

Forschungsergebnisse

Optische Technologien

der Baden-Württemberg Stiftung gGmbH

Fokuslage-Überwachung und -Regelung mit Berücksichtigung
der thermisch induzierten Fokuslageverschiebung „FoControl“

Fokuslage-Überwachung und -Regelung mit Berücksichtigung der thermisch induzierten Fokuslageverschiebung „FoControl“

Im Rahmen des Forschungsprogramms „Optische Technologien“ der Baden-Württemberg-Stiftung gGmbH, forschen zwei Arbeitsgruppen des Instituts für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart an einer Methode, die thermisch induzierte Fokusverschiebung in Laseroptiken in Echtzeit zu erfassen und durch eine Regelung der Optikposition auszugleichen.

Motivation

Die Verfügbarkeit von Multi-Kilowatt-Hochleistungsfestkörperlasern mit exzellenter Fokussierbarkeit ($SPP \leq 2 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$) für die Lasermaterialbearbeitung führt zu einem zunehmenden Einfluss thermisch induzierter Fokuslageverschiebungen auf den Bearbeitungsprozess. Um diesen Einfluss zu minimieren, wurde im Projekt „FoControl“ ein Konzept zur Überwachung und Regelung der Fokuslage im Bear-

beitungsprozess entwickelt. Das Messsystem basiert auf aktiven Messlaserstrahlen, die dem Strahlengang des Hochleistungslasers folgen und somit den gleichen optischen Einflüssen unterliegen wie dieser. Die Form des von der Werkstückoberfläche rückgestreuten Lichtflecks, der durch die astigmatischen Messstrahlen erzeugt wird, wird mit Hilfe einer kamerabasierten Prozessüberwachung erfasst und in Echtzeit analysiert. Die gemessene Fokuslage von sechs Messstrahlen wird zur Regelung des Arbeitsabstandes herangezogen.

Auslegung der Faseroptik

Vorteilhaft an der Methode ist zum einen, dass anhand der Ellipsenlage direkt erkennbar ist, ob die Ist-Position oberhalb oder unterhalb der Soll-Position liegt, und zum anderen, dass sowohl die thermisch induzierte Fokusverschiebung als auch eine mechanische Fehlpositionierung des Fokus zur Werkstückoberfläche erfasst werden.

Ein zentrales Ziel bei der Auslegung des optischen Systems für die Online-Fokuslagemessung und -regelung war die koaxiale Anordnung der Messstrahlen im gesamten Bereich der Freistrahpropagation des Bearbeitungslaserstrahls. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Messstrahlen die thermisch induzierten Fokuslageverschiebungen in den Optiken vollständig erfassen. Dies macht jedoch

konsequente Einsatz von Mikrooptiken mit einem Durchmesser von lediglich 0,5 mm erforderlich. Weiterhin ist in unmittelbarer Nähe der Austrittsfläche der Hochleistungsfasers mit starker Bestrahlung durch Streulicht, Rückreflexionen und Prozessstrahlung zu rechnen. Daher wurden für die Mikrooptiken und deren Halter ausschließlich transparente und – so weit möglich – temperaturbeständige Materialien (z.B. Quarzglas) eingesetzt. Insbesondere werden, wie in Abbildung 2 rechts gezeigt, die Mikrooptiken in Quarzglaskapillaren mit einem Innendurchmesser von 0,52 mm und einem Außendurchmesser von 1,2 mm gehalten.

Ein weiteres Ziel der Auslegung war ein optimaler Arbeitsbereich für die Fokuslagemessung und -regelung; angestrebt wurde ein Messbereich von mindestens 6 mm, also beispielsweise von -4 mm bis $+2 \text{ mm}$ relativ zur nominellen Fokuslage des Bearbeitungsstrahls. In einem iterativen Prozess gelang schließlich eine befriedigende Auslegung der Strahlformungsoptiken für die Messstrahlen. Wie in Abbildung 3 zu erkennen, ist im Anschluss an die Singlemodefaser, die das Messlicht mit einer Wellenlänge von 845 nm zuführt, eine Gradientindex-(GRIN)-Linse mit einem Durchmesser von 0,5 mm und einer Länge von 3,34 mm angeordnet, die den austretenden Strahl nach 10,23 mm fokussiert. Diese GRIN-Linse sorgt dafür, dass der Strahldurchmesser während der Propagation im optischen System ausreichend klein bleibt. Direkt hinter der GRIN-Linse ist eine Zylinderlinse aus Quarzglas mit einem Radius von $R = 2 \text{ mm}$ und einer Länge von 1 mm im Strahlengang angeordnet, die für den gewünschten Astigmatismus sorgt. Die Zylinderlinsen wurden aus Quarzglasstäben mit einem Durchmesser von 500 μm hergestellt, an die eine Zylinderfläche anpoliert wurde.

