



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2022 115 566.8**
(22) Anmeldetag: **22.06.2022**
(43) Offenlegungstag: **28.12.2023**

(51) Int Cl.: **A61F 9/008** (2006.01)
A61B 18/20 (2006.01)
B23K 26/03 (2006.01)

(71) Anmelder:
**SCHWIND eye-tech-solutions GmbH, 63801
Kleinostheim, DE**

(74) Vertreter:
**Hofstetter, Schurack & Partner - Patent- und
Rechtsanwaltskanzlei, PartG mbB, 81541
München, DE**

(72) Erfinder:
**Arba Mosquera, Samuel, 63739 Aschaffenburg,
DE; Triefenbach, Nico, 63814 Mainaschaff, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

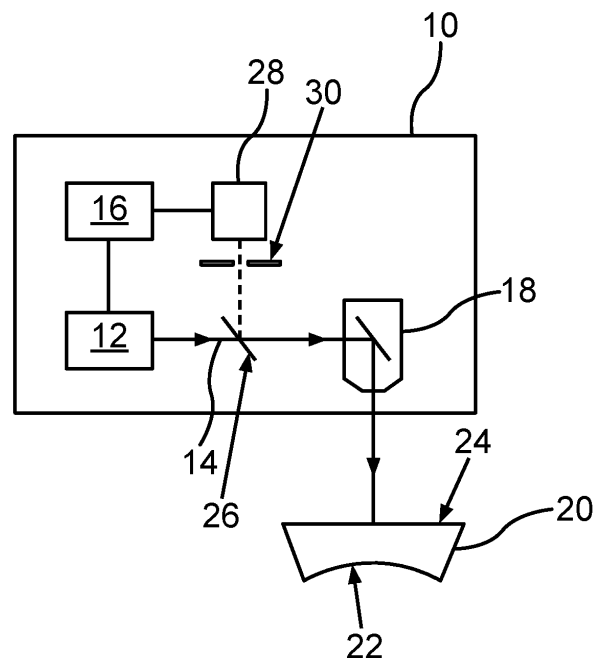
DE	10 2006 036 800	A1
DE	10 2006 046 370	A1
EP	2 349 149	B1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Materialbearbeitungsvorrichtung und Verfahren zum Vorbereiten einer Materialbearbeitungsvorrichtung**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Vorbereiten einer Materialbearbeitungsvorrichtung (10) zur Materialbearbeitung eines Objekts, wobei an der Materialbearbeitungsvorrichtung (10) ein für eine Bearbeitungslaserstrahlung transparentes auf das Objekt aufzusetzendes Kontaktelement (20) befestigt wird, das auf seiner auf das Objekt aufzusetzenden Seite eine Kontaktfläche (22) und auf seiner der Materialbearbeitungsvorrichtung zugewandten Seite eine Eintrittsfläche (24) aufweist, wobei vor der Bearbeitung des Objekts eine Form der Kontaktfläche (22) und/oder Eintrittsfläche (24) mittels Einstrahlung von Messlaserstrahlung (14) bestimmt wird, indem die Messlaserstrahlung (14) mittels der variablen Fokusversteleinrichtung (18) auf die Kontaktfläche (22) und/oder Eintrittsfläche (24) fokussiert wird, wobei aus dem Fokus der Messlaserstrahlung (14) rückgestreute oder rückreflektierte Strahlung konfokal detektiert wird und somit eine Lage von Schnittpunkten auf der Kontaktfläche (22) und/oder Eintrittsfläche (24) ermittelt wird, wobei ein dreidimensionales Flächenmodell an die ermittelte Lage der Schnittpunkte angepasst wird, wobei durch das Flächenmodell die 3-dimensionale Form der Kontaktfläche (22) und/oder Eintrittsfläche (24) bereitgestellt wird.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Vorbereiten einer Materialbearbeitungsvorrichtung zur Materialbearbeitung durch Erzeugung optischer Durchbrüche in oder an einem Objekt, sowie eine Materialbearbeitungsvorrichtung, die dazu ausgebildet ist, das Verfahren durchzuführen. Des Weiteren betrifft die Erfindung ein Computerprogramm, umfassend Befehle, die bewirken, dass die Materialbearbeitungsvorrichtung das Verfahren durchführt, sowie ein computerlesbares Medium, auf dem das Computerprogramm gespeichert ist.

[0002] Bei der Materialbearbeitung wird oft ein Laser auf zu bearbeitende Gebiete eines Objekts fokussiert, wobei hierfür Bearbeitungslaserstrahlung eingesetzt wird, dessen Intensität hoch genug ist, um optische Durchbrüche zu erzeugen. Damit die Bearbeitungslaserstrahlung auf vorher festgelegte Positionen fokussiert werden kann, ist es in der Regel unerlässlich, dass das Objekt in exakt definierter Lage zur Bearbeitungslaserstrahlung ausgerichtet und gehalten wird. Zum Halten des Objekts in exakt definierter Lage wird üblicherweise ein Kontaktelement verwendet, mit dem das zu bearbeitende Objekt an einer Position fixiert werden kann, wodurch definierte Verhältnisse erreichbar sind. Das Kontaktelement wird damit Teil des Strahlengangs der Bearbeitungslaserstrahlung.

[0003] Dies ist insbesondere bei der Mikrobearbeitung von Materialien notwendig, die nur eine geringe lineare optische Absorption im Spektralbereich der bearbeitenden Laserstrahlung aufweisen, oder bei der Erzeugung von Strukturen innerhalb des Objekts, insbesondere bei der laserinduzierten Brechungsindexänderung (LIRIC). Bei solchen Materialien werden üblicherweise nicht lineare Wechselwirkungen zwischen Laserstrahlung und Material ausgenutzt, meist in Form eines optischen Durchbruchs, der im Fokus hochenergetischer Laserstrahlung erzeugt wird. Da die bearbeitende Wirkung dann nur im Laserstrahlfokus stattfindet, ist es wichtig, die Lage des Fokus exakt dreidimensional auszurichten. Zusätzlich zu einer zweidimensionalen Ablenkung des Laserstrahls ist somit eine exakte Tiefeneinstellung der Fokusslage erforderlich. Das Kontaktelement dient dazu, konstante und auch mit einer gewissen Genauigkeit bekannte optische Verhältnisse im Strahlengang zum Objekt sicherzustellen, indem durch das Kontaktelement das Objekt und die Laserbearbeitungsvorrichtung mechanisch gekoppelt wird und zudem der Objektoberfläche eine Form mit bekannter optischer Wirkung bereitgestellt wird.

[0004] Eine typische Anwendung für ein solches Kontaktelement ist bei ophthalmologischen Verfahren, insbesondere bei einer Ablation und/oder Photo-disruption und/oder laserinduzierten Brechungsindex-

änderung (laserinduced refractive index change; LIRIC), wobei das Kontaktelement, das beispielsweise Glas, Plastik, PMMA und/oder Polymere umfassen kann, zumindest für eine Bearbeitungslaserstrahlung transparent wirken soll. Dabei ist die Materialbearbeitungsvorrichtung mit einem ophthalmologischen Laser ausgebildet, der eine Laserstrahlung in die Hornhaut fokussiert. Im Fokus kann ein optischer Durchbruch entstehen, der eine lokale Trennung des Hornhautgewebes bewirkt. Durch geeignete Aneinanderreihung dieser optischen Durchbrüche können dann Hornhautschichten abgetragen oder ein Hornhautvolumen isoliert und entfernt werden.

