(19) **Bundesrepublik Deutschland**
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 601 31 482 T2** 2008.09.18

(12) # Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 122 321 B1**
(21) Deutsches Aktenzeichen: **601 31 482.4**
(96) Europäisches Aktenzeichen: **01 300 696.0**
(96) Europäischer Anmeldetag: **26.01.2001**
(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **08.08.2001**
(97) Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA: **21.11.2007**
(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **18.09.2008**

(51) Int Cl.[8]: ***C21D 10/00*** (2006.01)
B23K 26/02 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
494715 **31.01.2000** **US**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE, FR, GB

(73) Patentinhaber:
General Electric Co., Schenectady, N.Y., US

(74) Vertreter:
Rüger und Kollegen, 73728 Esslingen

(72) Erfinder:
Graham, Michael Evans, Slingerlands, New York 12159, US; Jackson, John Dennis, Wyoming, Ohio 45215, US

(54) Bezeichnung: **Doppel-Laserschockstrahlen**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Diese Erfindung bezieht sich allgemein auf eine Laserschockoberflächenbehandlung und insbesondere auf ein Verfahren und System zur Steuerung der Doppel-Laserschockoberflächenbehandlung eines Gegenstandes.

[0002] Gasturbinentriebwerke und insbesondere die Triebwerksrotoren von Flugzeuggasturbinen arbeiten bei hohen Drehzahlen, die Felder hoher Zug- und Schwingungsbeanspruchungen in der Schaufel verursachen und die Bläserschaufeln anfällig für Fremdkörperbeschädigung (Foreign Object Damage, FOD) machen. Schwingungen können ebenfalls durch den Nachlauf der Schaufeln und Eintrittsdruckstörungen sowie andere aerodynamische Phänomene bewirkt werden. Die Fremdkörperbeschädigung verursacht Kerben und Risse und somit Beanspruchungskonzentrationen in den Anström- und Abströmkanten von Bläserschaufeln. Diese Kerben und Risse werden zur Quelle hoher Beanspruchungskonzentrationen bzw. sie werden zu Stress Risers und beschränken auf Grund von Langzeitermüdung (High Cycle Fatigue, HCF) durch Schwingungsbeanspruchungen einschneidend die Lebensdauer dieser Schaufeln.

[0003] Es ist daher höchst wünschenswert, länger haltende Bläser- und Verdichterschaufeln, wie auch andere Hartmetallteile, zu entwerfen und zu konstruieren, die besser in der Lage sind, sowohl der Kurzzeit- als auch der Langzeitermüdung zu widerstehen, und die Ausbreitung von Rissen besser hemmen, als die Teile heutzutage. Die U.S.-Patentanmeldungen oder -Patente, auf die unten Bezug genommen wird, sind auf dieses Ziel hin ausgerichtet: U.S.-Patentanmeldung Nr. 08/993,194, anhängige Patentanmeldung mit dem Titel „Laser Shock Peening Using Low Energy Laser"; 08/362,362 „On The Fly Laser Shock Peening", eingereicht am 22. Dezember 1994 und inzwischen zurückgezogen; U.S.-Patent Nr. 5,591,009 mit dem Titel „Laser Shock Peened Gas Turbine Fan Blade Edges"; U.S.-Patent Nr. 5,569,018 mit dem Titel „Technique To Prevent Or Divert Cracks"; U.S.-Patent Nr. 5,531,570 mit dem Titel „Distortion Control For Laser Shock Peened Gas Turbine Engine Compressor Blade Edges"; U.S.-Patent Nr. 5,492,447 mit dem Titel „Laser Shock Peened Rotor Components For Turbomachinery"; U.S.-Patent Nr. 5,674,329 mit dem Titel „Adhesive Tape Covered Laser Shock Peening" und das U.S.-Patent Nr. 5,674,328 mit dem Titel „Dry Tape Covered Laser Shock Peening", die alle an den Inhaber des vorliegenden Patents übertragen wurden. Diese Patente lehren, ein Schaufelblatt einer Bläserschaufel bereitzustellen, das einen kontinuierlichen oder volumetrischen Bereich tiefer kompressiver Eigenspannungen aufweist, bewirkt durch eine Laserschockoberflächenbehandlung über einen sich zumindest einwärts erstreckenden Abschnitt laserschockbehandelter Oberflächen eines Gegenstandes wie beispielsweise einer Bläserschaufel. Diese Bereiche werden durch mehrere sich überlagernde Ausbuchtungen kompressiver Eigenspannungen, bewirkt durch Laserschockbehandlung, die sich von einander überlappenden laserschockbehandelten Kreisen oder Punkten aus einwärts erstrecken.

[0004] Die durch die Laserschockoberflächenbehandlung der vorliegenden Erfindung bewirkten tiefen kompressiven Eigenspannungen sind nicht zu verwechseln mit der Oberflächenschicht eines Werkstücks, das lokal begrenzte kompressive Eigenspannungen enthält, die durch einen Härtungsvorgang unter Verwendung eines Laserstrahls bewirkt wurden, um das Werkstück lokal zu erwärmen und so zu härten, wie es beispielsweise in dem U.S.-Patent Nr. 5,235,838 mit dem Titel „Method and apparatus for truing or straightening out of true work pieces" offenbart wird. Der Stand der Technik lehrt die Anwendung multipler Strahlungspulse aus gepulsten Hochleistungslasern und großer Laserpunktdurchmesser von circa 1 cm, um Schockwellen an der Oberfläche eines Werkstücks zu erzeugen, ähnlich den oben bezugnehmend erwähnten U.S.-Patentanmeldungen und dem U.S.-Patent Nr. 3,850,698 mit dem Titel „Altering Material Properties", dem U.S.-Patent Nr. 4,401,477 mit dem Titel „Laser shock processing" und dem U.S.-Patent Nr. 5,131,957 mit dem Titel „Material Properties". Laserschockoberflächenbehandlung, wie die Bezeichnung in der Technik verstanden und hier verwendet wird, bedeutet die Verwendung eines Laserstrahls aus einer Laserstrahlquelle, um einen kontinuierlichen Bereich starker kompressiver Eigenspannungen in einem kontinuierlichen Bereich auf einem Teil einer Oberfläche zu erzeugen. Der Bereich ist volumetrisch und wird erzeugt durch die Koaleszenz einzelner Ausbuchtungen, die sich von einander überlappenden laserschockbehandelten Kreisen oder Punkten aus einwärts erstrecken. Laserschockbehandlung wurde verwendet, um eine kompressiv beanspruchte Schicht an der Außenoberfläche eines Werkstücks zu schaffen, von der bekannt ist, dass sie den Widerstand eines Werkstücks gegenüber Ermüdungsversagen beträchtlich erhöht, wie in dem U.S.-Patent Nr. 4,937,421 mit dem Titel „Laser Peening System and Method" offenbart wurde. Die Herstellungskosten des Laserschockoberflächenbehandlungs-Verfahrens sind ein bedeutender Gegenstand des Interesses, da die Einrichtungs- und Betriebskosten sehr hoch sein können. Das in 08/362,362 oben offenbarte „On-the Fly"-Laserschockoberflächenbehandlungs-Verfahren ist dafür konzipiert, Kosten einsparende Laserschockoberflächenbehandlungs-Verfahren zur Verfügung zu stellen, wie auch die vorliegende Erfindung. Der Stand der Technik lehrt die Verwendung von großen Laserpunkten mit einem Durchmesser größer gleich 1 cm und Hochleistungs-Lasern. Hersteller suchen ständig nach Methoden, um

die Zeit, Kosten und Komplexität derartiger Verfahren zu reduzieren. Ein Laserschockoberflächenbehandlungsverfahren, das einen Niederleistungslaserstrahl in der Größenordnung von 3–10 Joule und einer bevorzugten Spanne von 3–7 Joule und Laserstrahlpunkte mit einem Durchmesser von circa 1 mm verwendet, wird in der ebenfalls anhängigen U.S.-Patentanmeldung Nr. 08/993,194 mit dem Titel „Laser Schock Peening Using Low Energy Laser" offenbart, und dieses Verfahren zielt darauf ab, die Zeit, Kosten und Komplexität des Laserschockoberflächenbehandlungs-Verfahrens zu reduzieren. Es existiert beständig der Wunsch nach Konstruktionsverfahren, die derartige Reduzierungen zur Folge haben, und die vorliegende Erfindung ist auf dieses Ziel hin ausgerichtet.

[0005] Wie oben erwähnt, beschäftigten sich bekannte Laseroberflächenbehandlungsverfahren nach dem Stand der Technik ausschließlich mit der Anwendung eins einzigen Laserstrahls, der in einem festgelegten Winkel auf die zu behandelnde Oberfläche auftraf. Neue Fortschritte in der Laseroberflächenbehandlungstechnologie können es erfordern, dass der Gegenstand gleichzeitig auf einander gegenüber liegenden Oberflächen getroffen wird, so dass die entsprechenden, von den aufprallenden Laserstrahlen erzeugten Schockwellen im Zentrum der gegenüberliegenden Oberflächen aufeinandertreffen. Siehe U.S.-Patent Nr. 6,005,219, erteilt an den Zessionar der vorliegenden Erfindung und hier durch Bezugnahme enthalten. Die Herstellung dieses Doppel-Laserverfahrens bringt das Erfordernis mit sich, programmierbare Werkzeuge zu entwickeln, wie beispielsweise NC-Werkzeuge, die die genaue, verlässliche und kostengünstige Steuerung des Doppel-Laserschockoberflächenbehandlungsverfahrens ermöglichen.

[0006] Es ist daher wünschenswert, ein automatisiertes Verfahren zur Entwicklung von Befehlen für die Steuerung eines Doppel-Laserschockoberflächenbehandlungsgerätes unter Verwendung der gegenwärtig verfügbaren NC-Teilepositionierungs-Technologie zur Verfügung zu stellen. Ferner ist es wünschenswert, in der Lage zu sein, den Gegenstand genau und schnell relativ zu den Doppel-Laserstrahlen zu positionieren, so dass beide zugleich auf einander entsprechenden Stellen auf jeder der einander gegenüberliegenden Oberflächen auftreffen. Da die entsprechenden Stellen, die gleichzeitig von den zwei Laserstrahlen getroffen werden, einander auf gegenüberliegenden Oberflächen des Gegenstands gegenüberliegen, ist es ebenfalls wünschenswert, in der Lage zu sein, die Stellen präzise zu lokalisieren, die die Laserstrahlen treffen müssen, um eine gewünschte Abdeckung der Oberfläche und starke kompressive Eigenspannungen zu erzielen. Wie oben angedeutet, wäre es ebenso wünschenswert, die in die Gegenstandspositionierungsvorrichtung zu programmierende Befehlsstrategie – z. B. NC-Befehle – festlegen zu können, um den Gegenstand dreidimensional nach räumlichen Positionen ausrichten zu können, an denen eine geeignete Abdeckung erreicht wird.