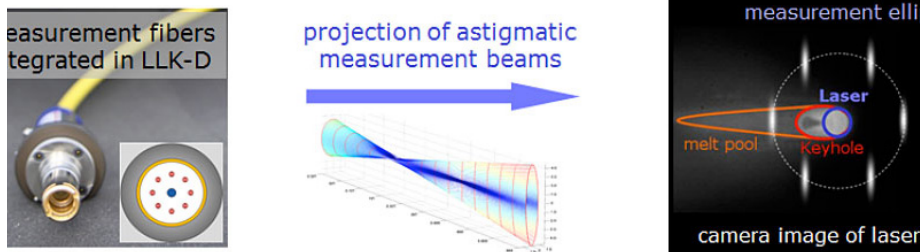


Abb. 1: Links: Lichtleitkabel mit integrierten Messfasern. Mitte: Abbildung der astigmatischen Messstrahlen auf das Werkstück. Rechts: Kamerabild des Schweißprozesses mit den Ellipsen der Messstrahlen.

beitungsprozess entwickelt. Das Messsystem basiert auf aktiven Messlaserstrahlen, die dem Strahlengang des Hochleistungslasers folgen und somit den gleichen optischen Einflüssen unterliegen wie dieser. Die Form des von der Werkstückoberfläche rückgestreuten Lichtflecks, der durch die astigmatischen Messstrahlen erzeugt wird, wird mit Hilfe einer kamerabasierten Prozessüberwachung erfasst und in Echtzeit analysiert. Die gemessene Fokuslage von sechs Messstrahlen wird zur Regelung des Arbeitsabstandes herangezogen.

eine Anordnung der Glasfasern, die die Messstrahlung zuführen, sowie der sich daran anschließenden Strahlformungsoptiken in unmittelbarer Nähe zur Hochleistungs-Glasfaser erforderlich. Der seitliche Versatz zwischen dem Bearbeitungsstrahl und den Messstrahlen sollte lediglich etwa 1 – 1,5 mm betragen, damit die Messflecken in ausreichendem geringem Abstand vom Bearbeitungsbereich auf dem Werkstück liegen. Dies führt zu einige Herausforderungen an das Design der Strahlformungsoptiken und deren Halterung. Aufgrund des extrem geringen seitlichen Platzangebots wurde der

Um den nutzbaren Bereich des astigmatischen Fokus in der gewünschten Weise in den Bereich des Fokus' des Bearbeitungsstrahls zu legen und zugleich die Endflächen der Mikrooptiken auf Höhe der Austrittsfläche der Hochleistungsfaser anordnen zu können, ist hinter der Zylinderlinse noch ein Quarzstab angeordnet.

Die zur Strahlpropagation durchgeführten Simulationsrechnungen ergeben, dass mit Hilfe der dargestellten Optik der geforderte Fokusbereich von ca. 6 mm abgedeckt werden kann. Durch Variation der Länge des Quarzstabs kann der Messbereich verschoben werden, was beispielsweise leicht gegeneinander verschobene Messbereiche ermöglicht, die gemeinsam einen größeren Messbereich abdecken, als mit einem einzelnen Messstrahl möglich ist. In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Simulationen für eine Länge des Quarzglasstabs von 8,2 mm dargestellt. Die schwarze Kurve zeigt die Kaustik des BearbeitungsLasers. Die grüne Linie zeigt den Strahlradius des Messstrahls in vertikaler Richtung und die blaue in horizontaler Richtung. Die rote Linie stellt das Verhältnis der beiden in logarithmischer Auftragung dar. Der Bereich, in dem die Kurve monoton und damit eindeutig ist, kann als Messbereich identifiziert werden und befindet sich in axialer Richtung von -5,5 mm bis +1 mm vom Fokus des Bearbeitungsstrahls; bei Verwendung eines 6,2 mm langen Quarzglasstabs ergibt sich ein Messbereich von ca. -4 mm bis +1 mm.