[0005] Eine Form und Lage des Kontaktelements ist bei einer solchen Materialbearbeitung genauigkeitsbestimmend, wobei die Lage des Kontaktelements zu der Materialbearbeitungsvorrichtung nach Kopplung mit dieser und vor der Materialbearbeitung im Rahmen der Vorbereitung der Materialbearbeitungsvorrichtung bestimmt wird. Die grundlegende Form des Kontaktelements ist dabei üblicherweise bekannt, wobei diese unter Umständen leicht von einer angegebenen Form abweichen kann.

[0006] Aus der WO 2008/040436 A1 sind eine gattungsgemäße Vorrichtung und ein Verfahren zum Vorbereiten der Vorrichtung zur Materialbearbeitung durch Erzeugung optischer Durchbrüche in oder an einem Objekt bekannt. Die Vorrichtung weist eine variable, dreidimensional wirkende Fokusverstelleinrichtung zur Fokussierung gepulster Bearbeitungslaserstrahlung auf verschiedene Orte im oder auf dem Objekt auf, wobei an der Vorrichtung ein für die Bearbeitungslaserstrahlung transparentes auf das Objekt aufzusetzendes Kontaktelement befestigt wird, das auf seiner auf das Objekt aufzusetzenden Seite eine gekrümmte Kontaktfläche vorbekannter Form aufweist, wobei vor der Bearbeitung des Objekts die Lage der Kontaktfläche bezüglich der Fokusverstelleinrichtung mittels Einstrahlung von Messlaserstrahlung auf die Kontaktfläche bestimmt wird, indem die Messlaserstrahlung mittels der variablen Fokusverstelleinrichtung nahe der oder auf die Kontaktfläche fokussiert wird. Die Energiedichte der fokussierten Messlaserstrahlung ist zur Erzeugung eines optischen Durchbruchs zu gering, und die Fokusslage der Messlaserstrahlung in einer Messfläche wird derart verstellt, dass diese die erwartete Lage der Kontaktfläche schneidet, wobei aus dem Fokus der Messlaserstrahlung rückgestreute oder reflektierte Strahlung konfokal detektiert wird, wobei aus der konfokal detektierten Strahlung und der zugeordneten Einstellung der variablen Fokusverstelleinrichtung die Lage von Schnittpunkten zwischen Messfläche und Kontaktfläche ermittelt wird, wobei aus der Lage der Schnittpunkte und der vorbekannten Form der Kontaktfläche die Lage der Kontaktfläche bestimmt wird.

[0007] Nachteilig bei einer solchen Bestimmung der Lage des Kontaktelements ist es, dass die exakte Form des Kontaktelements vorbekannt sein muss, um aus den Schnittpunkten die Lage der Kontaktfläche zurückrechnen zu können. Jedoch können Kontaktelemente gewissen Toleranzen aufweisen, die eine solche Lagebestimmung verfälschen können.

[0008] Daher ist es die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Vorbereitung der Materialbearbeitungsvorrichtung zu verbessern, insbesondere die Nachteile des Stands der Technik zu vermeiden.

[0009] Diese Aufgabe wird durch das erfindungsgemäße Verfahren, die erfindungsgemäßen Vorrichtungen, das erfindungsgemäße Computerprogramm sowie das erfindungsgemäße computerlesbare Medium gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen mit zweckmäßigen Weiterbildungen der Erfindung sind in den jeweiligen Unteransprüchen angegeben, wobei vorteilhafte Ausgestaltungen des Verfahrens als vorteilhafte Ausgestaltungen der Behandlungsvorrichtung, der Steuereinrichtung, des Computerprogramms und des computerlesbaren Mediums und umgekehrt anzusehen sind.

[0010] Die Erfindung basiert auf der Idee, dass mittels Messlaserstrahlung direkt die Form des Kontaktelements, insbesondere einer Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche, und damit die Lage im Bezug zu der Bearbeitungslaserstrahlung ermittelt werden kann ohne dafür davor die exakte Form zu kennen. Hierzu kann eine Mehrzahl von Schnittpunkten der Laserstrahlung mit der Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche bestimmt werden, aus denen dann die Form berechnet werden kann.

[0011] Durch die Erfindung ist ein Verfahren zum Vorbereiten einer Materialbearbeitungsvorrichtung zur Materialbearbeitung durch Erzeugung optischer Durchbrüche in oder an einem Objekt bereitgestellt. Die Materialbearbeitungsvorrichtung weist eine variable, dreidimensional wirkende Fokusverstelleinrichtung zur Fokussierung von Bearbeitungslaserstrahlung auf verschiedene Orte im oder auf dem Objekt auf, wobei an der Materialbearbeitungsvorrichtung ein für die Bearbeitungslaserstrahlung transparentes auf das Objekt aufzusetzendes Kontaktelement befestigt wird, das auf seiner auf das Objekt aufzusetzenden Seite eine Kontaktfläche und auf seiner der Materialbearbeitungsvorrichtung zugewandten Seite eine Eintrittsfläche für die Bearbeitungslaserstrahlung aufweist. Vor der Bearbeitung des Objekts wird eine Form der Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche mittels Einstrahlung von Messlaserstrahlung auf die Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche bestimmt, indem die Messlaserstrahlung mittels der variablen Fokusverstelleinrichtung nahe der oder auf die Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche fokussiert wird, wobei eine Energiedichte

der fokussierten Messlaserstrahlung zur Erzeugung eines optischen Durchbruchs zu gering ist, wobei aus dem Fokus der Messlaserstrahlung rückgestreute oder rückreflektierte Strahlung konfokal detektiert wird, wobei aus der konfokal detektierten Strahlung und der zugeordneten Einstellung der variablen Fokusverstelleinrichtung eine Lage von Schnittpunkten auf der Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche ermittelt wird. Ein dreidimensionales Flächenmodell wird an die ermittelte Lage der Schnittpunkte angepasst, wobei durch das Flächenmodell die 3-dimensionale Form der Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche bereitgestellt wird.

[0012] Mit anderen Worten kann die Materialbearbeitungsvorrichtung einen oder mehrere Laser aufweisen, wobei der oder die Laser zur Bereitstellung von Bearbeitungslaserstrahlung, durch die optische Durchbrüche im Objekt entstehen können, ausgebildet ist. Außerdem kann der oder die Laser dazu ausgebildet sein, Messlaserstrahlung, deren Energie zu gering zur Erzeugung optischer Durchbrüche ist, bereitzustellen. Die Messlaserstrahlung kann vorzugsweise durch die gleiche Fokusverstelleinrichtung, die zur Fokussierung der Bearbeitungslaserstrahlung verwendet wird, auf die Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche des Kontaktelements fokussiert werden. Das Kontaktelement, das für die Bearbeitungslaserstrahlung transparent ist, kann vorher mit der Materialbearbeitungsvorrichtung gekoppelt werden, so dass es im Strahlengang der Bearbeitungslaserstrahlung und/oder der Messlaserstrahlung ist.