[0007] Gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung wird ein Verfahren zur Doppel-Laserschockoberflächenbehandlung eines Gegenstandes zur Verfügung gestellt, wobei das Verfahren umfasst: Die Festlegung einer Punkteanordnung, die eine Vielzahl von Punkten auf einer ersten Oberfläche des mit dem Verfahren zu behandelnden Gegenstands umfasst; die Festlegung einer Punkteanordnung, die eine Vielzahl von Punkten auf einer zweiten Oberfläche des mit dem Verfahren zu behandelnden Gegenstands umfasst, wobei die erste und die zweite Oberfläche einander gegenüberliegende Oberflächen umfassen und jeder der Punkte auf der zweiten Oberfläche so angeordnet ist, dass seine Position mit der eines Punktes auf der ersten Oberfläche übereinstimmt, wobei eine Vielzahl übereinstimmender Punktepaare vorhanden ist, und: Das Erzeugen entsprechend ausgerichteter Doppel-Laserstrahlen, die simultan jeweils auf jedem entsprechenden übereinstimmenden Punktepaar aufprallen, wobei eine dreidimensionale Ausrichtung der Doppel-Laserstrahlen relativ zu dem Gegenstand umfasst: die Festlegung eines Gegenstandsausrichtungsvektors und einer Gegenstandsarbeitsebene entlang derer der Gegenstandsausrichtungsvektor verläuft; die Festlegung eines Laserausrichtungsvektors und einer Laserarbeitsebene entlang derer der Laserausrichtungsvektor verläuft; die Durchführung einer aufeinander bezogenen Rotation zwischen der Gegenstandsarbeitsebene und der Laserarbeitsebene, um für eine parallele Ausrichtung des Gegenstandsausrichtungsvektors und des Laserausrichtungsvektors zu sorgen; die Ausführung einer relativen Übersetzungsbewegung zwischen dem Gegenstand und dem Doppel-Laserstrahl, so dass einer der Laserstrahlen mit dem Mittelpunkt des Punktes auf der ersten Oberfläche übereinstimmt und der andere der Laserstrahlen mit dem Mittelpunkt des Punktes auf der zweiten Oberfläche übereinstimmt.

[0008] Die erste Oberfläche kann eine konvexe Oberfläche umfassen.

[0009] Die Punkteanordnung auf der ersten Oberfläche kann eine Vielzahl einander überlappender Punkte umfassen.

[0010] Das Verfahren kann ferner einen Verfahrensschritt umfassen, in dem der Grad der Überlappung zwischen einander benachbarten Punkten selektiv gesteuert wird.

[0011] Die zweite Oberfläche kann eine konkave Oberfläche umfassen.

[0012] Die Punkte eines jeden zueinander passenden Punktepaares können relativ zueinander so angeordnet sein, dass eine Linie, die relativ zu dem Punkt auf der ersten Oberfläche normal verläuft, eine Linie schneidet, die relativ zu dem Punkt auf der zweiten Oberfläche normal verläuft, wobei der Schnittpunkt sich in gleicher Entfernung von beiden Punkten befindet.

[0013] Der Verfahrensschritt der Festlegung der Punkteanordnung auf der ersten Oberfläche kann die Festlegung einer Vielzahl von Kurven umfassen, die entsprechend über die konvexe Oberfläche des Gegenstands verlaufen, wobei sie im Grundsatz senkrecht zur Längsachse des Gegenstands verlaufen.

[0014] Die Separation zwischen einander benachbarten Kurven kann so gewählt werden, dass sie nicht größer ist als ein gewünschter Abstand von Mittelpunkt zu Mittelpunkt benachbarter Punkte entlang der Längsachse.

[0015] Die gewählte Separation zwischen benachbarten Kurven kann den Grad der Überlappung von Punkten entlang der Längsachse bestimmen.

[0016] Der Verfahrensschritt der Festlegung der Punkteanordnung auf der ersten Oberfläche kann ferner die Festlegung einer Vielzahl von Punkten entlang einer jeden der entsprechenden Kurven umfassen, wobei die Separation zwischen benachbarten Punkten so gewählt werden kann, dass sie nicht größer ist als ein gewünschter Abstand von Mittelpunkt zu Mittelpunkt benachbarter Punkte entlang der Achse, die im Grundsatz senkrecht zu der Längsachse verläuft.

[0017] Die gewählte Separation zwischen benachbarten Punkten kann den Grad der Überlappung von Punkten entlang der Achse, die im Grundsatz senkrecht zu der Längsachse verläuft, bestimmen.

[0018] Das Verfahren kann ferner den Verfahrensschritt der Festlegung entsprechender Punkte umfassen, die den Mittelpunkten eines jeden übereinstimmenden Punktepaares entsprechen.

[0019] Das Verfahren kann ferner die Festlegung eines Gegenstandsausrichtungsvektors und einer Gegenstandsarbeitsebene, entlang derer der Gegenstandsausrichtungsvektor verläuft, umfassen.

[0020] Das Verfahren kann ferner die Festlegung eines Laserausrichtungsvektors und einer Laserarbeitsebene, entlang derer der Laserausrichtungsvektor verläuft, umfassen.

[0021] Das Verfahren kann ferner den Verfahrensschritt der Durchführung einer aufeinander bezogenen Rotation zwischen der Gegenstandsarbeitsebene und der Laserarbeitsebene umfassen, um für eine parallele Ausrichtung dieser beiden Ebenen zu sorgen.

[0022] Das Verfahren kann ferner den Verfahrensschritt der Durchführung einer aufeinander bezogenen Rotation zwischen dem Gegenstandsausrichtungsvektor und dem Laserausrichtungsvektor umfassen, um für eine parallele Ausrichtung dieser beiden Vektoren zu sorgen.

[0023] Das Verfahren kann ferner den Verfahrensschritt der Durchführung einer aufeinander bezogenen Übersetzungsbewegung zwischen dem Gegenstand und dem Doppel-Laserstrahl umfassen, so dass einer der Laserstrahlen mit dem Mittelpunkt des Punktes auf der ersten Oberfläche zusammenfällt und der andere der Laserstrahlen mit dem Mittelpunkt des Punktes auf der zweiten Oberfläche zusammenfällt.

[0024] Gemäß einem zweiten Aspekt der Erfindung wird eine Vorrichtung bzw. ein System zur Doppel-Laserschockoberflächenbehandlung eines Gegenstandes zur Verfügung gestellt, wobei das System umfasst: einen Punkteanordnungsgenerator zur Festlegung einer aus einer Vielzahl von Punkten bestehenden Punkteanordnung auf einer ersten Oberfläche des zu behandelnden Gegenstands, wobei der Punkteanordnungsgenerator ferner eine aus einer Vielzahl von Punkten bestehende Punkteanordnung auf einer zweiten Oberfläche des zu behandelnden Gegenstands festlegt, und wobei die erste und die zweite Oberfläche aus einander gegenüberliegenden Oberflächen bestehen, wobei jeder der Punkte auf der zweiten Oberfläche so angeordnet ist, dass er mit einem Punkt auf der ersten Oberfläche übereinstimmt, und wobei eine Vielzahl übereinstimmender Punktepaare vorhanden ist, und wobei das System weiter eine Lasereinheit zur Erzeugung von Doppel-Laserstrahlen umfasst, dessen Strahlen entsprechend ausgerichtet sind, um simultan auf jedes übereinstimmende Punktepaar aufzuprallen, dadurch gekennzeichnet, dass eine dreidimensionale Ausrichtung des Doppel-Laserstrahls relativ zu dem Gegenstand durch einen Prozessor ausgeführt wird, der umfasst: ein Modul zur Festlegung eines Gegenstandsausrichtungsvektors und einer Gegenstandsarbeitsebene, entlang derer der Gegenstandsausrichtungsvektor verläuft; ein Modul zur Festlegung eines Laserausrichtungsvektors und einer Laserarbeitsebene, entlang derer der Laserausrichtungsvektor verläuft; ein Modul zur Durchführung einer aufeinander bezogenen Rotation der Gegenstandsarbeitsebene und der Laserarbeitsebene, um für eine parallele Ausrichtung des Gegenstandsausrichtungsvektors und des Laserausrichtungsvektors zu sorgen, und ein Modul zur Durchführung einer aufeinander bezogenen Übersetzungsbewegung zwischen dem Gegenstand und dem Doppel-Laserstrahl, so dass

einer der Laserstrahlen mit dem Mittelpunkt des Punktes auf der ersten Oberfläche übereinstimmt und der andere der Laserstrahlen mit dem Mittelpunkt des Punktes auf der zweiten Oberfläche übereinstimmt.

[0025] Die erste Oberfläche kann eine konvexe Oberfläche umfassen.

[0026] Die Punkteanordnung auf der ersten Oberfläche umfasst eine Vielzahl einander überlappender Punkte.

[0027] Das System kann ferner ein Überlappungs-Steuermodul zur selektiven Steuerung des Grades der Überlappung von benachbarten Punkten enthalten.

[0028] Die zweite Oberfläche kann aus eine konkave Oberfläche umfassen.

[0029] Die Punkte eines jeden zueinander übereinstimmenden Punktepaares können relativ zueinander so angeordnet sein, dass eine Linie, die relativ zu dem Punkt auf der ersten Oberfläche normal verläuft, eine Linie schneidet, die relativ zu dem Punkt auf der zweiten Oberfläche normal verläuft, wobei der Schnittpunkt sich in gleicher Entfernung von beiden Punkten befindet.

[0030] Der Punkteanordnungsgenerator kann ein Modul zur Festlegung einer Vielzahl von über die konvexe Oberfläche des Gegenstandes verlaufenden Kurven enthalten, die im Grundsatz senkrecht zu der Längsachse des Gegenstandes verlaufen.

[0031] Die Separation zwischen einander benachbarten Kurven kann so gewählt werden, dass sie nicht größer ist als ein gewünschter Abstand von Mittelpunkt zu Mittelpunkt benachbarter Punkte entlang der Längsachse.

[0032] Die gewählte Separation zwischen benachbarten Kurven kann den Grad der Überlappung von Punkten entlang der Längsachse bestimmen.

[0033] Das Modul des Punkteanordnungsgenerators kann ferner eine Vielzahl von Punkten entlang der entsprechenden Kurven festlegen, wobei die Separation zwischen benachbarten Punkten so gewählt wird, dass sie nicht größer ist als ein gewünschter Abstand von Mittelpunkt zu Mittelpunkt benachbarter Punkte entlang der Achse, die im Grundsatz senkrecht zu der Längsachse verläuft.

[0034] Die gewählte Separation zwischen benachbarten Punkten kann den Grad der Überlappung von Punkten entlang der Achse, die im Grundsatz senkrecht zu der Längsachse verläuft, bestimmen.

[0035] Das System kann ferner ein Modul zur Festlegung von Punkten, die den Mittelpunkten eines jeden übereinstimmenden Punktepaares entsprechen, enthalten.

[0036] Das System kann weiter ein Modul zur Festlegung eines Gegenstandsausrichtungsvektors und einer Gegenstandsarbeitsebene, entlang derer der Gegenstandsausrichtungsvektor verläuft, umfassen.

[0037] Das System kann weiter ein Modul zur Festlegung eines Laserausrichtungsvektors und einer Laserarbeitsebene, entlang derer der Laserausrichtungsvektor verläuft, umfassen.

[0038] Das System kann weiter Mittel zur Durchführung einer aufeinander bezogenen Rotation zwischen der Gegenstandsarbeitsebene und der Laserarbeitsebene umfassen, um für deren parallele Ausrichtung zu sorgen.

[0039] Das System kann weiter Mittel zur Durchführung einer aufeinander bezogenen Rotation zwischen dem Gegenstandsausrichtungsvektor und dem Laserausrichtungsvektor umfassen, um für deren parallele Ausrichtung zu sorgen.

[0040] Das System kann weiter Mittel zur Durchführung einer aufeinander bezogenen Übersetzungsbewegung zwischen dem Gegenstand und dem Doppel-Laserstrahl umfassen, so dass einer der Laserstrahlen mit dem Mittelpunkt des Punktes auf der ersten Oberfläche zusammenfällt und der andere der Laserstrahlen mit dem Mittelpunkt des Punktes auf der zweiten Oberfläche zusammenfällt.

