



(10) **DE 11 2012 001 709 T5** 2014.01.16

(12)

Veröffentlichung

der internationalen Anmeldung mit der
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2012/142062**
in deutscher Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2 IntPatÜG)
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2012 001 709.9**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US2012/032970**
(86) PCT-Anmeldetag: **11.04.2012**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **18.10.2012**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **16.01.2014**

(51) Int Cl.: **G01B 11/25 (2013.01)**

(30) Unionspriorität:
61/475,703 **15.04.2011** **US**
61/592,049 **30.01.2012** **US**

(71) Anmelder:
Faro Technologies, Inc., Lake Mary, Fla., US

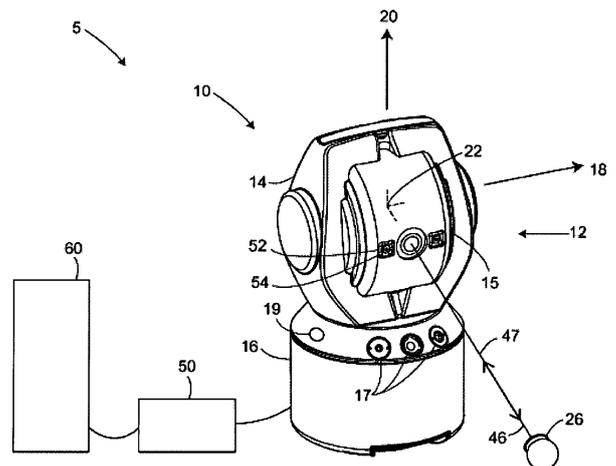
(74) Vertreter:
OFFICE FREYLINGER S.A., Strassen, LU

(72) Erfinder:
Bridges, Robert E., Kennett Square, Pa., US

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Lasertracker mit sechs Freiheitsgraden, der mit einem entfernt befindlichen Strukturlichtscanner zusammenwirkt**

(57) Zusammenfassung: Verfahren zur Messung von drei oder mehr als drei Flächensätzen auf einer Objektoberfläche mit einem Koordinatenmessgerät und einem Zielscanner, wobei jeder der Datensätze die 3D-Koordinaten eines Punktes auf der Objektoberfläche in einem Geräte-Bezugssystem darstellt und jeder Flächensatz drei Werte enthält. Das Verfahren umfasst: die Bereitstellung des Scanners, welcher einen Körper, einen ersten Retroreflektor, einen Projektor, eine Kamera und einen Scanner-Prozessor aufweist; die Bereitstellung des Koordinatenmessgerätes, welches dergestalt konfiguriert ist, dass es einen ersten Lichtstrahl zum erstem Retroreflektor sendet und einen zweiten Lichtstrahl vom ersten Retroreflektor aufnimmt, wobei der zweite Lichtstrahl ein Teil des ersten Lichtstrahls ist; der Scanner-Prozessor und der Geräte-Prozessor gemeinsam dergestalt konfiguriert sind, dass sie die Flächensätze ermitteln; die Auswahl des Quellen-Lichtmusters; das Projizieren des Quellen-Lichtmusters auf das Objekt, um das Objekt-Lichtmuster zu erzeugen; das Abbilden des Objekt-Lichtmusters auf die lichtempfindliche Anordnung, um das Bild-Lichtmuster zu erhalten; die Gewinnung der digitalen Bildpunktwerte für das Bild-Lichtmuster; die Ermittlung der Flächensätze entsprechend einem jeden der mindestens drei nicht-kollinearen Musterelemente; und das Sichern der Flächensätze.



Beschreibung

Querverweis auf verwandte Anmeldungen

[0001] Die vorliegende Anmeldung beansprucht den Vorteil der am 30. Januar 2012 angemeldeten vorläufigen US-amerikanischen Patentanmeldung, Aktenzeichen 61/592,049, und der am 15. April 2011 angemeldeten vorläufigen US-amerikanischen Anmeldung, Aktenzeichen 61/475,703, deren beider gesamter Inhalt hiermit durch Verweis einbezogen ist.

Hintergrund

[0002] Die vorliegende Offenbarung betrifft ein Koordinatenmessgerät. Eine Gruppe von Koordinatenmessgeräten gehört zu einer Klasse von Instrumenten, welche die dreidimensionalen Koordinaten (3D-Koordinaten) eines Punkts messen, indem sie einen Laserstrahl zu diesem Punkt senden. Dieser Laserstrahl kann auf den Punkt direkt auftreffen oder auf ein Retroreflektorziel, das sich mit dem Punkt in Kontakt befindet. In jedem der beiden Fälle ermittelt das Instrument die Koordinaten des Punkts, indem es die Entfernung und die zwei Winkel zu dem Ziel misst. Die Entfernung wird mit einem Entfernungsmessgerät wie beispielsweise einem Absolutdistanzmesser oder einem Interferometer gemessen. Die Winkel werden mit einem Winkelmessgerät wie beispielsweise einem Winkelkodierer gemessen. Ein kardanisch aufgehängter Strahlenkungsmechanismus im Innern des Instruments lenkt den Laserstrahl zu dem betreffenden Punkt.

[0003] Der Lasertracker ist ein besonderer Typ von Koordinatenmessgerät, der das Retroreflektorziel mit einem oder mehreren Laserstrahlen verfolgt, den bzw. die es aussendet. Koordinatenmessgeräte, die mit dem Lasertracker nahe verwandt sind, sind der Laserscanner und die Totalstation. Der Laserscanner richtet schrittweise einen oder mehrere Laserstrahlen auf Punkte auf einer Oberfläche. Er nimmt das von dieser Oberfläche gestreute Licht auf und ermittelt aus diesem Licht die Entfernung und zwei Winkel zu jedem Punkt. Die Totalstation, die am häufigsten bei Anwendungen im Vermessungswesen eingesetzt wird, kann dazu benutzt werden, um die Koordinaten von diffus streuenden bzw. retroreflektierenden Zielen zu messen. Nachstehend wird der Begriff „Lasertracker“ in weitem Sinn so benutzt, dass er Laserscanner und Totalstationen umfasst.

[0004] Gewöhnlich sendet der Lasertracker einen Laserstrahl zu einem Retroreflektorziel. Ein weit verbreiteter Typ eines Retroreflektorziels ist der sphärisch montierte Retroreflektor (SMR), der einen in eine Metallkugel eingebetteten Würfecken-Retroreflektor umfasst. Dieser Würfecken-Retroreflektor umfasst drei zueinander rechtwinklig angeordnete Spiegel. Der Scheitelpunkt, welcher der gemeinsame

Schnittpunkt dieser drei Spiegel ist, befindet sich in der Mitte der Kugel. Wegen dieser Anordnung der Würfecke innerhalb der Kugel bleibt die rechtwinklige Entfernung vom Scheitelpunkt zu einer beliebigen Oberfläche, auf welcher der SMR aufliegt, konstant, selbst dann, wenn der SMR gedreht wird. Folglich kann der Lasertracker die 3D-Koordinaten einer Oberfläche messen, indem er der Position eines SMR folgt, während dieser über die Oberfläche bewegt wird. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass der Lasertracker lediglich drei Freiheitsgrade (eine radiale Entfernung und zwei Winkel) benötigt, um die 3D-Koordinaten einer Oberfläche vollständig zu kennzeichnen.