[0013] Insbesondere kann an einem Übergang von Luft zu der Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche des Kontaktelements ein Brechungsindexsprung stattfinden, durch den rückgestreute oder rückreflektierte Strahlung im Vergleich zu einer Fokussierung in Luft und/oder innerhalb des Kontaktelements unterschieden werden kann. Somit wird ermöglicht, insbesondere mittels einer konfokalen Messung, Schnittpunkte der Messlaserstrahlung auf der Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche zu ermitteln. Dabei nutzt die konfokale Detektion der rückgestreuten oder reflektierten Messlaserstrahlung vorteilhaft aus, dass der Anteil der an der Grenzfläche eines transparenten Mediums rückgestreuten Sendestrahlung, die konfokal detektiert wird, signifikant höher ist als innerhalb des transparenten Kontaktelements. Die konfokale Detektion liefert durch die dabei auftretende räumliche Filterung ein ausreichendes Signal, dessen Stärke im Wesentlichen von der Brechzahldifferenz der an der Kontaktfläche aneinandergrenzenden Medien abhängig ist. Das Prinzip der konfokalen Messung ist hierbei aus dem Stand der Technik bekannt.

[0014] Nachdem die Lage von Schnittpunkten auf der Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche ermittelt

wurde, kann ein dreidimensionales Flächenmodell an die ermittelte Lage der Schnittpunkte angepasst werden. Das heißt, dass beispielsweise mathematische Modelle an die Schnittpunkte gefittet werden können, um die Form der Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche zu bestimmen. Somit ist es nicht nötig, die Form der Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche vorher zu kennen, um die Lage des Kontaktelements in Bezug auf die Materialbearbeitungsvorrichtung zu bestimmen. Durch das Verfahren kann direkt die Form der jeweiligen Fläche im Koordinatensystem der Materialbearbeitungsvorrichtung beziehungsweise der Bearbeitungslaserstrahlung bestimmt werden, wodurch auch gleichzeitig die Lage des Kontaktelements bekannt ist. Hierfür ist es für den Fachmann ersichtlich, dass bei Erhöhung der Anzahl der Schnittpunkte eine verbesserte Bestimmung der dreidimensionalen Form der Kontaktfläche und/oder der Eintrittsfläche erreicht werden kann. Daher wird der Fachmann für die Anwendung eine ausreichende Zahl von Schnittpunkten suchen und/oder gegebenenfalls die Einstrahlung von Messlaserstrahlung so lange wiederholen, bis eine genügend hohe Anzahl an Schnittpunkten gefunden ist. Vorzugsweise kann bei Kenntnis einer grundlegenden Form des Kontaktelements auch eine geeignete Verteilung der Messlaserstrahlung und damit der Schnittpunkte ausgewählt werden, um diese Form abzutasten.

[0015] Die Bearbeitungslaserstrahlung und/oder Messlaserstrahlung kann vorzugsweise eine gepulste Laserstrahlung sein, wobei ein Energiebereich der Messlaserstrahlung unter einer Energie für einen optischen Durchbruch ist, insbesondere unter ein Joule pro Quadratcentimeter beziehungsweise einer Leistungsdichte pro Puls unter 10^9 Watt pro Quadratcentimeter.

[0016] Durch die Erfindung ergibt sich der Vorteil, dass eine Vorbereitung für eine Materialbearbeitung verbessert werden kann, indem keine vorherige Kenntnis über das Kontaktelement benötigt wird, da mittels des Verfahrens die Form und somit die Lage in Bezug auf die Materialbearbeitungsvorrichtung beziehungsweise die Bearbeitungslaserstrahlung direkt bestimmt werden kann. Insbesondere kann eine Bestrahlungsplanung dann an die ermittelte Form angepasst werden.

[0017] Die Erfindung umfasst auch Ausgestaltungsformen, durch die sich zusätzliche Vorteile ergeben.

[0018] Eine Ausgestaltungsform sieht vor, dass durch die Lage der Schnittpunkte auf der Kontaktfläche und/oder der Eintrittsfläche eine Gitterstruktur bereitgestellt wird, wobei als das dreidimensionale Flächenmodell Polygone an die Gitterstruktur angepasst werden. Das bedeutet, dass durch die Messlaserstrahlung ein Raum abgetastet wird, in der sich

die Kontaktfläche und/oder die Eintrittsfläche befindet, wobei die konfokal detektierten Schnittpunkte mit der jeweiligen Fläche als dreidimensionale Gitterstruktur vorliegen. An diese Gitterstruktur können dann Polygone angepasst werden, die die dreidimensionale Form der jeweiligen Fläche ergeben. Die Polygone erhält man beispielsweise, indem man die Schnittpunkte, die die Gitterstruktur bilden, insbesondere benachbarte Schnittpunkte, miteinander verbindet, so dass zwischen den Gitterpunkten eine geschlossene Fläche entsteht. Dieses kann vorzugsweise für alle Gitterpunkte der Gitterstruktur durchgeführt werden, um mit einem geschlossenen Polygonzug die Form der jeweiligen Fläche zu erhalten. Somit kann auf einfache Art und Weise die dreidimensionale Form der jeweiligen Fläche im Raum bestimmt werden.

[0019] Eine weitere Ausgestaltung sieht vor, dass Polynome, insbesondere ein Polynomzug, an die Schnittpunkte auf der Kontaktfläche und/oder der Eintrittsfläche angepasst werden. Mit anderen Worten kann eine Funktion, die stückweise aus Polynomen n-ten Grades, beispielsweise bi-kubisch, besteht, an die Schnittpunkte angepasst werden. Solche Splines (Polynomzug) können dann verwendet werden, um die Schnittpunkte und die dazwischenliegende Fläche zu interpolieren und somit die dreidimensionale Form der Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche bereitzustellen. Vorzugsweise kann dies durch Fit-Algorithmen durchgeführt werden, die die Schnittpunkte in einer oder mehreren Ebenen verwenden, um daran die Polynome zu fitten. Hierdurch ergibt sich der Vorteil, dass eine weitere bevorzugte Ausgestaltungsform bereitgestellt werden kann.

[0020] Eine weitere Ausgestaltungsform sieht vor, dass als dreidimensionales Flächenmodell Zernike-Polynome oder eine Fourierreihe an die Schnittpunkte auf der Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche angepasst werden. Das bedeutet, dass insbesondere Zernike-Polynome als Polynome an die Schnittpunkte angepasst werden können, die glatte und ableitbare Flächen bereitstellen. Insbesondere in der Ophthalmologie werden Zernike-Polynome zur Repräsentation von Wellenfronten genutzt, wobei sich die Bestimmung der dreidimensionalen Form der Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche durch Zernike-Polynome insbesondere bei Kontaktelementen für die Ophthalmologie eignet. Alternativ kann eine Fourierreihe an die Schnittpunkte angepasst werden, wobei die Fourierreihe eine periodische, abschnittsweise stetige Funktion aus Sinus- und Kosinusfunktionen darstellt. Durch diese Ausgestaltungsform können weitere geeignete dreidimensionale Flächenmodelle zur Ermittlung der dreidimensionalen Form der Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche erhalten werden.

