

Wenn es auf jeden Laserpuls ankommt

Neuartige Messsysteme ermöglichen Einzelpulsaufgelöste Bestimmung von Strahlabmessungen und Strahlage bei Messraten von 200 kHz

Eine Kette ist nur so stark wie ihr schwächstes Glied. Bei Anwendungen in der Lasermaterialbearbeitung kann man sich in vielen Fällen keine Unregelmäßigkeiten des Werkzeugs Laserpuls erlauben. So müssen Pulsenergie, Auftreffpunkt und Strahldurchmesser für jeden einzelnen Laserpuls stimmen, damit z.B. eine produzierte Isolationsspur bei der Kantenisolation von Solarzellen auch tatsächlich ihre Funktion erfüllt. Damit man bei keinem einzigen der vielen Millionen zur Bearbeitung großer Flächen notwendigen Pulse eine mögliche Abweichung verpasst, hat das Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) nun mit Hilfe eines neuartigen Messverfahrens ein System entwickelt, mit dem man bei Pulsrepetitionsraten von bis zu 200 kHz die Strahlabmessungen, die Lage und die Energie eines jeden einzelnen Pulses erfassen kann. So kann ggfs. ein automatisierter Eingriff in den Bearbeitungsprozess ausgelöst werden oder frühzeitig in der Prozesskette vor fehlerhaften Teilen gewarnt werden. Zudem ist das System sehr kostengünstig zu realisieren und entspricht den Vorgaben der Norm ISO 11146.

Das hier vorgestellte Messverfahren nutzt neuartige lateral inhomogene Transmissionsfilter in Verbindung mit Photodioden und einer Elektronik-einheit, welche das Signal für einen handelsüblichen PC mit Datenerfassungskarte zur Verfügung stellt.

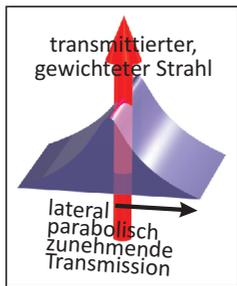
Aufbau des Messsystems

Das Geheimnis des Messverfahrens steckt in den Filtern.

Ihre lateral parabolische Transmissionscharakteristik bildet auf optischen Wege die quadratische Gewichtungsfunktion im Zähler der Funktion zur Berechnung des zweiten Moments der Leistungsdichteverteilung (siehe Infobox „Strahldurchmesser“). Die Gewichtung geschieht in dem kurzen Augenblick, wo das Licht den Filter passiert.

Die notwendige Integration über die Fläche findet durch die vollflächige Erfassung der durch den Filter gewichteten Leistungsdichteverteilung durch die Fläche der Photodiode statt.

Um Fehler durch zeitlichen Jitter oder andere Timingprobleme auch bei der Messung



Parabolischer Transmissionsfilter

von ultrakurzen Pulsen zu vermeiden, wird das Signal noch analogelektronisch zeitlich integriert und dann mittels eines Sample&Hold Gliedes einer PC-basierten Datenerfassung zur Verfügung gestellt.

Dieses Signal muss nur noch durch das Referenzsignal einer Photodiode, auf welche der ungefilterte Strahl fällt, dividiert werden um nach systembedingt notwendiger Skalierung und Abzug eines Offsets die Strahl-

messung eines jeden einzelnen Pulses zu erhalten. Da die aufwändige Gewichtung über den gesamten Strahlquerschnitt schon instantan auf optischen Wege und die Integration durch die Photodiodenfläche geschieht, bleiben lediglich noch einfache mathematische Operationen für *einen einzigen* Wert numerisch (oder wahlweise analogelektronisch) durchzuführen, um die Strahlabmessung zu erhalten. Im Vergleich dazu sind bei kamerabasierten Messungen (neben der

Übertragung von großen Datenmengen von Kamera zu PC) solche und andere Operationen für *jeden einzelnen* der Millionen Pixel notwendig. So wird deutlich, warum das filterbasierte Messverfahren sehr hohe Geschwindigkeiten erreichen kann.

Charakterisierung des Messsystems: Einzelpulsauflösung

Zur Charakterisierung des Messsystems stand ein 60 W Pikosekundenlaser ($t_p = 5$ ps) mit Repetitionsraten von 5 bis 206 kHz zur Verfügung. Dazu konnte mittels einer zeitlich zum Laser synchronisiert schaltbaren



Messkopf mit Filter

Pockelszelle und einem Polarisationsstrahlteiler für jeden einzelnen Puls ein Durchgang durch ein Teleskop ein- oder ausgeschaltet werden. So waren beliebige Abfolgen mit Pulsen großen (ca. 0,8 mm) und kleinen (ca. 0,4 mm) Strahldurchmessers mit Repetitions-

raten zwischen 5 und 206 kHz programmierbar. Mit ihnen konnte die zeitliche Mess-Auflösung des Systems auf einzelne Pulse charakterisiert werden.

