erhöhung der Frequenz auf 500 Hz wird zusätzlich eine starke Phasenverschiebung zwischen dem Stellsignal und dem Signal des Wellenfrontradius-Meßsystems beobachtet.

Stellglied: Adaptive Optik
Meßsystem: Wellenfrontradius

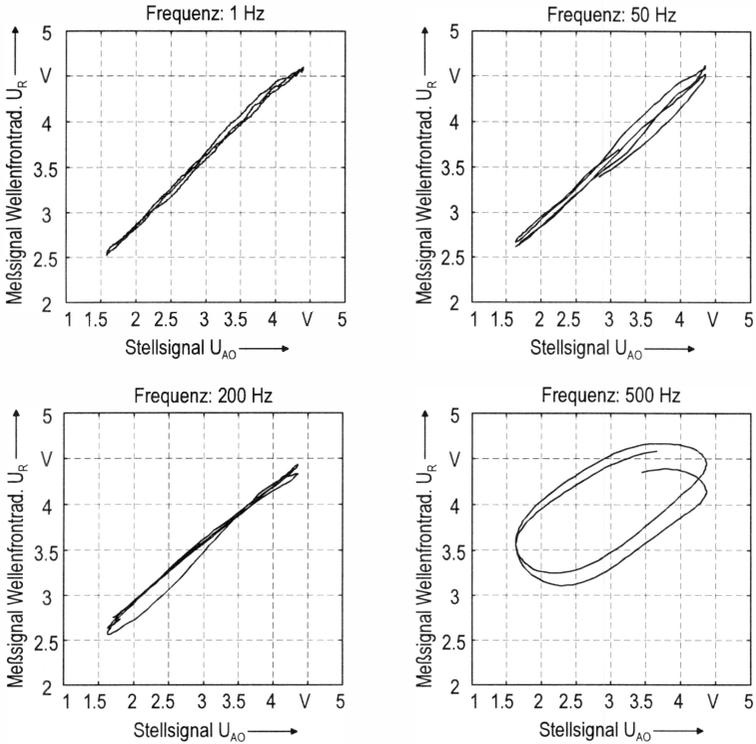


Bild 5-11: Dynamik der piezogetriebenen Adaptiven Optik

Die vorliegende Messung erfolgt unter Ausnutzung der maximal möglichen Hubdifferenz des Piezoaktuators ($\pm 20 \mu\text{m}$). Durch die Beschränkung auf einen geringeren Verstellbereich lassen sich noch weitaus höhere Stellfrequenzen erzielen. Mit der Adaptiven Optik steht demnach ein Stellelement für die Strahlkaustik zur Verfügung, das sich näherungsweise wie eine Linse variabler Brennweite verhält. Die Funktionsprüfungen zeigen, daß die Adaptive Optik den Wellenfrontradius zuverlässig bis zu einer Grenzfrequenz von ca. 200 Hz einstellt.

5.3.3 Regler und Computersystem

Für die Verarbeitung der Signale von den Meßeinrichtungen und die nachfolgende Ansteuerung der Stellelemente steht neben Analogreglern ein digitales programmierbares Signalprozessormodul (DSP) als PC-Einsteckkarte zur Verfügung. Dieses Modul kann flexibel an die Regelaufgaben angepaßt werden. Ein PC bildet sowohl während der Programmierung als auch im Regelbetrieb die Schnittstelle zum Bediener, **Bild 5-12**.

Kern der Karte ist ein Signalprozessor TMS 320 C31 von Texas Instruments [122] auf einer PC-Einsteckkarte PC/C31 [123]. Diese Einsteckkarte ist einerseits über den PCI-Bus mit dem Rechner, andererseits mit zwei weiteren Einsteckkarten (Daughter-Modules) zur Dateneingabe und -ausgabe verknüpft. Über ein Interface (AMELIA) ist eine 2-Kanal I/O-Karte mit 16 Bit Auflösung (AM/D 16 SA) angeschlossen.

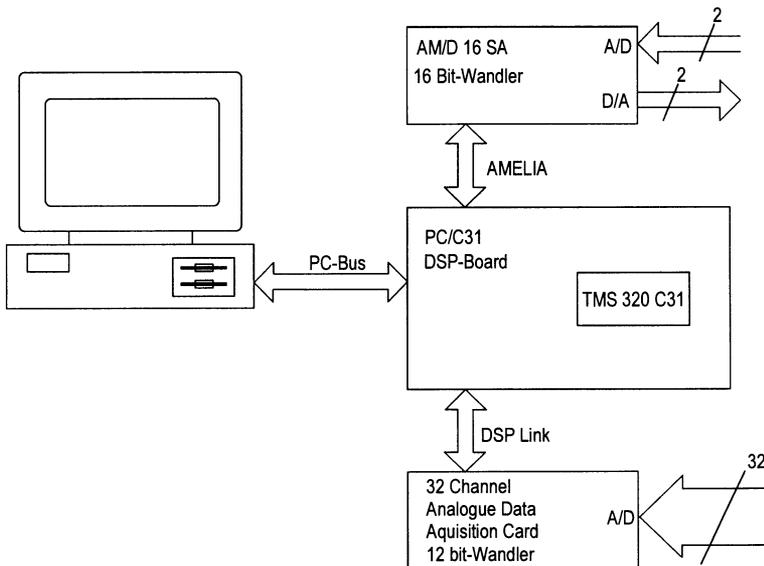


Bild 5-12: Computersystem für Dateneingabe, -ausgabe und Regelung

Die Eingangskanäle, die mit einer maximalen Abtastrate von 200 kHz arbeiten, nehmen die Signale der Meßsysteme für Leistung und Wellenfrontradius auf. Gleichzeitig lassen sich über die Ausgangskanäle zwei Stellelemente (hier: Adaptive Optiken) ansteuern. Zusätzlich ist eine 32 Kanal-Karte (Analogue Data Acquisition Card) für die Meßwerterfassung mit 12 Bit Auflösung über einen parallelen Bus (DSP Link) angeschlossen. Diese Karte ermöglicht, Daten von bis zu 32 Kanälen gleichzeitig einzulesen [124] und wird für das Radius-Meßsystem verwendet.

Durch die Verwendung des AMELIA-Interface bzw. des DSP Link als Schnittstelle zur Signalprozessor-Karte umgehen beide Karten den vergleichsweise langsamen PCI-Bus des Rechners. Insgesamt stehen 34 Input- und 2 Output-Kanäle für die Meßdatenerfassung und Ansteuerung der Stellelemente zur Verfügung. Für die spätere Regelung erforderliche Algorithmen können flexibel und schnell programmiert und implementiert werden.

6 Störgrößenidentifikation

Für die Regelung der Laserparameter ist eine exakte Analyse der Stärke und der Frequenz aller Störgrößen unerlässlich, da diese maßgeblichen Einfluß auf die Auslegung des Regelkreises nehmen. In einem ersten Schritt werden die Störungen der Laserstrahlleistung an der gegebenen Laseranlage untersucht. Die Unterteilung erfolgt nach Zeit- bzw. Frequenzverhalten.

Die weiteren Messungen und Berechnungen behandeln quantitativ die Auswirkungen dieser Störgrößen auf die Strahlkaustik. Es muß sichergestellt sein, daß alle wesentlichen Störgrößen erfaßt und ihre Charakteristika im Rahmen des Regelungskonzeptes berücksichtigt werden.

Abschließend wird die Verkopplung der Störeinflüsse überprüft. Eine minimale Verkopplung ist zwingende Voraussetzung für die Aufspaltung des Regelsystems in Einzelregelkreise, die getrennt optimiert werden können.

**Störgrößen der
Laserstrahlleistung**

**Störgrößen der
Strahlkaustik**

**Verkopplung der
Störeinflüsse**

6.1 Störgrößen der Laserstrahlleistung

Die Laserstrahlleistung ist während des Prozeßablaufs sowohl anlagen- als auch prozeßbedingten Störungen unterworfen. Die Auswirkungen der verschiedenen Störgrößen werden mit unterschiedlichen Meßsystemen bis zu einer Frequenz von 100 kHz quantitativ erfaßt. Die Messung der Laserstrahlleistung erfolgt am rückwärtigen Auskoppelspiegel des Resonators mit Meßsystemen auf der Basis pyroelektrischer Detektoren oder Atomlagen-Thermosäulen (Abschnitt 5.2.1). Unabhängig von ihrer Ursache erfolgt die Einteilung der Störgrößen im folgenden nach abnehmender Dynamik.

6.1.1 Optische Rückkopplung

Während des Bearbeitungsprozesses treten optische Rückkopplungen auf, wenn Laserstrahlung vom Werkstück über die Strahlführung zurück in den Resonator reflektiert und verstärkt wird [23]. Daraus resultieren Leistungsspitzen, die mehr als eine Größenordnung über der Normalleistung des Lasers liegen. Die Bandbreite dieser Störungen umfaßt den Bereich bis 100 kHz. Modellierungsansätze für diese Rückwirkung finden sich bei [125, 126, 127].

Eine regelungstechnische Lösung zur Beseitigung der Leistungsüberhöhungen ist mit dem Pumpmechanismus der Strahlquelle als Stellglied nicht möglich. Effektiver und weit weniger aufwendig ist der Einsatz eines Faraday-Polarisators im Laserstrahlengang [128]. Diese sogenannten Rückreflex-Auskoppel-Module absorbieren selektiv die vom Werkstück reflektierte Laserstrahlung, verhindern die Rückstreuung und die damit verbundene Leistungsüberhöhung im Resonator [129].

6.1.2 Modulation durch Tastbetrieb

Im Tastbetrieb wird die mittlere Laserstrahlleistung bei einer festen Tastfrequenz durch das variable Tastverhältnis eingestellt. Das Tiefpaßverhalten des Lasers bewirkt mit zunehmender Tastfrequenz die Annäherung an eine mittlere Laserausgangsleistung. Dieser Mittelwert ist jedoch beträchtlichen Leistungsschwankungen mit der Tastfrequenz unterworfen. Dieser Effekt tritt umso deutlicher hervor, je niedriger die Tastfrequenz gewählt wird.

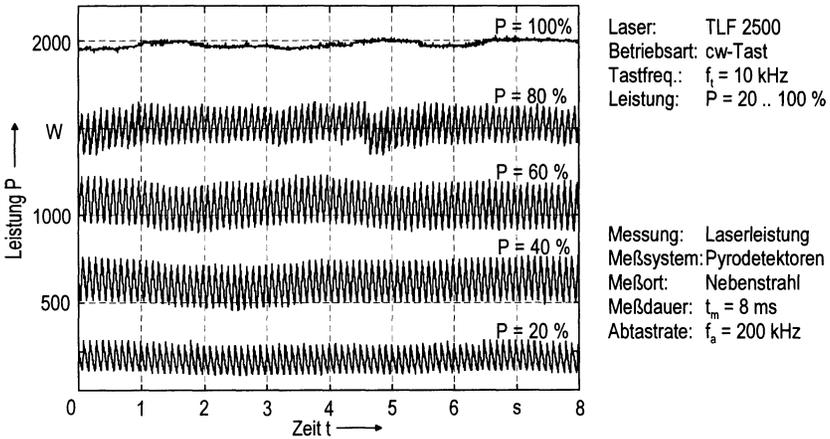


Bild 6-1: Leistungsfluktuation bei Betriebsart cw-Tast

Bild 6-1 zeigt eine Messung mit pyroelektrischen Detektoren bei verschiedenen Laserleistungsausgangsleistungen. Alle Messungen wurden im Tastbetrieb bei einer Tastfrequenz von 10 kHz vorgenommen. Die Meßzeit beträgt 8 ms bei einer Abtastrate von 200 kHz. Deutlich ist die Überlagerung der mittleren Laserstrahlleistung mit der Tastfrequenz zu sehen. Die Schwankungsbreite der Leistung beträgt dadurch bis zu 300 Watt. Lediglich bei einer Ausgangsleistung von 100 % werden keine Störungen beobachtet, da dies dem cw-Betrieb entspricht.

Trotz dieser beträchtlichen Fluktuationen sind bei Tastfrequenzen im Bereich ab 10 kHz die Auswirkungen auf das Bearbeitungsergebnis gering, da alle thermischen Bearbeitungsprozesse Tiefpaßcharakter besitzen [24]. Das eröffnet die Möglichkeit, im Rahmen einer Regelung die niederfrequenten Störungen auf eine hohe Trägerfrequenz zu modulieren und dadurch Störeinflüsse auf den Prozeß vollständig zu verhindern. Neuere Arbeiten beim Laserstrahlschweißen zeigen bei bestimmten Trägerfrequenzen eine deutliche Stabilisierung der Einschweißtiefe [130]. In der vorliegenden Arbeit werden Tastfrequenzen von 10 kHz oder höher gewählt, weil bei dieser Frequenz einerseits geringe Auswirkungen auf den Prozeßverlauf erwartet werden und andererseits ein akzeptabler Wirkungsgrad des Lasers, der mit zunehmender Tastfrequenz sinkt, gewährleistet ist.

6.1.3 Einflüsse der Energie- und Gasversorgung

Neben Fluktuationen bei der Tastfrequenz zeigen Aufnahmen der Laserstrahlleistung verschiedene niederfrequente Störungen. Ihre Überlagerung erschwert die Analyse im Zeitbereich, weshalb eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) in den Frequenzraum vorgenommen wird. Im Frequenzbereich über 1 kHz sind außer der Tastfrequenz keine ausgeprägten Spektrallinien zu beobachten. Dagegen weist der Frequenzbereich unter 1 kHz mehrere charakteristische Linien auf, **Bild 6-2**.

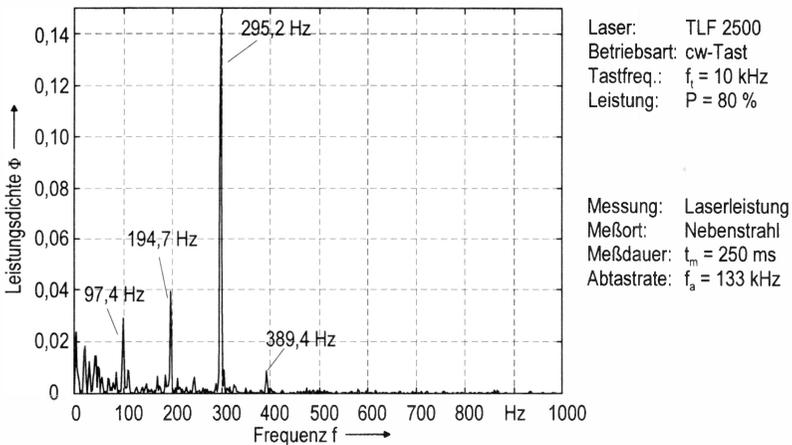


Bild 6-2: Störspektrum bei niedrigen Frequenzen

Unabhängig von der eingestellten Leistung treten deutliche Linien der Frequenzen 97,4 Hz, 194,7 Hz, 295,2 Hz und 389,4 Hz auf (Genauigkeit: $\pm 3,1$ Hz). Die dominierende Linie bei 295,2 Hz wird durch die Restwelligkeit der gleichgerichteten 3-Phasen-Wechselspannung verursacht und wurde bereits in früheren Arbeiten beobachtet. Eine Beeinflussung des Bearbeitungsergebnisses ist anhand einer, mit der 295,2-Hz-Störung korrelierten, periodischen Riefigkeit der Schnittfläche beim Laserstrahlbrennschneiden nachgewiesen [69].

Die Spektrallinien bei 97,4 Hz, bei 194,7 Hz und bei 389,4 Hz sind auf Druckstöße im Laser-gaskreislauf zurückzuführen, welche durch die Drehkolbenverdichter verursacht werden. Vergleichsmessungen an einem Laser des gleichen Herstellers (Trumpf: TLF 750 Turbo), der mit einem Turboradialgebläse ausgestattet ist, weisen diese Spektrallinien nicht auf.

6.1.4 Erwärmung der Resonatorgase

Mit zunehmender Einschaltdauer des Lasers nimmt die Laserstrahlleistung mit großer Zeitkonstante ab. Zur Bestimmung dieser thermischen Drift wurden bei 50 % bzw. 100 % Leistung eine Meßzeit von 150 Sekunden und eine Abtastrate von 50 Hz gewählt, **Bild 6-3**.

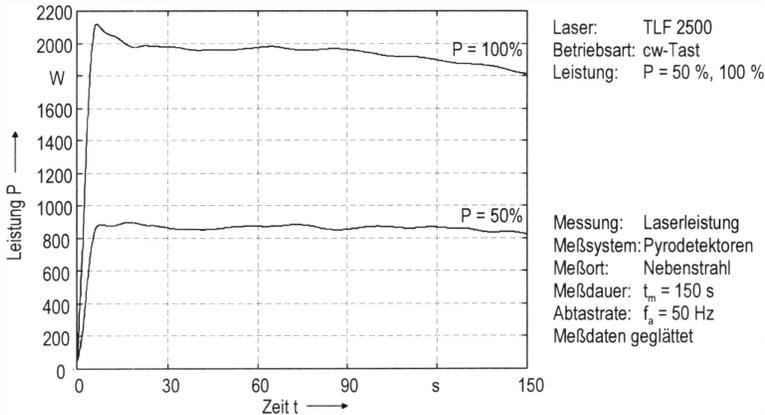


Bild 6-3: Drift der Laserausgangsleistung nach dem Einschaltzeitpunkt

Bei einem Sollwert von 100 % ist ein starker Abfall der Laserstrahlleistung innerhalb der ersten 10 Sekunden nach dem Einschaltzeitpunkt erkennbar. Im weiteren Verlauf nimmt die Laserstrahlleistung weiter ab und erreicht nach 150 s noch keinen stationären Zustand [115]. Dieser Effekt ist auch bei einem Sollwert von 50 %, jedoch weit weniger ausgeprägt, zu beobachten. Erst nach einer Einschaltdauer von ca. 300 s kann von einer konstanten Laserstrahlleistung im weiteren Verlauf des Bearbeitungsvorgangs ausgegangen werden.

Die Abnahme der Laserleistung ist auf die Erwärmung der Resonatorgase nach Zuschalten der HF-Anregung zurückzuführen. Die Kühlung erfolgt durch axialen Gasaustausch mit konstanter Geschwindigkeit. Mit zunehmender HF-Leistung resultiert ein thermisches Gleichgewicht bei einer höheren Lasergastemperatur [131], die zu einer stärkeren thermischen Besetzung des unteren Laserniveaus führt. Die Besetzungsinversion wird vermindert und die Verstärkung des Lasers reduziert [131]. Der beschriebene Effekt weist eine geringe Dynamik auf und kann selbst mit langsamen thermischen Sensoren erfaßt werden. In neueren Laseranlagen ist die Konstanz der Laserleistung bereits serienmäßig durch einen Regelkreis gewährleistet [132].

6.2 Störgrößen der Fokusparameter

Die Kaustik des fokussierten Laserstrahls mit den Parametern Fokusradius w_F und Bildweite z_F resultiert aus dem Tailenradius w_0 sowie der Objektweite z_0 des unfokussierten Rohstrahls (Abschnitt 2.1.1). Die nachfolgende Analyse untersucht quantitativ die Auswirkungen auf die Kaustik des fokussierten Laserstrahls, die durch Abweichungen der Rohstrahltaile w_0 oder der Objektweite z_0 von den Sollwerten verursacht werden.

Die experimentelle Bestimmung des Laserstrahlverlaufs erfolgt mit dem Hohladelmeßgerät (Prometec: Laserscope UFF 100). Entlang der Strahlachse werden die Rohstrahlradien bestimmt und die Parameter der Strahlkaustik mittels quadratischer Regression gewonnen (siehe Anhang). Diese Vorgehensweise eignet sich gut für vergleichende Messungen. Die Absolutwerte können jedoch mit einem systematischen Fehler behaftet sein, der im Auswertalgorithmus des Laserscope begründet ist.

6.2.1 Variable Strahlweglänge

Die Fokussieroptik im Bearbeitungskopf der Laseranlage L 5000 wird durch Teleskopachsen in y- bzw. z-Richtung im Arbeitsraum positioniert (Abschnitt 5.1.2). Dadurch ergeben sich Strahlweglängen vom Resonator bis zur Fokussieroptik zwischen 5 m und 7,75 m. Bei fester Lage der Taile zum Resonator z_T resultiert eine veränderliche Objektweite z_0 , die von der Position des Laserkopfes im Arbeitsraum abhängt. Entsprechend variieren die Parameter des fokussierten Laserstrahls Fokusradius w_F bzw. Bildweite z_F , **Bild 6-4**.

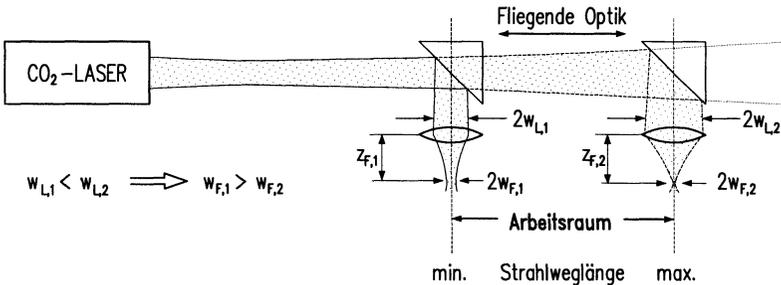


Bild 6-4: Arbeitsraum der fliegenden Optik

Im folgenden werden die Auswirkungen der variablen Strahlweglänge auf die Parameter Fokusradius w_F bzw. Bildweite z_F der Laseranlage L 5000 untersucht. Für diese Analyse werden Mittelwerte der Rohstrahlraten verwendet, die durch exemplarische Messungen verifiziert und im weiteren als ungestört angenommen werden, **Tabelle 6-1**.

Tailenradius:	$w_0 = 6 \text{ mm}$
Ort der Taille:	$z_T = 4 \text{ m}$
Strahlpropagationsfaktor:	$K = 0,5$

Tabelle 6-1: Rohstrahlkenngrößen der Laseranlage L 5000

Die Taille des Rohstrahls liegt vor dem Bearbeitungsraum. Beim Verfahren des Laserkopfes von der minimalen bis zur maximalen Strahlweglänge steigt der Laserstrahlradius am Ort der Fokussieroptik monoton an. Der Wellenfrontradius hingegen erreicht ein Minimum bei einer Strahlweglänge von 6,7 m. Die Werte für den Strahlradius w und den Wellenfrontradius R in der vorderen Brennebene der Fokussieroptik sind maßgebend für die Ausbildung der Fokusparameter (Abschnitt 2.1.1). **Bild 6-5** links zeigt diese Werte für den gesamten Arbeitsraum.