[0021] Eine weitere Ausgestaltungsform sieht vor, dass die Messlaserstrahlung gemäß einer vorgegebenen Abtaststrategie nahe oder auf die Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche fokussiert wird. Das bedeutet, dass eine Abtaststrategie vorgesehen sein kann, um genügend Schnittpunkte mit der Kontaktfläche und/oder der Eintrittsfläche zu erhalten, um daran das dreidimensionale Flächenmodell anzupassen. Je nach verwendetem dreidimensionalen Flächenmodell kann eine andere Abtaststrategie verwendet werden. Hierbei können beispielsweise zunächst ausreichend viele Schnittpunkte gesucht werden, wobei bei Unterschreiten einer Schwelle eine Messung wiederholt werden kann, insbesondere mit verändertem Abtastgebiet, bis genügend Schnittpunkte erreicht sind. Insbesondere wird der Fachmann die benötigte Anzahl von Schnittpunkten für das jeweilig verwendete dreidimensionale Flächenmodell aus Erfahrungswerten und/oder Versuchen ermitteln. Auch eine gewünschte Genauigkeit bei der Bestimmung der dreidimensionalen Form und die dafür benötigten Schnittpunkte passt der Fachmann entsprechend der gewünschten Genauigkeit an. Als vorgegebene Abtaststrategie können beispielsweise hexagonale Raster, rechteckige Raster und/oder kreisförmige Raster verwendet werden. Alternativ oder zusätzlich kann eine Albrecht-Verteilung und/oder eine Jacobi-Verteilung und/oder eine Legendre-Verteilung verwendet werden, um eine Fläche abzutasten. Vorzugsweise kann eines der zuvor genannten Raster beziehungsweise Verteilungen in einer x-y-Ebene abgetastet werden, wobei anschließend die z-Position (Tiefenrichtung) verstellt wird und die nächste Ebene erneut mit einer dieser Abtaststrategien abgetastet wird. Dies kann für mehrere z-Positionen durchgeführt werden, bis eine genügend hohe Anzahl von Schnittpunkten gefunden ist.

[0022] Vorzugsweise ist vorgesehen, dass Fokuspunkte der Messlaserstrahlung gemäß der Abtaststrategie gleichmäßig in einem Raumbereich, in der die Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche erwartet wird, verteilt werden. So kann bei der Abtaststrategie durch die Fokusverstelleinrichtung die Messlaserstrahlung bereits in die Bereiche fokussiert werden, in der erfahrungsgemäß die Kontaktfläche und/oder die Eintrittsfläche erwartet wird. Die Fokuspunkte der Messlaserstrahlung können dann gleichermäßig in diesem dreidimensionalen Raumbereich verteilt werden, um konfokal Schnittpunkte zu detektieren.

[0023] Besonders bevorzugt ist vorgesehen, dass gemäß der Abtaststrategie die Fokusverstelleinrichtung zur Fokussierung der Messlaserstrahlung auf eine x-y-Position, die in einer senkrecht zur Abstrahlrichtung der Fokusverstelleinrichtung liegenden Fläche liegt, eingestellt wird und in dieser x-y-Position mehrere Fokuspunkte entlang einer z-Achse, die bezüglich der Fokusverstelleinrichtung auf einer Tie-

fenachse liegt, abgetastet werden, wobei gemäß dieser Abtaststrategie iterativ mehrere unterschiedliche x-y-Positionen mit jeweils anschließender Abtastung entlang der z-Achse gemessen werden. Mit anderen Worten kann entlang der Tiefenrichtung, also beispielsweise die Richtung, die von der Eintrittsfläche zu der Kontaktfläche führt, mehrere aufeinanderfolgende Punkte abgetastet werden. Anschließend kann die Position in der Ebene verstellt werden, und die Tiefenrichtung in dieser neuen Position kann erneut abgetastet werden.

[0024] Dies kann für mehrere x-y-Positionen in der Ebene durchgeführt werden, bis eine genügend hohe Anzahl von Schnittpunkten mit der Kontaktfläche und/oder der Eintrittsfläche ermittelt sind.

[0025] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltungsform ist vorgesehen, dass gemäß der Abtaststrategie die Fokusverstelleinrichtung zur Fokussierung der Messlaserstrahlung auf eine z-Position, die in einer parallel zur Abstrahlrichtung der Fokusverstelleinrichtung liegenden Tiefenachse liegt, eingestellt wird und in dieser z-Position mehrere unterschiedliche x-y-Positionen, die in einer senkrecht zur Abstrahlrichtung der Fokusverstelleinrichtung liegender x-y-Fläche liegen, gemäß einem Raster, einer Spirale und/oder konzentrischen Kreisen abgetastet werden, wobei gemäß dieser Abtaststrategie iterativ mehrere unterschiedliche z-Positionen mit jeweils anschließender Abtastung der x-y-Fläche gemessen werden. Mit anderen Worten wird bei dieser Ausgestaltungsform eine Ebene in der Tiefenrichtung festgelegt, wobei diese Ebene, die in der x-y-Richtung aufgespannt wird, anschließend abgetastet wird. Hierbei kann ein Raster verwendet werden, vorzugsweise eines der oben genannten Raster beziehungsweise Verteilungen, es kann eine Spiralbahn von innen nach außen oder von außen nach innen in dieser Fläche abgetastet werden und/oder es können mehrere konzentrische Kreise abgetastet werden, um Schnittpunkte mit der Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche zu erhalten. Anschließend kann die Position in der Tiefenrichtung verändert werden, was bedeutet, dass eine nächste Ebene angesteuert wird, bei der diese Abtaststrategie wiederholt wird. Nach Ansteuerung mehrerer unterschiedlicher z-Positionen kann somit ein Raum beziehungsweise Volumen abgetastet werden, um die Schnittpunkte mit der Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche zu erhalten.

[0026] Vorzugsweise ist vorgesehen, dass gemäß der Abtaststrategie eine oder mehrere Helix-Kurven abgetastet werden. Das heißt, dass eine Messbahn für die Messlaserstrahlung vorgesehen sein kann, die helixförmig beziehungsweise als Schraubenlinie einen Raum abtastet, in dem die Kontaktfläche und/oder die Eintrittsfläche erwartet wird. Nach einmaliger Abtastung einer Helixkurve kann beispiels-

weise ein Radius der Helixkurve verändert werden und eine erneute Abtastung stattfinden. Somit können beispielsweise iterativ mehrere unterschiedliche Radien verwendet werden, mit denen Helixkurven abgetastet werden, um den Raum, in dem sich die Kontaktfläche und/oder die Eintrittsfläche befindet, abzutasten.