[0041] Daher erfüllt, allgemein gesagt, die vorliegende Erfindung den zuvor erwähnten Bedarf durch die Bereitstellung eines Verfahrens zur Doppel-Laserschockbehandlung eines Gegenstandes. Das Verfahren sieht die Festlegung einer eine Vielzahl von Punkten enthaltenden Punkteanordnung auf einer ersten Oberfläche des zu behandelnden Gegenstands vor. Das Verfahren sieht ferner die Festlegung einer eine Vielzahl von Punkten enthaltenden Punkteanordnung auf einer zweiten Oberfläche des zu behandelnden Gegenstands vor. Die erste und die zweite Oberfläche bestehen aus einander gegenüberliegenden Oberflächen. Jeder der Punkte auf der zweiten Oberfläche ist so angeordnet, dass er mit einem Punkt auf der ersten Oberfläche übereinstimmt, und es ist eine Vielzahl von übereinstimmenden Punktepaaren vorhanden. Ein Verfahrensschritt sieht die Erzeugung eines Doppel-Laserstrahls vor, dessen Strahlen dafür ausgerichtet sind, simultan auf jedes der beiden übereinstimmenden Punktepaare aufzuprallen.

[0042] In einem anderen Aspekt der Erfindung wird der zuvor erwähnte Bedarf ferner durch die Bereit-

stellung eines Systems zur Doppel-Laserschockbehandlung eines Gegenstandes erfüllt. Das System umfasst einen Punkteanordnungsgenerator zur Festlegung einer eine Vielzahl von Punkten enthaltenden Punkteanordnung auf einer ersten Oberfläche des zu behandelnden Gegenstands. Der Punkteanordnungsgenerator legt weiter eine eine Vielzahl von Punkten enthaltende Punkteanordnung auf einer zweiten Oberfläche des zu behandelnden Gegenstandes fest. Die erste und die zweite Oberfläche bestehen aus einander gegenüberliegenden Oberflächen. Ferner ist jeder der Punkte auf der zweiten Oberfläche so angeordnet, dass er einem der Punkte auf der ersten Oberfläche entspricht und umfasst eine Vielzahl abgestimmter Punktepaare. Eine Lasereinheit ermöglicht die Erzeugung eines Doppel-Laserstrahls, dessen Strahlen so ausgerichtet sind, dass sie simultan auf jedes entsprechende Punktepaar aufprallen.

[0043] Die Erfindung soll nun anhand von Beispielen mit Bezug auf die Zeichnungen detaillierter beschrieben werden:

[0044] Fig. 1 ist eine perspektivische Darstellung eines beispielhaften Gegenstandes, d. h. einer Bläserschaufel eines Flugzeuggasturbinentriebwerks, der unter Verwendung des Verfahrens und des Systems der vorliegenden Erfindung laserschockoberflächenbehandelt werden kann;

[0045] Fig. 2 ist eine perspektivische Darstellung einer anderen beispielhaften Bläserschaufel eines Flugzeuggasturbinentriebwerks, die unter Verwendung des Verfahrens und des Systems der vorliegenden Erfindung laserschockoberflächenbehandelt werden kann;

[0046] Fig. 3 ist ein Querschnitt durch die Bläserschaufel entlang der in Fig. 2 dargestellten Schnittlinie 3-3;

[0047] Fig. 4 ist ein Flussdiagramm einer beispielhaften Ausführungsform des Verfahrens der vorliegenden Erfindung, das die Festlegung der Punkte ermöglicht, an denen ein Doppel-Laserstrahl auf einander gegenüberliegenden Oberflächen des mit dem Doppel-Laserschockoberflächenbehandlungsverfahren zu behandelnden Gegenstandes auftrifft;

[0048] Fig. 5 ist ein Flussdiagramm, das weitere Details hinsichtlich beispielhafter Punkteanordnungen zeigt, z. B. einander überlappende Punkte, wie sie durch das Verfahren der vorliegenden Erfindung erzeugt werden können.

[0049] Fig. 6 ist ein Flussdiagramm, das Verfahrensschritte zur Sicherstellung einer geeigneten Oberflächenabdeckung des durch Laserschockoberflächenbehandlung zu behandelnden Gegenstands darstellt;

[0050] Fig. 7 ist ein Flussdiagramm, das Details hinsichtlich der steuerbaren Auswahl des Grades der Überlappung benachbarter Punkte liefert;

[0051] Fig. 8 ist eine Draufsicht auf eine beispielhafte Punkteanordnung, die durch das Verfahren der vorliegenden Erfindung erzeugt werden kann;

[0052] Fig. 9 ist ein Aufriss des durch Laserschockoberflächenbehandlung zu behandelnden Gegenstands, der geometrische Beziehungen zwischen einem Paar zusammenpassender Punkte darstellt, die von dem Doppel-Laserstrahl getroffen werden sollen;

[0053] Fig. 10 ist eine Perspektive, die geometrische Beziehungen für die steuerbare Auswahl des Grades der Überlappung benachbarter Punkte darstellt;

[0054] Fig. 11 ist ein Flussdiagramm zur Darstellung von Verfahrensschritten, die die dreidimensionale Ausrichtung des Gegenstands relativ zu dem Doppel-Laserstrahl ermöglichen;

[0055] Fig. 12 ist ein Aufriss des durch Laserschockoberflächenbehandlung zu behandelnden Gegenstands, der geometrische Beziehungen für die Festlegung eines Gegenstandsausrichtungsvektors und einer Gegenstandsarbeitsebene darstellt;

[0056] Fig. 13 ist eine Anordnung eines beispielhaften Doppel-Laserstrahls, die geometrische Beziehungen für die Festlegung eines Laserausrichtungsvektors und einer Laserarbeitsebene darstellt;

[0057] Fig. 14 ist ein Aufriss als Ergebnis der Kombination von Fig. 12 und Fig. 13 bei dreidimensionaler Ausrichtung relativ zueinander;

[0058] Fig. 15 ist eine Schemaperspektive der Schaufel aus Fig. 1, die beschichtet und für die Anwendung des Verfahrens der vorliegenden Erfindung in einem Laserschockoberflächenbehandlungssystem montiert ist;

[0059] Fig. 16 ist zum Teil ein Querschnitt und zum Teil eine schematische Darstellung der Anordnung in Fig. 15.

[0060] In den Fig. 1, Fig. 2 und Fig. 3 ist eine Bläserschaufel **8** mit einem aus einer Titanlegierung hergestellten Schaufelblatt **34** dargestellt, das sich von einer Schaufelplattform **36** radial auswärts zu einer Schaufelspitze **38** erstreckt. Dieses ist charakteristisch für die Art von Hartmetallteil und -material, für die das Verfahren und System der vorliegenden Erfindung entwickelt wurden. Zu der Bläserschaufel **8** gehört ein Wurzelabschnitt **40**, der sich von der Platt-

form **36** aus radial einwärts zu einem radial einwärts gelegenen Ende **37** des Wurzelabschnitts **40** erstreckt. An dem radial einwärts gelegenen Ende **37** des Wurzelabschnitts **40** befindet sich eine Schaufelwurzel **42**, die mit der Plattform **36** durch einen Schaufelschaft **44** verbunden ist. Das Schaufelblatt **34** erstreckt sich in Sehnenrichtung zwischen einer Anströmkante LE und einer Abströmkante TE des Schaufelblattes. Die Sehne C des Schaufelblattes **34** ist die Linie zwischen der Anströmkante LE und der Abströmkante TE in jedem Schaufelquerschnitt, wie in Fig. 2 dargestellt. Eine Druckseite **46** des Schaufelblatts **34** ist der allgemeinen Rotationsrichtung zugewandt, wie der Pfeil zeigt, eine Saugseite **48** befindet sich auf der anderen Seite des Schaufelblattes und eine Mittellinie ML ist im Grundsatz mittig in Sehnenrichtung zwischen den beiden Oberflächen angeordnet.

[0061] Die Bläserschaufel **8** weist einen Anströmkantenabschnitt **50** auf, der sich entlang der Anströmkante LE des Schaufelblatts **34** von der Schaufelplattform **36** zu der Schaufelspitze **38** erstreckt. Der Anströmkantenabschnitt **50** weist eine vorgegebene erste Breite W1 auf, so dass der Anströmkantenabschnitt **50** Kerben **52** und Risse umschließt, die entlang der Anströmkante des Schaufelblatts **34** auftreten können. Das Schaufelblatt **34** kann auf Grund von Zentrifugalkräften, die durch die Rotation der Bläserschaufel **8** während des Triebwerksbetriebs erzeugt werden, einem signifikanten Zugspannungsfeld ausgesetzt sein. Das Schaufelblatt **34** kann auch während des Triebwerksbetriebs erzeugten Schwingungen ausgesetzt sein, und die Kerben **52** und Risse wirken als Langzeitermüdungs-Stress-Riser (Belastungszonen) und erzeugen zusätzliche Beanspruchungskonzentrationen um sich herum.

[0062] Um dem Ermüdungsversagen von Teilen der Schaufel entlang möglichen Bruchlinien entgegenzuwirken, die sich entwickeln können und hervorgehen können aus beginnenden Brüchen oder Mikro-Brüchen, Kerben und Rissen, weisen die einander gegenüberliegende erste und zweite Oberfläche oder Seite des Gegenstands, wie beispielsweise die Saugseite **46** und die Druckseite **48**, einen entsprechenden laserschockoberflächenbehandelten Bereich **54** mit Anordnungen **56** von vorgespannten, volumetrisch überlappenden laserschockbehandelten Ausbuchtungen oder Punkten mit tiefen kompressiven Eigenspannungen auf, die durch das Doppel-Laserschockoberflächenbehandlungsverfahren (laser shock peening, LSP) und das entsprechende System der vorliegenden Erfindung hervorgerufen wurden.

[0063] Fig. 4 zeigt ein Flussdiagramm einer beispielhaften Ausführungsform des Verfahrens **100** der vorliegenden Erfindung, das die Festlegung der exakten Position der Punkte ermöglicht, an denen die entsprechenden Doppelstrahlen auf die einander gegenüberliegenden Oberflächen des Gegenstands auftreffen müssen, der einer Laserschockoberflächenbehandlung (LSP) unterzogen werden soll. Auf den „Start"-Verfahrensschritt **102** folgend, ermöglicht der Verfahrensschritt **104** die Festlegung einer Punkteanordnung, die eine Vielzahl von Punkten auf einer ersten Oberfläche des Gegenstands umfasst, wie z. B. einer relativ zu einem auftreffenden Laserstrahl konvexen Oberfläche. Der Verfahrensschritt **106** ermöglicht die Festlegung einer Punkteanordnung, die eine Vielzahl von Punkten auf einer zweiten Oberfläche des Gegenstands umfasst, wie z. B. einer relativ zu einem auftreffenden Laserstrahl konkaven Oberfläche. Wie oben erwähnt, sind die erste und die zweite Oberfläche (z. B. die Oberflächen **46** und **48** in Fig. 3) einander gegenüberliegende Oberflächen. Ferner ist jeder der Punkte auf der zweiten Oberfläche so angeordnet, dass er mit einem entsprechenden Punkt auf der ersten Oberfläche übereinstimmt, um so eine Vielzahl von übereinstimmenden Punktepaaren zu erzeugen. Vor dem Verfahrensschritt „Zurück" **110**, ermöglicht der Verfahrensschritt **108** die Erzeugung von Doppel-Laserstrahlen, die entsprechend ausgerichtet sind, um simultan auf die übereinstimmenden Punktepaare aufzuprallen.