[0005] Ein Typ von Lasertracker enthält nur ein Interferometer (IFM) ohne einen Absolutdistanzmesser (ADM). Falls ein Objekt den Strahlengang des von einem dieser Tracker ausgehenden Laserstrahls blockiert, verliert das IFM seinen Bezug zur Entfernung. Die Bedienperson muss dann den Retroreflektor zu einer bekannten Stelle nachführen, um die Rückstellung auf einen als Bezugswert dienenden Entfernungswert durchzuführen, bevor die Messung fortgesetzt werden kann. Eine Methode zur Umgehung dieser Einschränkung besteht darin, einen ADM in den Tracker einzubringen. Der ADM kann die Entfernung in einer Weise des Zielens und Abdrückens messen, wie das weiter unten noch ausführlicher beschrieben wird. Einige Lasertracker enthalten nur einen ADM ohne ein Interferometer. Das an Bridges et al. erteilte US-Patent Nr. 7,352,446 ('446), dessen Inhalt in dieses Dokument durch Verweis einbezogen ist, beschreibt einen Lasertracker, der nur einen ADM (und kein IFM) aufweist und der zum genauen Scannen eines sich bewegenden Ziels in der Lage ist. Vor dem Patent '446 waren Absolutdistanzmesser für das genaue Auffinden der Position eines sich bewegenden Ziels zu langsam.

[0006] Im Innern des Lasertrackers kann ein Kardanmechanismus verwendet werden, um einen Laserstrahl von dem Tracker auf den SMR zu richten. Ein Teil des von dem SMR retroreflektierten Lichts tritt in den Lasertracker ein und gelangt durch diesen hindurch auf einen Positionsdetektor. Ein Steuerungssystem im Lasertracker kann die Position des Lichts auf dem Positionsdetektor dazu nutzen, um die Drehwinkel der mechanischen Achsen des Lasertrackers dergestalt einzustellen, dass der Laserstrahl auf den SMR zentriert bleibt. Auf diese Weise ist der Tracker in der Lage, einem SMR zu folgen (nachgeführt zu werden), der über die Oberfläche des betreffenden Objekts bewegt wird.

[0007] Winkelmessgeräte wie beispielsweise Winkelkodierer sind an den mechanischen Achsen des Trackers befestigt. Die eine Entfernungsmessung und die zwei Winkelmessungen, die der Lasertracker

durchführt, reichen aus, um die dreidimensionale Position des SMR genau anzugeben.

[0008] Um sechs Freiheitsgrade an Stelle der sonst üblichen drei Freiheitsgrade zu messen, stehen mehrere Lasertracker zur Verfügung oder wurden vorgeschlagen. Als Beispiel dienende Systeme mit sechs Freiheitsgraden (6-DOF-Systeme) (DOF – degrees of freedom = Freiheitsgrad) sind in dem an Bridges et al. erteilten US-Patent Nr. 7,800,758 ('758), dessen Inhalt hierin durch Verweis einbezogen ist, und in der von Bridges et al. angemeldeten und veröffentlichten US-amerikanischen Patentanmeldung, Aktenzeichen 2010/0158259, deren Inhalt hierin durch Verweis einbezogen ist, beschrieben.

[0009] Es besteht Bedarf an neuen Typen von Zusatzgeräten für 6 Freiheitsgrade, die eine breite Vielfalt an Leistungsfähigkeit aufweisen, wenn sie zusammen mit Lasertrackern mit 6 Freiheitsgraden eingesetzt werden sollen.

Zusammenfassung

[0010] Gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden ein Verfahren zur Messung von drei oder mehr als drei Flächensätzen auf einer Objektoberfläche mit einem Koordinatenmessgerät und einem Zielscanner, wobei jeder der drei oder mehr als drei Flächensätze die dreidimensionalen Koordinaten eines Punktes auf der Objektoberfläche in einem Geräte-Bezugssystem darstellt, jeder Flächensatz drei Werte enthält und das Geräte-Bezugssystem dem Koordinatenmessgerät zugeordnet ist. Das Verfahren umfasst die folgenden Schritte: Bereitstellung des Ziel-Scanners, welcher einen Körper, einen ersten Retroreflektor, einen Projektor, eine Kamera und einen Scanner-Prozessor enthält, wobei der erste Retroreflektor, der Projektor und die Kamera starr am Körper befestigt sind, und der Ziel-Scanner mechanisch vom Koordinatenmessgerät getrennt ist; der Projektor ein Quellen-Lichtmuster und ein Projektorobjektiv aufweist; das Quellen-Lichtmuster sich auf einer Quellebene befindet und mindestens drei nicht-kollineare Musterelemente aufweist; das Projektorobjektiv dergestalt konfiguriert ist, dass es das Quellen-Lichtmuster auf das Objekt projiziert, damit auf dem Objekt ein Objekt-Lichtmuster gebildet wird; jedes der mindestens drei nicht-kollinearen Musterelemente mindestens einem Flächensatz entspricht; die Kamera ein Kameraobjektiv und eine lichtempfindliche Anordnung enthält, wobei das Kameraobjektiv dergestalt konfiguriert ist, dass es das Objekt-Lichtmuster auf die lichtempfindliche Anordnung als ein Bild-Lichtmuster abbildet, die lichtempfindliche Anordnung Kamera-Bildpunkte aufweist und diese lichtempfindliche Anordnung dergestalt konfiguriert ist, dass sie für jeden Kamera-Bildpunkt einen entsprechender digitalen Bildpunktwert erzeugt, welcher einem Betrag an Licht entspricht, das vom Kamera-Bildpunkt von

dem Bild-Lichtmuster aufgenommen wird. Das Verfahren umfasst auch: die Bereitstellung des Koordinatenmessgeräts, wobei das Koordinatenmessgerät dergestalt konfiguriert ist, dass es einen Translationssatz und einen Orientierungssatz misst, wobei der Translationssatz die Werte von drei Translationsfreiheitsgraden des Ziel-Scanners in dem Geräte-Bezugssystem darstellt und der Orientierungssatz Werte von drei Orientierungsfreiheitsgraden des Ziel-Scanners in dem Geräte-Bezugssystem darstellt; der Translationssatz und der Orientierungssatz ausreichend sind, um die Position und die Richtung des Ziel-Scanners im Raum festzulegen; das Koordinatenmessgerät dergestalt konfiguriert ist, dass es einen ersten Lichtstrahl zum ersten Retroreflektor sendet und einen zweiten Lichtstrahl vom ersten Retroreflektor empfängt und der zweite Lichtstrahl ein Anteil am ersten Lichtstrahl ist; das Koordinatenmessgerät einen Geräte-Prozessor enthält und dieser Geräteprozessor dergestalt konfiguriert ist, dass er den Orientierungssatz und den Translationssatz ermittelt, wobei der Translationssatz zumindest teilweise auf dem zweiten Lichtstrahl beruht; der Scanner-Prozessor und der Geräte-Prozessor gemeinsam dergestalt konfiguriert sind, dass sie die drei oder mehr als drei Flächensätze ermitteln, wobei jeder der Flächensätze zumindest teilweise auf dem Translationssatz, dem Orientierungssatz und den digitalen Bildpunktwerten beruht. Das Verfahren umfasst außerdem: das Auswählen des Quellen-Lichtmusters; das Projizieren des Quellen-Lichtmusters auf das Objekt, um das Objekt-Lichtmuster zu erzeugen; das Abbilden des Objekt-Lichtmusters auf die lichtempfindliche Anordnung, um das Bild-Lichtmuster zu erhalten; das Gewinnen der digitalen Bildpunktwerte für das Bild-Lichtmuster; das Senden des ersten Lichtstrahls vom Koordinatenmessgerät zum ersten Retroreflektor; den Empfang des zweiten Lichtstrahls vom ersten Retroreflektor; das Messen des Translationssatzes und des Orientierungssatzes mit dem Koordinatenmessgerät auf der Grundlage von zumindest einem Teil der zweiten Lichtstrahls; das Ermitteln der Flächensätze entsprechend einem jeden der mindestens drei nicht-kollinearen Musterelemente; und das Sichern der Flächensätze.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0011] Es soll nun auf den Zeichnungssatz Bezug genommen werden, wo beispielhafte Ausführungsformen gezeigt werden, die nicht als einschränkend für den gesamten Schutzbereich der Offenbarung anzusehen sind und in denen die in mehreren Figuren vorkommenden Bauelemente die gleichen Bezugswerte haben. Es zeigen:

[0012] Fig. 1 eine Perspektivdarstellung eines Lasertrackersystems mit einem Retroreflektorziel gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0013] Fig. 2 eine Perspektivdarstellung eines Lasertrackersystems mit einem 6-DOF-Ziel gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0014] Fig. 3 ein Blockschaltbild, in dem die Bauteile der Optik und der Elektronik des Lasertrackers gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung beschrieben sind;

[0015] Fig. 4 zu der Fig. 4A und Fig. 4B gehören, zwei Typen von afokalen Strahlerweiterern des Standes der Technik;

[0016] Fig. 5 eine faseroptische Strahl-Einkopplung des Standes der Technik;

[0017] Fig. 6A–D schematische Abbildungen, in denen vier Typen von Lagedetektoranordnungen des Standes der Technik dargestellt sind;

[0018] Fig. 6E und Fig. 6F schematische Abbildungen, die Lagedetektoranordnungen gemäß den Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung zeigen;

[0019] Fig. 7 ein Blockschaltbild der elektrischen und elektro-optischen Bauteile in einem ADM des Standes der Technik;

[0020] Fig. 8A und Fig. 8B schematische Abbildungen, die faseroptische Bauteile in einem faseroptischen Netz des Standes der Technik zeigen;

[0021] Fig. 8C eine schematische Darstellung, in der faseroptische Bauteile in einem faseroptischen Netz gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung dargestellt sind;

[0022] Fig. 9 eine Aufrissdarstellung eines Lasertrackers des Standes der Technik;

[0023] Fig. 10 eine Schnittdarstellung eines Lasertrackers des Standes der Technik;

[0024] Fig. 11 ein Blockschaltbild der für die Berechnungen und die Kommunikation zuständigen Bauteile eines Lasertrackers gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0025] Fig. 12A ein Blockschaltbild der Bauteile in einem Lasertracker, bei dem eine einzelne Wellenlänge benutzt wird, gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0026] Fig. 12B ein Blockschaltbild der Bauteile in einem anderen Lasertracker, bei dem eine einzelne Wellenlänge benutzt wird, gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0027] Fig. 13 ein Blockschaltbild der Bauteile in einem Lasertracker mit 6-DOF-Tauglichkeit gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0028] Fig. 14 Blockschaltbilder von Bauteilen in einem Lasertracker mit 6-DOF-Tauglichkeit gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0029] Fig. 15 und Fig. 15C Blockschaltbilder von Bauteilen in einem Lasertracker mit 6-DOF-Tauglichkeit gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0030] Fig. 15A, Fig. 15B, Fig. 15D und Fig. 15E schematische Darstellungen, welche die Funktionsprinzipien von Scanning-Systemen veranschaulichen, die auf der Triangulierung beruhen;

[0031] Fig. 15F Schritte, die gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung unternommen werden können, um Messergebnisse hoher Qualität zu gewährleisten;

[0032] Fig. 16, Fig. 16A und Fig. 16B schematische Diagramme, welche die Elemente einer 6-DOF-Anzeigevorrichtung gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zeigen;

[0033] Fig. 17 ein Blockschaltbild eines 6-DOF-Projektors gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0034] Fig. 18 ein Blockschaltbild eines 6-DOF-Projektors gemäß einer anderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0035] Fig. 19 ein Blockschaltbild eines 6-DOF-Sensors gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0036] Fig. 19A ein Blockschaltbild eines 6-DOF-Sensors gemäß einer anderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0037] Fig. 20 ein Ablaufdiagramm von Schritten in einem Verfahren zur Messung von drei oder mehr als drei Flächensätzen mit einem Koordinatenmessgerät und einem Zielscanner gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0038] Fig. 21 ein Ablaufdiagramm von Schritten in einem Verfahren, das der Markierung A in Fig. 20 folgt;

[0039] Fig. 22 ein Ablaufdiagramm von Schritten in einem Verfahren, das der Markierung A in Fig. 20 folgt;

[0040] Fig. 23 ein Ablaufdiagramm von Schritten in einem Verfahren, das der Markierung A in Fig. 20 folgt;

[0041] Fig. 24 ein Ablaufdiagramm von Schritten in einem Verfahren zur Messung einer Empfindlichkeitseigenschaften und eines Flächensatzes, dem eine Empfindlichkeitseigenschaften zugeordnet ist, mit einem Koordinatenmessgerät und einem Zielsensor gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0042] Fig. 25 ein Ablaufdiagramm von Schritten in einem Verfahren, das der Markierung B in Fig. 24 folgt;

[0043] Fig. 26 ein Ablaufdiagramm von Schritten in einem Verfahren zur Übertragung von ersten Informationen an einen Nutzer eines Koordinatenmessgerätes durch Projizieren eines ersten Musters mit einem ersten Zielprojektor gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0044] Fig. 27 ein Ablaufdiagramm von Schritten in einem Verfahren, das der Markierung C in Fig. 26 folgt;

[0045] Fig. 28 ein Ablaufdiagramm von Schritten in einem Verfahren, das der Markierung C in Fig. 26 folgt;

[0046] Fig. 29 ein Ablaufdiagramm von Schritten in einem Verfahren, das dem Marker C in Fig. 26 folgt;

[0047] Fig. 30 ein Ablaufdiagramm von Schritten in einem Verfahren, das dem Marker C in Fig. 26 folgt;

[0048] Fig. 31 ein Ablaufdiagramm von Schritten in einem Verfahren zur Messung einer Mehrzahl von Flächensätzen auf einer Objekt Oberfläche mit einem Koordinatenmessgerät und einem Translationssatz gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

[0049] Fig. 32 ein Ablaufdiagramm von Schritten in einem Verfahren zur Messung einer Mehrzahl von Flächensätzen auf einer Objekt Oberfläche mit einem Koordinatenmessgerät und einem Zielscanner gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

