

(19)



REPUBLIK
ÖSTERREICH
Patentamt

(10)

Nummer:

AT 406 423 B

(12)

PATENTSCHRIFT

(21) Anmeldenummer: 2163/97
(22) Anmeldetag: 22.12.1997
(42) Beginn der Patentdauer: 15.09.1999
(45) Ausgabetag: 25.05.2000

(51) Int. Cl.⁷:

G01J 3/443

B23K 26/04

(30) Priorität:

DE 4206499C2 EP 0811453A2

(73) Patentinhaber:

FORSCHUNGSINSTITUT FÜR LASERBAU
UND LASERBEARBEITUNG DER TU-WIEN
A-1030 WIEN (AT).

(72) Erfinder:

PENZ ANDREAS DR.
WIEN (AT).
FAZENY STEPHAN DIPL.ING.
WELS, OBERÖSTERREICH (AT).
WEINGARTNER WENDELIN DIPL.ING.
WIEN (AT).

(54) **SENSORSYSTEM ZUR ERFASSUNG VON TEMPERATUR UND POSITION DES
SCHMELZBADES BEI DER LASERMATERIALBEARBEITUNG**

(57) Das erfindungsgemäße Verfahren basiert auf der chromatischen Aberration der Bearbeitungslinse (1) in der Lasermaterialbearbeitung. Die Linse (1) erzeugt je nach Wellenlänge Bildpunkte des Schmelzbades in einer gewissen Entfernung. Wird an einem bestimmten Punkt die Farbe des Bildes bestimmt, so kann auf die Position der Schmelze bezüglich der Linse rückgeschlossen werden. Weiters kann durch Bestimmung der Wellenlänge des Emissionsmaximums gleichzeitig auf die Temperatur der Schmelze rückgeschlossen werden.

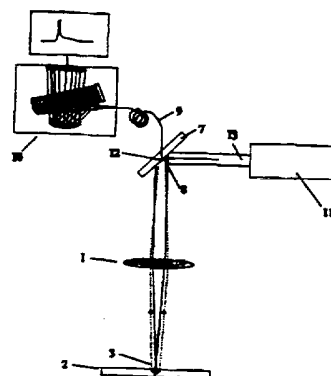


Fig.2

AT 406 423 B

Bei der abtragenden Lasermaterialbearbeitung wird durch einen auf die Oberfläche des zu bearbeitenden Werkstücks fokussierten Laserstrahl Material aufgeschmolzen und durch eine geeignete Gasströmung durch Überdruck oder Unterdruck ausgetrieben. Durchdringt der Laserstrahl das Werkstück, so wird vom Laserschneiden gesprochen, ansonsten vom Laserabtragen. Beim Laserschweißen werden zwei Werkstückteile zugleich an der Nahtstelle aufgeschmolzen und so miteinander verbunden. Bei auftragenden Laserverfahren werden zusätzlich Werkstoffe zugerührt, aufgeschmolzen und so mit dem Werkstück verbunden. Wird das Werkstück umgeschmolzen, legiert ö.ä., spricht man von Oberflächenbehandlung durch Laserstrahlen. Soll bei diesen Bearbeitungsverfahren ein System zur Prozeßbeobachtung, -kontrolle oder -regelung eingesetzt werden, so sind die Temperatur des Schmelzbades und dessen Position relativ zum Fokus des Bearbeitungsstrahls die wichtigsten zu messenden Prozeßparameter. Zur Messung des Abstandes des Schmelzbades bzw. der Werkstückposition gibt es mehrere gebräuchliche Möglichkeiten wie taktile und kapazitive Messung, Triangulation oder Ausnutzung der chromatischen Aberration:

Die einfachste Anordnung besteht aus einem taktilen Sensor wie einem mechanischem Fühler oder einem Laufrad. Soll jedoch mit einem derartige taktilen Sensor eine komplexe Werkstückoberfläche vermessen werden, so wird die punktweise Messung sehr zeitaufwendig und kann nur off-line durchgeführt werden. Außerdem sind diese Methoden nur bei bestimmten Geometrien einsetzbar. Bei der kapazitiven Abstandsmessung wird die Tatsache ausgenutzt, daß sich die Kapazität zwischen dem Bearbeitungskopf und dem Werkstück mit deren Abstand voneinander ändert. Durch Messung der Kapazitätsänderung kann so auf eine Abstandsänderung geschlossen werden. Nachteilig bei dieser Methode ist, daß sie dann nicht eingesetzt werden kann, wenn eine Plasmawolke über dem Schmelzbad entsteht, und daß weder tiefe dreidimensionale Oberflächen noch einzelne, örtlich genau bestimmte Punkte aufgenommen werden können. Bei der Triangulationsmessung mit kohärentem Licht wird ein Hilfslaser eingesetzt, der koaxial oder seitlich auf die zu erfassende Stelle des Werkstücks gerichtet und dort diffus reflektiert wird. Mittels eines positionsempfindlichen Detektors wird diese kohärente Rückstrahlung aufgenommen und daraus die Position des Auftreffpunktes bestimmt. Hier wird die mögliche Meßauflösung bei Einsatz von praktikablen Optiken durch das Auftreten von sogenanntem Speckle-Rauschen beschränkt, einem Störeinfluß durch Interferenzerscheinungen durch Oberflächenrauigkeit. Ein verbesserter Ansatz zu dieser Methode ist die Triangulationsmessung unter Verwendung der inkohärenten Schmelzbadstrahlung, wodurch sowohl Fehler durch Interferenzerscheinungen vermieden werden können als auch der Leuchtfleck möglichst klein gehalten werden kann (vgl. DE 42 06 499 C2). Nachteilig bei diesem Verfahren ist die starke Justierempfindlichkeit des Systems und die schwierige Kompensation der Auswirkungen einer sich ändernden Leuchtfleckgröße. Eine andere Methode nutzt den wellenlängenabhängigen Brechungsindex, d.h. die chromatische Aberration der Bearbeitungslinse aus (vgl. EP 0811 453 A2). Hier wird die Rückprojektion der Schmelzbadstrahlung durch die Bearbeitungslinse auf die Apertur der Glasfaser für den Bearbeitungslaserstrahl gemessen, indem diese Strahlung, die durch die Glasfaser in den Resonator geleitet wird, dort ausgekoppelt wird und in zwei Frequenzbänder im sichtbaren ($0.3-0.7 \mu\text{m}$) und infraroten ($1.1-1.6 \mu\text{m}$) Bereich geteilt wird. Die Schmelzbadstrahlung wird schließlich in diesen beiden Bereichen gemessen und aus dem Verhältnis der beiden Signale eine Regelgröße zur Abstandsregelung gewonnen. Diese Vorgehensweise hat den Nachteil, daß durch die Messung von zwei Frequenzbändern der Schmelzbadstrahlung die Auflösung als auch die Linearität gering ist, sowie diese Meßsignale stark von der Temperatur des Schmelzbades abhängen. Ebenso ist es nicht möglich, auf diese Art den Absolutabstand zwischen Linse und Schmelzbad zu messen.

Vorliegende Erfindung stellt eine Verbesserung der letztgenannten Meßmethode dar, indem mittels eines Spektroskops oder Monochromators die Farbe des Bildpunktes des Schmelzbades in einem fixen, von der Bearbeitungsoptik entfernten Abstand gemessen wird. Mit derselben Meßvorrichtung kann auch die gesamte Strahlungsemission des Schmelzbades spektral aufgelöst gemessen werden. Dadurch wird sowohl eine genaue, von den Prozeßparametern unabhängige Abstandsmessung als auch Temperaturmessung des Schmelzbades möglich.