[0027] Vorzugsweise ist vorgesehen, dass gemäß der Abtaststrategie eine oder mehrere bezüglich der Fokusverstelleinrichtung schräg liegende Ebenen abgetastet werden. Mit anderen Worten kann die Fokusverstelleinrichtung sowohl die x-y-Ansteuerung als auch die z-Ansteuerung verwenden, um eine schräg im Raum liegende Messebene abzutasten.

[0028] Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltungsform sieht vor, dass nach Auffinden eines Schnittpunkts eine Dichte von Abtastpunkten in der Umgebung des Schnittpunkts erhöht wird. Insbesondere kann die Dichte von Abtastpunkten in der Umgebung des Schnittpunkts im Vergleich zu Fokuspunkten, bei denen kein Schnittpunkt festgestellt wird, erhöht werden. Mit anderen Worten kann also durch Auffinden zumindest eines Schnittpunkts eine ungefähre Lage der jeweiligen Fläche bestimmt werden, wobei anschließend die Abtastung u diesen Schnittpunkt verfeinert wird, beispielsweise verdoppelt, um genügend Schnittpunkte für die Anpassung des dreidimensionalen Flächenmodells zu erhalten. Durch diese Ausgestaltungsform ergibt sich der Vorteil, dass das Verfahren beschleunigt werden kann.

[0029] Vorzugsweise kann auch vorgesehen sein, dass, falls eine grundlegende Form des Kontaktelements bekannt ist, die Messlaserstrahlung entlang einer aus der grundlegenden Form zu erwartenden Fläche verstellt wird, vorzugsweise mit vorgegebenen Varianzen, um die Anzahl der Schnittpunkte zu erhöhen. Somit kann eine Bestimmung der Form der Fläche beschleunigt und/oder verbessert werden.

[0030] Eine weitere Ausgestaltungsform sieht vor, dass die Messlaserstrahlung aus einer auch für die Erzeugung der Bearbeitungslaserstrahlung vorgesehenen Laserstrahlungsquelle bereitgestellt wird. So kann die Materialbearbeitungsvorrichtung vorzugsweise nur einen Laser aufweisen, der Bearbeitungslaserstrahlung erzeugen kann und beispielsweise durch eine verminderte Laserenergie, insbesondere durch einen Energieminderer, Messlaserstrahlung bereitstellt. Durch diese Ausgestaltungsform ergibt sich der Vorteil, dass auf die Verwendung eines weiteren Lasers zur Erzeugung der Messlaserstrahlung verzichtet werden kann, was Kosten spart.

[0031] Besonders bevorzugt ist vorgesehen, dass die Materialbearbeitungsvorrichtung für eine Augenlaserbehandlung vorbereitet wird. Mit anderen Wor-

ten kann die Materialbearbeitungsvorrichtung eine Behandlungsvorrichtung zur Behandlung eines menschlichen oder tierischen Auges sein, wobei ein Kontaktelement zum Fixieren des Auges für die Behandlung mittels des Verfahrens gemessen und dessen Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche bestimmt wird.

[0032] Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft eine Materialbearbeitungsvorrichtung, insbesondere mit mindestens einem ophthalmologischen Laser für die Behandlung eines menschlichen oder tierischen Auges, und einem daran fixierbaren Kontaktelement. Die Behandlung des Auges kann beispielsweise eine Abtrennung eines Lentikels aus einer Hornhaut mit vordefinierten Grenzflächen durch optische Durchbrüche und/oder eine Ablation der Hornhaut und/oder eine laserinduzierte Brechungsindexänderung umfassen. Die Materialbearbeitungsvorrichtung kann folglich dazu ausgebildet sein, ein Verfahren nach einem der vorhergehenden Ausgestaltungsformen durchzuführen.

[0033] Mit anderen Worten kann die Materialbearbeitungsvorrichtung als Behandlungsvorrichtung mit zumindest einen ophthalmologischen Laser, mindestens einer Fokusverstelleinrichtung beziehungsweise Strahlableitvorrichtung, und einer Fixiervorrichtung ausgebildet sein, wobei beispielsweise ein Steuergerät der Materialbearbeitungsvorrichtung dazu ausgebildet sein kann, ein Verfahren nach einem der vorhergehenden Ausgestaltungsformen durchzuführen.

[0034] Das Steuergerät beziehungsweise die Steuereinrichtung kann zum Beispiel als Steuerchip, Steuergerät oder Anwendungsprogramm („App“) ausgestaltet sein. Die Steuereinrichtung kann vorzugsweise eine Prozessoreinrichtung und/oder einen Datenspeicher aufweisen. Unter einer Prozessoreinrichtung wird ein Gerät oder eine Gerätekomponente zur elektronischen Datenverarbeitung verstanden. Die Prozessoreinrichtung kann zum Beispiel mindestens einen Mikrokontroller und/oder mindestens einen Mikroprozessor aufweisen. Auf dem optionalen Datenspeicher kann vorzugsweise ein Programmcode zum Durchführen des Verfahrens abgelegt sein. Der Programmcode kann dazu ausgelegt sein, bei Ausführung durch eine Prozessoreinrichtung die Steuereinrichtung dazu zu veranlassen, eine der beschriebenen Ausgestaltungsformen des Verfahrens durchzuführen.

[0035] Vorzugsweise kann der Laser dazu geeignet sein, Laserpulse in einem Wellenlängenbereich zwischen 300 Nanometern und 1400 Nanometern, vorzugsweise zwischen 700 Nanometern und 1200 Nanometern, bei einer jeweiligen Pulsdauer zwischen einer Femtosekunde und einer Nanosekunde, vorzugsweise zwischen zehn Femtosekunden und

zehn Pikosekunden und eine Wiederholungsfrequenz größer zehn Kilohertz, vorzugsweise zwischen 100 Kilohertz und 100 Megahertz, abzugeben. Ein solcher Femtosekundenlaser ist zur Herstellung von Volumenkörpern innerhalb der Kornea besonders gut geeignet.

[0036] Die Materialbearbeitungsvorrichtung kann vorzugsweise die Steuereinrichtung mit mindestens einer Speichereinrichtung zur zumindest temporären Speicherung von mindestens einem Steuerdatensatz aufweisen, wobei der oder die Steuerdatensätze Steuerdaten zur Positionierung und/oder zur Fokussierung einzelner Laserpulse in die Hornhaut/Kornea und/oder das Kontaktelement umfassen können.

[0037] Weitere Merkmale und deren Vorteile sind in den Beschreibungen der Erfindungsaspekte zu entnehmen, wobei vorteilhafte Ausgestaltungen jedes Erfindungsaspekts als vorteilhafte Ausgestaltungen des jeweils anderen Erfindungsaspekts anzusehen sind.

[0038] Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein Computerprogramm, umfassend Befehle, die bewirken, dass die Materialbearbeitungsvorrichtung Verfahrensschritte gemäß einer der vorhergehenden Ausgestaltungsformen ausführt.