[0064] Fig. 5 zeigt ein Flussdiagramm, das weitere Details in Verbindung mit der Punkteanordnung aufzeigt, die durch das Verfahren **100** erzeugt werden kann. Auf den „Start"-Verfahrensschritt **112** folgend, ermöglicht der Verfahrensschritt **114** die Bereitstellung einer Punkteanordnung auf der ersten Oberfläche, wobei diese Punkteanordnung aus einer Vielzahl einander überlappender Punkte besteht. Ein Beispiel für eine derartige Überlappungs-Punkteanordnung wird in Fig. 8 gezeigt. Der Verfahrensschritt **16** erlaubt die selektive Steuerung des Grades der Überlappung benachbarter Punkte. Wie in Block **118** angegeben und in Fig. 9 gezeigt, ist jedes übereinstimmende Punktepaar relativ zueinander angeordnet, so dass eine Linie, die sich normal zu dem Punkt auf der ersten Oberfläche (z. B. Oberfläche **48**) erstreckt, eine Linie schneidet, die sich normal zu dem Punkt auf der zweiten Oberfläche (z. B. Oberfläche **46**) erstreckt. Der Schnittpunkt der beiden normalen Linien liegt an einem Punkt (z. B. Punkt o), der von beiden Punkten gleich weit entfernt ist. Die oben beschriebene Geometrie ist am besten aus Fig. 9 ersichtlich, in der die Laserstrahlpfade Aa und Bb als koplanar angenommen werden und es ferner angenommen wird, dass derartige Pfade in einer festen Position und einem festen Winkel gehalten werden, während sie simultan ein übereinstimmendes Punktepaar treffen. Die Punkte a und b entsprechen den Punkte-Positionen auf dem Gegenstand, wo die Laserstrahlen die Gegenstandsoberfläche treffen werden. Genauer gesagt, stimmen die Punkte a und b mit den entsprechenden Mittelpunkten der Punkte überein, die auf den einander gegenüberliegenden

Seiten des mit einer Laserschockoberflächenbehandlung zu behandelnden Gegenstands liegen. Daher ist, wie in Fig. 9 gezeigt, der Abstand ao gleich dem Abstand bo. Außerdem ist das Liniensegment ao senkrecht zu dem Punkt-Mittelpunkt auf der ersten Oberfläche **46** des Gegenstands **54**. In gleicher Weise ist das Liniensegment bo senkrecht zu dem Punkt-Mittelpunkt auf der zweiten Oberfläche **48** des Gegenstands **54**.

[0065] Fig. 6 ist ein Flussdiagramm, das weitere Details hinsichtlich des Verfahrens **100** liefert, das sicherstellt, dass die Vielzahl der übereinstimmenden Punktepaare die mit einer Laserschockoberflächenbehandlung zu behandelnden Oberflächen vollständig bedeckt. Auf den „Start"-Verfahrensschritt **122** folgend, ermöglicht der Verfahrensschritt **124** die Festlegung einer Vielzahl von Kurven wie beispielsweise der Kurven **59** in Fig. 10, die entsprechend über die erste Oberfläche **46**, z. B. die konvexe Oberfläche, des Gegenstandes verlaufen, und zwar im Grundsatz senkrecht zu der Längsachse (z. B. Achse **60** in Fig. 10) des Gegenstands. Der Verfahrensschritt **126** ermöglicht die Auswahl der Separation benachbarter Kurven derart, dass diese nicht länger als ein gewünschter Abstand von Mittelpunkt zu Mittelpunkt benachbarter Punkte entlang der Längsachse ist. Vor dem Verfahrensschritt „Zurück" **130** und wie in Block **128** gezeigt, legt die gewählte Separation zwischen benachbarten Kurven, dargestellt durch die vertikalen Pfeile **64** in Fig. 10, den Grad der Überlappung von Punkten entlang der Längsachse fest.

[0066] Fig. 7 ist ein Flussdiagramm, das die Auswahl des Grades der Punkte-Überlappung entlang der Achse, die im Grundsatz senkrecht zu der Längsachse des Gegenstands (z. B. Achse **62** in Fig. 10) verläuft. Auf den „Start"-Verfahrensschritt **132** folgend, ermöglicht der Verfahrensschritt **134** die Festlegung einer Vielzahl von Punkten, wie beispielsweise die Punkte **66** in Fig. 10, entlang einer jeden entsprechenden Kurve. Die Separation zwischen zwei benachbarten Punkten wird so gewählt, dass diese nicht länger als ein gewünschter Abstand von Mittelpunkt zu Mittelpunkt benachbarter Punkte entlang der Achse ist, die im Grundsatz senkrecht zu der Längsachse des Gegenstands verläuft. Vor dem Verfahrensschritt „Zurück" **138**, und wie in Block **136** gezeigt, legt die gewählte Separation zwischen benachbarten Punkten, wie sie durch die horizontalen Pfeile **68** in Fig. 10 dargestellt ist, den Grad der Überlappung von Punkten entlang der Achse fest, die im Grundsatz senkrecht zu der Längsachse des Gegenstands verläuft.

[0067] Fig. 11 zeigt ein Flussdiagramm, das die Festlegung der NC-Befehle ermöglicht, die in eine Gegenstands-Positionierungs-Vorrichtung einprogrammiert werden, um den mit einer Laserschockoberflächenbehandlung zu behandelnden Gegenstand an exakte Positionen zu bewegen, um eine dreidimensionale Ausrichtung zwischen den Doppel-Laserstrahlen und jedem übereinstimmenden Punktepaar zu erzielen. Auf den „Start"-Verfahrensschritt **140** folgend, ermöglicht der Verfahrensschritt **142** die Festlegung eines Gegenstandsausrichtungsvektors und einer Gegenstandsarbeitsebene, entlang derer der Gegenstandsausrichtungsvektor verläuft. Der Gegenstandsausrichtungsvektor und die Gegenstandsarbeitsebene können in einem geeigneten Computer-Aided-Design-Modell (CAD-Modell) des Gegenstands **54** definiert werden, wie es in Fig. 12 dargestellt ist. Im Folgenden wird ein nicht einschränkendes Beispiel hierfür gegeben: Zuerst wird ein Liniensegment zwischen den beiden Gegenstands-Punkten a und b definiert. Danach wird ein Mittelpunkt des Liniensegments definiert, z. B. der Mittelpunkt c, der sich in gleicher Entfernung von den Punkten a und b befindet. Ein Vektor CD erstreckt sich von dem Punkt c, so dass der Vektor CD zu dem Liniensegment ab normal verläuft. In dieser Darstellung ist der Vektor CD der Gegenstandsausrichtungsvektor und die Punkte a, b und der Gegenstandsausrichtungsvektor CD definieren die Gegenstandsarbeitsebene.

[0068] Der Verfahrensschritt **144** ermöglicht die Festlegung Laserausrichtungsvektors und einer Laserarbeitsebene, entlang derer der Laserausrichtungsvektor verläuft. Zur Festlegung des Laserausrichtungsvektors und der Laserarbeitsebene gehen wir von einer feststehenden Doppel-Laserstrahl-Anordnung aus, wie sie in Fig. 13 dargestellt ist. Es wird weiter angenommen, dass die Doppel-Laserstrahlen A und B sich an einem bekannten Punkt p in einem bekannten festen Winkel qps kreuzen. Um den Laserausrichtungsvektor festzulegen, wird ein Liniensegment pr, das den Winkel qps in zwei Teile teilt, zwischen die beiden Strahlen A und B des Doppellasers verlängert. In diesem Fall bildet das Segment pr den Laserausrichtungsvektor und die Laserarbeitsebene wird durch die gemeinsame Ebene definiert, die die Doppellaserstrahlen A und B und der Laserausrichtungsvektor pr gemeinsam haben.

[0069] Der Verfahrensschritt **146** ermöglicht die Ausführung einer aufeinander bezogenen Rotation der Gegenstandsarbeitsebene und der Laserarbeitsebene, um für eine parallele Ausrichtung der Gegenstandsarbeitsebene und der Laserarbeitsebene zu sorgen. Der Verfahrensschritt **148** ermöglicht die Ausführung einer aufeinander bezogenen Rotation des Gegenstandsausrichtungsvektors und des Laserausrichtungsvektors, um für eine parallele Ausrichtung dieser Vektoren zu sorgen. Vor dem Verfahrensschritt „Zurück" **152**, ermöglicht es der Verfahrensschritt **150**, der durch einen Verbindungsknoten A erreicht wird, eine relative Übersetzungsbewegung zwischen dem Gegenstand und dem Dopellaserstrahl durchzuführen, so dass einer der Laserstrah-

len mit dem Mittelpunkt des Punktes auf der ersten Oberfläche des Gegenstands übereinstimmt und der andere Laserstrahl mit dem Mittelpunkt des Punktes auf der zweiten Oberfläche des mit einer Laserschockoberflächenbehandlung zu behandelnden Gegenstands übereinstimmt.

[0070] Für Fachleute ist es ersichtlich, dass traditionelle NC-Steuerverfahren nur eine Ausrichtung des Gegenstandsausrichtungsvektors mit einem einzigen Werkzeugachsenausrichtungsvektor erfordern würden. Es wird jedoch deutlich werden, dass ein derartiges traditionelles Verfahren in einem Fall, der die simultane Steuerung eines Doppellaserstrahls erfordert, nicht funktionieren würde. Daher wurde in dieser Erfindung das Erfordernis erkannt, eine zusätzliche Ausrichtung durchzuführen, nämlich die Ausrichtung zwischen der Gegenstandsarbeitsebene und der Laserarbeitsebene. Die oben beschriebene Ausrichtungsanordnung ist in Fig. 14 dargestellt, wobei der Laserausrichtungsvektor und der Gegenstandsausrichtungsvektor ausgerichtet sind, um eine gemeinsame Arbeitsebene zu haben, so dass die Achsen der Doppellaserstrahlen A und B durch die Punkt a und b gehen, die mit den Mittelpunkten der Punkte auf den des mit einer Laserschockoberflächenbehandlung zu behandelnden einander gegenüberliegenden Seiten übereinstimmen.

[0071] Mit Bezug auf die Fig. 15 und Fig. 16: Die laserschockinduzierten tiefen kompressiven Eigenspannungen werden durch wiederholtes Abfeuern zweier Laserstrahlen **2** erzeugt, die beide um plus/minus einige Mil defokussiert sind, bezogen auf die Oberflächen **54** beiderseits der Anströmkante LE, die mit irgendeiner geeigneten ablativen Beschichtung **55** beschichtet sein können. Der Laserstrahlbeschuss findet vorzugsweise durch einen Schleier aus fließendem Wasser statt, dass über die beschichtete laserschockbehandelte Oberfläche **54** geleitet wird. Die Farbe, das Klebeband oder die sonstige ablative Beschichtung **55** wird unter Plasmaerzeugung abgetragen, was Schockwellen auf der Materialoberfläche zur Folge hat. Als geeignete Alternativen zu Farbe können andere ablative Materialien für die Beschichtung der Oberfläche verwendet werden. Zu diesen Beschichtungsmaterialien gehören Metallfolie oder Plastikklebeband, wie es in den U.S.-Patenten Nr. 5,674,329 und 5,674,328 offenbart wurde. Diese Schockwellen werden durch den Schleier aus fließendem Wasser zu der beschichteten Oberfläche zurückgelenkt und erzeugen wandernde Schockwellen (Druckwellen) in dem Material unterhalb der beschichteten Oberfläche. Die Amplitude und Menge dieser Schockwellen bestimmt die Tiefe und Intensität der kompressiven Spannungen. Die ablative Beschichtung wird zum Schutz der Zieloberfläche und ebenfalls zur Plasmaerzeugung verwendet.

[0072] In Fig. 15 und Fig. 16 ist ein System **1** dargestellt, bei dem die Schaufel **8** in einem konventionell bekannten Roboterarm **27** angebracht ist, der dazu verwendet wird, die Schaufel kontinuierlich zu bewegen und zu positionieren, um für eine Laserschockoberflächenbehandlung „on the fly" gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zu sorgen. Der Roboterarm **27** reagiert auf Rotations- und/oder Linearbewegung, was durch geeignete Servomotoren **94** bewirkt wird, die wiederum auf geeignete Befehle eines Controllers **92** reagieren, z. B. eine NC-Vorrichtung, die dafür programmiert sein kann, die im Zusammenhang mit den Fig. 11–Fig. 14 erörterten Ausrichtungsschritte umzusetzen. Außerdem kann ein Punkteanordnungsgenerator **90** dafür programmiert werden, die die Punkteanordnung definierenden Schritte anzuwenden, die im Zusammenhang mit den Fig. 4–Fig. 10 erörtert wurden. Es ist ersichtlich, dass die obige Programmierung unter Anwendung von Programmierungstechniken implementiert werden kann, die wohlbekannt und unter Fachleuten wohlverstanden sind.