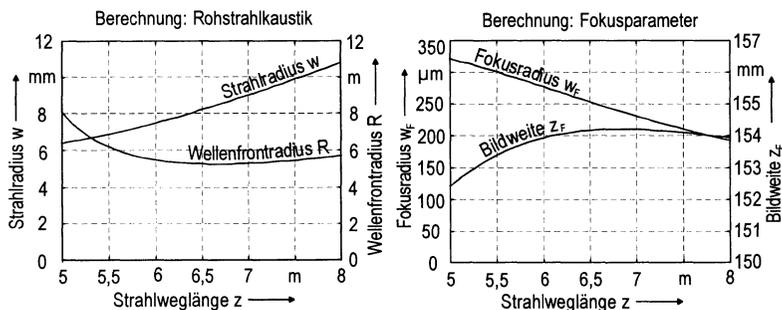


Bild 6-5: Mittelwerte der Roh- und Fokusstrahlparameter

Nach (Gl. 2-6) bestimmt der Strahlradius w in der vorderen Brennebene (z_0-f) den Fokusradius w_F und der Wellenfrontradius R in der vorderen Brennebene (z_0-f) nach (Gl. 2-7) die Bildweite z_F . Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in **Bild 6-5** rechts dargestellt. Evident ist die indirekte Proportionalität zwischen Rohstrahlradius und Fokusradius einerseits sowie Wellenfrontradius und Bildweite andererseits. Der Fokusradius fällt monoton von über 300 μm bis auf Werte unter 200 μm beim Durchfahren des Arbeitsraumes. Die Bildweite beträgt 152,5 mm am minimalen Strahlweg, erreicht ein Maximum bei einer Arbeitsraumposition von 6,7 m und beträgt ca. 154 mm am maximalen Strahlweg.

Entscheidend für die Materialbearbeitung sind jedoch nicht Fokusradius und Bildweite, sondern der Strahlradius des fokussierten Laserstrahls in der Werkstückebene (meist die Oberfläche des Werkstücks), da dieser die mittlere Leistungsdichte bestimmt. Maßgabe ist, durch die spätere Regelung nicht nur die Konstanz der Leistungsdichte zu gewährleisten, sondern bei fester Laserstrahlleistung eine maximale Leistungsdichte zu erzielen. Deshalb wird diejenige Ebene ausgewählt, an der sich der minimal mögliche Fokusradius erzielen läßt. An der vorliegenden Laseranlage beträgt dieser $190 \mu\text{m}$ bei einer Bildweite von 154 mm bei maximaler Strahlweglänge. In dieser Werkstückebene nimmt der Strahlradius beim Durchfahren des Arbeitsraumes von der maximalen zur minimalen Strahlweglänge um ca. $150 \mu\text{m}$ zu. Dadurch fällt die Leistungsdichte auf 35 % des Anfangswertes, **Bild 6-6**.

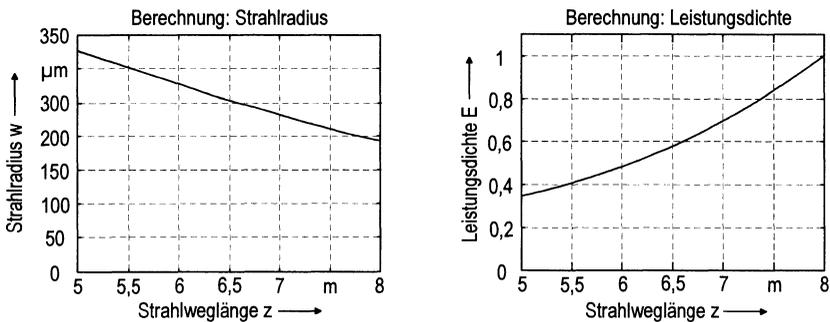


Bild 6-6: Strahlradius und Leistungsdichte in der Werkstückebene ($z_F = 154 \text{ mm}$) bei variabler Strahlweglänge

Die aufgezeigten Änderungen der Fokusparameter sind deterministischen Ursprungs und können bei Kenntnis der Strahlweglänge berechnet werden. Ein Strahlweglängenausgleich wird erzielt, indem die Adaptiven Optiken in Abhängigkeit von der Stellung der Teleskopachsen angesteuert werden [66]. Die korrekte Funktion dieser Steuerung setzt jedoch konstante Rohstrahlparameter voraus. Im folgenden wird gezeigt, daß diese Bedingung im allgemeinen nicht erfüllt ist.

6.2.2 Statistische Schwankungsbreite

In einem Zeitraum von fünf Jahren zwischen der Inbetriebnahme der Laseranlage L 5000 und den vorliegenden Untersuchungen wurden mehrfach die Rohstrahl- und Fokusparameter im Rahmen verschiedener Arbeiten erfaßt. Im weiteren werden Ergebnisse von Untersuchungen verglichen, die alle mit dem Laserstrahl diagnosesystem Laserscope UFF 100 bei 100 % Laser-

strahlleistung aufgenommen wurden. Die Berechnung der Strahlpropagation erfolgte in allen Fällen über die quadratische Regression der Meßwerte, wodurch die Vergleichbarkeit der Messungen gewährleistet ist. Alle Messungen bestätigen eine Leistungsdichteverteilung TEM_{01*}. Von Untersuchung zu Untersuchung wurden jedoch erhebliche Schwankungen bei der Bestimmung von Tailenradius w₀ und Objektweite z₀, bzw. Fokusradius w_F und Bildweite z_F sowie des berechneten Strahlpropagationsfaktors K festgestellt, **Bild 6-7**.

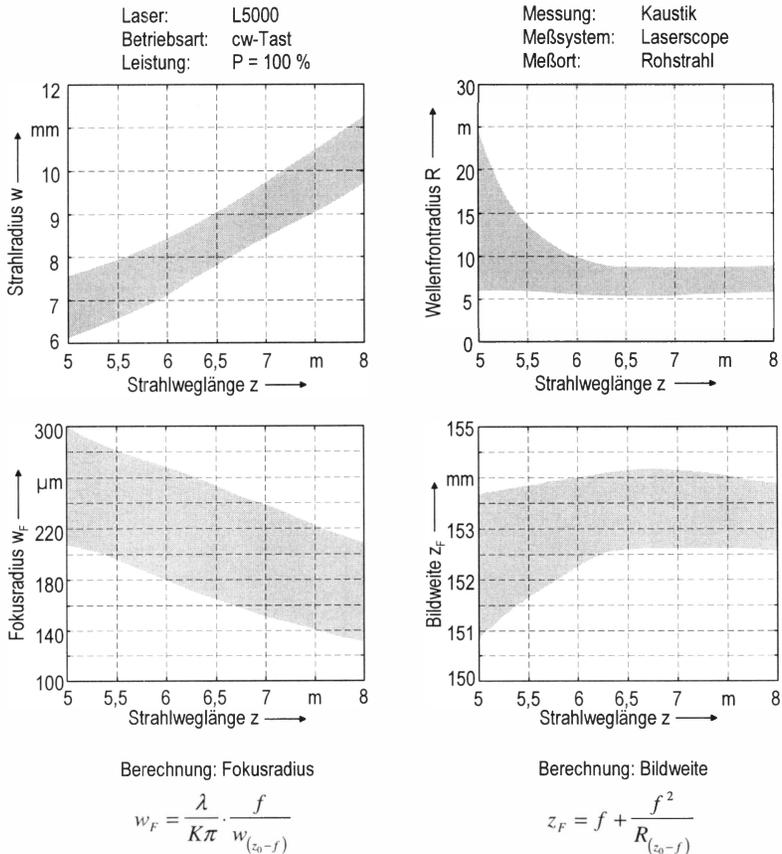


Bild 6-7: Schwankungsbreite der Rohstrahl- und Fokusparameter

Im **Bild 6-7** sind die Schwankungsbreiten der Ergebnisse als grau hinterlegte Bereiche zusammengefaßt. Sie dokumentieren die Auswirkung aller Störgrößen, die während des Betriebes der Laseranlage im Laufe mehrerer Jahre auftreten können. Dazu zählen systematische Alterungseffekte optischer Komponenten ebenso wie die stochastisch unterschiedliche Justage von Strahlführungseinheiten.

Bild 6-7 zeigt deutlich, daß die Schwankungsbreite des Rohstrahlradius im gesamten Arbeitsraum bei ca. 1,5 mm liegt (oben links), während der Wellenfrontradius extreme Schwankungen am minimalen Strahlweg ($z = 5\text{ m}$) aufweist (oben rechts). Die Berechnung der Fokusparameter ergibt folgerichtig einen Fokusradius, der unabhängig von der Arbeitsraumposition um ca. $\pm 50\text{ }\mu\text{m}$ variieren kann (unten links), während die Bildweite vor allem am minimalen Strahlweg eine extrem ausgeprägte Schwankungsbreite von ca. $\pm 1,5\text{ mm}$ aufweist (unten rechts).

Analog zu Abschnitt 6.2.1 werden für die Werkstückebene ($z_F = 154\text{ mm}$) Strahlradius und mittlere Leistungsdichte bestimmt. Zusätzlich zum beschriebenen Einfluß der Strahlweglänge weisen die Fokusparameter abhängig von der Strahlweglänge eine zusätzliche Schwankungsbreite auf, **Bild 6-8**. Demnach muß selbst bei einem idealen Strahlweglängenausgleich noch mit einer Schwankungsbreite des Strahlradius in der Werkstückebene von $\pm 50\text{ }\mu\text{m}$ gerechnet werden. Je nach Position des Laserkopfes ergeben sich daraus Schwankungsbreiten der mittleren Leistungsdichte von bis zu $\pm 20\text{ }\%$.

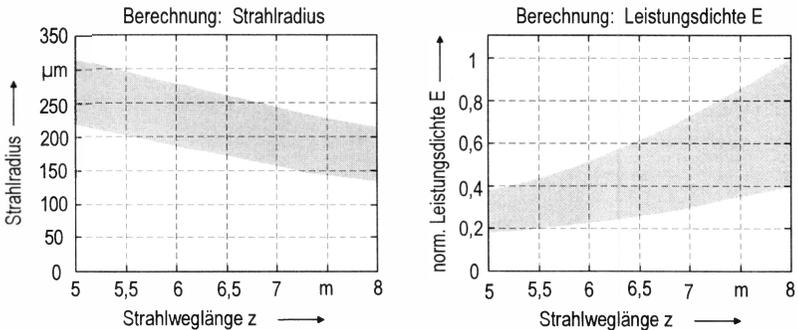


Bild 6-8: Schwankungsbreite von Strahlradius und Leistungsdichte in der Werkstückebene ($z_F = 154\text{ mm}$)

Ohne die unterschiedlichen Ursachen für die festgestellte Schwankungsbreite der Laserparameter, wie Alterungseffekte optischer Komponenten oder Justagearbeiten am Strahlweg exakt zu kennen, ist offensichtlich, daß die Strahlparameter einer Laseranlage nicht als konstant während der gesamten Laufzeit angenommen werden dürfen. Daraus kann auch geschlossen werden, daß Laseranlagen identischer Bauart nicht exakt gleiche Strahlparameter aufweisen, was eine wichtige Voraussetzung für die Übertragbarkeit von Prozeßparametern darstellt.

6.2.3 Thermische Linseneffekte

Das Auskoppelfenster des Resonators ist die, durch die Laserstrahlung am höchsten belastete optische Komponente im Strahlengang der Anlage. Selbst eine sehr geringe Restabsorption verursacht einen Temperaturanstieg des Fensters, führt zu einer Änderung der Brennweite und in Folge zu einer Beeinflussung der Strahlkaustik. Der Grad der Störung durch diese thermischen Linseneffekte hängt von der transmittierten Laserstrahlleistung, der Einschaltdauer des Lasers sowie dem Alter und dem Verschmutzungsgrad des Fensters ab.

Die folgenden Untersuchungen werden bei 100 % Laserstrahlleistung durchgeführt, um den maximalen Einfluß der Störgrößen zu erfassen. **Bild 6-9** zeigt den Vergleich zweier Resonatorfenster gleicher Spezifikation jedoch unterschiedlicher Einsatzdauer.

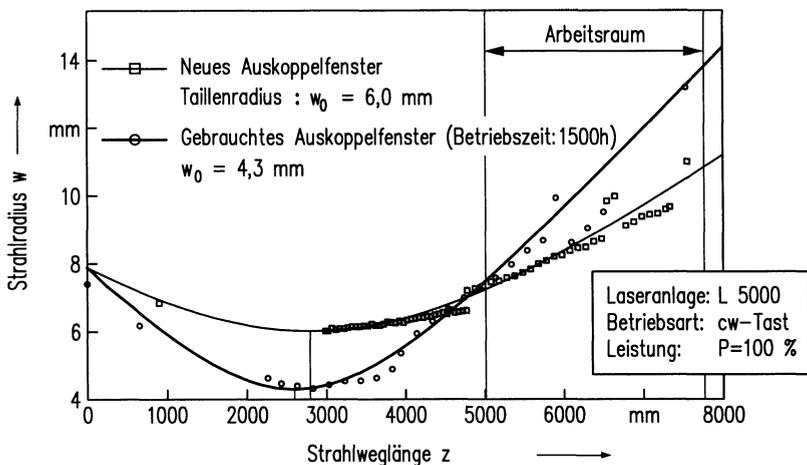


Bild 6-9: Rohstrahlkaustik bei unterschiedlichem Alter des Resonatorfensters [nach 115]

Die Messungen erfolgten jeweils im thermischen Gleichgewicht zwischen absorbierter und durch Wärmeleitung abgeführter Leistung nach einer Einschaltdauer von mehr als 60 s.

Der Vergleich der beiden Kaustiken ergibt bei konstantem Strahlpropagationsfaktor ($K = 0,5$), im Falle des gebrauchten Auskoppelfensters einen um 30% kleineren Taillenradius und eine Verschiebung der Taille um 200 mm zum Resonator. Dies entspricht dem Einbringen einer zusätzlichen Linse mit einer Brennweite von $f = 8,3$ m am Ort des Resonatorfensters. Beim Einsatz des gebrauchten Resonatorfensters ergeben sich im thermischen Gleichgewicht für alle Arbeitsraumpositionen größere Rohstrahlradien bzw. kleinere Fokusradien.

Selbst in diesem stationären Fall (thermisches Gleichgewicht) hängt die Ausbildung der Strahlkaustik in komplexer Weise von der eingestellten Laserstrahlleistung und dem Alter des Auskoppelfensters ab. Da eine Wartezeit bis zum Erreichen dieses Gleichgewichts (> 10 s) wirtschaftlich nicht vertretbar ist, muß als weitere Einflußgröße die Zeitdauer vom Einschaltzeitpunkt des Lasers in Betracht gezogen werden.

Bild 6-10 zeigt die Rohstrahlverläufe jeweils bei 100 % Laserstrahlleistung, jedoch nach unterschiedlicher Einschaltdauer des Lasers [115]. Der stationäre Zustand wird nach ca. 12 Sekunden erreicht. Im Verlauf dieses Zeitintervalls verringert sich der Radius der Taille von 6,4 mm bis auf 4,3 mm. Gleichzeitig wird die Taille um bis zu 200 mm zum Resonator verschoben. In Übereinstimmung mit der vorangegangenen Messung weist das vormals plane Auskoppelfenster im thermischen Gleichgewicht die Brennweite $f = 8,3$ m auf.

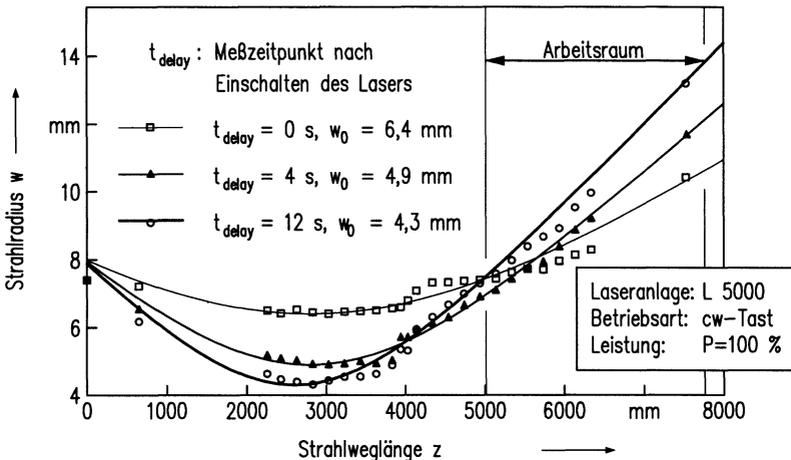


Bild 6-10: Rohstrahlkaustik nach unterschiedlicher Einschaltdauer des Lasers [nach 115]

In diesem Zeitintervall hängt der zeitliche Verlauf des Rohstrahlradius an einem beliebigen, während der Messung festgehaltenen Ort erheblich von der gewählten Arbeitsraumposition ab. Während bei maximaler Strahlweglänge eine stetige Vergrößerung des Rohstrahlradius auftritt, tritt an der minimalen Arbeitsraumposition zuerst eine Verringerung ein, bevor im thermischen Gleichgewicht ein Strahlradius erreicht wird, der ungefähr dem Startwert entspricht.

Für die mittlere Arbeitsraumposition $z = 6,5$ m werden die Fokusparameter im Zeitintervall vom Einschaltzeitpunkt des Lasers bis zum Erreichen des thermischen Gleichgewichts berechnet, **Bild 6-11**.

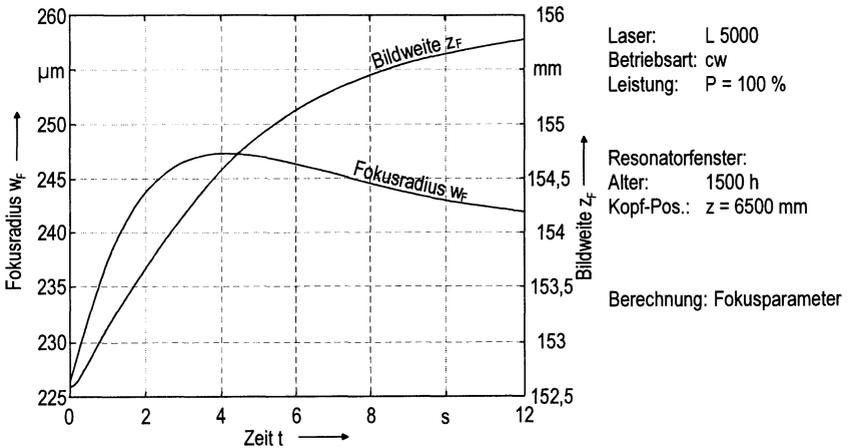


Bild 6-11: Bildweite und Fokusradius nach dem Einschaltzeitpunkt

Einem Anstieg des Fokusradius innerhalb der ersten drei Sekunden nach dem Einschaltzeitpunkt von $225 \mu\text{m}$ auf $245 \mu\text{m}$ folgt eine leichte Abnahme, und asymptotisch wird ein Wert von ca. $240 \mu\text{m}$ erreicht. Gleichzeitig nimmt die Bildweite, ausgehend von $152,5$ mm, zunächst zu, um schließlich einen Wert von ca. 156 mm zu erreichen.

Aus diesen Fokusparametern werden die, für die Materialbearbeitung maßgeblichen Größen, Strahlradius w und Strahldichte E des fokussierten Laserstrahls in der Werkstückebene ($z_F = 154 \text{ mm}$) berechnet, **Bild 6-12**. Die parallele Zunahme von Fokusradius und Bildweite verursacht eine Vergrößerung des Strahlradius in der Werkstückebene von $225 \mu\text{m}$ auf ca. $285 \mu\text{m}$. Dadurch nimmt die normierte Leistungsdichte vom Einschaltzeitpunkt des Lasers bis zum Erreichen des thermischen Gleichgewichts auf ca. 65 % des Startwertes ab.

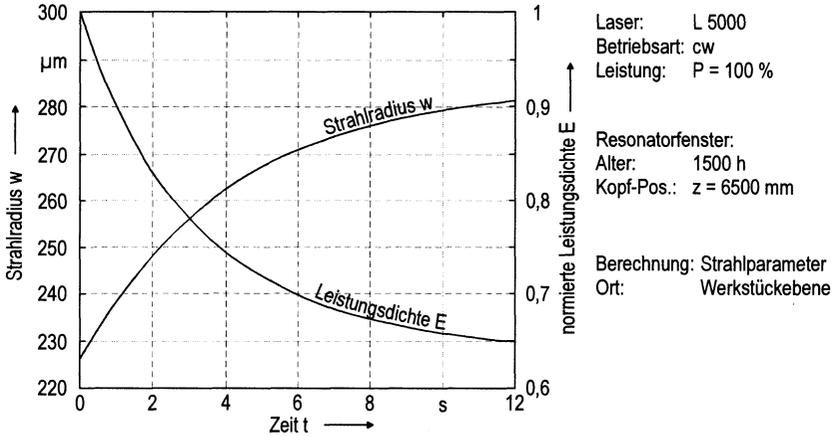


Bild 6-12: Strahlradius und Leistungsdichte in der Bezugsebene nach dem Einschaltzeitpunkt

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß bei der gegebenen Laseranlage die Störgrößen durch thermische Linseneffekte zu einer beachtlichen und für viele Bearbeitungsprozesse untolerierbaren Beeinflussung der Strahldichte in der Werkstückebene führen. Die Abhängigkeit der Störgrößen vom Alter des Auskoppelfensters, der eingestellten Laserstrahlleistung und dem Zeitintervall nach dem Einschaltzeitpunkt des Lasers erschweren eine analytische Beschreibung der thermischen Linseneffekte.

6.3 Verkopplung der Laserparameter

Die gleichzeitige Regelung der Laserstrahlleistung und der Strahlkaustik erfordert eine Mehrgrößenregelung (Abschnitt 2.4.3). Für die angestrebte Aufteilung in Einzelregelkreise muß überprüft werden, ob die Steuerung einer Regelgröße unerwünschte Einflüsse auf die jeweils andere Regelgröße hat. Im folgenden werden beide Richtungen der Verkopplung untersucht.