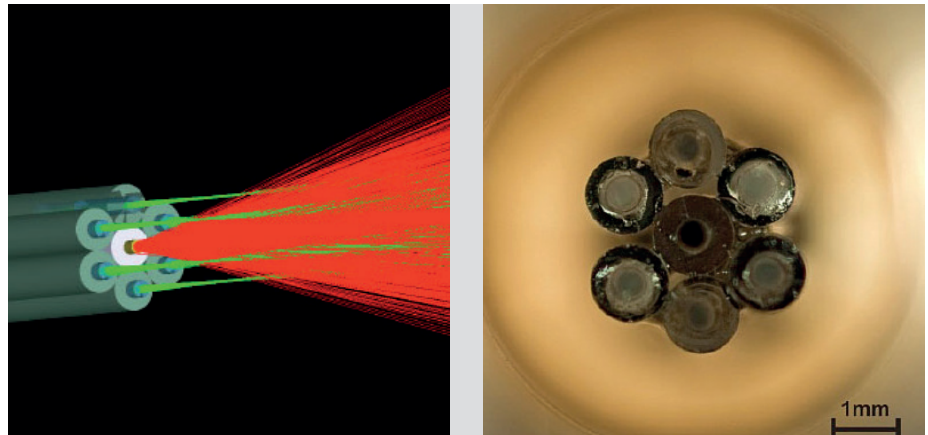


Abb. 2: Links: Schema der sechs Mikrooptiken zur Formung der über Fasern zugeführten Messstrahlen gruppiert um die Hochleistungsfaser. Rechts: Photographische Draufsicht auf die realisierte Anordnung.

Fertigung und Test des Labormusters der Faseroptik

Das zunächst angestrebte Verschweißen („Spleißen“) sämtlicher optischer Komponenten mit Hilfe eines Faserspleißgerätes erwies sich aufgrund der begrenzten thermischen Belastbarkeit der verwendeten GRIN-Linsen als nicht durchführbar; GRIN-Linsen aus Quarzglas, die sich verschweißen lassen, besitzen keine ausreichende optische Qualität. Die schließlich gewählte Lösung, die Komponenten in Kapillaren einzuschieben, erübrigt eine Justage und erlaubt es, die Komponenten an ihrem Umfang, also außerhalb des Strahlengangs, zu fixieren. Um die Singlemodefasern, die einen Außendurchmesser von 125 µm besitzen, gemeinsam mit den Mikrooptiken in Kapillaren mit 520 µm Innendurchmesser halten zu können, wurden diese in weitere Kapillaren mit 130 µm Innendurchmesser und 500 µm Außendurchmesser eingeschoben.

Die Montage der Mikrooptiken erfolgte mit Hilfe eines Faserspleißgeräts, dass in Kombination mit speziellen Führungselementen für die einzelnen Komponenten eine genaue Ausrichtung zur Kapillare und damit ein beschädigungsfreies Einführen der Optiken ermöglicht. Zunächst wurde das Verschweißen der Mikrooptiken mit der als Halter dienenden Kapillare untersucht. Hierbei wurde angestrebt, die Kapillaren an unkritischeren Punkten kollabieren zu lassen. Auf diese Weise konnte in einem Arbeitsschritt sowohl die Singlemodefaser mit der 500 µm-Kapillare, als auch mit der 1200 µm-Kapillare verbunden werden. Für das alternativ untersuchte Kleben wurde ein UV-härtender Klebstoff verwendet, der speziell für optische Anwendungen ausgelegt ist und eine hohe Transparenz bei der Wellenlänge des BearbeitungsLasers (1030 nm) aufweist. Durch einen geeigneten Auftrag auf die Komponenten konnte ein Eindringen des Klebstoffs in den Strahlengang vermieden werden. Nach der Montage der einzelnen mikrooptischen Baugruppen wurden diese durch schrittweises Verkleben in speziellen Halterungen zu einem Bündel aus 6 Optiken mit einer zentralen Kapillare, durch die die Hochleistungsfaser eingeschoben wird, zusammengefügt.