Detaillierte Beschreibung

[0050] Ein als Beispiel dienendes Lasertrackersystem 5, das in Fig. 1 veranschaulicht ist, umfasst einen Lasertracker 10, einen Retroreflektor 26, einen wahlweise vorhandenen Hilfsprozessor 50 und einen wahlweise vorhandenen Hilfscomputer 60. Ein als Beispiel dienender kardanisch gelagerter Strahlenkmechanismus 12 des Lasertrackers 10 umfasst

eine Zenit-Trägervorrichtung 14, die auf einen Azimutsockel 16 montiert ist und sich um die Azimutachse 20 dreht. Eine Nutzmasse 15 ist auf die Zenit-Trägervorrichtung 14 montiert und dreht sich um die Zenitachse 18. Die Zenitachse 18 und die Azimutachse 20 schneiden sich orthogonal im Innern des Trackers 10 am Kardanpunkt 22, der typischerweise der Ausgangspunkt für die Entfernungsmessungen ist. Ein Laserstrahl 46 tritt auf virtuelle Weise durch den Kardanpunkt 22 und ist orthogonal zur Zenitachse 18 gerichtet. Mit anderen Worten liegt der Laserstrahl 46 in einer Ebene annähernd rechtwinklig zur Zenitachse 18 und diese führt durch die Azimutachse 20. Der abgehende Laserstrahl 46 wird durch Drehung der Nutzmasse 15 um die Zenitachse 18 und durch Drehung der Zenit-Trägervorrichtung 14 um die Azimutachse 20 in die gewünschte Richtung gerichtet. Ein im Innern des Trackers vorhandener Zenitwinkelkodierer ist an der mechanischen Zenitachse befestigt, die zur Zenitachse 18 ausgerichtet ist. Ein im Innern des Trackers befindlicher Azimutwinkelkodierer ist an der mechanischen Azimutachse befestigt, die zur Azimutachse 20 ausgerichtet ist. Der Zenitwinkelkodierer und der Azimutwinkelkodierer messen den Zenitwinkel und den Azimutwinkel der Drehung mit einer relativ hohen Genauigkeit. Der abgehende Laserstrahl 46 läuft zum Retroreflektorziel 26, das beispielsweise ein sphärisch montierter Retroreflektor (SMR) sein kann, wie er weiter oben beschrieben ist. Durch die Messung der radialen Entfernung zwischen dem Kardanpunkt 22 und dem Retroreflektor 26, des Drehwinkels um die Zenitachse 18 und des Drehwinkels um die Azimutachse 20 wird die Position des Retroreflektors 26 innerhalb des Kugelkoordinatensystems des Trackers gefunden.

[0051] Der abgehende Lichtstrahl 46 kann eine oder mehrere Laserwellenlängen enthalten, wie weiter unten noch beschrieben wird. Aus Gründen der Klarheit und Einfachheit wird ein Steuerungsmechanismus der in Fig. 1 dargestellten Art bei der folgenden Diskussion angenommen. Es sind jedoch auch andere Typen von Steuermechanismen möglich. Zum Beispiel ist es möglich, einen Laserstrahl von einem Spiegel weg zu reflektieren, der sich um die Azimut- und die Zenitachse dreht. Die hier beschriebenen Techniken sind anwendbar ohne Rücksicht auf den Typ des Steuerungsmechanismus.

[0052] Am Lasertracker können magnetische Haltevorrichtungen 17 unterschiedlicher Größe vorhanden sein, die zum Rücksetzen des Lasertrackers in eine „Home“-Position für SMRs unterschiedlicher Größe wie beispielsweise SMRs für 1,5, 7/8 und 1/2 Zoll dienen. Ein am Tracker angebrachter Retroreflektor 19 kann benutzt werden, um den Tracker auf eine Bezugsentfernung zurück zu setzen. Zusätzlich kann ein auf dem Tracker angebrachter Spiegel, der aus der Fig. 1 nicht ersichtlich ist, in Kombination mit dem auf dem Tracker angebrachten Retroreflektor benutzt

werden, um das Leistungsmerkmal der Selbstkompensierung zu ermöglichen, wie es im US-Patent Nr. 7,327,446 beschrieben ist, dessen Inhalt durch Verweis eingearbeitet ist.

[0053] Fig. 2 zeigt ein als Beispiel dienendes Lasertrackersystem 7, das dem Lasertrackersystem 5 von Fig. 1 gleicht, jedoch mit der Ausnahme, dass das Retroreflektorziel 26 durch eine 6-DOF-Sonde 1000 ersetzt ist. In Fig. 1 können weitere Typen von Retroreflektoren verwendet werden. Zum Beispiel wird manchmal ein Katzenaugen-Retroreflektor benutzt, der ein Glas-Retroreflektor ist, bei dem Licht auf einen kleinen Lichtfleck auf einer reflektierenden hinteren Fläche der Glasstruktur fokussiert wird.

[0054] Fig. 3 ist ein Blockschaltbild, das die optischen und elektrischen Bauteile in einer Ausführungsform eines Lasertrackers zeigt. Hier sind die Bauteile eines Lasertrackers dargestellt, der zwei Wellenlängen von Licht aussendet – eine erste Wellenlänge für einen ADM und eine zweite Wellenlänge für einen sichtbaren Zeiger und zur fortlaufenden Zielverfolgung. Der sichtbare Zeiger versetzt den Nutzer in die Lage, die Position des Laserstrahlflecks, der vom Tracker ausgesendet wird, zu sehen. Die zwei unterschiedlichen Wellenlängen werden unter Verwendung eines Freiraum-Strahlteilers kombiniert. Das elektrooptische System 100 (EO) enthält die Quelle für sichtbares Licht 110, den Isolator 115, die wahlweise vorhandene erste Fasereinkopplung 170, das wahlweise vorhandene Interferometer (IFM) 120, den Strahlenaufweiter 140, den ersten Strahlteiler 145, die Lagedetektoranordnung 150, den zweiten Strahlteiler 155, den ADM 160 und die zweite Fasereinkopplung 170.

[0055] Die Quelle für sichtbares Licht 110 kann ein Laser, eine Superlumineszenz-Diode oder eine andere lichtaussendende Quelle sein. Der Isolator 115 kann ein Faraday-Entkoppler, ein Dämpfungsglied oder eine andere Vorrichtung sein, die imstande ist, das Licht, das in die Lichtquelle zurück reflektiert wird, zu verringern. Das wahlweise vorhandene Interferometer kann auf vielfältige Weise konfiguriert sein. Als spezielles Beispiel für eine mögliche Ausführung kann das Interferometer einen Strahlteiler 122, einen Retroreflektor 126, Lambdaviertelplättchen 124, 130 und einen Phasenanalysator 128 enthalten. Die Quelle für sichtbares Licht 110 kann das Licht in den freien Raum werfen, wo das Licht dann im freien Raum durch den Isolator 115 und das wahlweise vorhandene Interferometer 120 tritt. Auf alternative Weise kann der Isolator 115 an die Quelle für sichtbares Licht 110 über ein faseroptisches Kabel angeschlossen sein. In diesem Fall kann das Licht durch die erste Fasereinkopplung 170 vom Isolator in den freien Raum geworfen werden, wie das hier noch weiter unten unter Bezug auf Fig. 5 diskutiert wird.

[0056] Der Strahlenaufweiter 140 kann unter Verwendung einer Vielfalt von Linsenkombinationen aufgebaut sein, aber zwei üblicherweise benutzte Konfigurationen des Standes der Technik sind in Fig. 4A und Fig. 4B dargestellt. Fig. 4A zeigt eine Konfiguration 140A, die auf dem Einsatz einer Konkavlinse 141A und einer Konvexlinse 142A beruht. Ein Strahl gebündelten Lichtes 220A, das auf die Konkavlinse 141A fällt, tritt aus der Konvexlinse 142A als erweiterter Strahl an gebündeltem Licht 230A aus. Fig. 4B zeigt eine Konfiguration 140B, die auf dem Einsatz von zwei Konvexlinsen 141B und 142B beruht. Ein Strahl gebündelten Lichtes 220B, das auf die erste Konvexlinse 141B trifft, tritt aus der zweiten Konvexlinse 142B als erweiterter Strahl gebündelten Lichtes 230B aus. Von dem Licht, das den Strahlenaufweiter 140 verlässt, reflektiert ein kleiner Anteil an den Strahlteilern 145, 155 auf dem Weg aus dem Tracker heraus und geht verloren. Derjenige Teil des Lichtes, der durch den Strahlteiler 155 hindurch geht, wird mit Licht vom ADM 160 kombiniert, um einen zusammengesetzten Lichtstrahl 188 zu bilden, der diesen Lasertracker verlässt und zum Retroreflektor 90 gelangt.