6.3.1 Einfluß der Strahlkaustik auf die Laserstrahlleistung

Die Ausgangsleistung des Resonators ist im allgemeinen unabhängig von der weiteren Laserstrahlführung. Ausnahmen bilden optische Rückkopplungen vom Bearbeitungsprozeß (Abschnitt 6.1.1), die konstruktiv unterdrückt und im weiteren nicht berücksichtigt werden.

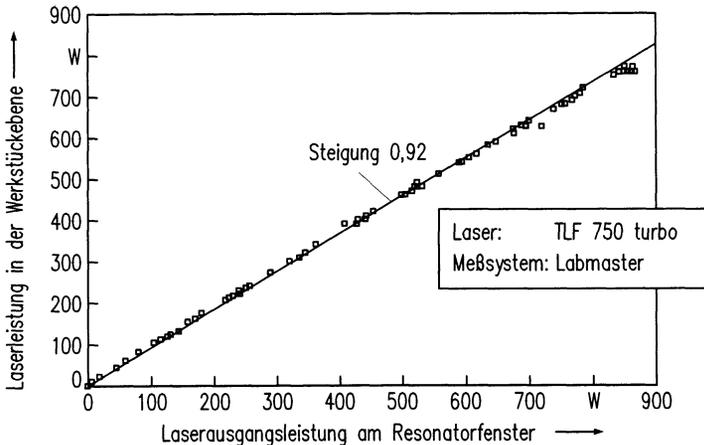


Bild 6-13: Absorptionsverluste zwischen Resonator und Werkstück

In der Betriebsart cw-Tast werden verschiedenste Tastverhältnisse und -frequenzen eingestellt und sowohl die Laserleistungsleistung direkt am Resonator als auch die Laserstrahlleistung in der Werkstückebene gemessen, **Bild 6-13**. Die Laserstrahlleistung in der Werkstückebene ist, unabhängig von der Betriebsart des Lasers direkt proportional zur Ausgangsleistung des Resonators. Der Verlustanteil, der sich aus der Steigung der Regressionsgeraden bestimmen läßt, wird durch die Restabsorption an insgesamt fünf optischen Komponenten verursacht.

Abweichend von diesem idealen Verhalten führen jedoch speziell an der verwendeten Laseranlage L 5000 Rohstrahlradien größer als 12 mm zu einer Abschattung des Laserstrahls an Blenden des Strahlführungssystems. Diese anlagenspezifische Beschränkung hat keine Auswirkungen auf das allgemeine Konzept des Regelsystems, muß aber bei der Implementierung an der vorliegenden Laseranlage berücksichtigt werden.

6.3.2 Einfluß der Laserstrahlleistung auf die Strahlkaustik

Bei gleichstromangeregten Resonatoren (Abschnitt 2.1.2) hat die Laserstrahlleistung durchaus Einfluß auf die Strahlparameter Radius, Leistungsdichteverteilung und Strahlpropagationsfaktor. Bei HF-angeregten Lasern ist dieser Einfluß wesentlich geringer. Um dies bei der vorliegenden Laseranlage zu überprüfen, wird der Rohstrahl bei unterschiedlichen Betriebsarten, Tastfrequenzen und Laserausgangsleistungen vermessen, **Bild 6-14**.

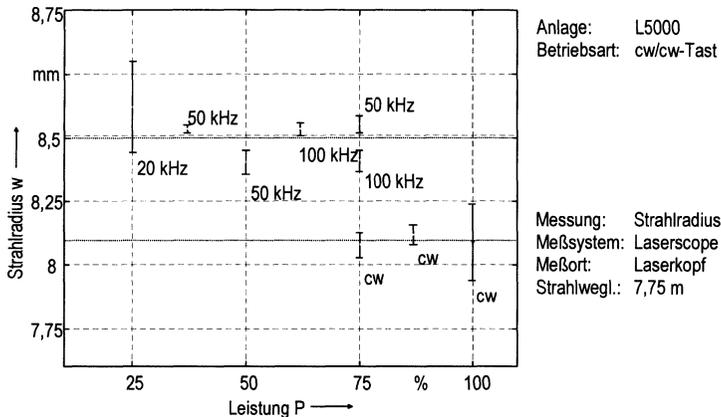


Bild 6-14: Einfluß der Laserstrahlleistung auf den Strahlradius

Alle Messungen erfolgten am maximalen Strahlweg ($z = 7,75$ m), da hier eventuelle Störeffekte am deutlichsten zutage treten. Es wird jedoch lediglich beim Wechsel der Betriebsart zwischen cw und cw-Tast eine Vergrößerung des Rohstrahlradius von ca. 0,4 mm, unabhängig von der eingestellten Tastfrequenz, beobachtet.

Dieser Einfluß ist von geringer Bedeutung, da die spätere Regelung keinen Wechsel der Betriebsarten vorsieht. Der Betriebspunkt des Reglers wird zudem unter 100 % Laserstrahlleistung liegen, um ausreichende Reserven zur Ausregelung von Störungen zur Verfügung zu stellen. Dadurch kann auch die leichte Verringerung des Fokusradius bei Annäherung der Laserstrahlleistung an den Vollastbetrieb vernachlässigt werden.

Die vorangegangenen Versuche wurden mit einem neuen Resonatorfenster durchgeführt. Bei Verwendung eines alten Fensters sind aufgrund thermischer Linseneffekte größere Auswirkungen der Laserausgangsleistung auf die Ausbildung der Strahlkaustik zu erwarten (Abschnitt 6.2.3). Eine Verkopplung zwischen Laserstrahlleistung und Strahlkaustik folgt daraus jedoch nicht. Im Arbeitspunkt der Leistungsregelung befindet sich die thermische Linse im Gleichgewicht und kann aufgrund ihrer geringen Dynamik (mehrere Sekunden) der Dynamik der schnellen Leistungsregelung (> 10 kHz) nicht folgen.

6.4 Diskussion der Störgrößenidentifikation

Die Störgrößenanalyse ergibt, daß sowohl die Laserstrahlleistung als auch Fokusradius und Bildweite erheblichen Schwankungen unterworfen sind. Resultat sind starke Abweichungen der Leistungsdichte in der Werkstückebene von den vorgegebenen Sollgrößen.

Die Messungen der Laserstrahlleistung offenbaren periodische Störungen, deren Schwerpunkt im spektralen Bereich unter 1 kHz liegt. Den Hauptanteil verursachen die Stromversorgung durch eine Restwelligkeit der gleichgerichteten 3-Phasen-Wechselspannung sowie Dichteschwankungen im Lasergas aufgrund der Verwendung von Drehkolbenverdichtern (Abschnitt 6.1.3). Diese Leistungsschwankungen müssen durch die Regelung auf jeden Fall beseitigt werden, da in diesem Frequenzbereich negative Auswirkungen auf den Prozeßverlauf und das Bearbeitungsergebnis nachgewiesen sind.

Höherfrequente periodische Fluktuationen der Laserstrahlleistung, wie sie z. B. durch den Tastbetrieb verursacht werden (Abschnitt 6.1.2), lassen aufgrund des Tiefpaßcharakters thermischer Bearbeitungsprozesse keine nachteiligen Auswirkungen auf das Bearbeitungsergebnis erwarten. Tast- oder Reglerfrequenzen über 10 kHz bieten einen guten Kompromiß um einerseits Störungen auszuschließen und andererseits einen hohen Wirkungsgrad des Lasers sicherzustellen.

Die Kaustik des fokussierten Laserstrahls unterliegt Störungen, die durch die variierende Objektweite aufgrund von fliegenden Optiken (Abschnitt 6.2.1) und durch Änderungen der Rohstrahlkaustik aufgrund thermischer Linseneffekte (Abschnitt 6.2.3) verursacht sind. Während die Auswirkungen einer fliegenden Optik bei konstanten Rohstrahlparametern durch eine Steuerung unterdrückt werden können, lassen sich thermische Linseneffekte mit ihrer komplexen Abhängigkeit von der Laserstrahlleistung, der Einschaltdauer des Lasers und dem Alter des Resonatorfensters nur mit einer Regelung vollständig beseitigen.

Die Verkopplung von Laserstrahlleistung und Strahlkaustik kann als minimal angesehen werden (Abschnitt 6.3). Das Regelsystem läßt sich deshalb vorteilhaft in zwei Regelkreise unterteilen, die jeweils entsprechend der Dynamik der Störgrößen getrennt optimiert werden. Ziel des Gesamtsystems ist es, bei der verwendeten Laseranlage eine konstant hohe Leistungsdichte unabhängig vom Bearbeitungsort sicherzustellen.

7 Regelung der Laserstrahlleistung

Nach der vorangegangenen Störgrößenanalyse sind Stärke, Zeitverhalten und Einwirkort aller wesentlichen Störgrößen bekannt. Nachfolgend müssen die Meßsysteme so in den Laserstrahlengang integriert werden, daß alle Effekte online erfaßt werden können, ohne die Kinematik der Laseranlage zu beeinträchtigen.

Anschließend wird anhand vergleichender Messungen die Betriebsart des Lasers ausgewählt, die einen weiten Stellbereich mit einer hohen Dynamik kombiniert.

Nach dem Schließen des Regelkreises erfolgen abschließende Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit und den Grenzen der Leistungsregelung. Die Meßergebnisse im geregelten Betrieb werden mit denen des unregulierten Betriebes verglichen.

**Integration der
Meßsysteme**

**Integration der
Stellelemente**

**Einsatzbereiche
und Grenzen**

7.1 Integration des Leistungsmeßsystems

Das Leistungsmeßsystem muß an einer Position im Laserstrahlengang integriert werden, welche einerseits den Nachweis aller Störeinflüsse erlaubt und andererseits Beeinträchtigungen des Hochleistungsstrahls ausschließt. Basierend auf den Ergebnissen der Störgrößenidentifikation erfolgt der Einbau direkt an der Laserstrahlquelle, da bei korrekter Auslegung der Strahlführung die Laserausgangsleistung in festem Verhältnis zur Laserstrahlleistung in der Werkstückebene steht (Abschnitt 6.3.1). Bereits in vorangegangenen Arbeiten wurden an diesem Einbautort pyroelektrische Detektoren erfolgreich für eine Leistungsregelung eingesetzt.

Am verwendeten Laser (Abschnitt 5.1.1) steht am rückwärtigen Resonatorfenster ein leistungsreduzierter Nebenstrahl (max. 27,5 W) für Diagnosezwecke zur Verfügung. Wiederum 10 % der Leistung dieses Nebenstrahls werden über einen weiteren Strahlteiler ausgekoppelt und mit einer Zinkselenidlinse auf das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Meßsystem für die Laserstrahlleistung (Abschnitt 5.2.1) abgebildet, **Bild 7-1**. Für die nachfolgende Leistungsregelung wird das Meßsystem so kalibriert, daß 100 % Laserstrahlleistung (2,2 kW) einem Meßsignal von 10 Volt entsprechen. Somit können als Führungsgrößen auch die Ausgangssignale der Laserleistungssteuerung (LLS) verwendet werden.

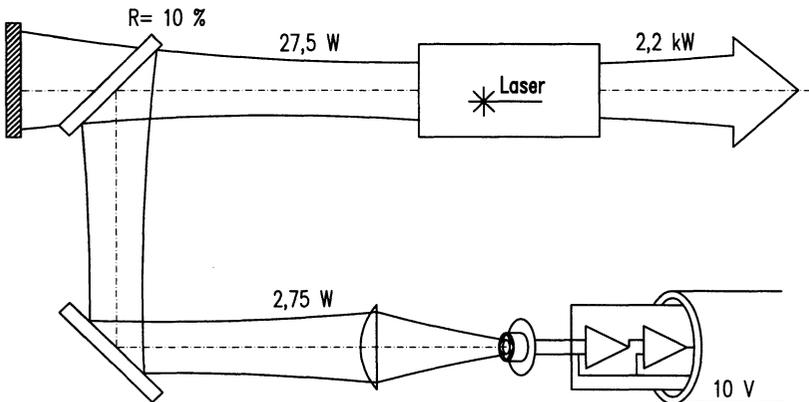


Bild 7-1: Meßsystem für die Laserstrahlleistung

7.2 Auswahl der Laserbetriebsart

Die Regelung der Laserstrahlleistung erfordert neben einem schnellen Meßsystem auch ein Stellelement kleiner Zeitkonstante. Die HF-Anregung ist grundsätzlich für die Leistungsregelung von CO₂-Hochleistungslasern geeignet und hat den Vorteil, daß sie, im Gegensatz zu dämpfenden Elementen im Strahlengang, den Wirkungsgrad des Lasers nicht verschlechtert. Die Ansteuerung der HF-Generatoren erfolgt entweder mit einem Steuersignal einstellbarer Amplitude oder durch ein Tastsignal mit variablem Tastverhältnis (Abschnitt 5.3.1).

Die nachfolgenden Messungen vergleichen die Sprungantworten der Laserausgangsleistung bei Verwendung der unterschiedlichen Ansteuerungsarten, **Bild 7-2**. Die Führungsgröße gibt einen Sprung der Laserstrahlleistung von $P_1 = 80\%$ auf $P_2 = 90\%$ der maximalen Ausgangsleistung (2,2 kW) vor. Aus dem Verlauf der Kurven werden die Zeitkonstanten für die jeweilige Betriebsart ermittelt.

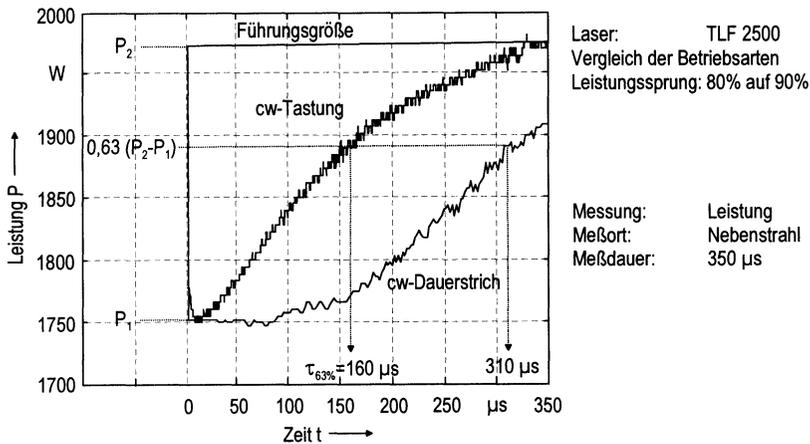


Bild 7-2: Zeitkonstanten der Sprungantworten in der Betriebsart cw bzw. cw-Tast

In der Betriebsart cw-Tast resultiert eine Zeitkonstante von $160\ \mu\text{s}$, während im cw-Betrieb eine wesentlich längere Zeitkonstante von $310\ \mu\text{s}$ festgestellt wird, die durch einen internen Regelkreis des HF-Generators bedingt ist [116]. Die Betriebsart cw-Tast besitzt als zusätzlichen Vorteil den größeren Regelbereich (Abschnitt 5.3.1) und wird deshalb im folgenden als Stellelement für die Laserstrahlleistung verwendet.

7.3 Schließen des Regelkreises

Die Beeinträchtigung des Prozeßverlaufs und der Bearbeitungsqualität durch niederfrequente Störeinflüsse erfordert die Minimierung von Leistungsschwankungen im Frequenzbereich bis mindestens 1 kHz (Abschnitt 6.4). Als zusätzliche Randbedingung wird die Kompatibilität mit der Laserleistungssteuerung (LLS) gefordert (Abschnitt 5.3.1). Dadurch können neben konstanten Führungsgrößen auch Funktionen in Abhängigkeit von der Prozeßzeit sowie der Verfahrstrecke und -geschwindigkeit vorgegeben werden.

Für die Regelung der Laserstrahlleistung wird ein Zweipunktregler ausgewählt, da dieser sich durch seine Robustheit und Störsicherheit für diese Aufgabe besonders eignet. Die Regelgüte genügt den Anforderungen, wenn die Schaltfrequenz über 10 kHz gewählt wird (Abschnitt 6.4), was aufgrund der geringen Totzeit der Strecke von maximal 10 µs leicht erreicht wird. Da der Zweipunktregler nur einen Reglerparameter aufweist, ist er zudem problemlos einzustellen.

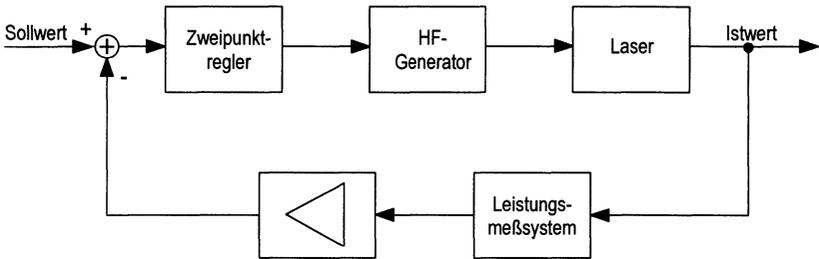


Bild 7-3: Schema des Leistungsregelkreises

Bild 7-3 zeigt das Schema des realisierten Regelkreises. Das Spannungssignal des Meßsystems wird mit einem invertierenden, kalibrierbaren Verstärker aufbereitet und einem analogen Zweipunktregler zugeführt. Je nach eingestellter Hysterese und Vorzeichen der Regelabweichung wird das Tastsignal ein- oder ausgeschaltet. Dieses Regler-Ausgangssignal wird über Optokoppler und Lichtwellenleiter an die HF-Generatoren übertragen.

7.4 Ergebnisse der Leistungsregelung

Nach der Implementierung des Meßsystems und des Stellelementes wird die Leistungsfähigkeit der Regelung durch Vergleichsmessungen gegenüber dem unregelmäßigen Betrieb beurteilt. Die Messungen erfolgen in den Frequenzbereichen, in denen die Störgrößenanalyse die intensivsten Störeinflüsse aufzeigte (Abschnitt 6.4).

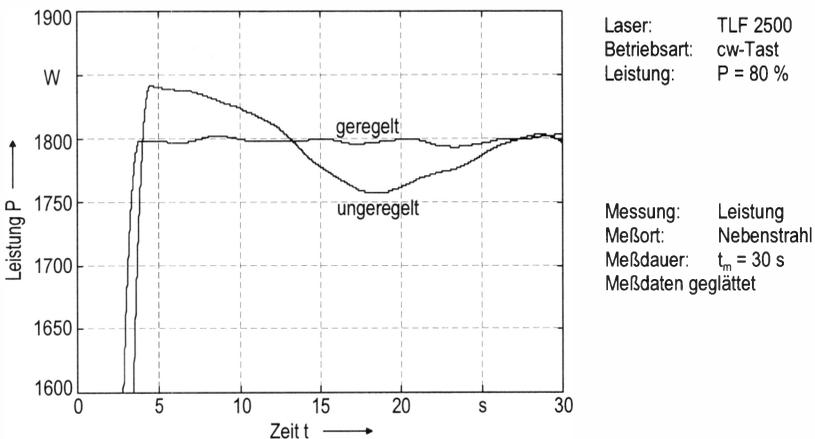


Bild 7-4: Thermische Drift der Laserstrahlleistung im geregelten und unregelmäßigen Betrieb

Bei einem Tastverhältnis von 80 % ist ein deutlicher Unterschied zwischen geregelterm und unregelmäßigem Betrieb während der ersten 30 s nach dem Einschaltzeitpunkt zu beobachten, **Bild 7-4**. Die zeitliche Stabilität der Laserstrahlleistung ist im geregelten Betrieb deutlich verbessert und das Absinken der Laserstrahlleistung um bis zu 20 % des Endwertes, wie es im unregelmäßigen Betrieb durch die Erwärmung der Resonatorgase beobachtet werden kann (Abschnitt 6.1.4), ist im geregelten Betrieb auf Schwankungen von wenigen Watt reduziert.

Auch im wichtigen Frequenzbereich um 1 kHz, in dem starke Leistungsschwankungen durch Restwelligkeiten der Stromversorgung und Gasdichtefluktuationen beobachtet wurden (Abschnitt 6.1.3), kann eine wesentliche Verbesserung erzielt werden.

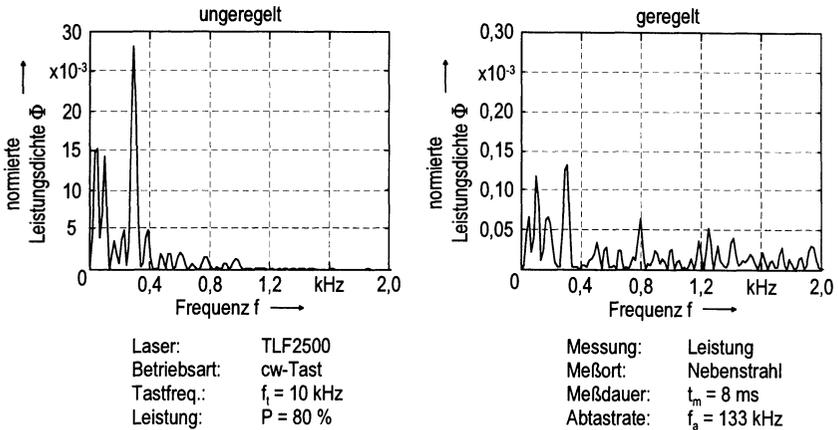


Bild 7-5: Vergleich der Leistungsspektren im unregulierten und geregelten Betrieb

Einen Vergleich der Störspektren im unregulierten und geregelten Betrieb zeigt **Bild 7-5**. Mit einer Abtastrate von 133 kHz wird der Frequenzbereich bis 2 kHz über eine Meßdauer von 8 ms aufgenommen. Deutlich ist in der Spektraldarstellung der normierten Leistungsdichte im unregulierten Fall die dominierende Spektrallinie bei 300 Hz zu sehen. Im geregelten Betrieb kann diese Störung um mehr als den Faktor 200 gedämpft werden (siehe Achsenskalierung).

Messungen bei höheren Frequenzbereichen ergeben, daß über 2 kHz auch bei hoher Auflösung nur noch die Tastfrequenz (10 kHz) im unregulierten bzw. die Schaltfrequenz des Zweipunktreglers (15 kHz) im geregelten Fall zu beobachten ist. Störungen des Bearbeitungsprozesses können in diesem Frequenzbereich weitgehend ausgeschlossen werden.

Um die Grenzen der Regelung zu ermitteln, werden Sprünge der Führungsgrößen auf den Regelkreis gegeben. Mit einer Amplitude von 800 W wird ein sehr hoher Wert gewählt, um eine sichere Abschätzung zu erhalten. Die Frequenz der Führungssprünge wird erhöht, bis die Ausgangsleistung des Lasers gerade noch den vorgegebenen Sollwerten folgt.