[0039] Erfindungsgemäß ist auch ein computerlesbares Medium vorgesehen, auf dem das Computerprogramm gemäß dem vorhergehenden Erfindungsaspekt gespeichert ist. Hierbei ergeben sich gleiche Vorteile und Variationsmöglichkeiten wie bei den weiteren Erfindungsaspekten.

[0040] Weitere Merkmale der Erfindung ergeben sich aus den Ansprüchen, den Figuren und der Figurenbeschreibung. Die vorstehend in der Beschreibung genannten Merkmale und Merkmalskombinationen, sowie die nachfolgend in der Figurenbeschreibung genannten und/oder in den Figuren alleine gezeigten Merkmale und Merkmalskombinationen sind nicht nur in der jeweils angegebenen Kombination, sondern auch in anderen Kombinationen verwendbar, ohne den Rahmen der Erfindung zu verlassen. Es sind somit auch Ausführungen von der Erfindung als umfasst und offenbart anzusehen, die in den Figuren nicht explizit gezeigt und erläutert sind, jedoch durch separierte Merkmalskombinationen aus den erläuterten Ausführungen hervorgehen und erzeugbar sind. Es sind auch Ausführungen und Merkmalskombinationen als offenbart anzusehen, die somit nicht alle Merkmale eines ursprünglich formulierten unabhängigen Anspruchs aufweisen. Es sind darüber hinaus Ausführungen und Merkmalskombinationen, insbesondere durch die oben dargelegten Ausführungen, als offenbart anzusehen, die über die in den Rückbezügen der Ansprüche dargelegten Merkmalskombina-

tionen hinausgehen oder von diesen abweichen. Dabei zeigt:

Dabei zeigt:

Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Materialbearbeitungsvorrichtung gemäß einer beispielhaften Ausführungsform;

Fig. 2 schematische Muster für eine Abtaststrategie.

[0041] In den Figuren sind gleiche oder funktionsgleiche Elemente mit den gleichen Bezugszeichen versehen.

[0042] In **Fig. 1** ist eine stark schematisierte Darstellung einer Materialbearbeitungsvorrichtung 10, insbesondere einer Behandlungsvorrichtung 10, zur Behandlung eines Auges, dargestellt. Die Materialbearbeitungsvorrichtung 10 weist einen Laser 12 auf, der dazu ausgebildet ist, Bearbeitungslaserstrahlung zu erzeugen, wobei die Bearbeitungslaserstrahlung optische Durchbrüche in einem Objekt (nicht gezeigt) zur Bearbeitung des Objekts erzeugen kann. Des Weiteren kann der Laser 12 dazu ausgebildet sein, Messlaserstrahlung 14 zu erzeugen, wobei die Energie der Messlaserstrahlung unter der Energie für einen optischen Durchbruch liegt, insbesondere unter 1 Joule pro Quadratcentimeter. Vorzugsweise können die Materialbearbeitungsvorrichtung 10 und der Laser 12 für eine Augenlaserbehandlung bereitgestellt werden.

[0043] Neben dem Laser 12 kann die Materialbearbeitungsvorrichtung 10 eine Steuereinrichtung 16 aufweisen, die dazu ausgebildet sein kann, den Laser 12 durch Steuerdaten anzusteuern, so dass dieser gepulste Laserpulse, beispielsweise zur Behandlung eines Auges abgeben kann. Des Weiteren kann die Steuereinrichtung 16 eine dreidimensional wirkende Fokusverstelleinrichtung 18 ansteuern, so dass die Fokusverstelleinrichtung 18 den Bearbeitungslaserstrahl und/oder den Messlaserstrahl 14 an vorgegebene Positionen fokussiert, insbesondere durch Steuerdaten vorgegebene Positionen im oder auf dem Objekt und/oder einem Kontaktelement 20.

[0044] Bei dem Laser 12 kann es sich vorzugsweise um einen photodisruptiven und/oder ablativen Laser handeln, der ausgebildet ist, Laserpulse in einem Wellenlängenbereich zwischen 300 nm und 1400 nm, vorzugsweise zwischen 700 nm und 1200 nm, bei einer jeweiligen Pulsdauer zwischen 1 fs und einer 1 ns, vorzugsweise zwischen 10 fs und 10 ps, und einer Wiederholungsfrequenz größer 10 kHz vorzugsweise zwischen 100 kHz und 100 MHz, abzugeben. Die Steuereinrichtung 16 weist optional zudem eine Speichereinrichtung (nicht dargestellt) zur zumindest temporären Speicherung von mindestens einem Steuerdatensatz auf, wobei der oder die Steuerdatensätze Steuerdaten zur Positionierung

und/oder Fokussierung einzelner Laserpuls umfassen.

[0045] Ferner kann die Materialbearbeitungsvorrichtung 10 ein Kontaktelement 20 umfassen, das für die Bearbeitungslaserstrahlung transparent ist. Das Kontaktelement 20 kann vorzugsweise an der Materialbearbeitungsvorrichtung 10 befestigt werden. Das Kontaktelement 20 kann dazu vorgesehen sein, ein Objekt, beispielsweise ein Auge, für die Bearbeitung mit dem Laser 12 in einer Position zu fixieren. Dazu kann das Kontaktelement eine Kontaktfläche 22 aufweisen, die eine auf das Objekt aufzusetzende Seite des Kontaktelements 20 darstellt. Die Kontaktfläche 22 weist vorzugsweise eine Form auf, die für die Bearbeitung des Objekts angepasst ist, wobei im Falle einer Augenbehandlung eine gewölbte Form, beispielsweise ein Halbkreis, vorgesehen sein kann. Auf der der Materialbearbeitungsvorrichtung 10 zugewandten Seite kann das Kontaktelement 20 eine Eintrittsfläche 24 aufweisen, durch die die Laserstrahlung durch das für die Bearbeitungslaserstrahlung transparente Kontaktelement 20 hindurchtritt.

[0046] Zur Vorbereitung der Materialbearbeitungsvorrichtung 10 kann nach der Befestigung des Kontaktelements die Form der Kontaktfläche 22 und/oder der Eintrittsfläche 24 bestimmt werden. Hierzu kann der Laser 12 Messlaserstrahlung 14 mittels der Fokusverstelleinrichtung 18 auf die Kontaktfläche 22 und/oder die Eintrittsfläche 24 fokussieren, wobei an einem Brechungsindexübergang an der jeweiligen Fläche ein Reflexionssignal entsteht, das als Schnittpunkt mit der Kontaktfläche 22 und/oder der Eintrittsfläche 24 gemessen werden kann. Diese Messung der rückgestreuten und/oder rückreflektierten Strahlung kann vorzugsweise konfokal erfolgen, wobei hierfür in Rückrichtung des Strahlengangs die rückgestreute oder rückreflektierte Strahlung durch die Fokusverstelleinrichtung 18 zurück in die Materialbearbeitungsvorrichtung 10 gestrahlt wird, wobei durch einen Strahlteiler 26 diese rückgestreute oder rückreflektierte Strahlung durch einen Detektor 28 gemessen werden kann. Vor dem Detektor 28 kann ein Pinhole 30 angeordnet sein, so dass nur diejenige rückreflektierte Strahlung gemessen wird, die aus dem Fokuspunkt der Fokusverstelleinrichtung stammt. Da das Prinzip der konfokalen Messung bekannt ist, werden aus Übersichtlichkeitsgründen weitere Details zu optischen Bauteilen der konfokalen Messung nicht weiter beschrieben.