Bei den Messungen wiesen Rauschen und Fluktuationen im Messergebnis einen Zusammenhang mit der Repetitionsrate und der Abschwächung des optischen Eingangssignals auf, hielten sich auch bei hohen Repetitionsraten von 206 kHz und starker Abschwächung mit einer Standardabweichung von unter 3% in einem kaum wahrnehmbaren Rahmen. Bei dem Wechsel von einem Puls mit großer zu einem mit kleiner Strahlabmessung (und andersherum) zeigt sich bei sehr hohen Repetitionsraten (mehr als 3 Größenordnungen höher als von herkömmlichen Messsystemen erfassbar) durch eine nicht-optimal angepasste Auslöschungscharakteristik des analogelektronischen Integrators ein Über-

Strahldurchmesser und Strahlabmessungen

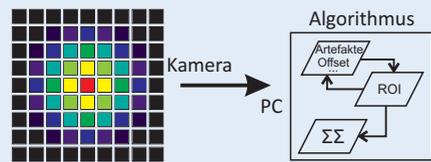
Der Strahldurchmesser ist ein zusammenfassendes Maß dafür, wie die Leistung eines Laserstrahls quer zu seiner Ausbreitungsrichtung über den Raum verteilt ist. Oft wird er entlang einer vorgegebenen Achse (z.B. x- oder y-Achse) betrachtet; dann spricht man von der Strahlabmessung. Da in der Regel die Leistungsdichte eines Laserstrahls nicht an einer Stelle abrupt auf null abfällt, wenn man sich aus dem Zentrum des Strahls nach außen bewegt, widerspricht die Definition des Wortes „Durchmesser“ hier denjenigen Vorstellungen, welche wir vom „Durchmesser“ von materiellen Dingen, z.B. einem Stab, haben. Bei Laserstrahlen ergibt sich die Abmessung d_x gemäß ISO 11146 über die Berechnung des zweiten zentrierten Moments der Leistungsdichteverteilung $I(x,y)$:

$$d_x = 4\sqrt{\langle x^2 \rangle} \quad \text{mit dem zweiten Moment:} \quad \langle x^2 \rangle = \frac{\iint (x - \langle x \rangle)^2 \cdot I(x,y) \, dx \, dy}{\iint I(x,y) \, dx \, dy}$$

Beim Gauß-Grundmode Strahl ist die Leistungsdichte an der Stelle des Strahldurchmessers auf I_0/e^2 abgefallen. 86% seiner Leistung befinden sich innerhalb des Durchmessers, der Rest außerhalb. Dies ist je nach Form der Leistungsdichteverteilung unterschiedlich.

Messung des Strahldurchmessers: Vergleich von zwei gebräuchlichen mit dem neuartigen filterbasierten Verfahren

Kamerabasierte Messung



Dieses Verfahren führt die mathematischen Anweisungen aus der Norm diskretisiert numerisch durch: Die laterale Leistungs-dichte-Verteilung des Strahls wird mit Hilfe einer - sowohl in Anzahl der Pixel wie auch Dynamik hochauflösenden - Kamera erfasst und an eine Software übergeben. Mit ausgeklügelten Algorithmen werden Artefakte und störende Effekte von z.B. Umgebungslicht, Offset oder Rauschen eliminiert, sowie das zweite Moment - und damit der Strahldurchmesser - bestimmt. Durch die notwendigerweise entstehenden großen Datenmengen und die aufwändigen Algorithmen ist das System in puncto Geschwindigkeit stark begrenzt. Je nach Güte der Algorithmen und Kamera können aber sehr genaue Messergebnisse erzielt werden. Deswegen wird dieses Verfahren als Referenz verwendet.

sprechen zwischen vorangegangenem und aktuellem Puls, welches je nach Repetitionsrate zwischen 3% und in extremen Fällen bis zu 23% der Schritthöhe zwischen kleiner und großer Puls-Strahlabmessung betragen kann. Da diese Abweichung systematisch ist, kann sie durch entsprechende Skalierung nivelliert werden. Außerdem ist eine Anpassung des Timingverhaltens des Integrators auf die Repetitionsrate möglich, mit denen dieses zeitliche Übersprechverhalten verhindert wird. Die Ergebnisse zeigen, dass der korrekte Strahldurchmesser eines jeden einzelnen Pulses lückenlos auch bei Pulszügen von vielen Stunden Dauer erfasst werden kann.

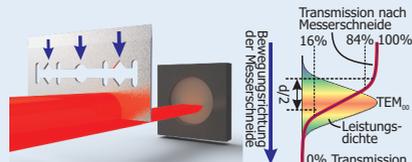
Charakterisierung des Messsystems: Messgenauigkeit

Um zu überprüfen, ob die gemessenen Strahlabmessungswerte auch der Realität entsprechen, wurden nun fokussierte Strahlen an verschiedenen Stellen ihrer Kaustik vermessen und mit den Ergebnissen einer kamerabasierten Messung vergli-

	Kamera	Messerschneide	Filter
Normgerecht	ja	eingeschr.	ja
Akkurat für viele M ²	ja	eingeschr.	ja
Feldvert. darstellbar	ja	nein	nein
Größter : kleinster Ø	>100 : 1	>10000 : 1	>30 : 1*
Max. Messrate / Hz	ca. 10 .. 100	ca. 10	>206000*
Kosten / €	ca. 10 ³ .. 10 ⁴	ca. 10 ³ .. 10 ⁴	ca. 10 ² .. 10 ³

* Hier vorgestellte Messung. Prinzipiell mögliche Werte liegen höher.