Die Grenzfrequenz des Regelkreises, bei welcher der vorgegebene Sollwert gerade noch erreicht wird, liegt bei 2 kHz, **Bild 7-6**. Bei einer weiteren Erhöhung der Frequenz stellt sich ein quasi-cw-Wert mit einer Schwankung um den Mittelwert der beiden Sollwerte ein, wie er auch im Tastbetrieb zu beobachten ist.

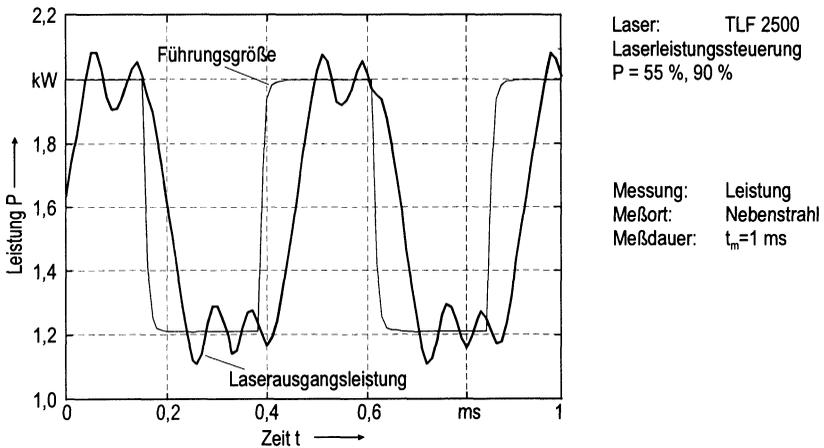


Bild 7-6: Grenzfrequenz des Führungsverhaltens

Aus **Bild 7-6** kann eine maximale Anstiegsgeschwindigkeit der Laserstrahlleistung von 9 kW/ms abgelesen werden. Bei entsprechend geringerer Amplitude der Führungsgröße können damit auch weitaus höhere Stellfrequenzen realisiert werden. Die nachgewiesene Dynamik eröffnet neue Möglichkeiten für die Steuerung und Regelung von Bearbeitungsprozessen.

8 Regelung der Strahlkaustik

Zur Auskopplung eines Teilstrahls für die Strahl diagnose wird ein modifizierter Laserkopf aufgebaut und in die Laseranlage integriert. Dieser Diagnosekopf nimmt bei unveränderter Führung des Hochleistungsstrahls die Meßsysteme für Laserstrahlleistung, Strahlradius und Wellenfrontradius auf.

Die Steuerung der Strahlkaustik erfolgt mit piezodynamischen Adaptiven Optiken. Nach der Bestimmung optimaler Einbauorte für eine minimale Verkopplung der Ansteuerung von Fokusradius und Bildweite werden die erforderlichen Stellbereiche zur zuverlässigen Beseitigung der detektierten Störungen ermittelt und das Zusammenwirken der Komponenten überprüft.

Das DSP-System tastet die Signale der Meßsysteme ab und generiert Steuersignale für die Adaptiven Optiken. Das Verhalten der Regelstrecken für Fokusradius und Bildweite wird überprüft, indem die Adaptiven Optiken mit periodischen Stellsignalen verschiedener Frequenzen angesteuert und die resultierenden Auswirkungen auf die Strahlkaustik aufgenommen werden.

**Integration der
Meßsysteme**

**Integration der
Stellelemente**

**Überprüfung der
Regelstrecken**

8.1 Integration der Meßsysteme

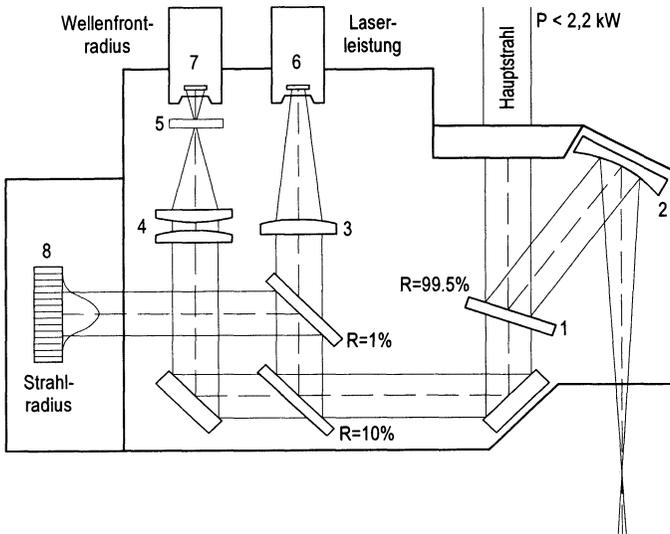
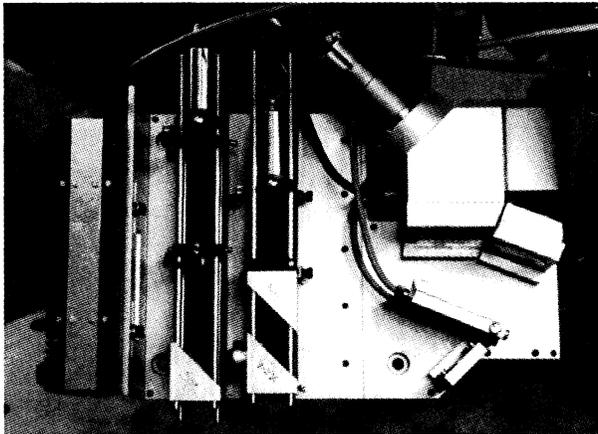
Die Einbauorte der Meßsysteme müssen einen Kompromiß zwischen regelungstechnischem Ideal und maschinenbaulicher Machbarkeit darstellen. Nur direkt im Fokus könnten ausnahmslos alle denkbaren Einflüsse erfaßt werden. Für eine Online-Diagnose scheidet dieser Einbauort jedoch aus, da sich bei der Materialbearbeitung das Werkstück an dieser Position befindet. Ergebnis der Störgrößidentifikation ist, daß die Fokusparameter Strahlradius und Bildweite und somit die Leistungsdichte am Bearbeitungsort erheblichen Schwankungen unterworfen sind (Abschnitt 6.4). Diese resultieren aus einer variablen Strahlweglänge (Abschnitt 6.2.1), einer statistischen Schwankungsbreite (Abschnitt 6.2.2) und thermischen Linseneffekten des Auskoppelfensters (Abschnitt 6.2.3). Die aufgeführten Störeinflüsse lassen sich ausnahmslos im unfokussierten Rohstrahl nahe der Fokussieroptik nachweisen.

Änderungen der Rohstrahlparameter Strahlradius und Wellenfrontradius können unter Verwendung des Gaußstrahl-Modells mit den Parametern des fokussierten Strahls Fokusradius und Bildweite in Beziehung gesetzt werden (Abschnitt 2.1.1). Die vordere Brennebene der Fokussieroptik zeichnet sich als idealer Meßort aus, weil hier der Rohstrahlradius zum Fokusradius (Gl. 2-6) und der Wellenfrontradius zur Bildweite (Gl. 2-7) leicht korreliert werden können. Ziel ist deshalb eine Integration der Meßsysteme für den Strahlradius (Abschnitt 5.2.2) und den Wellenfrontradius (Abschnitt 5.2.3) nahe der vorderen Brennebene.

Zeitabhängige Störeinflüsse der Fokussieroptik können mit dieser Anordnung nicht erfaßt werden. Während bei sorgfältiger Justage des Fokussierspiegels vorausgesetzt werden darf, daß diese über die gesamte Betriebsdauer stabil bleibt, treten mit zunehmender Betriebsdauer Verunreinigungen durch Prozeßemissionen auf. Diese können zu einer erhöhten Absorption der Laserstrahlung und einer Vergrößerung des Fokusradius führen (Abschnitt 2.1.3). Zur Überwachung der Fokussieroptik kann eine Temperaturmessung mit Thermoelementen eingesetzt werden, die erhöhte Absorption nachweist und bei Überschreiten eines kritischen Wertes dem Bediener die Notwendigkeit der Reinigung oder des Austauschs anzeigt.

8.1.1 Aufbau eines Diagnosekopfes

Für die Integration der Meßsysteme (Abschnitt 5.2) in die CO₂-Laseranlage (Abschnitt 5.1) wurde ein Diagnosekopf konstruiert, der anstelle des serienmäßigen Bearbeitungskopfes in den Laserstrahlengang integriert werden kann, **Bild 8-1**. Dieser Prototyp erfüllt bereits die Minimalanforderung, die Bewegungsfreiheit der Drehachsen nicht einzuschränken. Eine seriennahe Ausführung unter Verzicht auf die hier erreichbaren Kombinationsmöglichkeiten der Meßsysteme, kann wesentlich kompakter ausgeführt werden.



- | | | | |
|---|--|---|-------------------------------|
| 1 | Hochleistungs-Strahlteiler | 5 | Maske |
| 2 | Fokussierparaboloid ($f = 150 \text{ mm}$) | 6 | Meßsystem Laserstrahlleistung |
| 3 | Linse | 7 | Meßsystem Strahlradius |
| 4 | Astigmatische Linsenkombination | 8 | Meßsystem Wellenfrontradius |

Bild 8-1: Aufbau des Bearbeitungskopfes zur Auskopplung eines Diagnosestrahls

Ein Hochleistungs-Strahlteiler (1), der anstelle des letzten Standard-Umlenkspiegels eingesetzt wird, koppelt 80 mm vor der Fokussieroptik 0,5 % der Leistung aus dem Hochleistungsstrahl aus. Die Führung des Hochleistungsstrahls bleibt unverändert. Er wird mit dem serienmäßigen Fokussierparaboloid (2) der Schnittweite $f = 150$ mm fokussiert und steht für die Materialbearbeitung zur Verfügung. Die Führung des Diagnosestrahls erfolgt äußerst flexibel mit einem modularen, optischen System. Über Strahlteiler, Spiegel und Linsen wird der Diagnosestrahl auf die Meßsysteme für die Laserstrahlleistung (6), den Strahlradius (7) und den Wellenfrontradius (8) geführt.

Für eine zuverlässige Messung muß der ausgekoppelte Teilstrahl bezüglich der geometrischen Parameter exakt mit dem Hochleistungsstrahl übereinstimmen. Der Hochleistungsstrahlteiler wird durch überstreichendes Prozeßgas auf der strahlzugewandten Seite gekühlt und steht in gutem thermischen Kontakt zu einer wassergekühlten Aluminiumfassung. Der verbleibende thermische Linseneffekt dieses Strahlteilers wird durch einen Vergleich abgeschätzt. J. Hutfless [7] berechnet den bestrahlungsinduzierten thermischen Linseneffekt einer wassergekühlten Zinkselenid-Fokussierlinse durch eine Simulation mit der Finite-Elemente-Methode. Bei einer transmittierten Laserstrahlleistung von 1 kW (gegenüber 11 W in der vorliegenden Arbeit) und gleicher Kühlkonfiguration bildet sich eine thermische Linse der Brennweite 22 m aus. In der vorliegenden Arbeit ist die transmittierte Laserstrahlleistung um den Faktor 100 niedriger und somit die Ausbildung einer thermischen Linse im Meßstrahlengang durch die Erwärmung des Strahlteilers vernachlässigbar.

8.1.2 Meßanordnung für den Fokusradius

Die Online-Erfassung des Fokusradius soll durch die indirekte Messung des Strahlradius (Abschnitt 5.2.2) vor der Fokussieroptik erfolgen. Der Rohstrahlradius der Laseranlage L 5000 beträgt am Ort der Fokussieroptik zwischen 6 mm bei minimaler Strahlweglänge ($z = 5$ m) und 12 mm bei maximaler Strahlweglänge ($z = 7,75$ m). Daraus resultieren korrespondierende Fokusradien zwischen $250 \mu\text{m}$ ($z = 6,5$ m) und $150 \mu\text{m}$ ($z = 7,75$ m).

Je nach Anforderung an die Auflösung kann mit dem Meßsystem entweder der absolute Wert oder die relative Änderung des Rohstrahlradius gemessen werden. Bei einer Absolutmessung wird der gesamte Strahldurchmesser über eine Linse auf den Sensor abgebildet. Dieses Verfahren erfaßt gleichzeitig die Lage des Rohstrahls bezüglich der Detektorachse. Die Auflösung hängt von der Anzahl der Pixel des Zeilendetektors ab. Für die verwendeten 16 Elemente ergeben sich für den Laserstrahl der L 5000 nur 4 Quantisierungsstufen entsprechend $25 \mu\text{m}$ Fokusradiusänderung. Diese Auflösung ist für den vorliegenden Einsatzzweck nicht akzeptabel. Mit einer erfolversprechenden Anwendung ist dann zu rechnen, wenn Zeilendetektoren mit mindestens 32 Elementen zur Verfügung stehen.

Eine weitaus höhere Auflösung ergibt sich, wenn nur die Randbereiche des Rohstrahls beobachtet werden und dadurch nur relative Änderungen detektiert werden. Ohne abbildende Optik können mit diesem Verfahren Änderungen des Fokusradius von $6,5 \mu\text{m}$ erfaßt werden. Für sichere Aussagen müßten jedoch mehrere Zeilendetektoren um den Rohstrahl gruppiert werden, um Radiusänderungen von Strahl Lageänderungen zu unterscheiden. Als guter Kompromiß bei rotationssymmetrischen Strahlprofilen wird die Beobachtung des Strahlradius und die Spiegelung der Meßdaten an der Symmetrieachse angesehen. Die Auflösung verdoppelt sich gegenüber der Abbildung des gesamten Strahldurchmessers auf 8 Quantisierungsstufen. Als Vorteile gegenüber der Relativmessung können zusätzlich der Absolutwert des Strahlradius und die Leistungsdichteverteilung in einer Querschnittsebene berechnet werden, **Bild 8-2**.

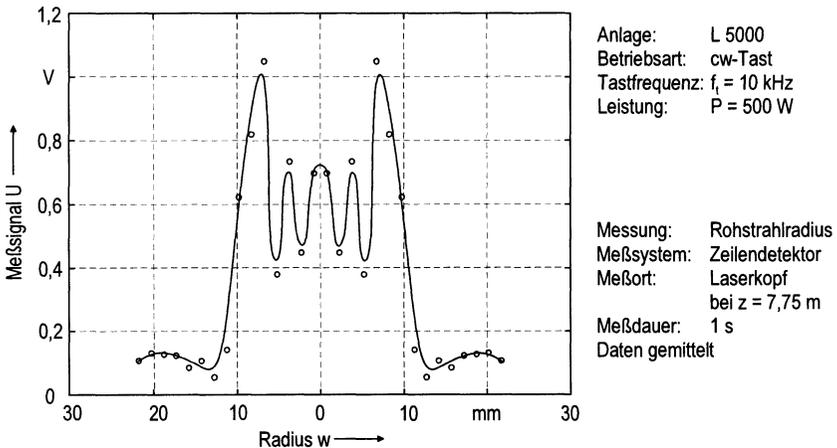


Bild 8-2: Erfassung des Strahlquerschnitts mit dem Radius-Meßsystem

Eine örtliche Auflösung der Messung mit Subpixelgenauigkeit wird durch die Anpassung einer Kurve an die Meßwerte erreicht. Neben Splines bietet sich für die Berechnung des Strahlradius z.B. das zweite Moment der Verteilungsfunktion an [133].

Die Grenzfrequenz der Einzelpixel des Zeilendetektors liegt bei 55 Hz. Mit dem DSP-System (Abschnitt 5.3.3) wird die gesamte Detektorzeile mit den 16 Elementen mit 4 kHz abgetastet. Diese Abtastrate ist völlig ausreichend für die Erfassung von Strahlradiusänderungen durch eine variable Strahlweglänge oder thermische Linseneffekte.

8.1.3 Meßanordnung für die Bildweite

Das Meßsystem für den Wellenfrontradius wird für die Online-Messung in den Diagnosekopf integriert. Die Anforderung, einerseits die Bildweite über den gesamten Verstellbereich zu erfassen und andererseits eine ausreichend hohe Auflösung zu erhalten wird durch die Kombination einer sphärischen Linse ($f = 100 \text{ mm}$) und einer Zylinderlinse ($f = 1,5 \text{ m}$) im Abstand von ca. 100 mm zur Blende erfüllt.

Die Kalibrierung der Meßsignale dieser Anordnung auf absolute Werte der Bildweite erfolgt durch eine Vergleichsmessung, **Bild 8-3**. Die Bildweite wird mit dem Hohladelmeßgerät Laserscope Offline im Fokus ermittelt. Die resultierende Kalibrierkurve weist einen Bereich von $154 \text{ mm} \pm 4 \text{ mm}$ auf, in dem das Ausgangssignal des Meßsystems der Bildweite in guter Näherung linear zugeordnet werden kann.

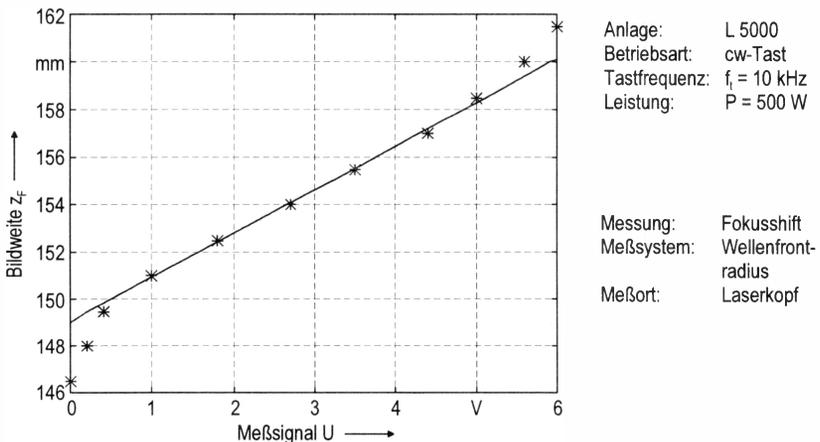


Bild 8-3: Kalibrierkurve für die Bildweite

Die Funktion der Meßanordnung für die Bildweite kann sehr anschaulich erklärt werden. Der Hochleistungsstrahl wird durch den Parabolspiegel, der Diagnosestrahl durch die astigmatische Linsenkombination fokussiert. Dadurch entsteht ein leistungsreduziertes, astigmatisches Bild des Fokus. Eine Änderung des Wellenfrontradius im unfokussierten Rohstrahl verschiebt sowohl den Fokus als auch das astigmatische Bild. Die Verschiebung des astigmatischen Bildes führt zu einer veränderten Transmission des Diagnosestrahls durch die Maske und wird vom Detektor nachgewiesen. Die Kalibrierung ermöglicht schließlich quantitative Rückschlüsse auf die Fokusverschiebung.

8.2 Integration der Adaptiven Optiken

Eine möglichst geringe Verkopplung ist die Voraussetzung für die getrennte Steuerung der Fokusparameter Strahlradius und Bildweite. Da die Transformation des Rohstrahls mit einer Adaptiven Optik im allgemeinen jeweils beide Fokusparameter beeinflusst, werden für die vorliegende Laseranlage Einbauorte minimaler Verkopplung ermittelt. Nachfolgender Ansatz zur entkoppelten Ansteuerung von Fokusradius und Bildweite durch zwei Adaptive Optiken stützt sich auf N. Neubauer [63].

8.2.1 Bestimmung optimaler Einbauorte

Als Faustregel gilt, daß die erste Adaptive Optik (AO 1) zur Steuerung des Fokusradius möglichst nahe am Resonator, die zweite Adaptive Optik (AO 2) zur Steuerung der Bildweite möglichst in der vorderen Brennebene der Fokussieroptik eingebaut werden sollte. Auf der Basis der gemessenen Rohstrahlausbreitung wird diese Empfehlung speziell für den Strahlverlauf der L 5000 überprüft. Die verwendeten Rohstrahlkenngrößen sind Mittelwerte mehrerer Messungen mit dem Hohladelmeßgerät Laserscope, **Tabelle 8-1**.

Tailenradius:	$w_0 = 6,2 \text{ mm}$
Ort der Taille:	$z_T = 3,5 \text{ m}$
Strahlpropagationsfaktor:	$K = 0,54$
Strahlweglänge:	$z = 6,5 \text{ m}$

Tabelle 8-1: Rohstrahlkenngrößen der L 5000

Der Laserkopf der L 5000 steht in der Mitte des Bearbeitungsraumes ($z = 6,5 \text{ m}$). Alle optischen Komponenten werden als ideal angenommen und speziell die Auswirkungen einer Adaptiven Optik in Abhängigkeit vom Einbauort und Hub des Piezoaktuators auf die Parameter des unfokussierten und fokussierten Laserstrahls untersucht.

Ausgehend von den gemessenen Rohstrahlparametern werden zunächst Strahlradius w und Wellenfrontradius R in der vorderen Brennebene (z_0-f) berechnet und für alle möglichen Einbauorte der Adaptiven Optik entlang der Strahlachse und für Hübe des Piezoaktuators von $2 \mu\text{m}$ bis $20 \mu\text{m}$ aufgetragen, **Bild 8-4 oben**.