[0057] In einer Ausführungsform enthält der ADM 160 eine Lichtquelle 162, die ADM-Elektronik 164, ein faseroptisches Netz 166, ein zur Verschaltung dienendes elektrisches Kabel 165 und Lichtwellenleiter 168, 169, 184, 185, die der Verbindung untereinander dienen. Die ADM-Elektronik gibt elektrische Modulations- und Vorspannungen an die Lichtquelle 162 ab, die zum Beispiel ein Laser mit verteilter Rückkopplung (DFB-Laser) sein kann, der bei einer Wellenlänge von annähernd 1550 nm arbeitet. In einer Ausführungsform kann das faseroptische Netz 166 das in Fig. 8A dargestellte faseroptische Netz 420A des Standes der Technik sein. Bei dieser Ausführungsform läuft das Licht von der Lichtquelle 162 in Fig. 3 über den Lichtwellenleiter 184, welche dem Lichtwellenleiter 432 in Fig. 8A gleichwertig ist.

[0058] Das faseroptische Netz von Fig. 8A enthält einen ersten Faserkoppler 430, einen zweiten Faserkoppler 436 und Reflektoren mit geringer Durchlässigkeit 435, 440. Das Licht läuft durch den ersten Faserkoppler 430 und spaltet sich in zwei Wege auf, wobei der erste Weg durch den Lichtwellenleiter 433 zum zweiten Faserkoppler 436 führt und der zweite Weg durch den Lichtwellenleiter 422 und den Faserlängenausgleicher 423 führt. Der Faserlängenausgleicher 423 ist an die Faserlänge 168 in Fig. 3 angeschlossen, die zum Referenzkanal der ADM-Elektronik 164 führt. Der Zweck des Faserlängenausgleichers 423 besteht darin, die Länge der Lichtwellenleiter, die vom Licht im Referenzkanal durchlaufen werden, an die Länge der Lichtwellenleiter, die vom Licht im Messkanal durchlaufen werden, anzugleichen. Das auf diese Weise erfolgende Angleichen der Faserlängen verringert ADM-Fehler, die durch Änderungen in der Umgebungstemperatur verursacht

werden. Derartige Fehler können entstehen, da die effektive optische Weglänge eines Lichtwellenleiters gleich dem durchschnittlichen Brechungsindex des Lichtwellenleiters, multipliziert mit der Länge der Faser, ist. Da der Brechungsindex der Lichtwellenleiter von der Temperatur der Faser abhängt, verursacht eine Änderung in der Temperatur der Lichtwellenleiter auch Änderungen in den effektiven optischen Weglängen von Mess- und Referenzkanal. Falls die effektive optische Weglänge des Lichtwellenleiters im Messkanal sich gegenüber der effektiven optischen Weglänge des Lichtwellenleiters im Referenzkanal ändert, führt das zu einer offensichtlichen Verschiebung in der Position des Retroreflektorziels **90**, selbst wenn das Retroreflektorziel **90** stationär gehalten wird. Um dieses Problem zu umgehen, werden zwei Schritte unternommen. Der erste besteht darin, dass die Länge der Faser im Referenzkanal so gut wie möglich an die Länge der Faser im Messkanal angepasst wird. Der zweite besteht darin, dass die Mess- und Bezugsfasern in dem Maße, wie dies möglich ist, nebeneinander verlegt werden, um zu gewährleisten, dass die Lichtwellenleiter in den zwei Kanälen nahezu die gleichen Temperaturänderungen erfahren.

[0059] Das Licht läuft durch den zweiten Faserkoppler **436** und wird auf zwei Wege aufgespaltet. Der erste führt zum LWL-Endelement **440** mit niedrigem Reflexionsvermögen und der zweite Weg zum Lichtwellenleiter **438**, von dem er zum Lichtwellenleiter **186** in **Fig. 3** führt. Das Licht im Lichtwellenleiter **186** läuft durch bis zu der zweiten Fasereinkopplung **170**.

[0060] In einer Ausführungsform ist die Fasereinkopplung **170** in **Fig. 5** in der Version des Standes der Technik dargestellt. Das Licht vom Lichtwellenleiter **186** von **Fig. 3** gelangt zum Lichtleiter **172** in **Fig. 5**. Die Fasereinkopplung **170** enthält den Lichtwellenleiter **172**, das Führungsröhrchen **174** und die Linse **176**. Der Lichtwellenleiter **172** ist am Führungsröhrchen **174** angebracht, das auf stabile Weise an der Struktur im Innern des Lasertrackers **10** angebracht ist. Falls gewünscht, kann das Ende des Lichtwellenleiters unter einem bestimmten Winkel poliert werden, um die zurück erfolgenden Reflexionen zu vermindern. Das Licht **250** tritt aus dem Kern der Faser aus, das eine optische Einmodenfaser mit einem Durchmesser zwischen 4 und 12 Mikrometer sein kann, was von der Wellenlänge des benutzten Lichts und vom besonderen Typ der Lichtwellenleiter abhängt. Das Licht **250** divergiert unter einem bestimmten Winkel und tritt durch die Linse **176**, die es bündelt. Das Verfahren des Abstrahlens und Aufnehmens eines optischen Signals durch einen einzelnen Lichtwellenleiter in einem ADM-System wurde mit Bezug auf **Fig. 3** im Patent '758 beschrieben.

[0061] Unter Bezugnahme auf **Fig. 3** kann der Strahlteiler **155** ein dichromatischer Strahlteiler sein,

der andere Wellenlängen durchlässt als er reflektiert. In einer Ausführungsform reflektiert das vom ADM **160** kommende Licht vom dichromatischen Strahlteiler **155** und verbindet sich mit dem sichtbaren Licht vom Laser **110**, das durch den dichromatischen Strahlteiler **155** durchgelassen wird. Der zusammengesetzte Lichtstrahl **188** läuft aus dem Lasertracker als erster Strahl zum Retroreflektor **90**, der einen Teil dieses Lichts als zweiten Strahl zurück wirft. Dieser Teil des zweiten Strahls, der bei der ADM-Wellenlänge liegt, reflektiert vom dichromatischen Strahlteiler **155** und kehrt zu der zweiten Fasereinkopplung **170** zurück, die das Licht zurück in den Lichtwellenleiter **186** koppelt.