[0073] Die laserschockbehandelten Oberflächen **54** der Druck- und der Saugseite **46** und **48** der Anströmkante LE werden mit der ablativen Beschichtung **55** überzogen. Dann wird die Schaufel **8** kontinuierlich bewegt, während die Oberflächen **54** kontinuierlich von den stationären Laserstrahlen **2** durch den Schleier aus fließendem Wasser **21** beschossen werden und die steuerbar überlappenden laserschockbehandelten kreisförmigen Punkte **58** gebildet werden. Der Wasserschleier **21** ist als durch eine konventionelle Wasserdüse **23** am Ende eines konventionellen Wasserzufuhrrohrs **19** mit Wasser versorgt dargestellt. Das Laserschockoberflächenbehandlungssystem **1** verfügt über einen konventionellen Generator **31** mit einem Oszillator **33** und einem Vor-Verstärker **39A** und einen Strahlteiler **43**, der den vorverstärkten Laserstrahl in zwei optische Übertragungsschaltungen einspeist, jede mit einem ersten **39** und zweiten Verstärker **41** und einer Optik **35**, die optische Elemente umfasst, die den Laserstrahl **2** auf die laserschockbehandelten Oberflächen **54** übertragen und dort fokussieren. Es kann ein Controller **24** eingesetzt werden, um das Laserstrahlgerät **1** einzustellen und zu steuern, um die Laserstrahlen **2** gesteuert auf die laserschockbehandelten Oberflächen **54** abzufeuern. Abgetragenes Beschichtungsmaterial wird durch den Schleier aus fließendem Wasser fortgespült.

[0074] Der Laser kann sequenziell „on the fly" abgefeuert werden, so dass die laserschockbehandelte Oberfläche **54** mit mehr als einer Sequenz – Beschichtung und dann Laserschockbehandlung der Oberfläche, während kontinuierlich Bewegung zwischen dem Schaufelblatt **34** der Schaufel **8** und den Laserstrahlen **2** bewirkt wird, wie in Fig. 15 und Fig. 16 dargestellt – behandelt wird. In dem vorliegenden Ausführungsbeispiel wird das Schaufelblatt

34 bewegt, während die Laserstrahlen **2** kontinuierlich auf die Oberflächen **54** abgefeuert werden, so dass übereinstimmende Paare kreisförmiger Punkte simultan von den Doppel-Laserstrahlen getroffen werden. Die Sequenz aus Beschichtung und Laserschockbehandlung kann mehrmals wiederholt werden, um eine gewünschte Stärke der kompressiven Eigenspannungen und eine gewünschte Tiefe der laserschockbehandelten Ausbuchtungen **53** zu erreichen.

[0075] Für Fachleute ist ersichtlich, dass das Verfahren derart angepasst werden kann, dass nur neue oder fast neue Beschichtungen abgetragen werden, ohne irgendeinen merkbaren Effekt oder eine merkbare Beschädigung der Schaufelblattoberfläche. Das verhält sich so, damit sogar minimale Defekte oder ein neuerliches Schmelzen auf Grund des Lasers verhindert werden, weil diese sonst unerwünschte aerodynamische Auswirkungen auf die Funktion der Schaufel haben könnten. Es können mehrere Sequenzen erforderlich sein, um die gesamte Anordnung abzudecken, und die Wiederbeschichtung der laserschockbehandelten Oberflächen **54** wird zwischen den einzelnen Laserbeschusssequenzen vorgenommen, während derer jedes Punktepaar mehrmals getroffen wird. Der Laserbeschuss besteht aus mehreren Laserbeschüssen oder Pulsen, mit einer zwischen den Beschössen liegenden Zeitspanne, die oft als „Rep" bezeichnet wird. Während der Rep wird das Teil/der Gegenstand bewegt, so dass der nächste Puls an der Position des nächsten laserschockbehandelten Punktepaars eintritt. Vorzugsweise wird das Teil kontinuierlich bewegt und zeitlich so gesteuert, dass es sich bei dem Puls oder Abfeuern des Laserstrahls an der richtigen Position befindet. Es können eine oder mehrere Wiederholungen der Sequenz verwendet werden, um jedes laserschockbehandelte kreisförmige Punktepaar mehr als einmal zu treffen. Dies kann es ebenfalls einen geringeren Verbrauch von Laserenergie bei jedem Abfeuern oder Laserpuls ermöglichen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Doppel-Laserschockoberflächenbehandlung eines Gegenstandes, wobei das Verfahren umfasst:
das Definieren einer Punkteanordnung, die mehrere Punkte auf einer ersten Oberfläche des für die Oberflächenbehandlung vorgesehenen Gegenstandes umfasst;
die Definition einer Punkteanordnung, die mehrere Punkte auf einer zweiten Oberfläche des für die Oberflächenbehandlung vorgesehenen Gegenstandes umfasst, wobei die erste und zweite Oberfläche einander entgegengesetzte Oberflächen umfassen und wobei jeder der entsprechenden Punkte auf der zweiten Oberfläche so angeordnet ist, dass er mit einem entsprechenden Punkt auf der ersten Oberfläche übereinstimmt, und wobei die erste und zweite Oberfläche mehrere übereinstimmende Punktepaare umfassen, und
die Erzeugung eines Doppel-Laserstrahls, der entsprechend ausgerichtet ist, um simultan auf jedem entsprechend übereinstimmenden Punktepaar aufzuprallen, **dadurch gekennzeichnet**, dass
eine auf den Gegenstand bezogene dreidimensionale Ausrichtung des Doppel-Laserstrahls umfasst:
das Definieren eines Gegenstandsausrichtungsvektors und einer Gegenstandsarbeitsebene, entlang derer der Gegenstandsausrichtungsvektor verläuft;
das Definieren eines Laserausrichtungsvektors und einer Laserarbeitsebene, entlang derer der Laserausrichtungsvektor verläuft;
eine aufeinander bezogene Rotation der Gegenstandsarbeitsebene und der Laserarbeitsebene, um eine parallele Ausrichtung des Gegenstandsausrichtungsvektors und des Laserausrichtungsvektors herzustellen, und
eine aufeinander bezogene Übersetzungsbewegung zwischen dem Gegenstand und dem Doppel-Laserstrahl, so dass einer der Laserstrahlen mit dem Mittelpunkt des Punktes auf der ersten Oberfläche übereinstimmt und der andere Laserstrahl mit dem Mittelpunkt des Punktes auf der zweiten Oberfläche übereinstimmt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die erste Oberfläche eine konvexe Oberfläche umfasst.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei die Punkteanordnung auf der ersten Oberfläche mehrere überlappende Punkte umfasst.

4. Verfahren nach Anspruch 3, das ferner den Verfahrensschritt umfasst, den Grad der Überlappung von benachbarten Punkten selektiv zu steuern.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die zweite Oberfläche eine konkave Oberfläche umfasst.

6. Gerät zur Doppel-Laserschockoberflächenbehandlung eines Gegenstandes, wobei das Gerät umfasst:
einen Punktanordnungsgenerator zum Definieren einer Punkteanordnung, die mehrere Punkte auf einer ersten Oberfläche des für die Oberflächenbehandlung vorgesehenen Gegenstandes umfasst, und wobei der Punktanordnungsgenerator außerdem eine Punkteanordnung definiert, die mehrere Punkte auf einer zweiten Oberfläche des für die Oberflächenbehandlung vorgesehenen Gegenstandes umfasst, wobei die erste und zweite Oberfläche einander entgegengesetzte Oberflächen umfassen, und wobei jeder der entsprechenden Punkte auf der zweiten Oberfläche so angeordnet ist, dass er mit einem entsprechenden Punkt auf der ersten Oberfläche übereinstimmt, und wobei die erste und zweite Oberfläche

mehrere übereinstimmende Punktepaare umfassen, und

eine Lasereinheit zum Erzeugen von Doppel-Laserstrahlen, die entsprechend ausgerichtet sind, um simultan auf jedem entsprechend übereinstimmenden Punktepaar aufzuprallen, dadurch gekennzeichnet, dass

eine dreidimensionale Ausrichtung der Doppel-Laserstrahlen bezogen auf den Gegenstand von einem Prozessor durchgeführt wird und umfasst:

ein Modul zum Definieren eines Gegenstands-Ausrichtungsvektors und einer Gegenstandsarbeitsebene, entlang derer der Gegenstandsausrichtungsvektor verläuft;

ein Modul zum Definieren eines Laserausrichtungs-vektors und einer Laserarbeitsebene, entlang derer der Laserausrichtungsvektor verläuft;

ein Modul zum Ausführen einer aufeinander bezogenen Rotation der Gegenstandsarbeitsebene und der Laserarbeitsebene, um eine parallele Ausrichtung des Gegenstandsausrichtungsvektors und des Laserausrichtungsvektors herzustellen, und

ein Modul zum Ausführen einer aufeinander bezogenen Übersetzungsbewegung zwischen dem Gegenstand und dem Doppel-Laserstrahl, so dass einer der Laserstrahlen mit dem Mittelpunkt des Punktes auf der ersten Oberfläche übereinstimmt und der andere Laserstrahl mit dem Mittelpunkt des Punktes auf der zweiten Oberfläche übereinstimmt.

7. Gerät nach Anspruch 6, ferner umfassend ein Überlappungs-Steuermodul, um den Grad der Überlappung von benachbarten Punkten selektiv zu steuern.