Messerschneideverfahren/Clip-Value



Ein Teil des Strahls wird (z.B. mit einer beweglichen Messerschneide oder Nadel) abgeschattet und die transmittierte Leistung in Abhängigkeit der Position der Messerschneide gemessen. Für eine bekannte, vorgegebene Form der Leistungsdichteverteilung (z.B. für den Gauß-Grundmode oder einen bekannten anderen Mode) ist der Zusammenhang zwischen relativer Messerschneidenposition und anteilig transmittierter Leistung bekannt: Von dem geometrischen Abstand zweier Positionen vorgegebener Transmission (z.B. 84% und 16%) kann auf den Strahldurchmesser geschlossen werden. Ist die Form der Leistungsdichteverteilung nicht bekannt, nicht korrekt berücksichtigt oder ändert sie sich, liefert dieses Verfahren sehr ungenaue Ergebnisse. Wegen den sich bewegenden Teilen ist es zudem langsam.

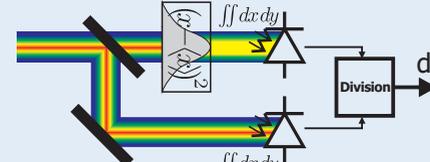
chen. Dabei wurde die Charakteristik des Strahls bzw. der Pulse zeitlich konstant gehalten, da das kamerabasierte System natürlich keine hinreichende Zeitauflösung besitzen konnte. Bedingt durch die endliche laterale Ausdehnung der Filter existiert eine obere Grenze, und bedingt durch Fertigungsungenauigkeiten in Bezug auf die genaue Kontur des Filters eine untere Grenze für die akkurat zu messenden Strahlmessungen. Zur Einhaltung eines Unterschieds der Messwerte von geringer als 5% zu dem Referenzverfahren beträgt das Verhältnis dieser beiden Grenzen 30:1; verglichen zu einem Wert von ca. 100:1 bei kamerabasierten Messsystemen (bedingt durch die endliche Größe des Kamerachips im Vergleich zur Pixeldichte) stellt dies schon einen für die Praxis gut ausreichenden

Wert dar, welcher durch ausgereifere Fertigungsverfahren für die Filter noch deutlich gesteigert werden kann.

Pulsenergie und Strahlage

Die Überwachung der Pulsenergie eines jeden Pulses wird vom Messsystem über Bestimmung des Referenzsi-

Messung mit Transmissionsfiltern



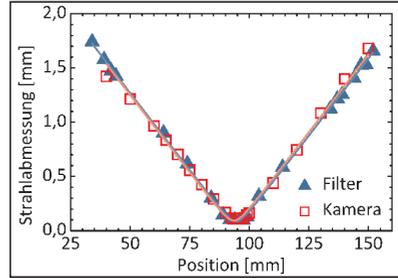
Mit Hilfe eines Filters, der eine besondere lateral inhomogene Transmissionscharakteristik aufweist, geschieht - auf optischen Wege - instantan die für die Erfassung des zweiten Moments notwendige Gewichtung der eintreffenden Leistungsdichteverteilung des Strahls. Das transmittierte gewichtete Licht und ein Referenzsignal werden mit jeweils einer Photodiode erfasst. Der Strahldurchmesser ergibt sich aus der Division beider Signale und systembedingt mit Skalierung und Abzug eines Offsets. Diese mathematischen Operationen kosten nur sehr wenig Rechenzeit. Das Verfahren ist normgerecht und liefert genaue Ergebnisse auch für unterschiedlichste Leistungsdichteverteilungen. Es ist in puncto Geschwindigkeit lediglich durch die der Photodioden und Elektronik bzw. Datenerfassung begrenzt.

gnals schon mitgeliefert, während eine Strahlpositionsmessung mittels spezieller Erster-Moment-Filter oder aber mittels einer Platinen-Umrüstung mit einer handelsüblichen ortsaufauflösenden Photodiode gelöst wird.

Zusammenfassung

Mit dem neuartigen Messverfahren mit Transmissionsfiltern lassen sich um mindestens drei Größenordnungen schnellere normgerechte Messungen mit sehr hoher Genauigkeit auch für wechselnde Leistungsdichteverteilungen durchführen. Das Messsystem ist einfach und sehr kompakt. Es kommt ohne bewegliche Teile aus und ist wegen seiner geringen Kosten auch für den Einsatz z.B. innerhalb von Lasermaterialbearbeitungsmaschinen als Online-Strahlüberwachung geeignet.

Autor:
Dipl.-Ing. Johannes Früchtenicht
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 43
70569 Stuttgart
Tel.: +49 (0)711 685 69750
fruechtenicht@ifsw.uni-stuttgart.de



Vergleichsmessung derselben Kaustik mit Transmissionsfilter- und kamerabasiertem Messsystem