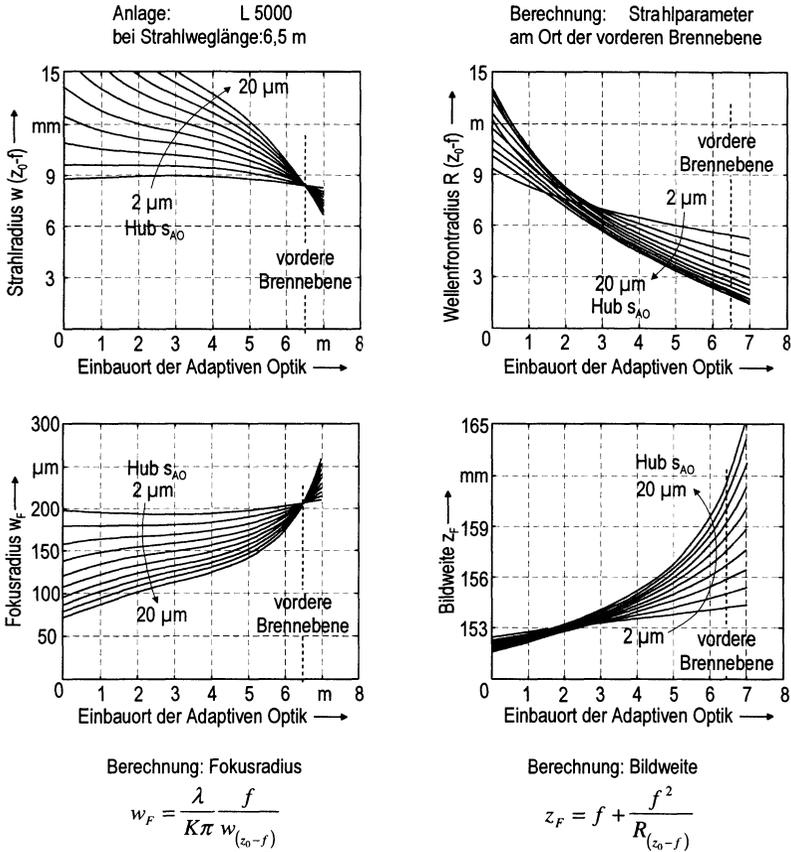


Bild 8-4: Strahlparameter in Abhängigkeit vom Einbauort der Adaptiven Optik im Rohstrahl

Mit diesen Werten des unfokussierten Laserstrahls erfolgt anschließend die Berechnung der Fokuserparameter Fokusradius w_F und Bildweite z_F , wobei der Fokusradius nach (Gl. 2-6) aus dem Strahlradius und die Bildweite nach (Gl. 2-7) aus dem Wellenfrontradius des Rohstrahls am Ort der vorderen Brennebene der Fokussieroptik hervorgehen, **Bild 8-4** unten.

Aus dem Verlauf der Graphen können die Einbauorte minimaler Verkopplung abgelesen werden. Die Adaptive Optik AO 2 zur Steuerung der Bildweite wird idealerweise in der vorderen Brennebene integriert. Mit zunehmendem Hub ($20\ \mu\text{m}$) kann sehr effektiv die Bildweite gesteuert werden während der Fokusradius unbeeinflusst bleibt.

Für die Adaptive Optik AO 1 existiert kein Einbauort, an dem der Fokusradius ohne jeglichen Einfluß auf die Bildweite eingestellt werden kann. Einbauorte nahe am Laser steuern zwar den Fokusradius mit dem Aktuatorhub sehr effektiv, beeinflussen aber gleichzeitig auch die Bildweite merklich. Ein minimaler Einfluß von AO 1 auf die Bildweite tritt bei der Strahlweglänge von ca. 2 m auf. An diesem Einbauort kann mit einem Hub von $2\ \mu\text{m}$ bis $20\ \mu\text{m}$ der Fokusradius im Bereich von $200\ \mu\text{m}$ bis $100\ \mu\text{m}$ gesteuert werden. Die Verkopplung verursacht lediglich eine Änderung der Bildweite von ca. 0,5 mm. Diese Ergebnisse sind qualitativ auch für alle anderen Positionen des Bearbeitungskopfes im Arbeitsraum gültig.

Realisierbare Einbauorte an der Laseranlage L 5000, die den berechneten am nächsten kommen, liegen für die Adaptive Optik AO 1 bei der Strahlweglänge 1,4 m (Z-Faltung), für AO 2 im Laserkopf (220 mm vor der Fokussieroptik), **Bild 8-5**.

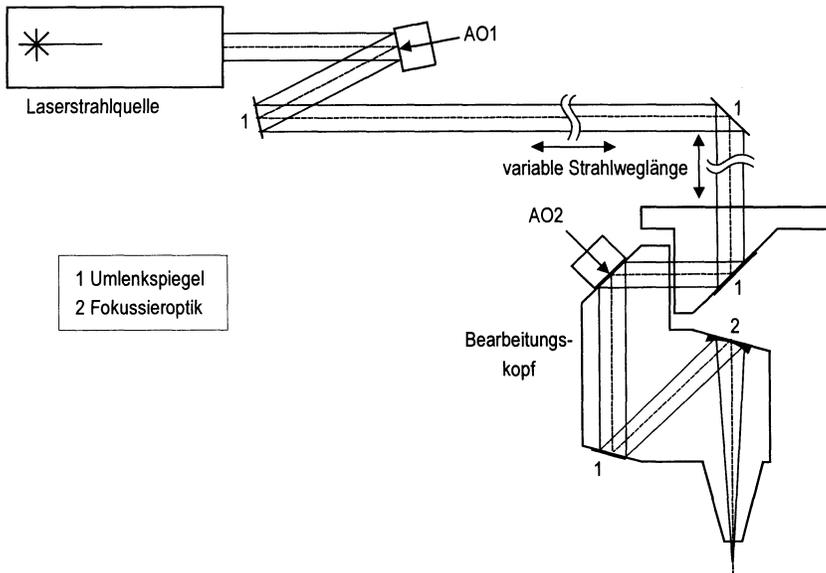


Bild 8-5: Einbauorte der Adaptiven Optiken für minimale Verkopplung

8.2.2 Erforderliche Stellbereiche

Nachdem die Einbauorte für die Adaptiven Optiken feststehen, wird im nächsten Schritt das Zusammenwirken der beiden Stellglieder überprüft und untersucht, ob die einzelnen Stellwege der Adaptiven Optiken ausreichen, um alle nachgewiesenen Störeinflüsse auf die Strahlkaustik (Abschnitt 6.2) zu kompensieren. Berechnungsgrundlage sind weiterhin die Mittelwerte von Messungen der Strahlkaustik mit dem Laserscope, **Tabelle 8-2**.

Tailenradius:	$w_0 = 6,2 \text{ mm}$
Ort der Taille:	$z_T = 3,5 \text{ m}$
Strahlpropagationsfaktor:	$K = 0,54$
Fokusradius:	$w_F = 160 \text{ } \mu\text{m}$
Bildweite:	$z = 155 \text{ mm}$

Tabelle 8-2: Rohstrahl- und Fokusparameter

Die Fokusparameter sind unter der Maßgabe gewählt, daß nicht nur ein konstanter, sondern der minimal erreichbare Fokusradius für alle Arbeitsraumpositionen sichergestellt werden soll. Dieser Arbeitspunkt ist exemplarisch ausgewählt, da bei vielen Bearbeitungsaufgaben die Forderung besteht, bei einer Laseranlage bestimmter Leistung eine maximale Leistungsdichte im Fokus zu erzielen.

Ausgehend vom Laser wird der vorgegebene Rohstrahl von AO 1 in der Z-Faltung ($z_{AO1} = 1,4 \text{ m}$) mit der variablen Brennweite f_{AO1} transformiert. Alle theoretisch erzeugbaren Kombinationen aus Tailenradius und -lage des transformierten Strahls beschreibt die Kurve mit Scheitelpunkt bei 1,4 m in **Bild 8-6**. Der durchgezogene Bereich der Kurve markiert den realisierbaren Stellbereich kommerzieller Adaptiver Optiken bei einem verfügbaren Aktuatorhub von $-20 \text{ } \mu\text{m}$ bis $+20 \text{ } \mu\text{m}$ und $0 \text{ } \mu\text{m}$ bis $+40 \text{ } \mu\text{m}$. Der jeweilige Hub der Adaptiven Optik ist als Parameter auf der Kurve markiert.

Nach der Transformation durch AO 1 trifft der Laserstrahl auf AO 2 und wird anschließend von der Fokussieroptik fester Brennweite in den Fokusstrahl mit den gewählten Parametern abgebildet. AO 2 ist nahe der vorderen Brennebene des Laserkopfes integriert und kann dadurch zwischen der minimalen ($z_{AO2} = 4,85 \text{ m}$) und der maximalen ($z_{AO2} = 7,6 \text{ m}$) Strahlweglänge positioniert werden. Die Kurve für AO 2 ist an den Extrempositionen des Arbeitsraumes, bei minimaler und maximaler Strahlweglänge, eingezeichnet. Der Stellbereich ist auf der Kurve markiert.

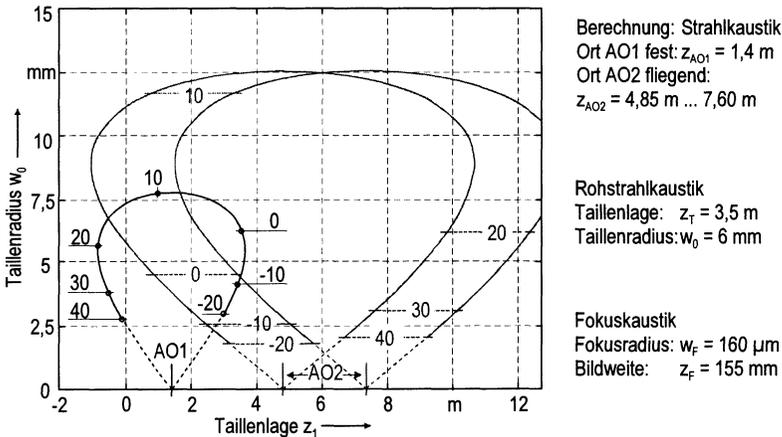


Bild 8-6: Stellbereiche der Adaptiven Optiken bei variabler Strahlweglänge

Die Schnittpunkte der Kurven in **Bild 8-6** zeigen, welche Hübe der Piezoaktuatoren bzw. Brennweiten der Adaptiven Optiken eingestellt werden müssen, um die Transformation des gegebenen Rohstrahls vom Laser in den gewählten Fokusstrahl zu erzielen. Während am kurzen Strahlweg ($z_{AO2} = 4,85 \text{ m}$) nur eine Lösung existiert, können am langen Strahlweg ($z_{AO2} = 7,6 \text{ m}$) zwei Schnittpunkte gefunden werden.

Die Lösung mit kleinem Tailleuradius (ca. 3,7 mm) muß als kritisch erachtet werden, weil sich sehr kleine Strahlradien zwischen den Adaptiven Optiken ausbilden, was zu hohen Leistungsdichten auf den optischen Komponenten zwischen AO 1 und AO 2 führen würde. Nur mit großem Tailleuradius (ca. 7 mm) läßt sich zudem über den gesamten Verfahrbereich von AO 2 für AO 1 eine geeignete Einstellung finden.

Die graphische Auswertung zeigt, daß Adaptive Optiken an den ausgewählten Einbauorten geeignet sind, den Einfluß der fliegenden Optik an der Laseranlage L 5000 zu kompensieren und die Einhaltung der ausgewählten Fokusparameter mit einem minimalen Fokusradius im gesamten Arbeitsraum sicherzustellen. Während AO 2 nur wenig gestellt werden muß, ist ein größerer Verstellbereich von AO 1 nötig (ca. $0 \mu\text{m}$ bis $+20 \mu\text{m}$). Über diesen Stellbereich von AO 1 wird die Tailleurlage um ca. 4 m verschoben, der Tailleuradius jedoch nur wenig geändert (ca. 1,5 mm).

Neben einer variablen Strahlweglänge wird an der Laseranlage ein beträchtlicher Einfluß durch thermische Linseneffekte beobachtet. Die Messungen (Abschnitt 6.2.3) ergeben folgende Mittelwerte und Schwankungsbreiten von Taillenradius und Taillenne, **Tabelle 8-3**.

Taillenradius:	$w_0 = 4,3 \text{ mm}$... 6,0 mm ... 7,3 mm
Ort der Taille:	$z_T = 2,6 \text{ m}$... 3,5 m ... 4,4 m
Strahlpropagationsfaktor:	$K = 0,48$... 0,54 ... 0,60
Fokusradius:	$w_F = 160 \mu\text{m}$
Bildweite:	$z_F = 155 \text{ mm}$

Tabelle 8-3: Schwankungsbreite der Rohstrahlparameter und gewählte Fokusparameter

Zentrale Fragestellung ist auch hier, welche Stellbereiche der Adaptiven Optiken benötigt werden, um die gewählten Fokusparameter bei vorliegender Schwankungsbreite von Taillenradius und Taillenne an allen Arbeitsraumpositionen zu garantieren. Die Aufgabenstellung läßt sich in zwei Teilbereiche untergliedern. Zunächst werden bei festem Radius Auswirkungen einer Verschiebung der Strahltaile untersucht, **Bild 8-7**. Analog erfolgt die Analyse der erforderlichen Stellbereiche bei festem Ort der Taille und variablem Radius.

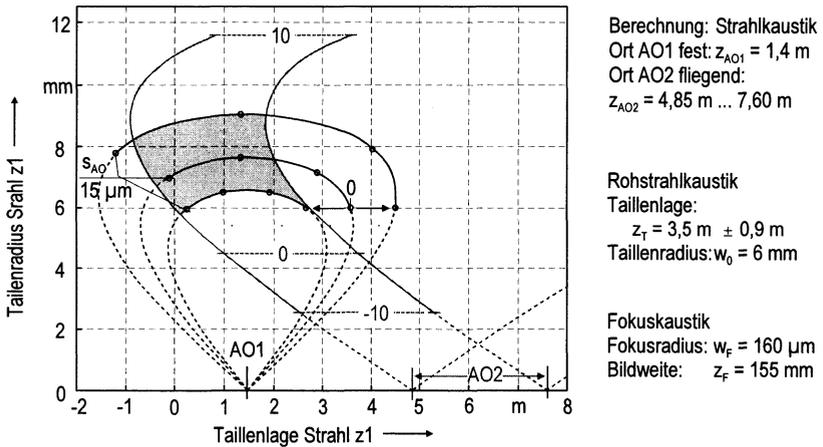


Bild 8-7: Erforderliche Stellbereiche bei Variation der Taillenne

Die Kurve von AO 2 ist an der minimalen ($z_{AO2} = 4,85 \text{ m}$) und der maximalen Strahlweglänge ($z_{AO2} = 7,6 \text{ m}$) des Arbeitsraumes aufgetragen, während AO 1 in der Z-Faltung arbeitet ($z_{AO1} = 1,4 \text{ m}$). Für AO 1 sind neben der Kurve für den Mittelwert der Taillenne (3,5 m) auch die Kurven für die Extremwerte von 2,6 m bzw. 4,4 m eingezeichnet (**Tabelle 8-3**).

Ergebnis ist, daß Stellbereiche der Adaptiven Optik in der Z-Faltung (AO 1) von ca. $0 \mu\text{m}$ bis $+15 \mu\text{m}$ und der Adaptiven Optik im Laserkopf (AO 2) von ca. $0 \mu\text{m}$ bis $+10 \mu\text{m}$ benötigt werden, um die beobachteten Abweichungen der Tailenlage für alle Arbeitsraumpositionen zu kompensieren. Die Stellbereiche der Adaptiven Optiken sind im **Bild 8-7** grau hinterlegt.

Analog werden die Auswirkungen eines variablen Tailenradius ermittelt. Neben dem Mittelwert ($w_0 = 6 \text{ mm}$) sind in **Bild 8-8** auch die Kurven für Minimal- ($4,3 \text{ mm}$) und Maximalwert ($7,3 \text{ mm}$) eingezeichnet. Konstante Fokusparameter an allen Arbeitsraumpositionen lassen sich nur erreichen, wenn ein Stellbereich der AO 1 von ca. $5 \mu\text{m}$ bis $+25 \mu\text{m}$ zur Verfügung steht.

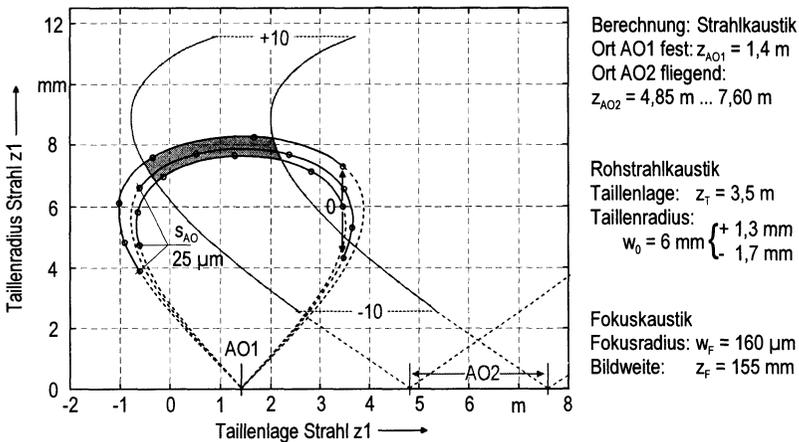


Bild 8-8: Erforderliche Stellbereiche bei Variation des Tailenradius

Speziell an der verwendeten Laseranlage L 5000 müssen Stellbereiche der AO 1 (Z-Faltung) von mehr als $+10 \mu\text{m}$ als kritisch eingestuft werden, weil bei größeren Hüben zunehmend Laserstrahlleistung an Aperturen im Strahlengang abgeschattet wird (Abschnitt 6.3.1).

Zusammenfassend ist festzustellen, daß der Einfluß einer variablen Tailenlage auf die Fokusparameter sehr gut eliminiert werden kann. Eine starke Abnahme des Tailenradius kann dagegen zu einem problematischen Betriebsverhalten führen. Für die Meßergebnisse der Störgrößenidentifikation (Abschnitt 6.2.3), die bereits einen sehr ausgeprägten thermischen Linseneffekt beschreiben, ergibt sich noch ein tolerierbares Verhalten. Stärkere Effekte durch sehr alte Auskoppelfenster sollten vermieden werden.

8.3 Überprüfung der Regelstrecken

Nach der graphischen Bestimmung der Stellbereiche beider Adaptiver Optiken AO 1 und AO 2 (Abschnitt 8.2.2) werden die dynamischen Eigenschaften der Regelstrecken für Fokusradius (Abschnitt 8.1.2) und Bildweite (Abschnitt 8.1.3) experimentell überprüft [134]. Die Versuchsdurchführung und Meßdatenerfassung erfolgt rechnergesteuert mit einem PC, der auch die Benutzerschnittstelle zum DSP-System (Abschnitt 5.3.3) bildet.

8.3.1 Anschluß des DSP-Boards

Das DSP-Board tastet die Ausgangssignale der Meßsysteme für den Strahlradius (Abschnitt 5.2.2) und den Wellenfrontradius (Abschnitt 5.2.3) ab und generiert die Stellsignale für die Steuerung der Adaptiven Optiken, **Bild 8-9**.

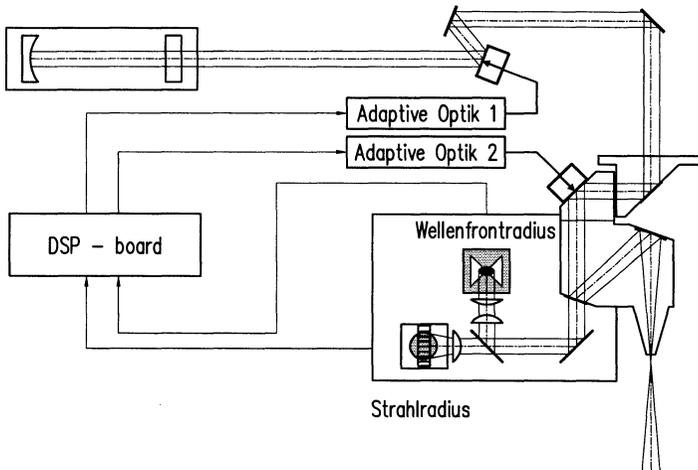


Bild 8-9: Regelkreis der Parameter Fokusradius und Bildweite

Das dynamische Verhalten der Regelstrecken für Fokusradius und Bildweite wird nacheinander überprüft, indem die einzelnen Adaptiven Optiken mit sinusförmigen Signalen angesteuert und die resultierenden Auswirkungen auf die Strahlausbreitung mit den Meßanordnungen erfaßt werden.

8.3.2 Steuerung des Fokusradius

Die Ausgangssignale des Meßsystems für den Strahlradius (Abschnitt 8.1.2) werden mit dem DSP-System erfaßt, während nacheinander AO 2 im Laserkopf und AO 1 in der Z-Faltung mit periodischen Signalen angesteuert werden. Aus der Meßwertverteilung der 16-elementigen Detektorzeile (Abschnitt 5.2.2) erfolgt die Berechnung des Rohstrahlradius am Ort der vorderen Brennebene über das zweite Moment der Verteilungsfunktion [133]. Anhand dieser Strahlradien kann eine genaue Aussage über die Auswirkung der Adaptiven Optiken auf den Rohstrahlverlauf getroffen werden. Die Kalibrierung auf Absolutwerte des Fokusradius soll anschließend durch eine Vergleichsmessung mit dem Hohlzylindergerät Laserscope erfolgen.

Bei allen nachfolgenden Messungen des Strahlradius befindet sich der Laserkopf an der maximalen Strahlweglänge, da an dieser Arbeitsraumposition Auswirkungen auf den Strahlradius besonders deutlich hervortreten. Die Ansteuerung der Adaptiven Optiken erfolgt bei der Frequenz 10 Hz mit einem sinusförmigen Stellsignal von 0 μm bis 8 μm Hub des Piezoaktuators.

Bei der Ansteuerung von AO 2 im Laserkopf wird wegen des gewählten Einbauortes nahe der vorderen Brennebene nur ein geringer Einfluß auf den Strahlradius erwartet (Abschnitt 8.2.1). Das Ergebnis der Messung zeigt **Bild 8-10**.

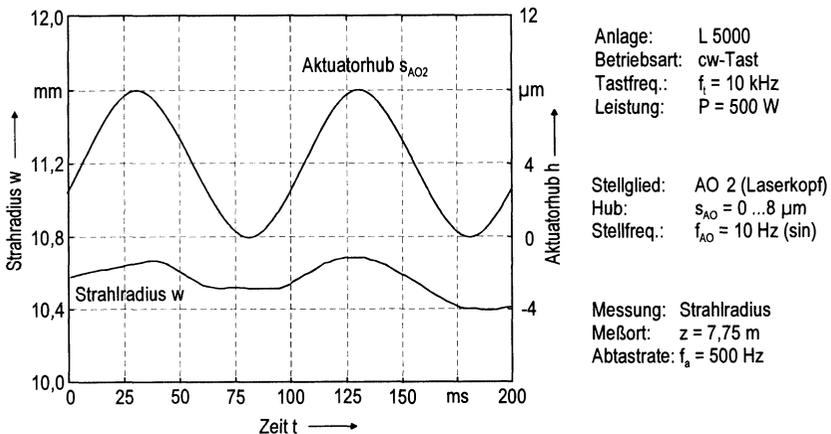


Bild 8-10: Stellbereich des Rohstrahlradius bei Ansteuerung von AO 2 (Laserkopf)

Die Meßergebnisse bestätigen die theoretischen Überlegungen. Übereinstimmend mit den Erwartungen ergibt sich lediglich eine geringe Vergrößerung des Rohstrahlradius von maximal + 0,2 mm bei einem Hub der AO 2 (Laserkopf) von 8 μm . Die Dynamik des Meßsystems ist ausreichend, um Änderungen des Strahlradius mit einer Frequenz von bis zu 10 Hz zu erfassen.