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

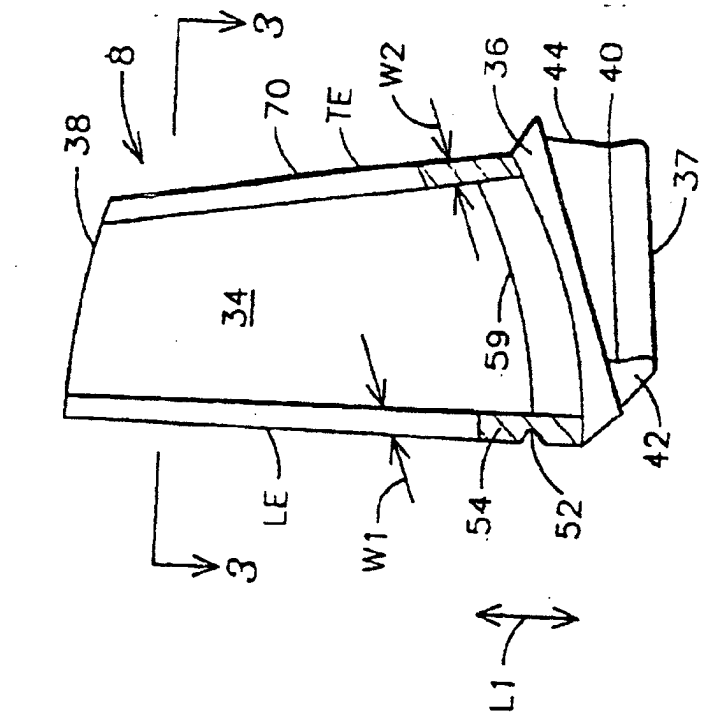


FIG. 2

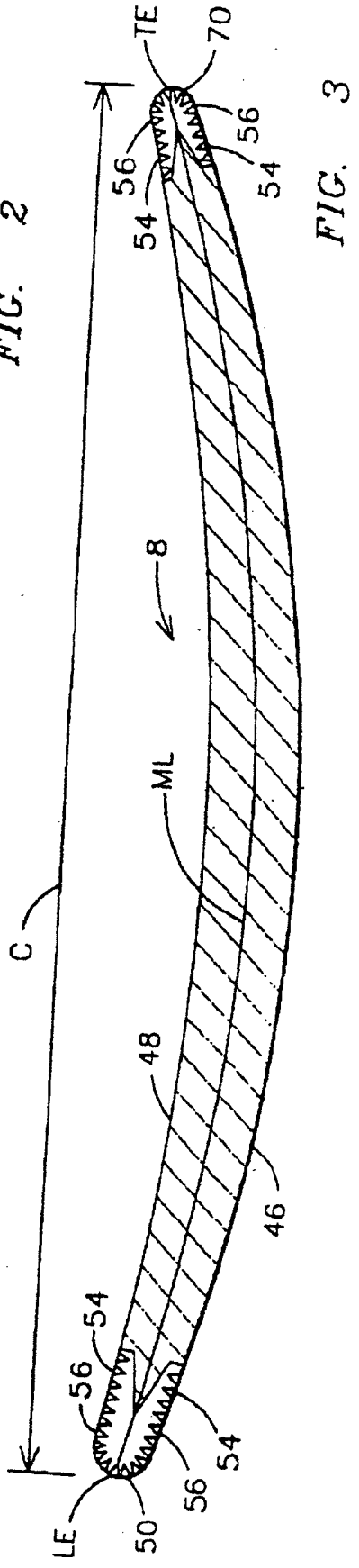


FIG. 3

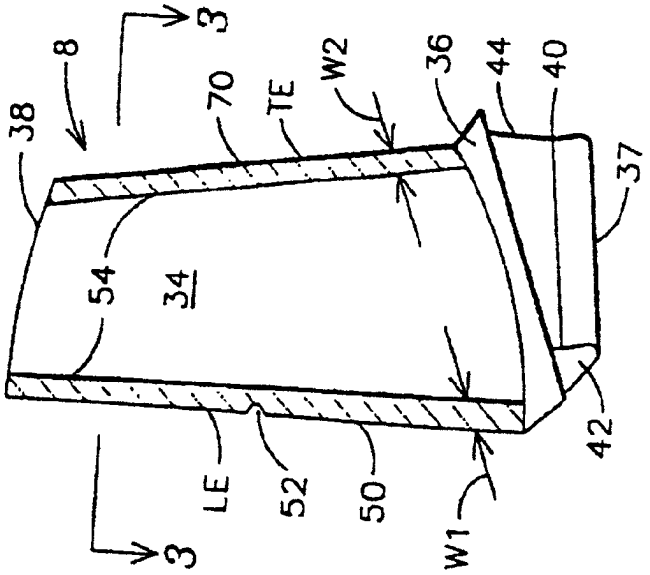


FIG. 1

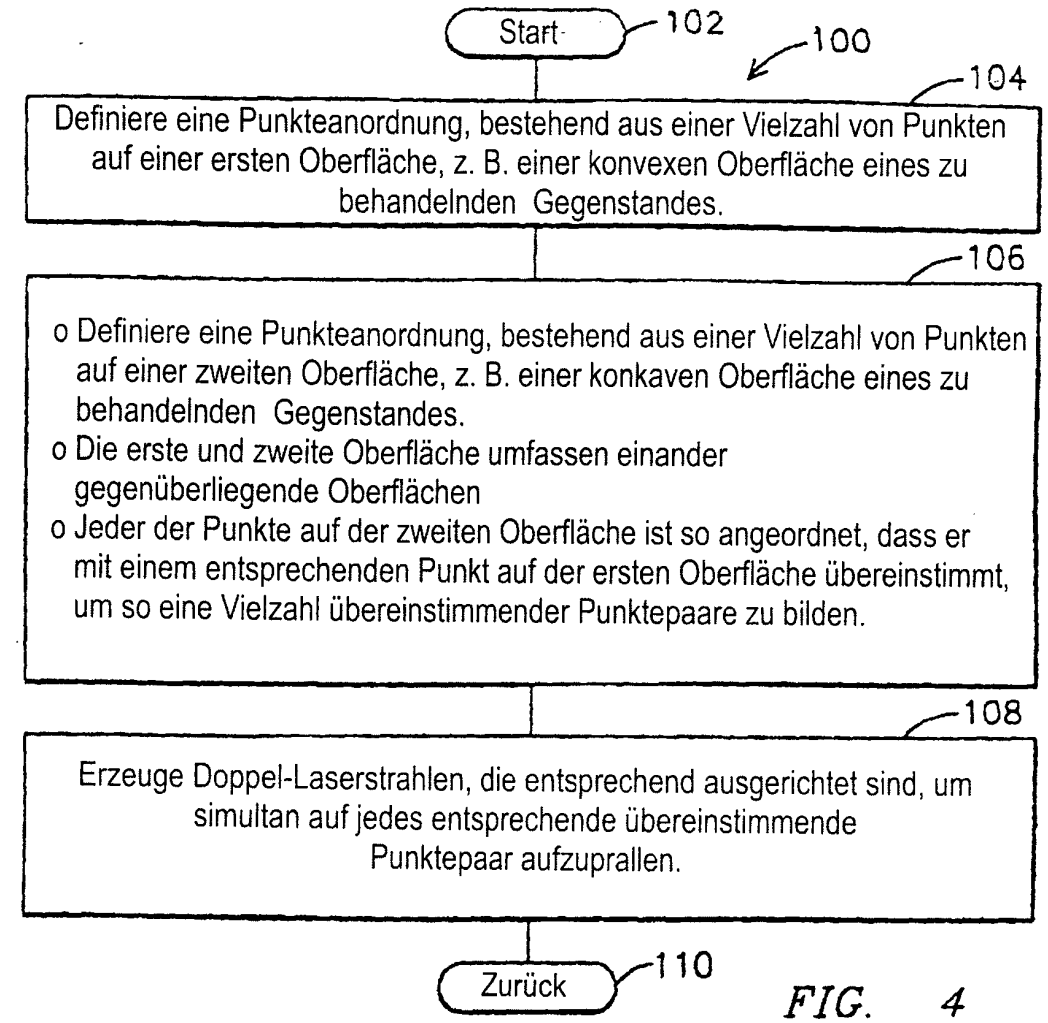

Start
102
100
104
Definiere eine Punkteanordnung, bestehend aus einer Vielzahl von Punkten auf einer ersten Oberfläche, z. B. einer konvexen Oberfläche eines zu behandelnden Gegenstandes.
106
o Definiere eine Punkteanordnung, bestehend aus einer Vielzahl von Punkten auf einer zweiten Oberfläche, z. B. einer konkaven Oberfläche eines zu behandelnden Gegenstandes.
o Die erste und zweite Oberfläche umfassen einander gegenüberliegende Oberflächen
o Jeder der Punkte auf der zweiten Oberfläche ist so angeordnet, dass er mit einem entsprechenden Punkt auf der ersten Oberfläche übereinstimmt, um so eine Vielzahl übereinstimmender Punktepaare zu bilden.
108
Erzeuge Doppel-Laserstrahlen, die entsprechend ausgerichtet sind, um simultan auf jedes entsprechende übereinstimmende Punktepaar aufzuprallen.
Zurück
110

FIG. 4

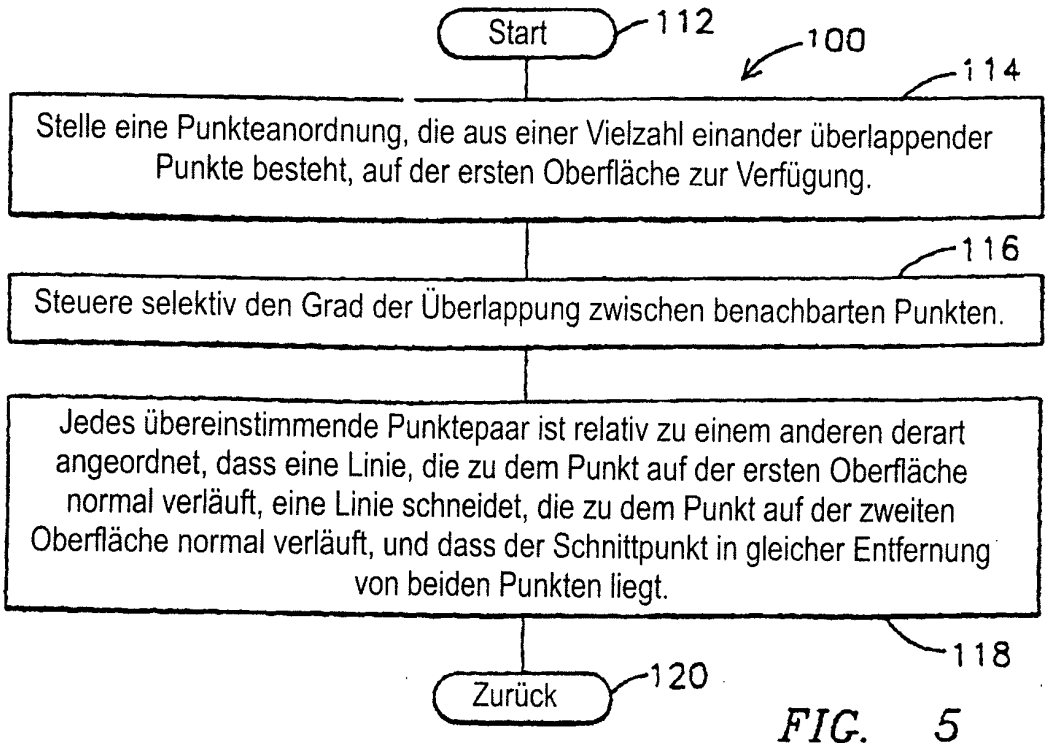

Start
112
100
114
Stelle eine Punkteanordnung, die aus einer Vielzahl einander überlappender Punkte besteht, auf der ersten Oberfläche zur Verfügung.
116
Steuere selektiv den Grad der Überlappung zwischen benachbarten Punkten.
Jedes übereinstimmende Punktepaar ist relativ zu einem anderen derart angeordnet, dass eine Linie, die zu dem Punkt auf der ersten Oberfläche normal verläuft, eine Linie schneidet, die zu dem Punkt auf der zweiten Oberfläche normal verläuft, und dass der Schnittpunkt in gleicher Entfernung von beiden Punkten liegt.
118
Zurück
120