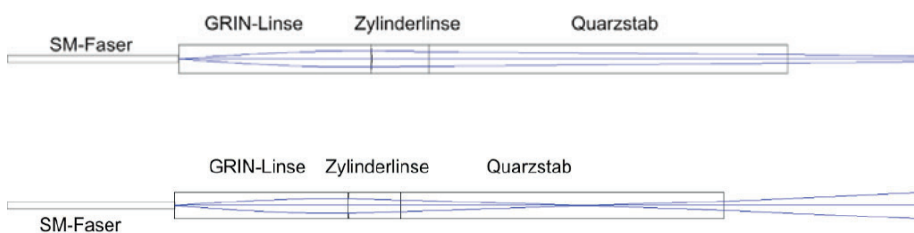


Abbildung 3: Simulierter Strahlengang innerhalb der Strahlformungsoptik für den Messstrahl, dargestellt in x-Richtung (oben) und y-Richtung (unten).

Gesamtsystem

Das kamerabasierte Messsystem zur Vermessung der oben beschriebenen

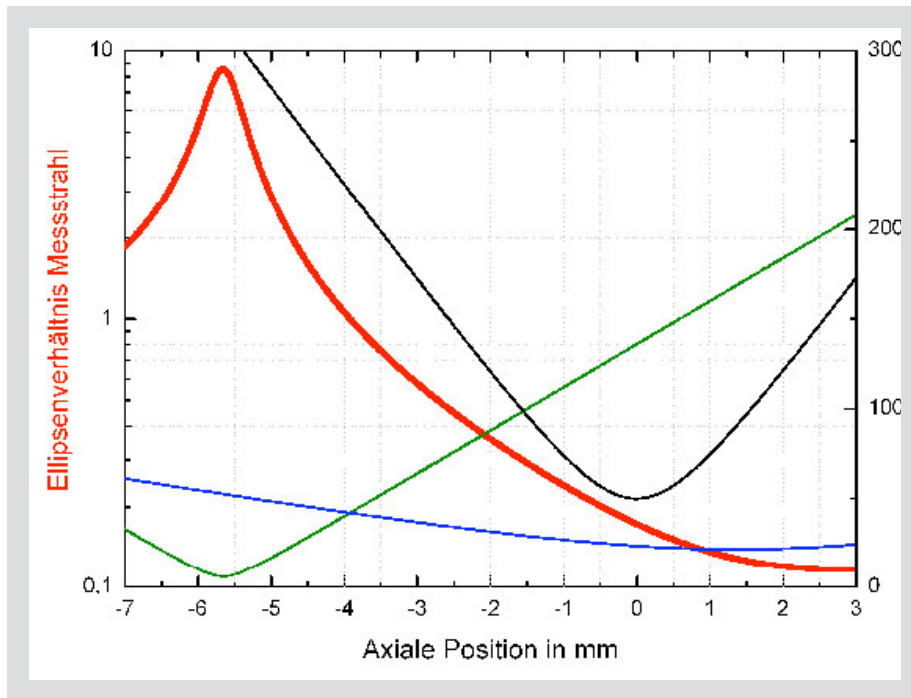


Abb. 4: Simulierte Stahlpropagation im Bereich um die nominelle Fokusslage ($z = 0$) des Bearbeitungsstrahls für einen 8,2 mm langen Quarzglasstab; dargestellt sind die Kautistik des Bearbeitungsstrahls (schwarz), der Strahlradius des Messstrahls in vertikaler (grün) und in horizontaler Richtung (blau), sowie das Verhältnis der beiden Radien in logarithmischer Auftragung (rot).