Bei der Ansteuerung von AO 1 (Z-Faltung) bei gleicher Frequenz (10 Hz) und Amplitude des Aktuatorhubs (8 μm) wird eine wesentlich deutlichere Beeinflussung des Strahlradius erwartet. Diese Tendenz kann aus den Meßkurven gelesen werden, dennoch vergrößert sich der Rohstrahlradius in geringerem Maße als erwartet, **Bild 8-11**.

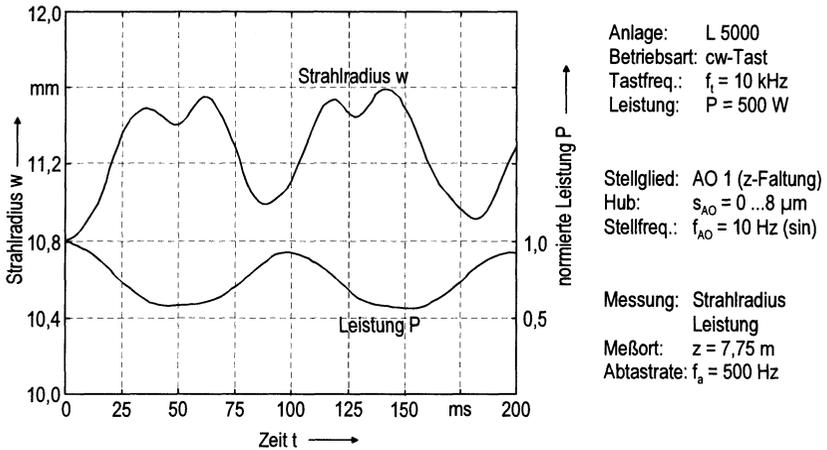


Bild 8-11: Stellbereich des Strahlradius bei Ansteuerung von AO 1 (Z-Faltung)

Bei einer Ansteuerung des Piezoaktuators von 0 bis 8 μm Hub wird lediglich eine Vergrößerung des Rohstrahlradius von 0,8 mm erzielt. Ursache ist die Limitierung durch Aperturen im Strahlengang der Laseranlage. Diese anlagenspezifische Einschränkung verhindert die effektive Steuerung des Fokusradius und verursacht zusätzlich eine starke Verkopplung mit der Laserstrahlleistung. Diese sinkt bereits bei geringen Hübten von AO 1 in der Z-Faltung und läßt sich in diesem Maße nicht mit der Leistungsregelung ausgleichen.

Ein weiterer Verkopplungseffekt zeigt sich beim Versuch, Meßwerten des Rohstrahlradius Fokusradien zuzuordnen. Berechnungen mit idealen optischen Komponenten sagen voraus, daß bei einem Einbau von AO 2 in der vorderen Brennebene der Fokusradius nicht beeinflusst wird (Abschnitt 8.2.1). Die Messungen des Rohstrahlradius nahe der vorderen Brennebene

scheinen diese Annahme zu bestätigen, da keine nennenswerte Vergrößerung des Rohstrahlradius durch den Hub der Adaptiven Optik AO 2 nachgewiesen wird. Demnach sollte nach dem Gauß'schen Modell (Gl. 2-6) auch der Fokusradius unbeeinflusst bleiben.

Offline-Messungen des Fokusradius zeigen jedoch starke Änderungen des Fokusradius in Abhängigkeit vom Hub der Adaptiven Optik AO 2, **Bild 8-12**. Dieser Effekt ist bei maximaler Strahlweglänge ($z = 7,75$ m) ausgeprägter als bei minimaler Strahlweglänge ($z = 5$ m) und bei negativem Hub der Adaptiven Optik weitaus gravierender als bei positivem Hub.

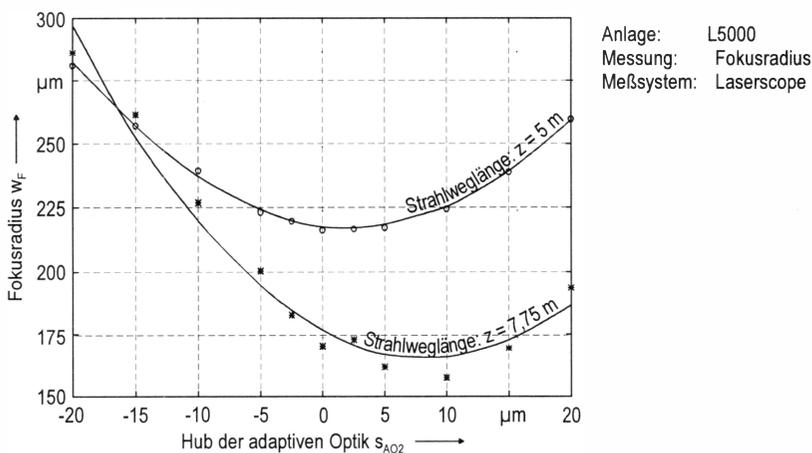


Bild 8-12: Störung des Fokusradius durch AO 2 (Laserkopf)

Der beobachtete Effekt wird von anderen Autoren bestätigt [135], die vollständige Identifikation ist Gegenstand laufender Arbeiten [136]. Es wird jedoch angenommen, daß mit zunehmendem Hub der Adaptiven Optik Phasenfrontstörungen in den Laserstrahl eingebracht werden. Als Ursache wird die Oberflächenkontur der Adaptiven Spiegel diskutiert, die mit zunehmendem Hub von der ideal sphärischen Form abweicht.

Phasenfrontstörungen sind gleichbedeutend mit einer Verminderung des Strahlpropagationsfaktors und verursachen somit eine Vergrößerung des Fokusradius. Diese Interpretation erklärt, daß die Vergrößerung des Fokusradius nicht auf einer Verkleinerung des Rohstrahlradius beruht und deshalb im Rohstrahl auch nicht nachgewiesen werden kann. Für die vorliegende Regelstrecke ergibt sich dadurch die Einschränkung, daß nur kleine Ausschnitte aus dem Stellbereich der Adaptiven Optik AO 2 genutzt werden dürfen. In diesen Teilbereichen werden die Parameter als konstant angenommen.

8.3.3 Steuerung der Bildweite

Als weiterer Schritt werden die Signale der Meßanordnung für die Bildweite (Abschnitt 8.1.3) bei Ansteuerung der beiden Adaptiven Optiken ausgewertet. Bei korrekter Funktion wird bei Ansteuerung von AO 2 im Laserkopf eine sehr effektive Beeinflussung, von AO 1 in der Z-Faltung nur ein minimaler Einfluß auf die Bildweite erwartet. Die Übereinstimmung mit den theoretischen Annahmen wird auch für die Bildweite durch die Ansteuerung der Adaptiven Optiken mit sinusförmigen Signalen überprüft. Dadurch kann gleichzeitig eine Aussage über die Dynamik der Regelstrecke getroffen werden.

Bei der Ansteuerung der Adaptiven Optik im Laserkopf (AO 2) mit einem Hub von $20\ \mu\text{m}$ und einer Frequenz von $100\ \text{Hz}$ stellt sich erwartungsgemäß ein annähernd sinusförmiger Verlauf der Bildweite mit einer Amplitude von ca. $4,5\ \text{mm}$ ein, **Bild 8-13**.

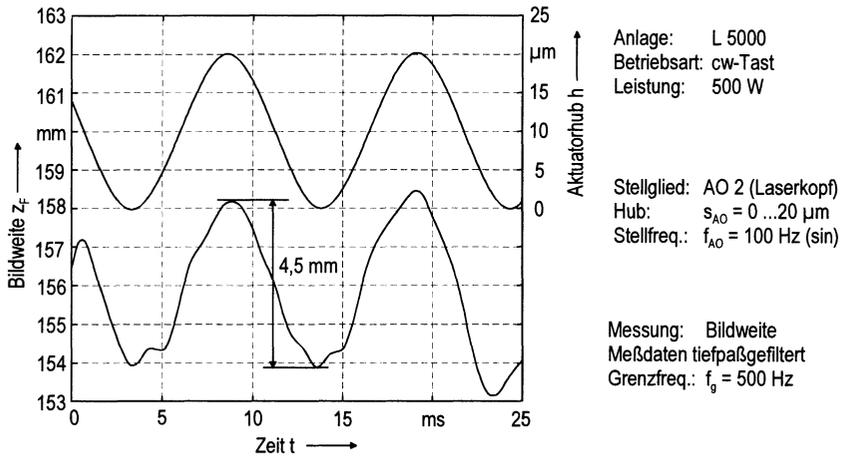


Bild 8-13: Stellbereich der Bildweite bei Ansteuerung von AO 2 (Laserkopf)

Bei der Analyse des Einflusses von AO 1 (Z-Faltung) auf die Fokusslage stellt man fest, daß selbst bei geringem Hub der Optik Leistung in der Strahlführung verloren geht. Eine Leistungsmessung entlang des Hochleistungsstrahles ergibt, daß der Leistungsverlust durch Abschattung des Hochleistungsstrahles und nicht im Meßstrahlengang auftritt. Um eine Verfälschung der Meßwerte durch diesen Effekt zu verhindern, wird im experimentellen Laserkopf ein weiteres Leistungsmeßsystem installiert, dessen Ausgang als Referenzsignal bei der Fokusslagemessung Verwendung findet.

Im weiteren Verlauf wird die AO 1 mit einem sinusförmigen Signal angesteuert, so daß sich ein Hub des Piezoaktuators von $0 \mu\text{m}$ bis $10 \mu\text{m}$ der Frequenz 50 Hz ergibt, **Bild 8-14**.

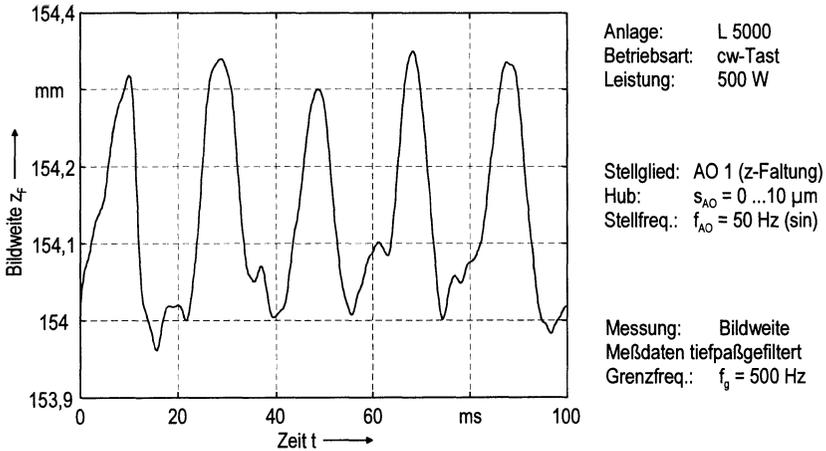


Bild 8-14: Stellbereich der Bildweite bei Ansteuerung von AO 1 (Z-Faltung)

Das korrigierte Signal des Meßsystems zeigt eine Schwankung der Bildweite von lediglich $0,3 \text{ mm}$. Dieser Wert stimmt sehr gut mit Messungen im Hochleistungsstrahl überein, die mit dem Laserscope vorgenommen wurden und Änderungen der Bildweite von $0,4 \text{ mm}$ zeigen. Die zuverlässige Funktion der Meßanordnung für die Bildweite kann somit verifiziert und der Regelkreis für die Bildweite über das DSP-System geschlossen werden.

8.4 Diskussion der Ergebnisse

Der im Rahmen dieser Arbeit modifizierte Laserkopf zur Auskopplung eines Diagnosestrahls nimmt die Meßsysteme für die Laserstrahlleistung (Abschnitt 5.2.1), den Rohstrahlradius (Abschnitt 5.2.2) und den Wellenfrontradius (Abschnitt 5.2.3) auf. An diesem Einbauort, nahe der vorderen Brennebene der Fokussieroptik, werden alle anlagenseitigen Störgrößen erfaßt und es erfolgt eine einfache Zuordnung zwischen Rohstrahlradius und Fokusradius bzw. Wellenfrontradius und Bildweite nach dem Gaußstrahlmodell.

Für die möglichst unabhängige Steuerung von Fokusradius und Bildweite wurden bei der verwendeten Laseranlage als Einbauorte für AO 1 die Z-Faltung ($z = 1,4$ m) und für AO 2 der Laserkopf ausgewählt. Die Überprüfung des Zusammenwirkens zeigte ausreichende Stellbereiche um alle detektierten Störgrößen auszugleichen.

Die nachfolgende dynamische Überprüfung der Regelstrecken zeigte einerseits, daß die Aufweitung des Rohstrahls durch die Adaptive Optik AO 1 (Z-Faltung) gut bis zu Stellfrequenzen von 10 Hz detektiert werden kann, offenbarte jedoch andererseits einen stark eingeschränkten Stellbereich bei der verwendeten Laseranlage. Schon bei sehr geringen Hüben von AO 1 wird der Laserstrahl an Aperturen im Strahlengang abgeschattet und es geht Laserstrahlleistung in der Strahlführung verloren.

Zusätzlich verursacht AO 2 im Laserkopf eine Vergrößerung des Fokusradius, die auf Störungen der Phasenfront zurückgeführt werden und im unfokussierten Strahl nicht nachgewiesen werden können. Dieser Effekt führt dazu, daß der Regelkreis mit den vorliegenden Adaptiven Optiken nicht geschlossen werden kann. Die Klärung der genauen Ursachen ist Gegenstand laufender Arbeiten. Mit der Weiterentwicklung der Adaptiven Optiken wird diese Einschränkung entfallen und die Regelung kann wie beschrieben in Betrieb genommen werden.

Unabhängig von den Einschränkungen der verwendeten Laseranlage und der Adaptiven Optiken konnten die Meßsysteme ihre Leistungsfähigkeit demonstrieren. Änderungen der Bildweite können bis 100 Hz, Änderungen des Strahlradius bis 10 Hz erfaßt werden. Der Einbauort der Meßsysteme im Laserkopf erweist sich als richtiger Weg, um eine eindeutige Zuordnung der Meßwerte zu den Fokusparametern zu gewährleisten. Mit dem Nachweis der prinzipiellen Funktionstüchtigkeit ist die konsequente Fortführung ein Laserkopf mit integriertem, miniaturisiertem Meß- und Stellsystem.

9 Zusammenfassung

Die Fokusparameter sind die wesentliche, prozeßbestimmende Kenngröße bei allen Verfahren der Lasermaterialbearbeitung. Eine reproduzierbar hohe Bearbeitungsqualität erfordert eine konstante Leistungsdichte, die einerseits von der Laserstrahlleistung, andererseits von der Kaustik des fokussierten Laserstrahls abhängt. Insbesondere bei der Materialbearbeitung mit CO₂-Hochleistungslasern konnte dies bisher nicht gewährleistet werden. Die Laserparameter unterliegen Störeinflüssen unterschiedlicher Ursachen und Stärke und beeinträchtigen dadurch das Bearbeitungsergebnis.

Auf der Basis innovativer Meßsysteme wurde eine Regelung für eine CO₂-Laseranlage aufgebaut, die alle prozeßrelevanten Störgrößen der Leistungsdichte in der Werkstückebene wirksam unterdrückt. Dieses Regelsystem arbeitet prozeßunabhängig, zeichnet sich durch seine leichte Integrierbarkeit in kommerzielle Anlagen aus und verzichtet vollständig auf bewegte mechanische Komponenten. Aufgrund der geringen Verkopplung konnten zwei Teilsysteme, für die Laserstrahlleistung einerseits sowie Fokusradius und Bildweite andererseits, separat optimiert werden.

Die Erfassung der Laserstrahlleistung erfolgt mit einem äußerst kompakten Meßsystem, das für den Einsatz an CO₂-Hochleistungslasern entwickelt wurde und mit einem Atomlagen-Thermosäulen-Detektor arbeitet. Die Online-Messung am rückwärtigen Resonatorfenster weist wesentliche Störungen der Laserstrahlleistung im Frequenzbereich bis zu einem Kilohertz nach. Die Leistungsregelung erfolgt über einen Zweipunktregler und HF-Generatoren als Stellelemente und erzielt eine Verbesserung der Leistungskonstanz um den Faktor 100 bei unverändertem Wirkungsgrad des Lasers.

Die wesentlichen Prozeßparameter Fokusradius und Bildweite werden durch die variable Strahlweglänge fliegender Optiken und durch thermische Linseneffekte, die in komplexer Weise von der vorgegebenen Laserstrahlleistung, der Einschaltdauer des Lasers und dem Alter des Resonatorfensters abhängen, beeinflusst. Die Messung dieser Effekte erfolgte durch neue Meßsysteme, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit konzipiert und aufgebaut wurden. Die Integration der Meßsysteme nahe der Fokussieroptik erlaubt die Korrelation zwischen Rohstrahl- und Fokusparametern und damit die Online-Erfassung während des Bearbeitungsvorgangs.

Änderungen des Fokusradius können mit einer Frequenz bis 10 Hz, Änderungen der Bildweite bis zu einer Frequenz von 100 Hz erfaßt werden. Diese Dynamik ist für die vorliegenden Störungen der Strahlkaustik völlig ausreichend. Die Steuerung von Fokusradius und Bildweite übernehmen Adaptive Optiken, deren Einbauorte so gewählt sind, daß eine minimale Verkopplung gewährleistet ist. Mit einem flexibel programmierbaren DSP-Board kann der Regelkreis geschlossen werden.

Die Regelung sichert konstante Laserparameter unabhängig vom Bearbeitungsprozeß und bietet dem Anwender, neben einer höheren Anlagenverfügbarkeit durch den Verzicht auf Justagearbeiten, eine fortlaufende Dokumentation der Betriebsmittel und eine höhere Prozeßsicherheit auch bei eng tolerierten Prozessen.

Anhang: Gaußstrahl-Modell

Das Gaußstrahl-Modell eignet sich zur Beschreibung der Feldverteilung von Lichtbündeln endlichen Strahlquerschnitts mit ausgezeichneter Ausbreitungsrichtung. Es zeichnet sich gegenüber der Wellenoptik durch einen einfachen Formalismus, gegenüber der geometrischen Optik durch die Einbeziehung von Beugungseinflüssen aus. Die theoretischen Grundlagen werden in Anlehnung an [137] dargestellt.

Herleitung

Ausgangspunkt sind die Maxwell'schen Gleichungen für ein quellenloses, homogenes, isotropes, lineares und verlustloses Medium.

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{H} &= \varepsilon \dot{\mathbf{E}} & \nabla \mathbf{E} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\mu \dot{\mathbf{H}} & \nabla \mathbf{H} &= 0 \end{aligned} \quad (\text{Gl. 9-1})$$

daraus erhält man:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \mu \varepsilon \ddot{\mathbf{E}} \quad (\text{Gl. 9-2})$$

Für harmonische Zeitabhängigkeit $\mathbf{E}(x, y, z, t) = \mathbf{E}(x, y, z) \cdot e^{j\omega t}$ ergibt sich die vektorielle Wellengleichung:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \mu \varepsilon \omega^2 \mathbf{E} = 0 \quad (\text{Gl. 9-3})$$

Jede skalare Komponente erfüllt dabei mit $k = \omega c^{-1}$; $c = \sqrt{\varepsilon \mu}$ eine skalare Wellengleichung der Form

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (\text{Gl. 9-4})$$

mit \mathbf{E} als komplexer Amplitude.

Man wählt den geeigneten Lösungsansatz:

$$\mathbf{E} = \mathbf{A}_{mn} \cdot \Psi_{mn} \cdot e^{-jkz} \tag{Gl. 9-5}$$

mit \mathbf{A}_{mn} komplexe Amplitude der elektrischen Feldstärke
 e^{-jkz} Ortsabhängigkeit der ebenen Welle in z-Richtung
 $\Psi_{mn}(x,y,z)$ Strukturfunktion (Feldverteilung quer zur Ausbreitungsrichtung)

Ergebnis ist eine vollständige Klasse von orthogonalen Lösungsfunktionen für die Strukturfunktion Ψ_{mn} . Die Elemente dieser Klasse, die transversalen elektromagnetischen Moden (TEM), unterscheiden sich einerseits für Rechteck- und Radial-Symmetrie, andererseits durch die Anzahl der Nullstellen. Für Rechtecksymmetrie erhält man Ψ_{mn} in x- bzw. y-Koordinatenrichtung als Produkt eines Hermite'schen Polynoms der Ordnung m bzw. n mit einer Gauß'schen Kurve. In radialsymmetrischen Feldstärkeverteilungen treten an die Stelle der Hermite'schen Polynome die Laguerre'schen Polynome, **Bild 9-1**.

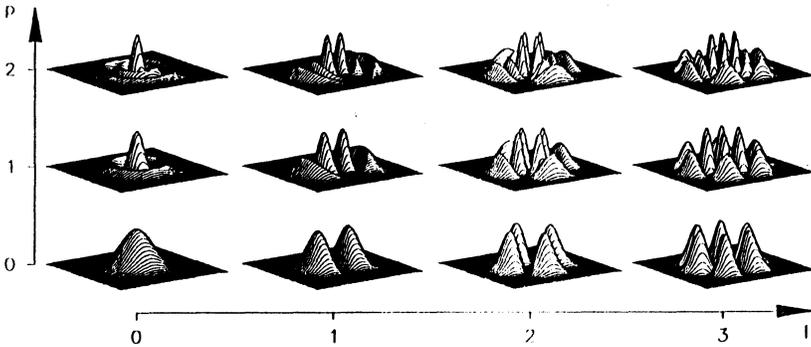


Bild 9-1: Laguerre- Gauß'sche Moden

Mit zunehmender Ordnung tritt bei beiden Verteilungsfunktionen eine wachsende Zahl von Nullstellen in den jeweiligen Polynomen und damit eine entsprechende Zahl von Knotenlinien in der Feldstärkeverteilung auf. Bei einer realen Messung wird die Leistungsdichte, das Quadrat der Feldstärkefunktion, gemessen. Neben dem Grundmode TEM₀₀, der sich durch minimale Aufweitung und beste Fokussierbarkeit auszeichnet, nimmt die bei CO₂-Hochleistungslasern häufig auftretende sogenannte Doughnut-Verteilung eine Sonderstellung ein. Diese Feldverteilung entsteht durch die inkohärente Überlagerung der Hermite-Gauß-Moden TEM₀₁ und TEM₁₀ und wird oft als „TEM₀₁-Mode“ bezeichnet.