FIG. 5

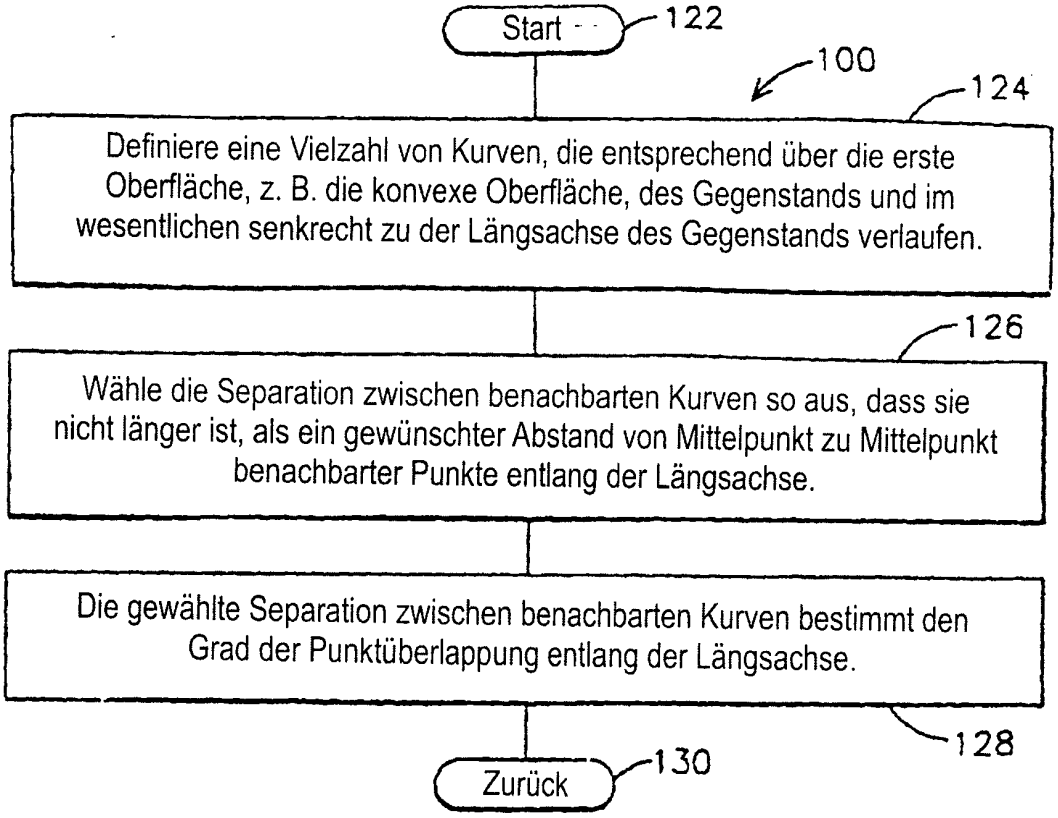

Start
122
100
124
Definiere eine Vielzahl von Kurven, die entsprechend über die erste Oberfläche, z. B. die konvexe Oberfläche, des Gegenstands und im wesentlichen senkrecht zu der Längsachse des Gegenstands verlaufen.
126
Wähle die Separation zwischen benachbarten Kurven so aus, dass sie nicht länger ist, als ein gewünschter Abstand von Mittelpunkt zu Mittelpunkt benachbarter Punkte entlang der Längsachse.
Die gewählte Separation zwischen benachbarten Kurven bestimmt den Grad der Punktüberlappung entlang der Längsachse.
128
Zurück
130

FIG. 6

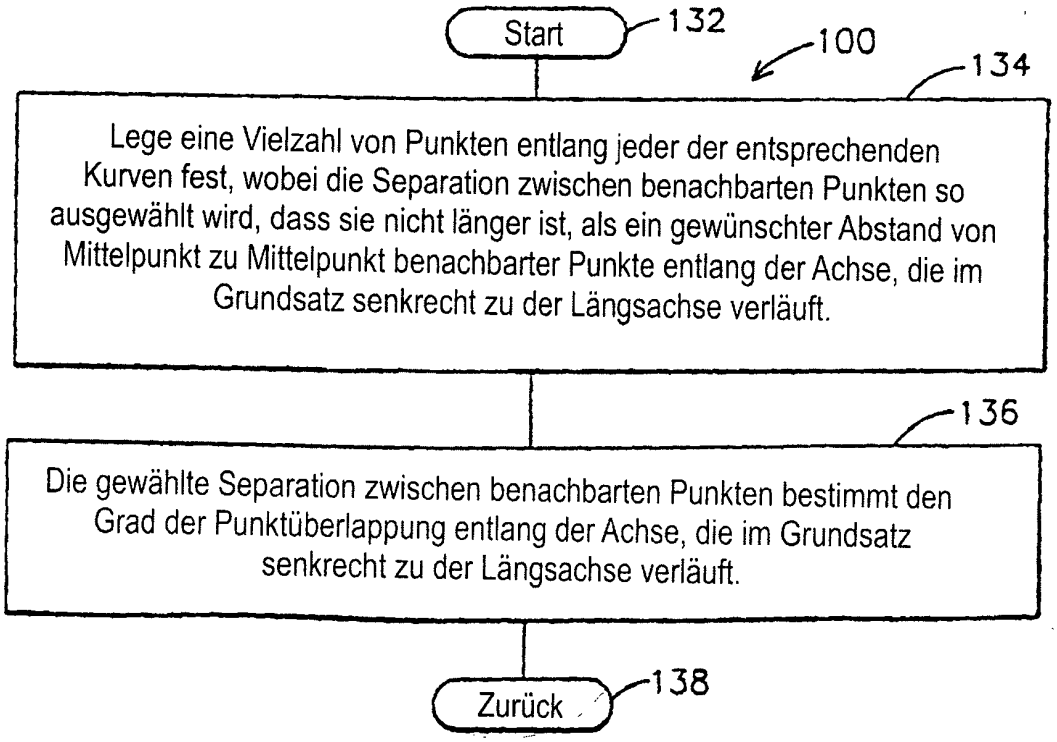

Start
132
100
134
Lege eine Vielzahl von Punkten entlang jeder der entsprechenden Kurven fest, wobei die Separation zwischen benachbarten Punkten so ausgewählt wird, dass sie nicht länger ist, als ein gewünschter Abstand von Mittelpunkt zu Mittelpunkt benachbarter Punkte entlang der Achse, die im Grundsatz senkrecht zu der Längsachse verläuft.
136
Die gewählte Separation zwischen benachbarten Punkten bestimmt den Grad der Punktüberlappung entlang der Achse, die im Grundsatz senkrecht zu der Längsachse verläuft.
Zurück
138