Ellipsen wurde in der Programmier- und Laufzeitumgebung „LabVIEW“ umgesetzt. Die Software ist in der Lage, durch Bildauswertung der sechs Messstrahllellipsen Lagesollwerte zu generieren und die Position der Optik über eine motorische Achse zu korrigieren. Der mechanische Aufbau des Systems und die Oberfläche der Regelsoftware mit den sechs Messstrahllellipsen ist in Abbildung 5 zu sehen. Die Zykluszeit von Bildeinzug bis zur Ausgabe der Lagesollwerte liegt bei etwa 13 ms bzw. 77 Hz. Diese Leistung wurde auf einem Intel Core-i7 980 erzielt und ist für die meisten Prozesse ausreichend schnell. In Experimenten zeigte sich, dass die

Messstrahlen vom Werkstück teilweise gestreut und teilweise reflektiert werden. Da der spiegelnde Reflex keine Information über die Fokusslage enthält und zu Falschmessungen führen kann, sollte dieser durch leichte Verkippung des Werkstücks vom Strahlengang der Kamera ferngehalten werden. Weiterhin entstehen aufgrund der Kohärenz des Messstrahls bei der Streuung am Werkstück statistische Intensitätsschwankungen, sogenannte Speckles. Zwar werden diese durch das Verfahren des Werkstücks in Verbindung mit der Belichtungszeit der Kamera teilweise „ausgemittelt“; dennoch beeinträchtigen sie die Messgenauigkeit erheblich.

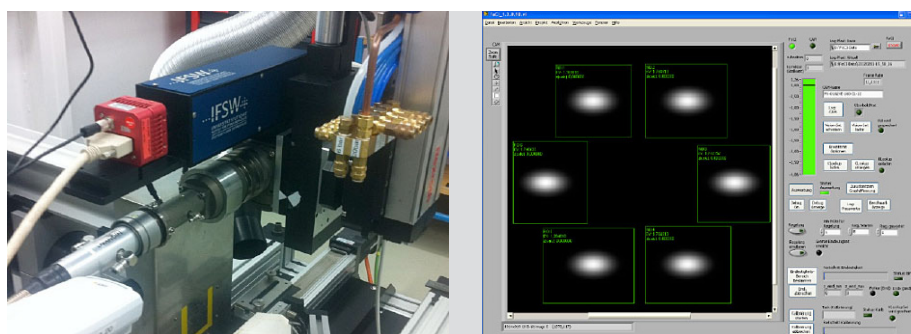


Abb. 5: Links: Laserbearbeitungskopf mit Lichtleitkabel und montierter Kamerabeobachtung auf einer elektromotorischen Z-Achse. Rechts: Benutzerinterface der Regelungssoftware mit den sechs Ellipsen.

In der Bildauswertung musste deshalb teilweise großer Aufwand für die Filterung der Bilddaten getrieben werden, um den Einfluss der Speckle-Muster zu minimieren. Weiterhin lässt sich der neben den Messstrahlen sichtbare Schweißprozess, trotz spektraler Filterung nicht vollständig unterdrücken. Durch entsprechende Maskierung der Bilddaten und einer adaptiven Hintergrundkorrektur konnte der Einfluss durch das Prozessleuchten jedoch auf ein beherrschbares Maß reduziert werden. Die abschließende Charakterisierung des Messsystems ergab Messgenauigkeiten im Bereich von 0,05 mm bei gut streuenden Oberflächen, bis hin zu 0,2 mm bei stark spiegelnden Werkstücken.

Damit konnte innerhalb des Projekts der Prototyp eines Mess- und Regelsystems entwickelt und realisiert werden, der grundsätzlich die benötigte Präzision und Robustheit aufweist, um eine Fokusslage während eines laufenden Laserprozesses zu ermöglichen.

Kontakt

Dipl.-Ing. Felix Abt
 Institut für Strahlwerkzeuge IFSW
 Pfaffenwaldring 43
 70569 Stuttgart

Tel.: +49 711 685-69760
 E-Mail:
 felix.abt@ifsw.uni-stuttgart.de
 www.ifsw.uni-stuttgart.de

Dr. Andreas Voß
 Institut für Strahlwerkzeuge IFSW
 Pfaffenwaldring 43
 70569 Stuttgart

Tel.: +49 711 685-66854
 E-Mail:
 andreas.voss@ifsw.uni-stuttgart.de
 www.ifsw.uni-stuttgart.de