Laserstrahlausbreitung

Das Ausbreitungsverhalten der Moden ist dadurch gekennzeichnet, daß sich die transversale Leistungsdichteverteilung an jedem Ort z der Strahlachse reproduziert. Die Breite der Verteilung wird lediglich mit einem z -abhängigen Parameter skaliert [138]. Dies ermöglicht die analytische Beschreibung der Propagation durch die beiden Kenngrößen **Strahlradius w** und Krümmungsradius der Wellenfront, abkürzend als **Wellenfrontradius R** bezeichnet:

$$w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (\text{Gl. 9-6})$$

$$R(z) = z \cdot \left[1 + \left(\frac{z_R}{z}\right)^2 \right] \quad (\text{Gl. 9-7})$$

Der minimale Rohstrahlradius wird als Strahltaille mit Tailenradius w_0 am Ort der Strahlweglänge $z=0$ bezeichnet und dient als Bezugspunkt für die weitere Berechnung der Strahlausbreitung. Die **Rayleighlänge z_R** gibt den Ort der stärksten Krümmung der Wellenfrontradien an und berechnet sich zu:

$$z_R = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda \cdot b^2} \quad (\text{Gl. 9-8})$$

Die beschriebenen Größen Strahlradius und Wellenfrontradius lassen sich im komplexen **Strahlparameter q** zusammenfassen:

$$\frac{1}{q(z)} = -j \frac{\lambda}{\pi w^2(z)} + \frac{1}{R(z)} \quad (\text{Gl. 9-9})$$

Mit zunehmender Entfernung von der Strahltaille nähert sich der Laserstrahl einem konstanten Öffnungsverhältnis, der **Fernfelddivergenz Θ** an:

$$\Theta = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (\text{Gl. 9-10})$$

Als Maß für die Strahlqualität wird die Strahlkennzahl K , das Produkt aus dem Radius der Strahltaille und der Fernfelddivergenz, herangezogen. Das theoretische Minimum dieser Größe wird für den Gauß'schen Grundmode (TEM_{00}) erreicht und beträgt $\lambda\pi$.

Das **Strahlparameterprodukt K** für reale Laserstrahlen höherer Modenordnung wird zum theoretisch erreichbaren Minimum λ/π ins Verhältnis gesetzt:

$$K = \frac{\lambda/\pi}{W_{\text{real}} \cdot \Theta_{\text{real}}} \leq 1 \quad (\text{Gl. 9-11})$$

Mit dem Strahlpropagationsfaktor K kann eine Aussage über die Strahlqualität getroffen werden. Bei gleichem Fokusradius ist die Fernfelddivergenz des realen Strahls um den Faktor $1/K$ ($K \leq 1$) größer als die eines Gaußstrahls.

$$\Theta_{\text{real}} = \frac{\Theta_{\text{Gauß}}}{K} \quad (\text{Gl. 9-12})$$

Die **Strahlkennzahl K** eines bestimmten Modes kann aus der Zahl der Nullstellen berechnet werden.

$$K = \frac{1}{2 \cdot m \cdot n + 1} \quad (\text{Gl. 9-13})$$

Somit kann aus der Kenntnis des Modes die Leistungsdichteverteilung des Laserstrahls für jeden Ort z entlang der Strahlachse berechnet werden. Der Umkehrschluß erweist sich als schwieriger.

Die bisherigen Ausführungen bezogen sich auf reine Strahlmoden, die nur Laser niedriger Leistung, wie sie z. B. in der Meßtechnik verwendet werden, erreichen. Hochleistungslaser weisen meist ein inkohärentes Modengemisch aus Moden unterschiedlicher Taillenradien und Fernfelddivergenzen auf. Hochfrequente zeitliche Schwankungen verhindern die Berechnung der Propagation der einzelnen Modenanteile.

Ein Kompromiß ist die Anpassung einer Gauß'schen Strahlkaustik mit dem Strahlparameterprodukt K an Meßwerte der Strahlradien entlang der Strahlachse. Bei dieser Vorgehensweise sind alle Laserparameter wie Radius, Wellenfrontradius oder Strahlkennzahl als Mittelwerte zu interpretieren. Diese mittleren Laserparameter, die z. B. aus dem schnellen zeitlichen Wechsel der Moden resultieren, erlauben die Berechnung der Strahlkaustik, nicht jedoch die Vorhersage der transversalen Leistungsdichteverteilung. Mit Abweichungen des realen vom berechneten Strahlprofils muß dennoch aufgrund nichtidealer optischer Komponenten, Abschattung und Beugung an Aperturen oder zeitliche Schwankungen der Modenzusammensetzung mit niedriger Frequenz gerechnet werden.

Transformation durch optische Komponenten

Zur Durchführung von Bearbeitungsschritten wird die Leistungsdichte des Laserstrahls durch eine Fokussieroptik erhöht. Diese transformiert den Rohstrahl mit vorgegebenem Taillenradius w_0 im Abstand z_0 (Objektweite) von der Linse der Brennweite f in den Fokusstrahl mit den Kenngrößen Fokusradius w_F und Bildweite z_F .

Eine ideale Optik verändert den Mode nicht, insbesondere ist das Strahlparameterprodukt und somit die Strahlqualität invariant. Unter Verwendung des komplexen Strahlparameters $q(z)$ kann der resultierende Fokusradius w_F und die resultierende Bildweite z_F in paraxialer Näherung unter Verwendung der sog. 'ABCD-Matrizen' hergeleitet werden. Man erhält für den **Fokusradius w_F** :

$$w_F = \frac{w_0 \cdot f}{\sqrt{(z_0 - f)^2 + z_R^2}} \quad (\text{Gl. 9-14})$$

Die **Bildweite z_F** setzt sich aus der Brennweite f und der Fokusverschiebung Δz_F zusammen.

$$z_F = f + \frac{(z_0 - f) \cdot f^2}{(z_0 - f)^2 + z_R^2} \quad (\text{Gl. 9-15})$$

Alternativ können Fokusradius w_F und Bildweite z_F auch in Abhängigkeit von den Werten des Rohstrahlradius w und des Wellenfrontradius R in der vorderen Brennebene der Fokussieroptik ($z_0 - f$) dargestellt werden. Durch Einführung von (Gl. 9-6) in (Gl. 9-14) bzw. (Gl. 9-7) und (Gl. 9-8) in (Gl. 9-15) erhält man für den **Fokusradius w_F** und die **Bildweite z_F** :

$$w_F = \frac{\lambda}{K \pi} \cdot \frac{f}{w_{(z_0-f)}} \quad (\text{Gl. 9-16})$$

$$z_F = f + \frac{f^2}{R_{(z_0-f)}} \quad (\text{Gl. 9-17})$$

Der resultierende Fokusradius ist invers proportional dem Rohstrahlradius w in der vorderen Brennebene ($z_0 - f$) der Optik (d. h. für $z_0 \gg f$ näherungsweise zur Ausleuchtung der Optik), während die Verschiebung der Bildweite bezüglich der hinteren Brennebene der Optik invers proportional dem Krümmungsradius der Wellenfronten R des einfallenden Strahls in der vorderen Brennebene ($z_0 - f$) der Optik ist.

Adaptive Optiken sind Spiegel variabler Brennweite. Im folgenden wird das Eingangs-Ausgangsverhalten dieser Systeme betrachtet. Ein einfallender Gaußstrahl (Eingangsstrahl), wird abhängig von der eingestellten Brennweite der Optik in einen reflektierten Gaußstrahl (Ausgangsstrahl) transformiert, wobei die Strahlqualität konstant bleibt.

Tailenradius und Tailenlage des Ausgangsstrahls sind durch die Gleichungen (Gl. 9-16) und (Gl. 9-17) mit dem Eingangsstrahl verknüpft, die Brennweite f ist hier ein freier Parameter.

Mit der Rayleighlänge des Rohstrahls z_R und dem Einbauort z_{AO} der Adaptiven Optik kann der Laserstrahlradius auf der Adaptiven Optik berechnet werden. Der **Radius w_{AO}** auf der Adaptiven Optik AO ist durch die Laserquelle und den Abstand z_{AO} definiert.

$$w_{AO} = w_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{(z_{AO} - z_0)^2}{z_R^2}} \quad (\text{Gl. 9-18})$$

Die Ausgangsstrahlparameter bilden eine Kurve charakteristischer Keulenform mit der Spitze am Ort der Adaptiven Optik. Die Kontur dieser keulenförmigen Kurve hängt sowohl von den Parametern des Eingangsstrahls als auch von der Objektweite ab (Strahltaille des Eingangsstrahls bezüglich der Adaptiven Optik AO). Die grafische Darstellung der Stellbereiche erlaubt die einfache Bestimmung der Möglichkeiten und Grenzen von Systemen, die mehrere Adaptive Optiken enthalten.

Im folgenden wird ein System zweier Adaptiver Optiken und einer Fokussieroptik betrachtet. Dabei wird der Rohstrahl zunächst über eine Adaptive Optik AO 1 in den Zwischenstrahl z_1 , anschließend durch die Adaptive Optik AO 2 in den Zwischenstrahl z_2 und schließlich durch eine Optik fester Brennweite in den gewünschten Ausgangsstrahl (hier: Fokusstrahl) transformiert. Mathematisch beschrieben werden die Kurven durch die Gleichungen:

$$z_1 = z_{AO1} \pm \frac{\pi w_1}{\lambda} \sqrt{w_{AO1}^2 - w_1^2} \quad \text{für AO 1 und} \quad (\text{Gl. 9-19})$$

$$z_1 = z_{AO2} \pm \frac{\pi w_1}{\lambda} \sqrt{w_{AO2}^2 - w_1^2} \quad \text{für AO 2.} \quad (\text{Gl. 9-20})$$

Die Lösung dieses Gleichungssystems für z_1 und w_1 ergibt die gesuchten Schnittpunkte.

Eine analytische Lösung existiert jedoch nicht, es läßt sich nur eine Existenzbedingung für die Schnittpunkte angeben:

$$(z_{AO2} - z_{AO1}) - \frac{\pi}{\lambda} w_{AO1} \cdot w_{AO2} < 0$$

(Gl. 9-21)

Ist (Gl. 9-21) erfüllt, existieren zwei Schnittpunkte der Kurven, andernfalls schneiden sie sich nicht. Die Lösung des Gleichungssystems ist auf numerischem Wege beispielsweise mit dem Sekanten-Verfahren möglich. Aus den so gewonnen Parametern des Zwischenstrahls z_1 können anschließend die nötigen Brennweiten der Adaptiven Optiken berechnet werden.

Mit diesen Größen ist die Brennweite der Adaptiven Optik auf eine zusätzliche Art bestimmbar:

$$f_{AO} = \frac{1}{w_1^2 - w_0^2} \cdot \left(w_1^2 \cdot (z_{AO} - z_0) - c \cdot w_1 \cdot \sqrt{w_0^2 \cdot (z_{AO} - z_0)^2 + z_R^2 \cdot (w_0^2 - w_1^2)} \right)$$

(Gl. 9-22)

wobei die Konstante c definiert ist: $c = \text{sign}(z_0 - z_{AO})$

Literaturverzeichnis

- 1 Kluge, J.; Stein, L.; Krubasik, E.; Beyer, I.; Düsedau, D.; Huhn, W. (McKinsey & Company, Inc.): Qualität gewinnt - Mit Hochleistungskultur und Kundennutzen an die Weltspitze. Stuttgart, 1995
- 2 Bläsing, J.P.: Das qualitätsbewusste Unternehmen. Stuttgart: Steinbeis-Stiftung für Wirtschaftsförderung, 1992
- 3 Wollermann-Windgasse, R.: Notwendigkeit der Innovation. In: Geiger, M. (Hrsg.): Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderung an die Fabrik 2000: Vorträge des 12. Int. Kongresses Laser 95. Bamberg: Meisenbach, 1995, 13-26
- 4 Geiger, M.; Lutz, N.: Lasertechnologie für die Fabrik 2000. In: Geiger, M. (Hrsg.): Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderung an die Fabrik 2000: Vorträge des 12. Int. Kongr. Laser 95. Bamberg: Meisenbach, 1995, 3-12
- 5 Hügel, H.: Strahlwerkzeug Laser. Stuttgart: Teubner, 1992
- 6 Leibinger, B.; Wollermann-Windgasse, R.; Richter, W.: Laser - The new Tool in Manufacturing. In: Geiger, M.; Vollertsen, F. (Hrsg.): Laser Assisted Net Shape Engineering. Bamberg: Meisenbach, 1994, 41-61
- 7 Hutfless, J.: Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungs-Laseranlage. Fertigungstechnik-Erlangen Nr. 33, München: Hanser, 1993. Zugl.: Erlangen, Univ., Diss., 1992
- 8 Norm DIN EN-ISO 11145: Laser und Laseranlagen. Berlin: Beuth, 1994
- 9 Vornorm DIN V 18730: Grundbegriffe der Lasertechnik. Berlin: Beuth, 1991
- 10 Naumann, H.; Schröder, G.: Bauelemente der Optik - Taschenbuch der technischen Optik. München: Hanser, 1987
- 11 Hecht, J.: The Laser Guidebook. New York: Mc Graw Hill, 1986
- 12 Wegmann, H. G.: Vergleich zwischen geschaltetem DC-Netzteil und HF-Anregung bei CO₂-Lasern für die Materialbearbeitung: Starnberg: Wegmann-Baasel
- 13 Hügel, H.; Schock, W.; Giesen, A.; Hall, T.; Wittwer, W.: CO₂-Hochleistungslaser mit transversaler RF-Anregung. In: Waidelich, W. (Hrsg.): Optoelektronik in der Technik: Vorträge des 7. Int. Kongr. Laser 85. Berlin: Springer, 1986, 40
- 14 Nowack, R.; Opower, H.; Wessel, K.: Diffusionsgekühlter CO₂-Hochleistungslaser in Kompaktbauweise. Laser und Optoelektronik 23 (1991) 6, 68
- 15 Hügel, H.: Hochleistungs-Gaslaser. Laser und Optoelektronik 17 (1985), 1, 21
- 16 Giesen, A.: Messung der Strahlqualität von Hochleistungslasern: Physikalische und technische Aspekte von Hochleistungslasern. Stuttgart: Institut für Technische Physik, 1985, 38-45

- 17 Giesen, A.; Borik, S.; Schreiner, U.; Dausinger, F.: Vermessung fokussierender Systeme für Hochleistungs-CO₂-Laser. In: Waidelich, W. (Hrsg): Optoelektronik in der Technik: Vorträge des 8. Int. Kongr. Laser 87. Berlin: Springer, 1987, 483-487
- 18 Giesen, A.; Borik, S.: Vermessung fokussierender Systeme für Hochleistungs-CO₂-Laser. Laser in der Technik. In: Waidelich, W. (Hrsg): Optoelektronik in der Technik: Vorträge des 8. Int. Kongr. Laser 87. Berlin: Springer, 1987
- 19 Du, K.; Loosen, P.; Herziger, G.: Untersuchung der Fokussierung von Laserstrahlung mit Off-Axis Parabol-Spiegeln. In: Waidelich, W. (Hrsg): Optoelektronik in der Technik: Vorträge des 8. Int. Kongr. Laser 87. Berlin: Springer, 1987
- 20 Wagner, H. P., Borik, S., Giesen, A.: Änderung der Eigenschaften optischer Komponenten bei Bestrahlung. In: Waidelich, W. (Hrsg.): Optoelektronik in der Technik: Vorträge des 9. Int. Kongr. Laser 89. Berlin: Springer, 1989, 789
- 21 Loosen, P.; Bakowsky, L.; Herziger, G.: Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung. Teil 3: Diagnostik von CO₂-Laserstrahlung hoher Leistung. Feinwerktechnik & Meßtechnik 92 (1984) 1, 11-15
- 22 Herziger, G.: Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung. Teil 1: Grundlagen und Probleme. Feinwerktechnik & Meßtechnik 91 (1983) 4
- 23 Donges, A. L.: Optische Rückwirkung am Beispiel der Materialbearbeitung mit Laserstrahlung. Darmstadt: Univ., Diss., 1985
- 24 Heyn, H.: Prozeßüberwachung und -diagnose beim Schneiden und Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern. Braunschweig: Univ., Diss., 1995
- 25 Borik, S.: Einfluß optischer Komponenten auf die Strahlqualität von Hochleistungslasern. Stuttgart: Teubner, 1991. Zugl. Stuttgart, Univ., Diss., 1991
- 26 Reedy, H. E.; Herrit, G. L.: Comparison of GaAs and ZnSe for High Power CO₂ Laser Optics. In: Quenzer, A. (ed.): High Power Laser Systems and Applications. Proc. of SPIE Vol. 1020 (1988), 180-189
- 27 Arlt, A. G.: Vergleichende Betrachtungen zur Fokussierung von CO₂-Laserlicht mit Linsen und Spiegeloptiken. In: Waidelich, W. (Hrsg): Optoelektronik in der Technik: Vorträge des 8. Int. Kongr. Laser 87. Berlin: Springer, 1987
- 28 Gorriz, M.: Adaptive Optik und Sensorik im Strahlführungssystem von Laserbearbeitungsanlagen. Stuttgart: Teubner 1992. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 1992
- 29 Kramer, R.: Beschreibung und Messung der Eigenschaften von CO₂-Laserstrahlung. Aachen: Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Hochschule, Diss., 1991
- 30 Geiger, M.; Hutflless, J.; Hoffmann, P.: Thermoelement-Sensorik - ein Lagesensor für CO₂-Hochleistungslaser. In: DVS-Berichte 135: Proc. of 3. Int. Konferenz „Strahltechnik“ Karlsruhe 1991, Düsseldorf: DVS, 1991, 204-207

- 31 Arnold, P.: Ein Gerät zur Analyse der Intensitätsverteilung im Laserstrahl während der Materialbearbeitung. In: Waidelich, W. (Hrsg.): Vorträge des 6. Int. Kongr. Laser 83 Optoelektronik in der Technik. Berlin: Springer, 1984, 264
- 32 Beyer, E.; Herziger, G.; Kramer, R.; Loosen, P.: A Diagnostic System for Measurement of the Focused Beam Diameter of High Power CO₂ Laser. In: Schuöcker, D. et al. (Hrsg.): High Power Lasers and their Industrial Application. Proc of SPIE Vol. 650. Bellingham, USA: The International Society for Optical Engineering, 1986, 170
- 33 Sepold, G.; Jüptner, W.; Telepski, J.: Measuring the Quality of High Power Beams. In: Schuöcker, D. et al. (Hrsg.): High Power Lasers and their Industrial Application. Proc of SPIE Vol. 650. Bellingham, USA: The International Society for Optical Engineering, 1986, 167
- 34 Harvey, J. E., Scott, M. L.: Hole Grating Beam Sampler - a Versatile High Energy Laser (HEL) Diagnostic Tool. Proc. of the SPIE 240 (1980), 232
- 35 Hutfless, J.; Rebhan, T.; Geiger, M.; Collischon, M.; Dresel, T.; Frank, M.; Lang, A.; Schwider, J.; Streibl, N.; Haidner, H.; Kipfer, P.; März, M.: Applications of Diffractive Optical Elements for High Power Lasers. In: Laser Materials Processing and Machining. Proc. of the SPIE Vol. 2246. Bellingham, USA: The International Society for Optical Engineering, 2246 1994, 146-154
- 36 Galus, W.; Perry F.S.: High-Speed Room-Temperature HgCdTe CO₂ Laser Detectors. Laser Focus 11 (1984)
- 37 Wong, T.T.S.: Photoconductive HgCdTe Detectors for CO₂ Laser Applications. Laser & Applications 2 (1987), 59-61
- 38 Piotrowski, J.; Galus, W.; Grudzien, M.: Near Room-Temperature IR Photo-Detectors. Infrared Physics 31 (1991) 1, 1-48
- 39 Becla, P.; Grudzien, N.; Piotrowski, J.: Uncooled 10,6 µm Mercury Manganese Telluride Photoelectromagnetic Infrared Detectors. J. Vac. Sci. Technol. B, American Vacuum Society 9 (1991) 3, 1777-1780
- 40 N. N.: Produktbeschreibung: Photoelectric Ambient Temperature Photodetectors. Warschau, Polen: VIGO System Ltd
- 41 Kramer, Reinhard: Schutzrecht WO 89/09928: Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Lage eines Laserstrahls. Schutzrecht WO 89/09928
- 42 Tränkler, H.-R.: Taschenbuch der Meßtechnik mit Schwerpunkt Sensortechnik. München: Oldenbourg, 1990
- 43 Dooley, D.: Measuring CO₂ Lasers with Pyroelectric Detectors. Laser & Applications 2 (1987), 63-65
- 44 Bohmeyer, W.; Kabel, W.; Volkman, H.: Pyroelektrische Detektoren für die Lasertechnik. Opto Elektronik Magazin 7 (1991) 1, 45-48
- 45 Gerthsen, C.; Kneser, H. O.; Vogel, H.: Physik. Berlin: Springer, 1982