[0062] In einer Ausführungsform entspricht der Lichtwellenleiter **186** dem Lichtwellenleiter **438** in **Fig. 8A**. Das zurückkommende Licht läuft vom Lichtwellenleiter **438** durch den zweiten Faserkoppler **436** und wird auf zwei Wege aufgespaltet. Ein erster Weg führt zum Lichtwellenleiter **424**, der in einer Ausführungsform dem Lichtwellenleiter **169** entspricht, der zum Messkanal der ADM-Elektronik **164** in **Fig. 3A** führt. Ein zweiter Weg führt zum Lichtwellenleiter **433** und dann zum ersten Faserkoppler **430**. Das Licht, das den ersten Faserkoppler **430** verlässt, wird auf zwei Wege aufgespaltet, ein erster Weg führt zum Lichtwellenleiter **432** und ein zweiter Weg zum LWL-Endelement **435** mit niedrigem Reflexionsvermögen. In einer Ausführungsform entspricht der Lichtwellenleiter **432** dem Lichtwellenleiter **184**, der in **Fig. 3** zur Lichtquelle **162** führt. In den meisten Fällen enthält die Lichtquelle **162** einen eingebauten Faraday-Entkoppler, der die Menge an Licht, die vom Lichtwellenleiter **432** in die Lichtquelle dringt, auf ein Mindestmaß senkt. Übermäßiges Licht, das in einen Laser in der umgekehrten Richtung eingespeist wird, kann den Laser destabilisieren.

[0063] Das Licht vom faseroptischen Netz **166** gelangt über die Lichtwellenleiter **168**, **169** in die ADM-Elektronik **164**. Eine Ausführungsform der ADM-Elektronik nach dem Stand der Technik ist in **Fig. 7** dargestellt. Der Lichtwellenleiter **168** in **Fig. 3** entspricht dem Lichtwellenleiter **3232** in **Fig. 7** und der Lichtwellenleiter **169** in **Fig. 3** entspricht dem Lichtwellenleiter **3230** in **Fig. 7**. Mit Bezug auf **Fig. 7** enthält die ADM-Elektronik **3300** einen Bezugsfrequenzgenerator **3302**, einen Synthesizer **3304**, einen Detektor **3306** für den Messkanal, einen Detektor **3308** für den Referenzkanal, eine Mischerschaltung **3310** für den Messkanal, eine Mischerschaltung **3312** für den Referenzkanal, Aufbereitungselektronik **3314**, **3316**, **3318**, **3320**, einen digitalen Frequenzteiler **3324** mit Division durch N und einen Analog-Digital-Wandler (ADC) **3322**. Der Bezugsfrequenzgenerator, der zum Beispiel ein ofengesteuerter Kristalloszillator (SCXO) sein kann, gibt eine Bezugsfrequenz f_{REF} , die beispielsweise 10 MHz betragen kann, an den Synthesizer ab, der zwei elektrische Signale erzeugt – ein

Signal mit einer Frequenz f_{RF} und zwei Signale mit der Frequenz f_{LO} . Das Signal f_{RF} läuft zur Lichtquelle **3102**, die der Lichtquelle **162** in **Fig. 3** entspricht. Die zwei Signale mit der Frequenz f_{LO} laufen zur Messkanal-Mischerschaltung **3310** und zur Referenzkanal-Mischerschaltung **3312**. Das Licht von den Lichtwellenleitern **168**, **169** in **Fig. 3** erscheint an den Lichtwellenleitern **3232** bzw. **3230** in **Fig. 7** und tritt in den Referenzkanal bzw. den Messkanal ein. Der Bezugskanal-detektor **3308** und der Messkanal-detektor **3306** wandeln die optischen Signale in elektrische Signale um. Diese Signale werden durch elektrische Komponenten **3316** bzw. **3314** aufbereitet und an die Mischer **3312** bzw. **3310** geleitet. Diese Mischer erzeugen die Frequenz f_{IF} , die gleich dem Absolutwert von $f_{LO}-f_{RF}$ ist. Das Signal f_{RF} kann eine relativ hohe Frequenz sein wie beispielsweise 2 GHz, während das Signal f_{IF} eine relativ niedrige Frequenz wie beispielsweise 10 kHz haben kann.

[0064] Die Bezugsfrequenz f_{REF} wird zum digitalen Frequenzteiler **3324** geleitet, der die Frequenz durch eine ganze Zahl dividiert. Zum Beispiel kann eine Frequenz von 10 kHz durch 40 geteilt werden, um eine Ausgangsfrequenz von 250 kHz zu erhalten. In diesem Fall würden die 10-kHz-Signale, die in den ADW **3322** eintreten, mit einer Rate von 250 kHz abgetastet, wodurch 25 Abtastwerte pro Zyklus erhalten werden. Die Signale vom ADW **3322** werden zu einem Datenprozessor **3400** geschickt, der ein oder mehrere digitale Signalverarbeitungsprozessoren (DSP) sein können, die sich in der ADM-Elektronik **164** von **Fig. 3** befinden.

[0065] Das Verfahren der Ermittlung einer Entfernung beruht auf der Berechnung der Phase der ADW-Signale für den Bezugs- und den Messkanal. Dieses Verfahren ist ausführlich in dem an Bridges et al. erteilten US-Patent Nr. 7,701,559 beschrieben, dessen Inhalt in dieses Dokument durch Verweis einbezogen ist. Die Berechnung enthält die Anwendung der Gleichungen (1) bis (8) des Patents '559. Außerdem werden, wenn der ADM zunächst beginnt, einen Retroreflektor zu messen, die von dem Synthesizer erzeugten Frequenzen mehrere Male (zum Beispiel drei Mal) geändert, und die möglichen ADM-Entfernungen werden in jedem einzelnen Fall berechnet. Durch Vergleich der möglichen ADM-Entfernungen für jede der ausgewählten Frequenzen wird Mehrdeutigkeit bei der ADM-Messung beseitigt. Die Gleichungen (1)–(8) des Patents '559 in Verbindung mit den Methoden der Synchronisierung, die mit Bezug auf **Fig. 5** von Patent '559 beschrieben sind, und mit den Kalmanschen Filtermethoden, die im Patent '559 beschrieben sind, versetzen den ADM in die Lage, ein sich bewegendes Ziel zu messen. In weiteren Ausführungsformen können weitere Methoden der Gewinnung von absoluten Entfernungsmessungen wie beispielsweise die unter Verwendung der ge-

pulsten Flugdauer an Stelle der Phasenunterschiede benutzt werden.

[0066] Der Teil des zurück kommenden Lichtstrahls **190**, der durch den Strahlteiler **155** tritt, kommt am Strahlteiler **145** an, der einen Teil des Lichts zum Strahllaufweiter **140** und einen weiteren Teil des Lichts zur Lagedetektoranordnung **150** schickt. Das Licht, das aus dem Lasertracker **10** oder dem elektrooptischen System **100** austritt, kann als ein erster Strahl gedacht werden und derjenige Teil von diesem Licht, das vom Retroreflektor **90** oder **26** reflektiert wird, als zweiter Strahl. Teile des reflektierten Strahls werden zu verschiedenen Funktionselementen des elektrooptischen Systems **100** geschickt. Zum Beispiel kann ein erster Teil zu einem Entfernungsmesser wie beispielsweise dem ADM **160** in **Fig. 3** geschickt werden. Ein zweiter Teil kann an die Lagedetektoranordnung **150** geschickt werden. In einigen Fällen kann ein dritter Teil an weitere Funktionseinheiten geschickt werden wie beispielsweise an ein wahlweise vorhandenes Interferometer **120**. Es ist dabei wichtig zu verstehen, dass, auch wenn im Beispiel von **Fig. 3** der erste Teil und der zweite Teil des zweiten Strahls an den Entfernungsmesser und den Positionsdetektor nach Reflexion vom Strahlteiler **155** bzw. **145** geschickt werden, es auch möglich wäre, das Licht an den Entfernungsmesser oder den Positionsdetektor durch Transmission an Stelle von Reflexion zu schicken.