Die gegenständliche Erfindung basiert auf den wellenlängenabhängigen Fokussierungseigenschaften der Bearbeitungsoptik bei der Lasermaterialbearbeitung. Der Rohstrahl aus einer Laserquelle wird im einfachsten Fall durch die sogenannte Bearbeitungslinse auf ein Werkstück fokussiert und erwärmt am Auftreffpunkt das Werkstück. Dieses wird dadurch in der erwärmten Zone zur Emission von inkohärenter Strahlung angeregt. Die Wellenlänge der Emission mit der

höchsten Strahldichte hängt unter anderem von der Temperatur ab. Diese Strahlung trifft auch auf die Bearbeitungslinse und wird von ihr entgegen der Richtung des Bearbeitungslaserstrahls fokussiert. Aufgrund des wellenlängenabhängigen Brechungsindex besitzt die Bearbeitungslinse für verschiedene Wellenlängen verschiedene Fokussierungseigenschaften (chromatische Aberration). Dies bedeutet, daß der Bildpunkt der erwärmten Zone (z. B. Schmelzbad) je nach Wellenlänge in verschiedener Entfernung von der Bearbeitungslinse liegt. So liegt z. B. der grüne Bildpunkt des Schmelzbades näher bei der Bearbeitungslinse als der rote. Im Bildpunkt ist die Intensität des gerade fokussierten Strahlungsanteils um ein vielfaches größer als die der restlichen Strahlung.

Verschiebt man das Werkstück und damit die emittierende Oberfläche bezüglich der Bearbeitungslinse, so verschieben sich auch die Orte der Bildpunkte der verschiedenen Wellenlängen. Nimmt man also einen fixen Bezugspunkt zur Bearbeitungslinse an, z. B. eine Apertur in einem Ablenkspiegel im Strahlengang, so verändert sich die Farbe der Schmelzbadabbildung an diesem Punkt je nach der Entfernung des Schmelzbades von der Bearbeitungslinse. Diese Farbe (Wellenlänge) jenes Teiles der Schmelzbadstrahlung, der genau auf diese Apertur abgebildet wird, kann gemessen werden und somit auch der Abstand vom Schmelzbad zur Bearbeitungsoptik errechnet werden. Die Bestimmung dieses Maximums im Spektrum der Schmelzbadstrahlung erfolgt vorzugsweise mittels eines Spektroskops.

Bisher (s. EP 0 811 453 A2, LUMONICS) wurde die Schmelzbadstrahlung nur in zwei Wellenlängenbändern gemessen und dadurch ein Wert für das Verhältnis der Strahlungsintensitäten der beiden Wellenlängenbereiche gewonnen. Dieses Verhältnis der Strahlungsintensitäten ist stark von der Temperatur des Schmelzbades abhängig. Bei der gegenständlichen Patentanmeldung werden diese Nachteile vermieden, indem die Wellenlänge des Strahlungsanteils mit der höchsten Intensität erfaßt wird, unabhängig von der Intensität der Gesamtstrahlung.

Bisher konnte auch nicht der Absolutwert des Abstandes vom Schmelzbad zur Bearbeitungslinse bestimmt werden, was erst durch Messung der Wellenlänge des Farbanteils mit der höchsten Intensität gelingt, da dadurch bei Kenntnis der Brechungseigenschaften der Bearbeitungslinse auf den Absolutabstand rückgerechnet werden kann.

Diese Meßanordnung ermöglicht es darüber hinaus die Temperatur des Schmelzbades zu berechnen. Die Strahlung des Schmelzbades (sog. Temperaturstrahlung) hat ein Emissionsmaximum bei einer gewissen Wellenlänge, deren Wert von der Temperatur abhängt. Diese liegt, für bei der Lasermaterialbearbeitung üblichen Temperaturen, im Infrarotbereich ($>1\mu\text{m}$). Durch Bestimmung der Wellenlänge, bei der dieses Emissionsmaximum des Schmelzbades auftritt, kann auf dessen Temperatur rückgerechnet werden. Die Bestimmung dieser Wellenlänge erfolgt in gleicher Weise wie die Messung der Wellenlänge des Schmelzbadabbildes. Gegenüber den bisherigen Verfahren zur Temperaturbestimmung, bei denen die Schmelzbadtemperatur nicht koaxial mit dem Bearbeitungslaserstrahl sondern seitlich gemessen wurde, kann nun das Schmelzbad direkt gemessen werden, was bei seitlicher Anordnung einer Temperaturmessanordnung bei großen Bearbeitungstiefen nicht möglich ist. Es muß allerdings darauf geachtet werden, daß in diesem Fall die chromatische Aberration der Bearbeitungslinse einen negativen Einfluß hat, da das tatsächliche Strahlungsspektrum des Schmelzbades aufgenommen werden muß. Um dem zu begegnen gibt es mehrere Möglichkeiten:

- Man kann für die Temperaturmessung einen derart großen Abstand von der Bearbeitungslinse wählen, daß die relative Bewegung des Werkstückes keinen großen Einfluß auf die Leistungsdichte der Infrarotstrahlung am Ort der Apertur mehr hat.

- Nachdem der Abstand des Schmelzbades von der Bearbeitungslinse durch obige Anordnung bestimmt wurde, kann auch die Beeinflussung des Schmelzbadspektrums durch die Bearbeitungslinse am Ort der Apertur berechnet werden. Mit diesen Werten kann diese Verschiebung auch wieder rechnerisch kompensiert werden, wodurch eine Temperaturbestimmung ermöglicht wird. Dadurch ist es möglich dieselbe Apertur und Meßvorrichtung sowohl zur Abstandsmessung als auch zur Temperaturmessung zu verwenden.

Das am häufigsten eingesetzte Verfahren zur genauen punktuellen Abstandsmessung ist die Messung der Kapazität zwischen Bearbeitungskopf und Werkstück. Diese Kapazität kann aber während des Bearbeitungsvorganges nicht bestimmt werden, da die Messung durch das Bearbeitungsplasma gestört wird. Deswegen muß der Laser im Pulsbetrieb betrieben werden, wobei in den Pausen die Kapazität gemessen wird. Bei vorliegender Erfindung kann die Abstandsmessung auch während der Bearbeitung vorgenommen werden.

Eine Möglichkeit zur Auskopplung der Schmelzbadstrahlung ist die Anbringung einer Apertur in einen Ablenkspiegel, wobei das Loch in Richtung zur Bearbeitungslinse angebracht ist. Die Größe der Öffnung kann gegenüber dem Durchmesser des Laserstrahls sehr gering gehalten werden, wodurch es zu keiner Beeinträchtigung der Strahlqualität kommt. Der Ablenkspiegel als reflektierendes Optikelement kann auch bei Höchstleistungslasern eingesetzt werden, wohingegen die Verwendung einer transmissiven Optik mit entsprechender wellenlängenabhängiger Beschichtung zur Auskopplung der Schmelzbadstrahlung nur bei geringeren Leistungen möglich wäre. Außerdem wird das Spektrum der gemessenen Schmelzbadstrahlung durch eine transmissive Optik stark beeinflusst.

Das Meßgerät zur Bestimmung des Spektrums kann direkt hinter dem Loch im Ablenkspiegel positioniert werden.

Um die Größe der Apertur möglichst gering zu halten und dennoch eine gute Auskopplung der Schmelzbadstrahlung zu erreichen, kann in der Spiegelöffnung ein Glasfaserkabel angebracht werden, das diese Strahlung zu einem Spektrometer führt. Dadurch wird die Anordnung des Spektrometers zur Apertur auch positionierungsempfindlicher.

Transmissionsminima der Bearbeitungslinse in bestimmten einzelnen Wellenlängenbereichen können zur Verfälschung von Meßergebnissen führen. Diese Fehler können vermieden werden, indem ein Wellenlängenbereich zur Abstandsbestimmung gewählt wird, der in einem Transmissionsmaximum liegt. Der Wellenlängenbereich wird durch den Abstand der Meßapertur von der Bearbeitungslinse festgelegt. Eine andere Möglichkeit ist die Messung und Abspeicherung des Transmissionsverhaltens der Bearbeitungsoptik in einem Digitalrechner, um eine rechnerische Kompensation des Emissionsspektrums vorzunehmen, bei Einsatz des Signals zu Regelungszwecken vorzugsweise in einem digitalen Signalprozessor.