[0047] Nach Detektion der rückgestreuten oder rückreflektierten Strahlung durch den Detektor 28 kann die zugeordnete Einstellung der variablen Fokusverstelleinrichtung 18 verwendet werden, um somit die Lage von Schnittpunkten auf der Kontaktfläche 22 und/oder der Eintrittsfläche 24 zu ermitteln.

[0048] Ist die Lage der Schnittpunkte auf der Kontaktfläche 22 und/oder der Eintrittsfläche 24 des Kontaktelements 20 bekannt, kann daran, beispielsweise durch die Steuereinrichtung 16, ein dreidimensionales Flächenmodell angepasst beziehungsweise gefittet werden, wobei durch das Flächenmodell die dreidimensionale Form der Kontaktfläche 22 und/oder der Eintrittsfläche 24 bereitgestellt wird.

[0049] Beispielsweise können an die ermittelten Schnittpunkte mit der jeweiligen Fläche, die in Form einer Gitterstruktur vorliegen können, Polygone angepasst werden, die zusammen die dreidimensionale Form ergeben. Alternativ oder zusätzlich können Polynome beziehungsweise ein Polynomzug (Splines) an die Schnittpunkte der Kontaktfläche 22 und/oder Eintrittsfläche 24 angepasst werden, die zusammen die Form der jeweiligen Fläche ergeben. Auch Zernike-Polynome oder Fourierreihen können besonders bevorzugt zur Ermittlung der Form an die Schnittpunkte der jeweiligen Fläche angepasst werden.

[0050] Um genügend Schnittpunkte mit dem Kontaktelement 20 zu erhalten, kann außerdem vorzugsweise vorgesehen sein, dass eine vorgegebene Abtaststrategie verwendet wird, die die Messlaserstrahlung 14 nahe oder auf die Kontaktfläche 22 und/oder Eintrittsfläche 24 fokussiert. Auch kann durch die Abtaststrategie eine Dichte vorgegeben werden, wie viele Fokuspunkte in einem Raumbereich, in dem die Kontaktfläche 22 und/oder die Eintrittsfläche 24 erwartet wird, abgetastet werden. Beispielhafte Raster beziehungsweise Verteilungen, die für die Abtaststrategie verwendet werden können, sind in **Fig. 2** dargestellt.

[0051] So können beispielsweise hexagonale Verteilungen als Abtaststrategie vorgesehen sein, wie im Raster R_1 der **Fig. 2** dargestellt. Alternativ können rechteckige Raster als Abtaststrategie verwendet werden, wie in Raster R_2 gezeigt. Weitere Möglichkeiten sind kreisförmige Raster R_3 , eine Albrecht-Verteilung R_4 , eine Jacobi-Verteilung R_5 und/oder eine Legendre-Verteilung R_6 .

[0052] Besonders bevorzugt kann durch die konfokale Messung auch zunächst ein Schnittpunkt mit der Kontaktfläche 22 und/oder der Eintrittsfläche 24 gesucht werden, wobei in dem Bereich, in dem der Schnittpunkt gefunden wurde, eine Dichte von Abtastpunkten erhöht wird, um eine verbesserte Auflösung der jeweiligen Fläche zu erhalten. Auch kann vorgesehen sein, dass die jeweiligen Flächen ebenenweise gescannt werden, was bedeutet, dass eine x-y-Fläche abgetastet wird, und anschließend eine z-Position (Tiefenrichtung) verändert wird, und erneut die x-y-Fläche in dieser z-Position gemessen wird. Hierbei können beispielsweise die in **Fig. 2** gezeigten Raster verwendet werden und/oder es können eine

Spirale und/oder konzentrische Kreise abgetastet werden. Statt ebenenweise in x-y-Richtung kann auch eine Abtastung in jeweiliger z-Richtung erfolgen, wobei im Anschluss die x-y-Position verstellt wird und die dazugehörige z-Richtung abgetastet wird. Weitere Abtaststrategien sind Helix-Kurven, insbesondere mit veränderlichem Radius und/oder schräg zur Fokusverstelleinrichtung 18 liegende Ebenen, die die Kontaktfläche 22 und/oder die Eintrittsfläche 24 schneiden.

[0053] Insgesamt zeigen die Beispiele, wie ohne vorherige Kenntnis der genauen Parameter des Kontaktelements 20 die Form der Kontaktfläche 22 und/oder der Eintrittsfläche 24 bestimmt werden kann, um die Materialbearbeitungsvorrichtung 10 für die Bearbeitung eines Objekts vorzubereiten.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- WO 2008040436 A1 [0006]

Patentansprüche

1. Verfahren zum Vorbereiten einer Materialbearbeitungsvorrichtung (10) zur Materialbearbeitung durch Erzeugung optischer Durchbrüche in oder an einem Objekt, die eine variable, dreidimensional wirkende Fokusverstelleinrichtung (18) zur Fokussierung von Bearbeitungslaserstrahlung auf verschiedene Orte im oder auf dem Objekt aufweist, - wobei an der Materialbearbeitungsvorrichtung (10) ein für die Bearbeitungslaserstrahlung transparentes auf das Objekt aufzusetzendes Kontaktelement (20) befestigt wird, das auf seiner auf das Objekt aufzusetzenden Seite eine Kontaktfläche (22) und auf seiner der Materialbearbeitungsvorrichtung zugewandten Seite eine Eintrittsfläche (24) für die Bearbeitungslaserstrahlung aufweist, - wobei vor der Bearbeitung des Objekts eine Form der Kontaktfläche (22) und/oder Eintrittsfläche (24) mittels Einstrahlung von Messlaserstrahlung (14) auf die Kontaktfläche und/oder Eintrittsfläche bestimmt wird, indem die Messlaserstrahlung (14) mittels der variablen Fokusverstelleinrichtung (18) nahe der oder auf die Kontaktfläche (22) und/oder Eintrittsfläche (24) fokussiert wird, wobei eine Energiedichte der fokussierten Messlaserstrahlung (14) zur Erzeugung eines optischen Durchbruchs zu gering ist, - wobei aus dem Fokus der Messlaserstrahlung (14) rückgestreute oder rückreflektierte Strahlung konfokal detektiert wird, - wobei aus der konfokal detektierten Strahlung und der zugeordneten Einstellung der variablen Fokusverstelleinrichtung (18) eine Lage von Schnittpunkten auf der Kontaktfläche (22) und/oder Eintrittsfläche (24) ermittelt wird, - wobei ein dreidimensionales Flächenmodell an die ermittelte Lage der Schnittpunkte angepasst wird, wobei durch das Flächenmodell die 3-dimensionale Form der Kontaktfläche (22) und/oder Eintrittsfläche (24) bereitgestellt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei durch die Lage der Schnittpunkte auf der Kontaktfläche (22) und/oder der Eintrittsfläche (24) eine Gitterstruktur bereitgestellt wird, wobei als das dreidimensionale Flächenmodell Polygone an die Gitterstruktur angepasst werden.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei Polynome, insbesondere ein Polynomzug, an die Schnittpunkte auf der Kontaktfläche (22) und/oder der Eintrittsfläche (24) angepasst werden.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei als dreidimensionales Flächenmodell Zernike-Polynome oder eine Fourierreihe an die Schnittpunkte auf der Kontaktfläche (22) und/oder Eintrittsfläche (24) angepasst werden.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Messlaserstrahlung (14) gemäß einer vorgegebenen Abtaststrategie nahe oder auf die Kontaktfläche (22) und/oder Eintrittsfläche (24) fokussiert wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei Fokuspunkte der Messlaserstrahlung gemäß der Abtaststrategie gleichmäßig in einem Raumbereich, in der die Kontaktfläche (22) und/oder Eintrittsfläche (24) erwartet wird, verteilt werden.