[0067] Vier Beispiele für Lagedetektoranordnungen **150A–150D** des Standes der Technik sind in **Fig. 6A–Fig. 6D** dargestellt. In **Fig. 6A** ist die einfachste Ausführung dargestellt, bei der die Lagedetektorenordnung einen Lagesensor **151** enthält, der auf eine Leiterplatte **152** montiert ist. Diese Leiterplatte **152** erhält ihre Stromversorgung vom Elektronikkasten **350** und schickt Signale an diesen zurück. Durch diesen kann dargestellt werden, dass die Möglichkeit der elektronischen Verarbeitung an jeder beliebigen Stelle im Lasertracker **10**, in der Hilfsanlage **50** oder im externen Computer **60** besteht. In **Fig. 6B** ist ein optischer Filter **154** vorhanden, der ungewünschte optische Wellenlängen davon abhält, den Lagesensor **151** zu erreichen. Die unerwünschten optischen Wellenlängen können auch beispielsweise durch Beschichtung des Strahlteilers **145** oder der Oberfläche des Lagesensors **151** mit einer geeigneten Folie abgeblockt werden. In **Fig. 6C** ist ein Objektiv **153** vorhanden, wodurch die Größe des Lichtstrahls verringert wird. In **Fig. 6D** sind sowohl ein optischer Filter **154** als auch ein Objektiv **153** vorhanden.

[0068] **Fig. 6E** zeigt eine Lagedetektoranordnung gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, die einen optischen Aufbereiter **149E** enthält. Dieser optische Aufbereiter enthält ein Objektiv **153** und kann auch optionale Wellenlängenfilter **154** aufweisen. Außerdem enthält er mindestens ei-

nen Diffusor **156** und einen räumlichen Filter **157**. Wie bereits weiter oben erläutert wurde, ist der Würfecken-Retroreflektor ein beliebter Typ von Retroreflektor. Ein Typ von Würfecken-Retroreflektor ist aus drei Spiegeln gefertigt, von denen jeder unter rechten Winkeln mit den beiden anderen Spiegeln verbunden ist. Die Schnittlinien, an denen diese drei Spiegel zusammengesetzt sind, können eine endliche Dicke aufweisen, in der das Licht nicht vollständig zurück zum Tracker reflektiert wird. Die Linien endlicher Dicke werden bei ihrer Ausbreitung gebeugt, so dass sie beim Erreichen des Lagedetektors am Positionsdetektor nicht genau dieselbe Erscheinungsform haben müssen. Jedoch wird das gebeugte Lichtmuster im Allgemeinen von der vollständigen Symmetrie abweichen. Im Ergebnis kann das Licht, das auf den Positionsdetektor **151** trifft, zum Beispiel Senken oder Anstiege in der optischen Leistung (hot spots) in der Nähe der gebeugten Linien aufweisen. Da die Gleichförmigkeit des vom Retroreflektor kommenden Lichts sich von einem Retroreflektor zum anderen Retroreflektor ändern kann und auch da die Verteilung des Lichts am Positionsdetektor sich verändern kann, wenn der Retroreflektor gedreht oder geneigt wird, kann es vorteilhaft sein, einen Diffusor **156** einzubeziehen, um die Glätte des Lichts, das auf den Positionsdetektor **151** trifft, zu verbessern. Da ein idealer Positionsdetektor auf einen Flächenschwerpunkt ansprechen sollte und ein idealer Diffusor einen Lichtfleck symmetrisch ausbreiten sollte, so könnte argumentiert werden, dass keine Auswirkung auf die sich ergebende Position, die vom Positionsdetektor angegeben wird, vorliegen dürfte. Jedoch wird in der Praxis beobachtet, dass der Diffusor die Leistungsfähigkeit der Lagedetektoranordnung verbessert, vermutlich aufgrund der Auswirkungen von Nichtlinearitäten (Unvollkommenheiten) im Positionsdetektor **151** und im Objektiv **153**. Würfecken-Retroreflektoren aus Glas können auch ungleichförmige Lichtflecke am Positionsdetektor hervorrufen. Änderungen in einem Lichtfleck auf einem Positionsdetektor können besonders vorrangig von dem Licht sein, das von den Würfecken in den 6-DOF-Zielen reflektiert wird, wie deutlicher aus den gemeinsam übertragenen US-Patentanmeldungen Nr. 13/370,339, angemeldet am 10. Februar 2015, und 13/407,983, angemeldet am 29. Februar 2015, hervorgeht, deren Inhalt hier durch Verweis einbezogen ist. In einer Ausführungsform ist der Diffusor **156** ein holografischer Diffusor. Ein holografischer Diffusor liefert kontrolliertes homogenes Licht über einen spezifizierten Diffusionswinkel. In anderen Ausführungsformen werden andere Typen von Diffusoren benutzt wie beispielsweise Diffusoren aus gemahlenem Glas oder „opale“ Diffusoren.

[0069] Der Zweck des räumlichen Filters **157** der Lagedetektoranordnung **150E** besteht darin, Geisterstrahlen abzublocken, die beispielsweise aus unerwünschten Reflexionen von optischen Oberflächen,

vom Auftreffen auf den Positionsdetektor **151** herrühren können. Ein räumlicher Filter enthält eine Platte **157**, die eine Apertur aufweist. Durch das Anordnen des räumlichen Filters **157** in einer Distanz vom Objektiv, die annähernd gleich der Brennweite des Objektivs ist, tritt das zurückkommende Licht **243E** durch den räumlichen Filter, wenn dieser sich nahe an der engsten Stelle, der Einschnürung des Strahls, befindet. Die Strahlen, die unter einem abweichenden Winkel laufen wie beispielsweise im Ergebnis der Reflexion an einem optischen Bauteil, treffen auf den räumlichen Filter in einer Distanz von der Apertur und werden somit daran gehindert, den Positionsdetektor **151** zu erreichen. Ein Beispiel ist in **Fig. 6E** dargestellt, wo ein unerwünschter Geisterstrahl **244E** von einer Oberfläche des Strahlteilers **145** reflektiert wird und zum räumlichen Filter **157** läuft, wo er abgeblockt wird. Ohne den räumlichen Filter würde der Geisterstrahl **244E** den Positionsdetektor **151** erreichen, was dazu führen würde, dass dadurch die Position des Strahls **243E** auf dem Positionsdetektor **151** auf unkorrekte Weise ermittelt wird. Selbst ein schwacher Geisterstrahl kann die Position des Flächenschwerpunkts auf dem Positionsdetektor **151** auf signifikante Weise ändern, falls der Geisterstrahl sich in einer relativ großen Entfernung vom Hauptfleck des Lichts befindet.

[0070] Ein Retroreflektor der hier diskutierten Art wie beispielsweise einer vom Würfeckentyp oder vom Katzenaugentyp hat die Eigenschaft, einen Lichtstrahl zu reflektieren, der in den Retroreflektor in einer Richtung parallel zum auftreffenden Strahl eintritt. Außerdem sind der einfallende und der reflektierte Strahl symmetrisch um den Symmetriepunkt des Retroreflektors gelagert. Zum Beispiel ist in einem offenen Würfecken-Retroreflektor der Symmetriepunkt des Retroreflektors der Scheitelpunkt der Würfecke. In einem Glaswürfel-Retroreflektor ist der Symmetriepunkt auch der Scheitelpunkt, aber in diesem Fall ist das Brechen des Lichts an der Glas-Luft-Grenzfläche zu berücksichtigen. Bei einem Katzenauge-Retroreflektor mit einem Brechungsindex von 2,0 ist der Symmetriepunkt der Mittelpunkt der Kugel. In einen Katzenauge-Retroreflektor aus zwei Glas-Halbkugeln, die symmetrisch auf einer gemeinsamen Ebene sitzen, ist der Symmetriepunkt ein Punkt, der auf der Ebene und in der sphärischen Mitte einer jeden Halbkugel liegt. Der Hauptpunkt besteht darin, dass für den Typ der Retroreflektoren, der bei Lasertrackern gewöhnlich benutzt wird, das von einem Retroreflektor zum Tracker zurück geführte Licht auf die andere Seite des Scheitelpunktes relativ zum einfallenden Laserstrahl verschoben ist.