Mit der Information über Schmelzbadtemperatur und Position können wichtige Meßgrößen für die Regelung von verschiedenen Lasermaterialbearbeitungsprozessen gefunden werden. Neben dem Schweißen und Schneiden ist die vorliegende Erfindung besonders für die ab- und auftragende Laserbearbeitung geeignet, da die Emissionsstrahlung coaxial mit dem Laserstrahl gemessen wird und so auch tiefe schmale Spuren erfaßt werden können.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand der Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

Fig.1 den Strahlengang der erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Messung von Temperatur und Abstand des Schmelzbades bei der Lasermaterialbearbeitung.

Fig.2 eine erfindungsgemäße Anordnung zur Messung der Wellenlänge der Schmelzbadstrahlung

Die Bearbeitungslinse (1) ist achromatisch, wie dies durch zwei verschiedene Brennpunkte angedeutet ist. In Fig. 1a) befindet sich das Werkstück (2) bzw. das Schmelzbad (3) in einem solchen Abstand von der Bearbeitungslinse, daß jener Bildpunkt (4) der Schmelze, der im langwelligeren Bereich liegt, an der Sensorapertur (5) abgebildet wird. Der kurzwellige Teil der Strahlung hat seinen Bildpunkt (6) näher bei der Linse. In Fig.1b) wurde das Werkstück und somit, das Schmelzbad um z in Richtung der Linse verschoben. Dadurch wird auch der Bildpunkt mit dem kurzwelligeren Licht zur Apertur des Sensors bewegt. Kann nun die Wellenlänge des jeweiligen Intensitätsmaximums, das durch die Abbildung an der Apertur entsteht, bestimmt werden, so kann auch auf die genaue Position des Schmelzbades bezüglich der Bearbeitungslinse geschlossen werden.

Eine erfindungsgemäße Anordnung zur Bestimmung von Position und Temperatur des Schmelzbades bei der Lasermaterialbearbeitung ist in Fig.2 dargestellt. Diese Abbildung zeigt eine übliche Anordnung einer Lasermaterialbearbeitungsanlage, bestehend aus einer Laserquelle (11), einer Fokussierungslinse (1) und einem Werkstück (2). Der Laserstrahl (13) wird durch einen Spiegel (7) auf das Werkstück gelenkt. Wesentliches Merkmal der Erfindung ist die Messung der Wellenlänge jenes Teils der Schmelzbadstrahlung, der am Meßpunkt abgebildet wird. In der Fig.2 ist dies das Bild (8) der Schmelze auf dem Umlenkspiegel. Die Wellenlänge wird in dieser Anordnung dadurch bestimmt, daß in den Spiegel ein zentrales mit dem Laserstrahl coaxiales Loch gebohrt wird, in dem eine Glasfaser (9) angebracht ist, durch die Schmelzbadstrahlung nach Fokussierung auf die Apertur (12) zu einem Spektroskop (10) geführt wird.

Patentansprüche:

1. Verfahren zur Überwachung von Temperatur und Abstand des Schmelzbades bei der Lasermaterialbearbeitung, bei welchem eine Zone eines Objekts durch einen Laserstrahl erwärmt wird und Eigenschaften dieser Zone durch Erfassung der von dieser emittierten elektromagnetischen Strahlung in der Weise bestimmt werden, daß durch die chromatische Aberration der Bearbeitungsoptik die von ihr erzeugten spektralen Bildpunkte der erwärmten Zone je nach Wellenlänge der Strahlung in verschiedenen Entfernungen von der Bearbeitungsoptik liegen, **dadurch gekennzeichnet**, daß durch eine Meßvorrichtung die in einem bestimmten Abstand von der Bearbeitungsoptik dominierende Wellenlänge der von der erwärmten Zone emittierten Strahlung bestimmt wird und dadurch der absolute Abstand von der erwärmten Zone zu einem Bezugspunkt ermittelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß gleichzeitig mit der Bestimmung der Entfernung auch die Wellenlänge des Spektralanteils mit der größten Intensität der von der erwärmten Zone emittierten Strahlung und damit die Temperatur dieser Zone bestimmt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß nach Messung des Schmelzbadabstandes gemäß Anspruch 1 der Einfluß der chromatischen Aberration der Bearbeitungsoptik berechnet wird und dieser Einfluß bei der Temperaturbestimmung rechnerisch kompensiert wird.
4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Messung auch durchgeführt wird während der Bearbeitungsstrahl auf das Objekt trifft.
5. Vorrichtung zur Überwachung von Abstand und Temperatur des Schmelzbades bei der Lasermaterialbearbeitung, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßvorrichtung (10) zur Erfassung der dominierenden Wellenlänge der Schmelzbadstrahlung im Beobachtungspunkt als Spektroskop oder Monochromator ausgebildet ist.
6. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Messung der von der erwärmten Zone emittierten Strahlung erfolgt, indem ein Lochspiegel (7) in den Strahlengang des Lasers gebracht wird, welcher die Laserstrahlung reflektiert, die Emissionsstrahlung der erwärmten Zone hingegen durch ein Loch transmittiert.
7. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die zu messende Emissionsstrahlung in eine im oder direkt nach dem Loch (12) angebrachte Glasfaser (9) eingekoppelt und zum Meßinstrument (10) geleitet wird.
8. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß das Meßinstrument (10) zur Erfassung der Strahlung der erwärmten Zone direkt hinter dem Lochspiegel (7) positioniert wird.
9. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß das gemessene Emissionsspektrum in einem Digitalrechner, vorzugsweise einem digitalen Signalprozessor, verarbeitet wird und Temperatur und Abstand des Schmelzbades als elektrische Größe ausgegeben werden und damit die Laserquelle und die Bearbeitungsoptik gesteuert werden, wobei mit dem gemessenen Emissionsspektrum des Schmelzbades und den bekannten Transmissionskoeffizienten der Bearbeitungsoptik für die einzelnen Wellenlängen die wellenlängenabhängigen Transmissionseigenschaften der im Signalweg liegenden Optikelemente rechnerisch korrigiert werden.

Hiezu 1 Blatt Zeichnungen

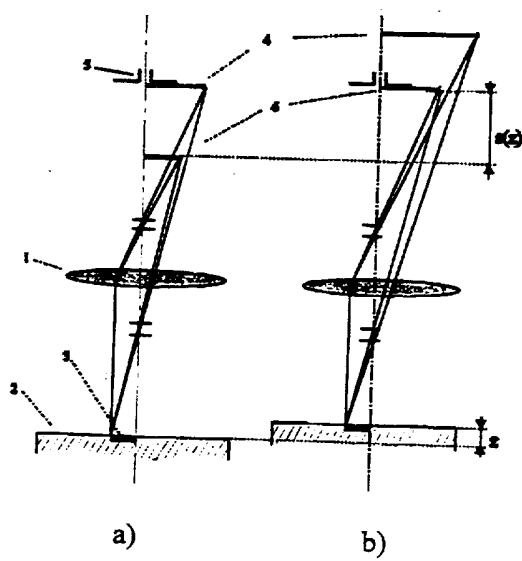


Fig.1

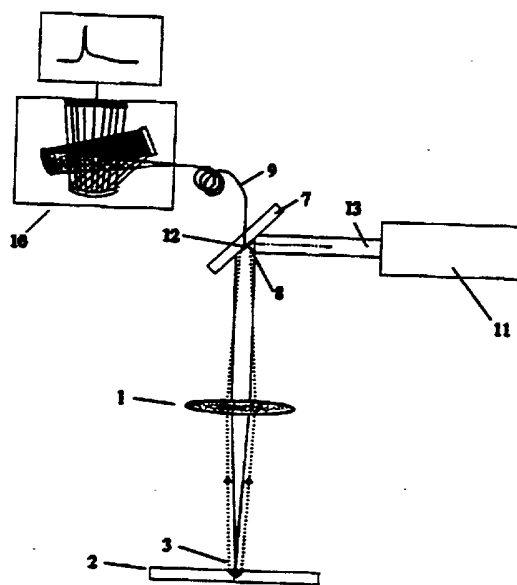


Fig.2