7. Verfahren nach Anspruch 5 oder 6, wobei gemäß der Abtaststrategie die Fokusverstelleinrichtung (18) zur Fokussierung der Messlaserstrahlung auf eine x-y-Position, die in einer senkrecht zur Abstrahlrichtung der Fokusverstelleinrichtung (18) liegenden Fläche liegt, eingestellt wird und in dieser x-y-Position mehrere Fokuspunkte entlang einer z-Achse, die bezüglich der Fokusverstelleinrichtung (18) auf einer Tiefenachse liegt, abgetastet werden, wobei gemäß dieser Abtaststrategie iterativ mehrere unterschiedliche x-y-Positionen mit jeweils anschließender Abtastung entlang der z-Achse gemessen werden.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 oder 6, wobei gemäß der Abtaststrategie die Fokusverstelleinrichtung (18) zur Fokussierung der Messlaserstrahlung (14) auf eine z-Position, die in einer parallel zur Abstrahlrichtung der Fokusverstelleinrichtung (18) liegenden Tiefenachse liegt, eingestellt wird und in dieser z-Position mehrere unterschiedliche x-y-Positionen, die in einer senkrecht zur Abstrahlrichtung der Fokusverstelleinrichtung (18) liegender x-y-Fläche liegen, gemäß einem Raster, einer Spirale und/oder konzentrischen Kreisen abgetastet werden, wobei gemäß dieser Abtaststrategie iterativ mehrere unterschiedliche z-Positionen mit jeweils anschließender Abtastung der x-y-Fläche gemessen werden.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 oder 6, wobei gemäß der Abtaststrategie eine oder mehrere Helix-Kurven abgetastet werden.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 oder 6, wobei gemäß der Abtaststrategie eine oder mehrere bezüglich der Fokusverstelleinrichtung (18) schräg liegende Ebenen abgetastet werden.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 10, wobei nach Auffinden eines Schnittpunkts eine Dichte von Abtastpunkten in der Umgebung des Schnittpunkts erhöht wird.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Messlaserstrahlung (14) aus einer auch für die Erzeugung der Bearbeitungslaser-

strahlung vorgesehenen Laserstrahlungsquelle (12) bereitgestellt wird.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Materialbearbeitungsvorrichtung (10) für eine Augenlaserbehandlung vorbereitet wird.

14. Materialbearbeitungsvorrichtung (10), insbesondere mit mindestens einem augenchirurgischen Laser (12) zur Behandlung eines menschlichen oder tierischen Auges, und einem daran fixierbaren Kontaktelement (20), wobei die Materialbearbeitungsvorrichtung (10) dazu ausgebildet ist, ein Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche durchzuführen.

15. Computerprogramm, umfassend Befehle, die bewirken, dass die Materialbearbeitungsvorrichtung (10) gemäß Anspruch 14 die Verfahrensschritte nach einem der Ansprüche 1 bis 13 ausführt.

16. Computerlesbares Medium, auf dem das Computerprogramm nach Anspruch 15 gespeichert ist.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

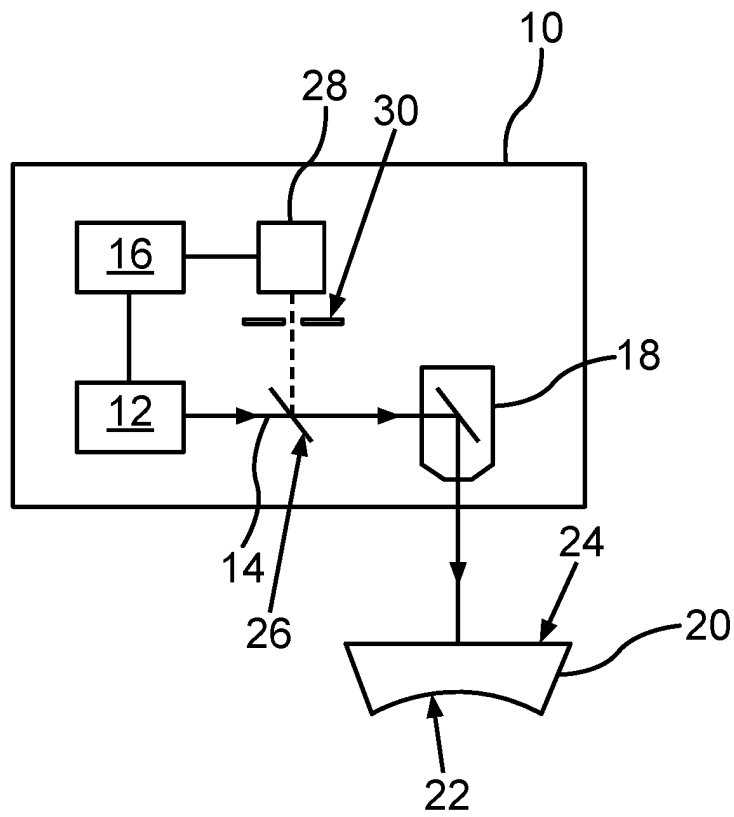


Fig.1

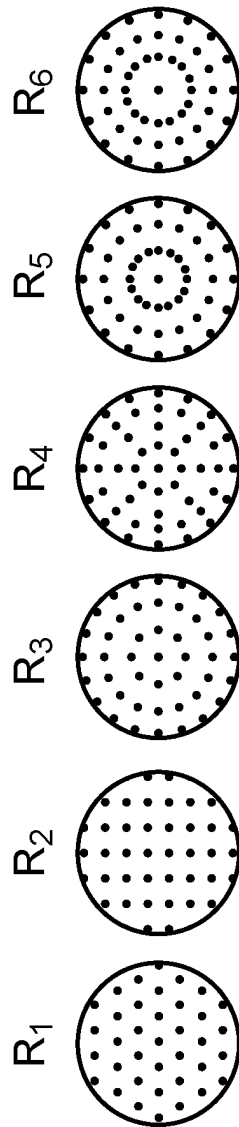


Fig.2