- 46 N. N.: Informationsschrift: Dünnfilm-Thermopile als Infrarotdetektor. München: Fraunhofer-Institut für Festkörpertechnologie (IFT), 1990
- 47 Kauf, M.; Feser, M.; Hutfless, J.: Meßsystem zur Erfassung von IR-Strahlung auf der Basis von Dünnschicht-Thermosäulen. Sensor-Magazin (1994) 1, 5-8
- 48 Schutzrecht DE 43 06 497 A1: Thermoelektrischer Detektor zur Detektion von kontinuierlicher und gepulster Strahlung.
- 49 N. N.: Datenblatt: Der Atomlagen-Thermosäulen-Detektor - Ein schneller thermoelektrischer Sensor für Lichtwellen vom UV zum FIR. Regensburg: FORTECH HTS GmbH und FORSUPRA, 1995
- 50 Lengfellner, H.; Zeuner, S.; Prettl, W.; Renk, K. F.: Thermoelectric Effect in Normal State $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ -Films. Europhysics Letters 25 (1994) 5, 375-378
- 51 Kauf, M.; Schubert, S.; Hutfless, J.; Betz, J.; Zeuner, S.; Lengfellner, H.: Atomlagen-Thermosäule - Ein neuartiger Detektor für die Laserstrahlidiagnose. Laser Magazin (1994) 5, 12-16
- 52 N. N.: Technische Dokumentation: Fast Laser Power Monitor FLPM. Gaggenau: Weidmüller, 1990
- 53 Loosen, P.; Beyer, E.; Herziger, G.; Kramer, R.: Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung. Teil 7: Praxis der Diagnostik von Hochleistungs- CO_2 -Lasern für die Fertigungstechnik. Feinwerktechnik & Meßtechnik 95 (1987) 4, 221-224
- 54 Lim, G. C.; Steen, W. M.: Measurement of the Temporal and Spatial Power Distribution of a High Power CO_2 Laser Beam. Optics and Laser Technology 6 (1982), 149-153
- 55 Loosen, P.; Beyer, E.; Kramer, R.: Diagnostik von CO_2 -Laserstrahlung. Laser und Optoelektronik 17 (1985) 3, 278-281
- 56 Gorriz, M.; Giesen, A.; Borrik, S.: Anmeldung zum Schutzrecht P 4012927.6-33 (1990): Meß-Verfahren und Vorrichtung zur dreidimensionalen Lageregelung des Brennpunktes eines Hochenergie-Laserstrahls
- 57 Wollermann-Windgasse et al.: Hochfrequenzangeregte CO_2 -Laser in der Industrie. In: Waidelich, W. (Hrsg): Optoelektronik in der Technik: Vorträge des 8. Int. Kongr. Laser 87. Berlin: Springer, 1987
- 58 Hibberd, H.: In Process Monitoring and Feedback Control. Proc. of 4th. Int. Conf. Lasers in Manufacturing (1987), 165-176
- 59 Hermanns, C.: Rechnergeführte Laserstrahlbeeinflussung zur Optimierung von Schneid-Schweiß-Ergebnissen: Vorträge der 4. Konferenz „Strahltechnik“ Halle: DVS, 1996, 29-33
- 60 Bea, M., Borik, S., Giesen, A.: Adaptive Optik für CO_2 -Hochleistungslaser. In: Optoelektronik in der Technik: Vorträge des 9. Int. Kongr. Laser 89, Berlin: Springer, 1989, 446

- 61 Bea, M.; Borik, S.; Giesen, A.: Schutzrecht DE 39 004 67 A1 (1990-07-26): Laserspiegelkopf
- 62 Hügel, H.; Bea, M.; Giesen, A.: Kombination Adaptiver Optiken zur voneinander unabhängigen Steuerung der Fokusslage und des Fokusradius. In: Laser '93 Bericht zum Fachseminar 'Prozessoptimierende Adaptive Optiken'. Röthenbach, 1993
- 63 Geiger, M.; Neubauer, N.; Hoffmann, P.; Hutfless, J.: Adaptive Beam Delivery for CO₂ Laser Material Processing. In: Mazumder, J. Conde, O.; Vilar, R.; Steen, W. (Hrsg.): Laser Processing: Surface Treatment and Film Deposition. Proc. of the NATO Advanced Study Institute, Sesimbra, Portugal, July 3-16, 1994. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995
- 64 Bär, K.; Freiesleben, B.; et al.: Piezoantriebene Adaptive Optiken für industrielle CO₂-Laserstrahlanlagen. In: Laser '93 Bericht zum Fachseminar 'Prozessoptimierende Adaptive Optiken'. Röthenbach, 1993
- 65 Hoffmann, P.; Schubert, S.; Geiger, M.; Kozlik, C.: Process Optimizing Adaptive Optics for the Beam Delivery of High Power CO₂ Lasers. In: Proc. Of the Conference OE/Technology '92". Boston, USA: 1992
- 66 Neubauer, N.; Hoffmann, P.: Verbesserte Wirtschaftlichkeit beim Laserstrahlschneiden durch den Einsatz Adaptiver Optiken. Eurolaser 3 (1994), 64-69
- 67 Beyer, E.; Gillner, A.: Sensorik und Regelung zur Prozessoptimierung bei der Laserstrahlbearbeitung. In: Laser '93 Bericht zum Fachseminar 'Prozessoptimierende Adaptive Optiken'. Röthenbach, 1993
- 68 Föllinger, O.: Regelungstechnik. Heidelberg, 1992
- 69 Biermann, S.: Untersuchungen zur Anlagen- und Prozessdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern. Fertigungstechnik-Erlangen Nr. 14, München: Hanser, 1991. Zugl.: Erlangen, Univ., Diss., 1991
- 70 Kapadia, P.: Theoretical Aspects of Laser Material Processing. In: Waidelich, W. (Hrsg.): Laser in der Technik: Vorträge des 11. Int. Kongr. Laser 93. Berlin: Springer, 1993
- 71 Gatzweiler, E.; Eischner: Process Monitoring and Process Control of Laser-Beam-Welding. In: Waidelich, W. (Hrsg.): Laser in der Technik: Vorträge des 10. Int. Kongr. Laser 91. Berlin: Springer, 1991
- 72 Eberl, G.: Abtragen mittels Laserstrahlung: Prozessanalyse und Regelungskonzept. In: Waidelich, W. (Hrsg.): Laser in der Technik: Vorträge des 10. Int. Kongr. Laser 91. Berlin: Springer, 1991
- 73 Sokolowski, W.; Beersiek, J.; Beyer, E.: Control of the Laser Welding Process by means of Spectroscopic Data. In: Waidelich, W. (Hrsg.): Laser in der Technik: Vorträge des 10. Int. Kongr. Laser 91. Berlin: Springer, 1991
- 74 Jurca: Online Monitor for the CO₂-Laser Welding Process. In: Waidelich, W. (Hrsg.): Laser in der Technik: Vorträge des 11. Int. Kongr. Laser 93. Berlin: Springer, 1993

- 75 Seidel, Sokolowski: Online Process in Laser-Beam -Welding by means of Power Regulation in RF-Excited CO₂-Lasers In: Waidelich, W. (Hrsg): Laser in der Technik: Vorträge des 11. Int. Kongr. Laser 93. Berlin: Springer, 1993
- 76 Eberl, G.; Kuhl, M.: Tiefenregelung beim Laserstrahlabtragen. In: Waidelich, W. (Hrsg): Laser in der Technik: Vorträge des 11. Int. Kongr. Laser 93. Berlin: Springer, 1993
- 77 Barkhausen: Excimer Laser: Process Diagnosis and Control for Removal Processes with Excimer-Laser-Radiation In: Waidelich, W. (Hrsg): Laser in der Technik: Vorträge des 11. Int. Kongr. Laser 93. Berlin: Springer, 1993
- 78 Zimmermann: Aspects for Quality-Assurance with a Plasma-Monitoring-System During Laser Beam Welding In: Waidelich, W. (Hrsg): Laser in der Technik: Vorträge des 11. Int. Kongr. Laser 93. Berlin: Springer, 1993
- 79 Miller, M.: Methods and Applications for Intensity Stabilisation of Pulsed and cw-Lasers from 257 nm to 10.6 µm. Proc. of the SPIE 1376 (1990), 180-191
- 80 Geissler, E; Bergmann, H. W.: Analytical Models for the Simulation of Laser Hardening. In: Proc of Euro. Sci. Laser Workshop Math. Sim. Lissabon 1989. Coburg: Sprechsaal Publ. Group, 1989, 73-88
- 81 Geissler, E.: Mathematische Simulation des temperaturgeregelten Laserstrahlhärtens und seine Verifikation an ausgewählten Stählen. Erlangen: Univ., Diss., 1993
- 82 Schlebeck, D.; Buchmann M.: The Use of Process Modelling of Laser Hardening in Close Limit Production. In: Waidelich, W. (Hrsg.): Laser in der Technik. Berlin: Springer 1991
- 83 Deinzer, G.: Qualitätssicherung in der Schweißtechnik In: Waidelich, W. (Hrsg): Laser in der Technik: Vorträge des 11. Int. Kongr. Laser 93. Berlin: Springer, 1993
- 84 Schubert, S.; Hutfless, J.; Geiger, M.: Focal Position Control Circuit for Laser Beam Welding using Adaptive Optics. In: Geiger, M. (Hrsg): Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderung an die Fabrik 2000: Vorträge des 12. Int. Kongr. Laser 95. Bamberg: Meisenbach, 1995, 336-367
- 85 Schubert, S.: Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von Adaptiven Optiken. Erlangen, Univ., Diss. im Druck
- 86 Neubauer, N.: Verfahrensoptimierte Laserstrahlbearbeitung mittels Adaptiver Optik. In: Geiger, M.; Kalisch, P.: Präzisionslaserstrahlfertigungstechnik für den Maschinenbau: Jahresbericht FORLAS. Erlangen, Bayerisches Laserzentrum, 1995, 47-56
- 87 Kauf, M.; Hutfless, J.; Geiger, M.: Improving Laser Ablation by Controlled Laser Beam Parameters. In: Schuöcker, D.: EuroLaser Academy: Proc. of the Seminar, Oct. 25th 1995. Wien, Österreich: Forschungsinstitut für Hochleistungsstrahltechnik, 1995
- 88 Kauf, M.; Schubert, S.; Hutfless, J.; Geiger, M.: Optimizing the Focus Parameters of CO₂ High Power Lasers by Closed-Loop-Control. In: Geiger, M. (Hrsg): Schlüssel-

- technologie Laser - Herausforderung an die Fabrik 2000. Bamberg: Meisenbach, 1995, 374-375
- 89 Topkaya, A.; Schmall, K. H. Majoli, R.: Noncontact Capacitive Clearance Control System for Laser Cutting Machines. Proc. of the SPIE 1024 (1988), 103-112
- 90 Tönshoff, H. K.; Heekenjann, P. B.; Overmeyer, L.: Autofokussensor für die Mikrobearbeitung. Laser und Optoelektronik 25 (1993), 60-65
- 91 Kauf, M.; Schubert, S.; Hutfless, J.; Geiger, M.: Closed-Loop-Control of the Focus Parameters of rf-excited CO₂ High Power Lasers. In: „Mechanik und Optik - Hochleistungslaser im Maschinenbau“ Saint Louis, Frankreich, 1995, 259-267.
- 92 Roemmp, M.; Hembd-Söllner, Ch.; Tiziani, H.; Eisele, R.; Voß, A.; Giesen, A.; Hügel, H.: Autofocus Sensor for CO₂ Laser Beam Welding. In: Proc. of the 5th European Conference on Laser Treatment of Materials ECLAT'94, Bremen, 1994. Bremen: DVS 163 (1994), 409-413
- 93 Tolle, H.: Mehrgrößen-Regelkreissynthese Band I & II. München, 1983
- 94 Korn, U.; Wilfert, H.-H.: Mehrgrößenregelungen. Berlin, 1982
- 95 Schlitt, H.: Regelungstechnik: Physikalisch orientierte Darstellung fachübergreifender Prinzipien. Würzburg, 1993
- 96 Blatt, F. J.; Schoeder, P. A.; Foiles, C. L.; Greig, D.: Thermoelectric Power of Metals. New York: Plenum Press, 1976.
- 97 Kaiser, A. B.; Uher, C.: Studies of High Temperature Superconductors. In: Narlikar, A. (ed.): Nova Science Vol. 7. New York, 1991, 353
- 98 Kohlrausch, F.: Praktische Physik. Stuttgart, 1968
- 99 Schieferdecker, H.: pers. Mitteilung
- 100 Onnes, H. K.: Comm. Leiden 120b (1911)
- 101 Bednorz, J. G.; Müller, K. A.: Z. Phys. B 64 (1987), 1373-1375
- 102 Zeuner S.: Atomlagenthermosäulen in Hochtemperatur-Supraleitern als schnelle Strahlungsdetektoren. Regensburg: Univ., Diss., 1994
- 103 J. D. Jorgensen: Physics Today, 44 (1991) 34
- 104 Schölch, H. P.; Fickenscher, T.; Redel, T.; Stetter, M.; Saemann-Ischenko, G.; Benker, W.; Hartmann, W.; Frank, K.; Christiansen, C.: Appl. Phys. A. 48 (1989), 397 - 400
- 105 Stark, R.: Die Pseudofunkenentladung als Quelle intensiver, gepulster Elektronenstrahlen und deren technologische Anwendung. Erlangen: Univ., Diss., 1995
- 106 Betz, J.: Herstellung, Eigenschaften, Anwendungen von dünnen Schichten aus YBa₂Cu₃O_{7-δ} und TlBaCuO. Regensburg: Univ., Diss., 1993
- 107 Kittel, Ch.: Einführung in die Festkörperphysik. München: Oldenbourg, 1993

- 108 Cohn, J. L.; Wolf, S. A.; Selvamanickam, V.; and Salama, K.: Phys. Rev. Lett. 66 (1991), 1098
- 109 Forro, L.; Raki, M.; Henry, J. Y.; and Ayache, C.: Solid State Commun. 69 (1989), 1097
- 110 Wang, Z. Z., Ong, N. O.: Phys. Rev. B 38 (1988), 7160
- 111 Li, L.; Bei-Hai, M.; Shu-Yuan, L.; Hong-Min, D.; and Dian-Lin, Z.: Europhys. Lett. 7 (1988), 555
- 112 Yu, R. C.; Naughton, M. J.; Yan, X.; Chaikin, P. M.; Holtzberg, F.; Greene, R. L.; Stuart, J.; and Davis, P.: Phys. Rev. B 37 (1988), 7963
- 113 Crommie, M. F.; Zettl, A.; Barbee III, T. W.; and Cohen, M. L.: Phys. Rev. B 37 (1988), 9734
- 114 Ma, H.; Xiong, G.; Wang, L.; Wang, S.; Zhang, H.; Tong, L.; Liang, S.; and Yan, S.: Phys. Rev. B 40 (1989), 9374
- 115 Hoffmann, P.: Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen. Fertigungstechnik-Erlangen Nr. 29, München: Hanser, 1991. Zugl.: Erlangen, Univ., Diss., 1991
- 116 N. N.: Betriebsanleitung Trumpf L 5000. Ditzingen: Trumpf GmbH + Co., 1987
- 117 Schutzrecht G 94 15 597.6: Atomlagen-Thermosäulen-Detektor
- 118 N. N.: Datenblatt: Thermoelektrischer Zeilensensor ZS-(2x8). Jena: Institut für Physikalische Hochtechnologie e. V. (IPHT), 1995
- 119 Heywang W.: Halbleiter-Elektronik, Sensorik. Berlin, 1984
- 120 N. N.: Trumpf TLF 1000/1500. Ditzingen: Trumpf GmbH + Co, 1987
- 121 Geiger, M.; Hoffmann, P.; Schubert, S.: Verfahrensgrundlagen zur Laserstrahlbearbeitung mit prozeboptimierenden Optiken. In: Geiger, M.; Hollmann, F. (Hrsg.): Strahl-Stoff-Wechselwirkung bei der Laserstrahlbearbeitung. Bamberg: Meisenbach, 1993, 103-108
- 122 N. N.: User Guide: TMS 320 C 3x. Texas Instruments, 1992
- 123 N. N.: Technical Reference and User Guide: PC/C 31. Loughborough, England Loughborough Sound Images Inc.
- 124 N. N.: Technical Reference Manual: 12-Bit 32-Channel Analogue Data Acquisition Card.: Loughborough Sound Images Inc.
- 125 Allgaier, K. H.: Ein Beitrag zur Theorie der stationären Felder in gekoppelten optischen Resonatoren mit Fehlanpassung. Karlsruhe, Univ., Diss., 1974
- 126 Abubaker, O.: Gekoppelte optische Resonatoren mit Berücksichtigung der Beugungsverluste. Karlsruhe, Univ., Diss., 1977
- 127 Herziger, G.: Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung. Teil 4: Absorption von CO₂-Laserstrahlung während der Bearbeitung. Feinwerktechnik & Messtechnik 92(1984) 3

-
- 128 Wilson, D. K.: Optical Isolators Cut Feedback in Visible and Near-IR Lasers. Laser Focus/Electro-Optics, Dec. 1988, 103-108
- 129 N. N.: Produktinformation Spektrum 48: TFP for Use at 45° AOI. Darmstadt: LOT ORIEL GmbH
- 130 Deinzer, G.; Otto, A.; Hoffmann, P.; Geiger, M.: Optimizing Systems for Laser Beam Welding. In: Geiger, M.; Vollertsen, F. (Hrsg.): Laser Assisted Net Shape Engineering. Bamberg: Meisenbach, 1994, 193-206
- 131 Siegman, A.: Lasers. Mill Valley, USA: Univ. Science Book, 1986
- 132 N. N.: Betriebsanleitung: Trumpf TLC 105. Ditzingen: Trumpf GmbH + Co.
- 133 Borik, S. et al.: Zur Bedeutung des Strahlparameterprodukts für das Propagationsverhalten von Hochleistungslaserstrahlen. Laser und Optoelektronik 26 (1994) 2
- 134 Siemon, H.; Kauf, M.; Otto, A.: Regelung der Laserstrahlparameter von CO₂ Hochleistungslasern mit hoher Dynamik. Laser Magazin (1997) im Druck
- 135 Haferkamp, H.; Bach, F. W.; Engel, K.; Homburg, A.; Seebaum, D.: Effects on Propagation of High Power CO₂ Laser Beams using Adaptive Optics. In: Proc. of the 2nd Workshop: Laser Beam Characterisation, 30.05. - 01.06.94, Berlin. Berlin, 1994
- 136 Neubauer, N.: Entwurf und Realisierung adaptiver Strahlführungssysteme für CO₂-Laserstrahlwerkzeugmaschinen. Erlangen, Univ., Diss. im Druck
- 137 Ripper, G. und Herziger, G.: Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung. Teil 5: Fokussierung von Laserstrahlung am Beispiel des CO₂-Lasers. Feinwerktechnik & Messtechnik 92 (1984) 6, 297-302
- 138 Eichler, J.; Eichler, H.-J.: Laser: Grundlagen, Systeme, Anwendungen. Berlin, 1991

Lebenslauf

Der Lebenslauf wird nicht veröffentlicht.

Reihe Fertigungstechnik Erlangen

Band 1

Andreas Hemberger

**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch
wissensbasierte Systeme**

208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 2

Detlef Classe

**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montage-
systeme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**

194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektiertung von Montagesystemen

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Kartoniert.

Band 4

Karsten Schlüter

**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz
der Simulationstechnik**

177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 5

Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern

168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 6

Rudolf Nuss

**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem
Laserstrahlschneiden**

206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 7

Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter
Montageanlagen**

194 Seiten, 89 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 8

Hans-Jürgen Wißmeier

**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-
Fließpreßmatrizen**

179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 9

Rainer Eisele

**Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der
Produktion**

183 Seiten, 86 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 10

Rolf Pfeiffer

**Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der
Schraubtechnik**

216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990. Kartoniert.

- Band 11
Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
201 Seiten, 82 Bilder. 1990. Kartoniert.
- Band 12
Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990. Kartoniert.
- Band 13
Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
XIII + 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990. Kartoniert.
- Band 14
Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
VIII + 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 15
Uwe Geißler
Material- und Datenfluß In einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 16
Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
XIV + 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. Kartoniert.
- Band 17
Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 18
Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
198 Seiten, 65 Bilder. 1991. Kartoniert.
- Band 19
Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 20
Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
XIV + 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 21
Egon Sommer
Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
188 Seiten, 102 Bilder. 1991. Kartoniert.
- Band 22
Georg Geyer
Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
192 Seiten, 112 Bilder. 1991. Kartoniert.

- Band 23
Rainer Flohr
Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
186 Seiten, 79 Bilder. 1991. Kartoniert.
- Band 24
Alfons Rief
Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
VI + 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 25
Christoph Thim
Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
188 Seiten, 74 Bilder. 1992. Kartoniert.
- Band 26
Roland Müller
CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992. Kartoniert.
- Band 27
Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
195 Seiten, 76 Bilder. 1992. Kartoniert.
- Band 28
Martin Hoffmann
Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
149 Seiten, 89 Bilder. 1992. Kartoniert.
- Band 29
Peter Hoffmann
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen :
Prozeführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen**
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992. Kartoniert.
- Band 30
Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
180 Seiten, 84 Bilder. 1992. Kartoniert.
- Band 31
Hubert Reinisch
Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
XI + 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. Kartoniert.
- Band 32
Brigitte Bärnreuther
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
XI + 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. Kartoniert.
- Band 33
Joachim Hutfless
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993. Kartoniert.
- Band 34
Uwe Günzel
Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung
XIV + 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 35
Bertram Ehmann
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener
Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**
XV + 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 36
Harald Kolléra
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems
für das Laserstrahlschneiden**
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993. Kartoniert.

Band 37
Stephanie Abels
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen
in einem integrierten Simulationssystem**
188 Seiten, 88 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 38
Robert Schmidt-Hebbel
**Laserstrahlbohren durchflußbestimmender
Durchgangslöcher**
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 39
Norbert Lutz
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung**
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994. Kartoniert.

Band 40
Konrad Grampp
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an
Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien**
178 Seiten, 88 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 41
Martin Koch
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung
in der Investitionsgüterindustrie**
169 Seiten, 68 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 42
Armin Gropp
**Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem
gepulsten Nd:YAG-Laser**
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 43
Werner Heckel
**Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung
mit dem Lichtschnittverfahren**
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 44
Armin Rothhaupt
**Modulares Planungssystem zur Optimierung
der Elektronikfertigung**
180 Seiten, 101 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 45
Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 46
Bodo Vormann
**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung
komplexer Blechblegeteile**
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 47
Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
144 Seiten, 75 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 48
Rainer Klotzbücher
**Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung
in flexiblen Fertigungssystemen**
156 Seiten, 62 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 49
Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
144 Seiten, 96 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 50
Jörg Franke
**Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)**
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 51
Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 52
Michael Solvie
Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 53
Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996. Kartoniert.

Band 54
Thomas Rebhahn
**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern –
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 55
Henning Hanebuth
Laserstrahlhardöten mit Zweistrahltechnik
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 56
Uwe Schönherr
**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen
mit kooperierenden Robotern**
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 57
Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 58
Markus Schultz
Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 59
Thomas Krebs
Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 60
Jürgen Sturm
**Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion**
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 61
Andreas Brand
**Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher
elektronischer Baugruppen (3D-MID)**
182 Seiten, 100 Bilder. 1997. Kartoniert

Band 62
Michael Kauf
**Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage**
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert

Band 63
Peter Steinwasser
**Modulares Informationsmanagement in der integrierten
Produkt- und Prozeßplanung**
190 Seiten, 87 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 64
Georg Liedl
**Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß
in der Elektronikproduktion**
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.