FIG. 7

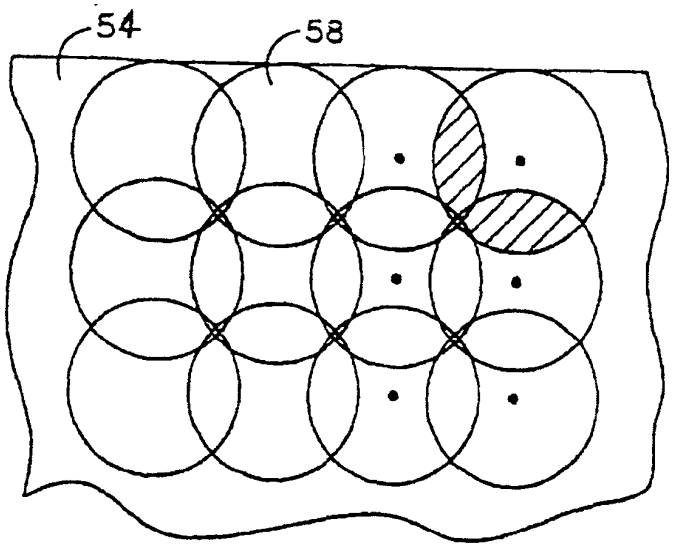


FIG. 8

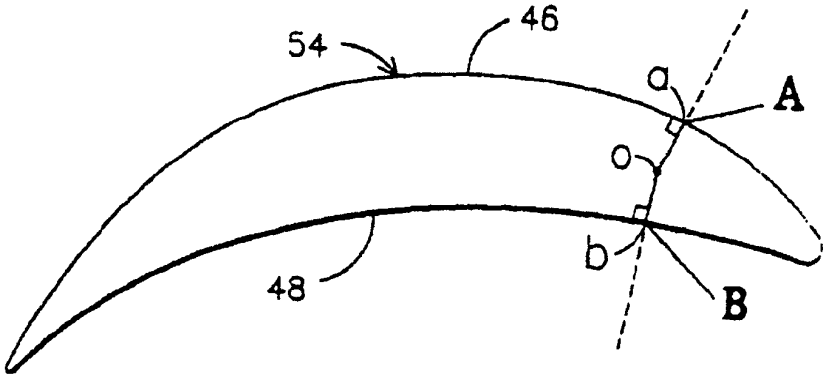


FIG. 9

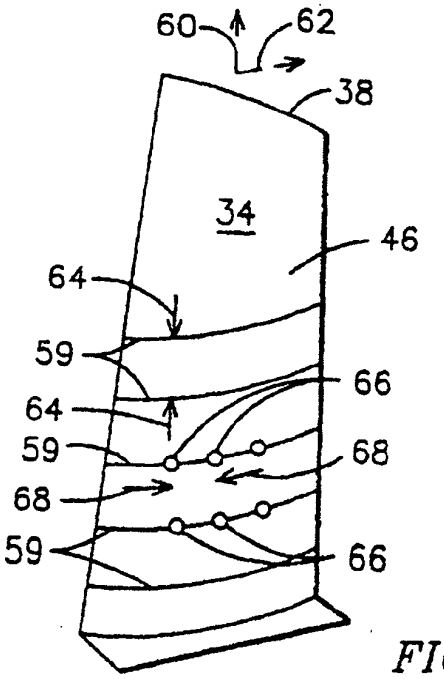


FIG. 10

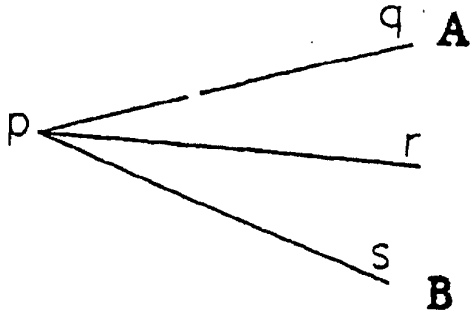


FIG. 13

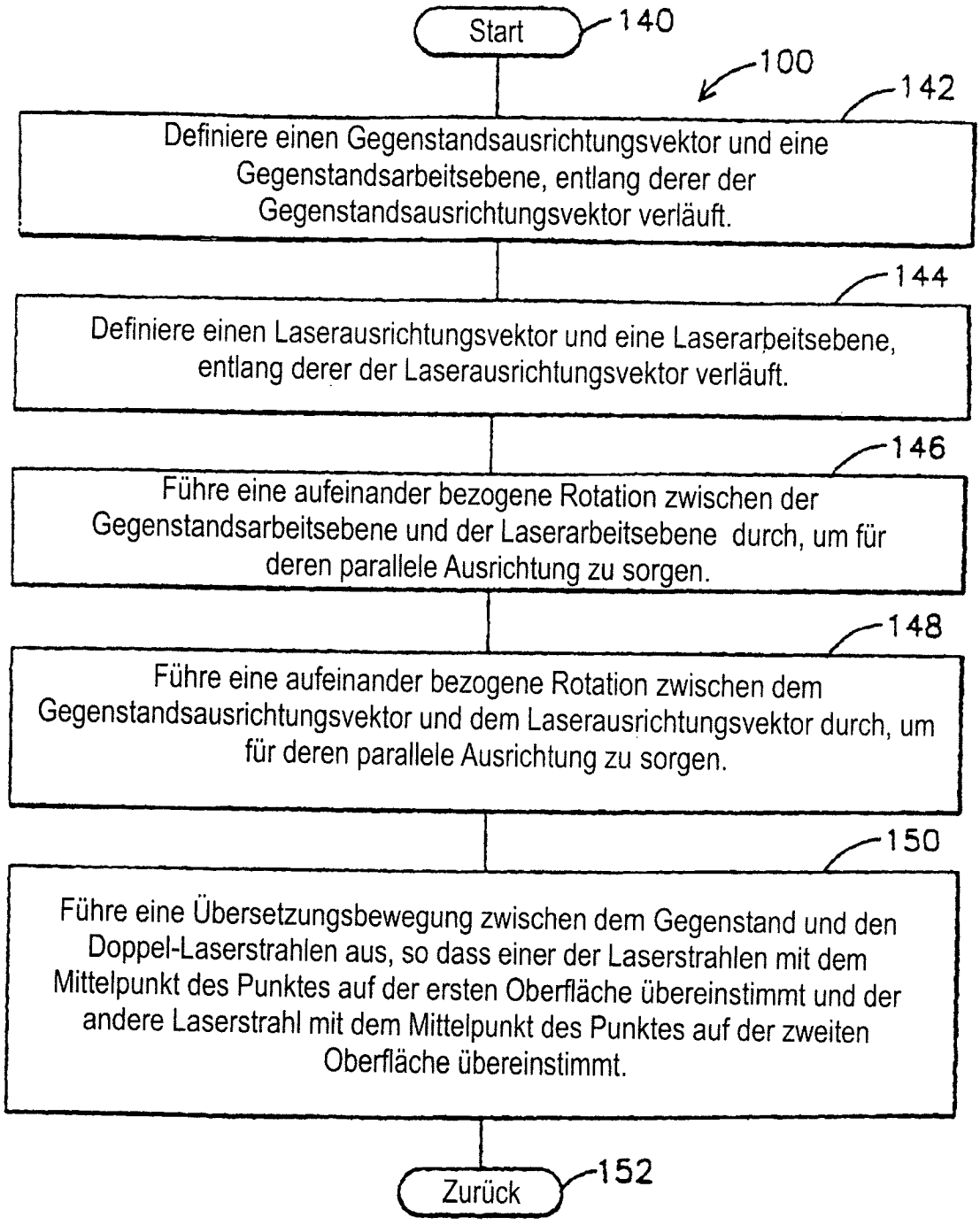

Start
140
100
142
Definiere einen Gegenstandsausrichtungsvektor und eine Gegenstandsarbeitsebene, entlang derer der Gegenstandsausrichtungsvektor verläuft.
144
Definiere einen Laserausrichtungsvektor und eine Laserarbeitsebene, entlang derer der Laserausrichtungsvektor verläuft.
146
Führe eine aufeinander bezogene Rotation zwischen der Gegenstandsarbeitsebene und der Laserarbeitsebene durch, um für deren parallele Ausrichtung zu sorgen.
148
Führe eine aufeinander bezogene Rotation zwischen dem Gegenstandsausrichtungsvektor und dem Laserausrichtungsvektor durch, um für deren parallele Ausrichtung zu sorgen.
150
Führe eine Übersetzungsbewegung zwischen dem Gegenstand und den Doppel-Laserstrahlen aus, so dass einer der Laserstrahlen mit dem Mittelpunkt des Punktes auf der ersten Oberfläche übereinstimmt und der andere Laserstrahl mit dem Mittelpunkt des Punktes auf der zweiten Oberfläche übereinstimmt.
Zurück
152

FIG. 11

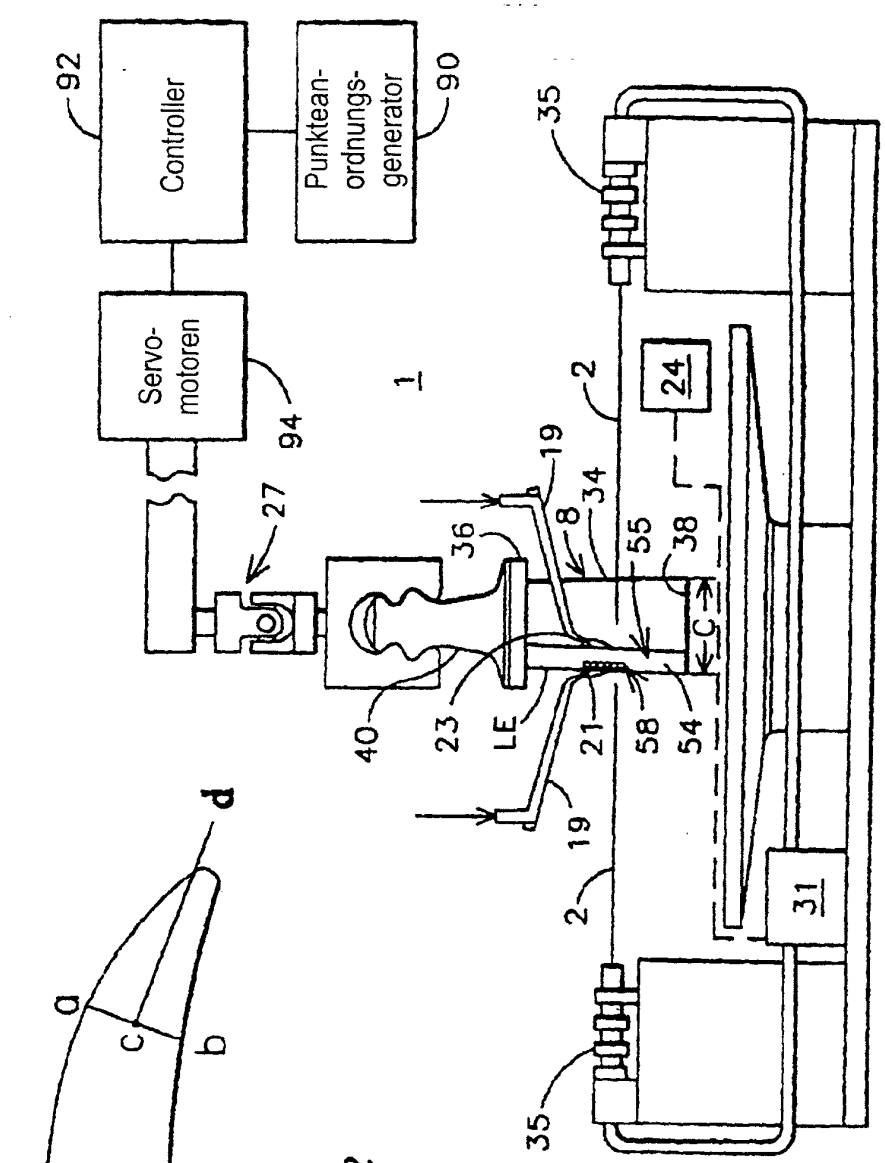

92
Controller
Punktean-ordnungs-generator
90
Servo-motoren
94
1
27
35
2
24
19
34
8
36
55
38
C
40
23
LE
21
58
54
19
2
31
35

FIG. 15

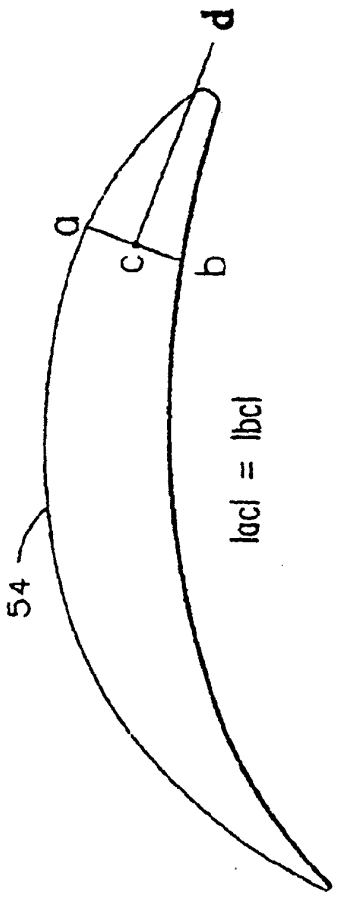

d
a
c
b
54
lacl = lbcl

FIG. 12

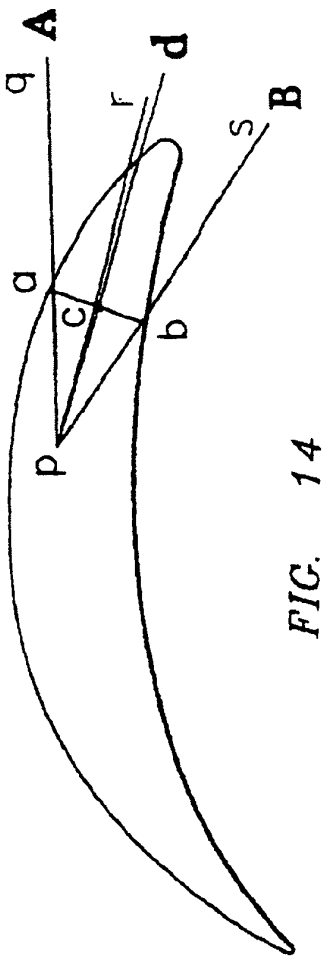

q
A
d
r
s
B
a
c
b
p

FIG. 14

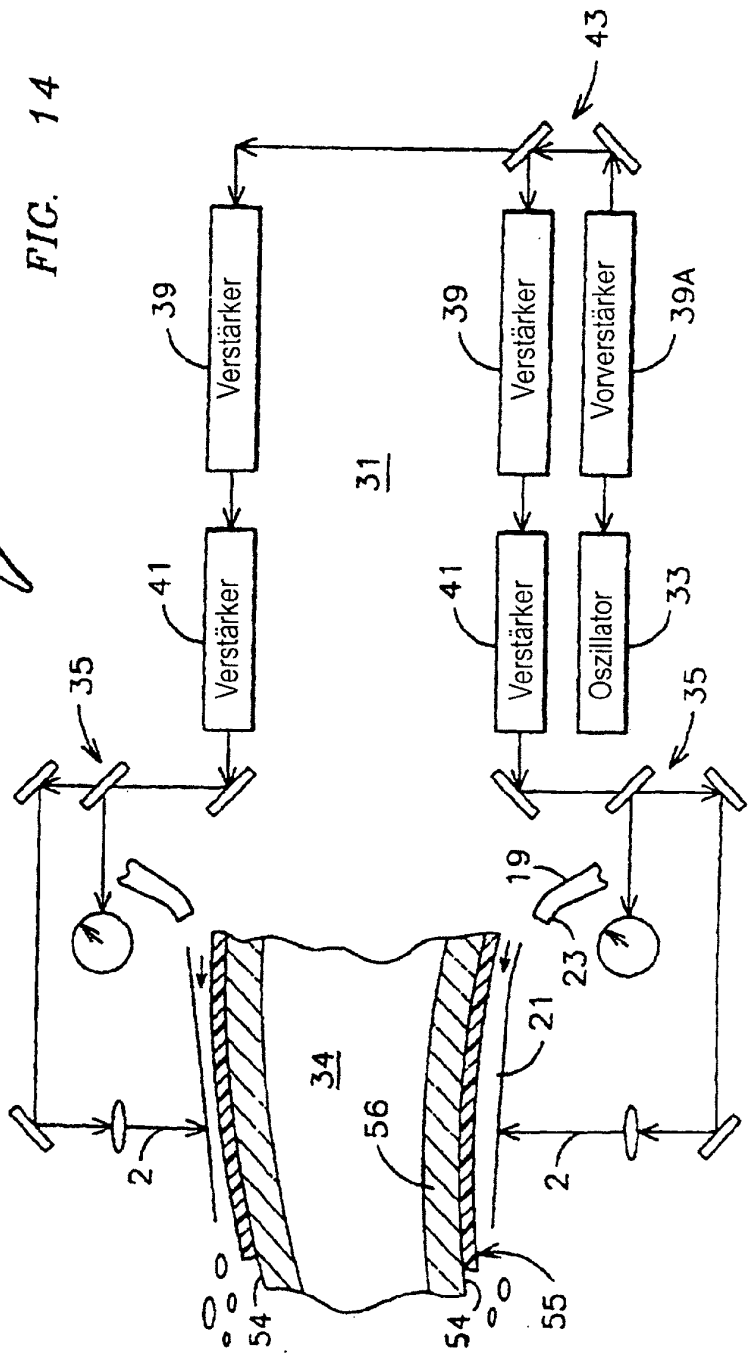

43
39
Verstärker
39
Verstärker
Vorverstärker
39A
31
41
Verstärker
41
Verstärker
Oszillator
33
35
35
19
23
21
34
56
2
2
54
54
55

FIG. 16