[0071] Dieses Verhalten eines Retroreflektors **90** in **Fig. 3** stellt die Grundlage für das Nachführen des Retroreflektor durch den Lasertracker dar. Der Lagesensor hat auf seiner Oberfläche einen idealen Verfolgungspunkt. Dieser ideale Verfolgungspunkt ist

derjenige Punkt, an dem ein zum Symmetriepunkt eines Retroreflektors (z. B. zum Scheitelpunkt des Würfecken-Retroreflektor in einem SMR) gesendeter Laserstrahl zurückkehrt. Üblicherweise liegt der Verfolgungspunkt in der Nähe der Mitte des Lagesensors. Falls der Laserstrahl auf eine Seite des Retroreflektors gesendet wird, reflektiert er auf der anderen Seite zurück und erscheint auf dem Lagesensor in einer Distanz vom Verfolgungspunkt. Durch Vermerken der Position des zurückkommenden Lichtstrahls auf dem Lagesensor kann das Steuerungssystem des Lasertracker **10** bewirken, dass die Motoren den Lichtstrahl in Richtung auf den Symmetriepunkt des Retroreflektors bewegen.

[0072] Falls der Retroreflektor quer zum Tracker mit einer konstanten Geschwindigkeit bewegt wird, wird der Lichtstrahl am Retroreflektor um einen festen Abstand vom Symmetriepunkt des Retroreflektors versetzt auf den Retroreflektor treffen (nachdem sich Übergangszustände eingestellt haben). Der Lasertracker führt eine Korrektur durch, um diesen versetzten Abstand am Retroreflektor auf der Grundlage eines Skalenfaktors zu berücksichtigen, der aus kontrollierten Messungen erhalten wird und der auf der Entfernung vom Lichtstrahl auf dem Lagesensor zum idealen Verfolgungspunkt beruht.

[0073] Wie bereits weiter oben erläutert wurde, erfüllt der Ladedetektor zwei wichtige Funktionen – die Ermöglichung des Nachführens und die Korrektur der Messungen, um die Bewegung des Retroreflektors zu berücksichtigen. Der Lagesensor im Positionsdetektor kann jeder beliebige Typ von Vorrichtung sein, die imstande ist, eine Position zu messen. Zum Beispiel könnte der Lagesensor ein lageempfindlicher Detektor oder eine lichtempfindliche Anordnung sein. Der lageempfindliche Detektor könnte beispielsweise ein Seitenwirkungsdetektor oder ein Quadrantendetektor sein. Die lichtempfindliche Anordnung könnte beispielsweise eine CMOS- oder eine CCD-Anordnung sein.

[0074] In einer Ausführungsform tritt das zurückkehrende Licht, das vom Strahlteiler **145** nicht reflektiert wird, durch den Strahlenerweiterer **140**, wodurch es weniger wird. In einer anderen Ausführungsform werden die Positionen des Lagedetektors und des Entfernungsmessers vertauscht, so dass das vom Strahlteiler **145** reflektierte Licht durch den Entfernungsmesser tritt und das vom Strahlteiler durchgelassene Licht zum Positionsdetektor gelangt.

[0075] Das Licht setzt seinen Weg fort durch das wahlweise vorhandene IFM, durch den Isolator und in die Quelle **110** für sichtbares Licht. In diesem Stadium sollte die optische Leistung klein genug sein, so dass dadurch die Quelle **110** für sichtbares Licht nicht destabilisiert wird.

[0076] In einer Ausführungsform wird das Licht von der Quelle **110** für sichtbares Licht durch die Strahl-Einkopplung **170** von **Fig. 5** abgegeben. Die Faser-einkopplung kann am Ausgang der Lichtquelle **110** oder an einem Lichtleiterausgang des Entkopplers **115** angebracht sein.

[0077] In einer Ausführungsform ist das faseroptische Netz **166** von **Fig. 3** das faseroptische Netz **420B** des Standes der Technik von **Fig. 8B**. Hier entsprechen die Lichtleiter **184, 186, 169** von **Fig. 3** den Lichtleitern **443, 444, 424, 422** von **Fig. 8B**. Das faseroptische Netz von **Fig. 8B** ist wie das faseroptische Netz von **Fig. 8A** mit der Ausnahme, dass das faseroptische Netz von **Fig. 8B** einen einzelnen Lichtwellen-Verzweiger aufweist an Stelle von zwei Lichtwellen-Verzweigern. Der Vorteil der **Fig. 8B** gegenüber **Fig. 8A** besteht in der Einfachheit, jedoch ist es wahrscheinlicher, dass **Fig. 8B** unerwünschte optische Rückreflexionen aufweist, die in die Lichtleiter **422** und **424** gelangen.

[0078] In einer Ausführungsform ist das faseroptische Netz **166** von **Fig. 3** das faseroptische Netz **420C** von **Fig. 8C**. Hier entsprechen die Lichtleiter **184, 186, 168, 169** von **Fig. 3** den Lichtleitern **447, 455, 423, 424** von **Fig. 8C**. Das faseroptische Netz **420C** enthält einen ersten Lichtwellen-Verzweiger **445** und einen zweiten Lichtwellen-Verzweiger **451**. Der erste Lichtwellen-Verzweiger **445** ist ein 2×2 -Verzweiger mit zwei Eingangs-Anschlüssen und zwei Ausgangs-Anschlüssen. Verzweiger von diesem Typ sind üblicherweise in der Weise gefertigt, dass zwei Faserkerne in enger Nachbarschaft geführt werden und dann die Fasern während des Erhitzens gezogen werden. Auf diese Weise kann die abklingende Kopplung zwischen den Fasern einen gewünschten Teil des Lichts auf die benachbarte Faser abspalten. Der zweite Lichtleiter-Verzweiger **451** ist von dem Typ, der Zirkulator genannt wird. Er hat drei Anschlüsse, von denen jeder die Fähigkeit aufweist, Licht zu übertragen oder aufzunehmen, aber nur in der festgelegten Richtung. Zum Beispiel tritt das Licht auf dem Lichtleiter **448** in den Anschluss **453** ein und wird in Richtung Anschluss **454** transportiert, wie das durch den Pfeil angegeben ist. Am Anschluss **454** kann das Licht zum Lichtleiter **455** übertragen werden. Auf ähnliche Weise kann das am Anschluss **455** anliegende Licht in den Anschluss **454** eintreten und in Richtung des Pfeils zum Anschluss **456** gelangen, wo etwas Licht zum Lichtleiter **424** übertragen werden kann. Falls nur drei Anschlüsse benötigt werden, kann der Zirkulator **451** weniger Verluste an optischer Leistung erleiden als der 2×2 -Verzweiger. Andererseits kann ein Zirkulator **451** teurer sein als ein 2×2 -Verzweiger, und es kann bei ihm Polarisationsmodendisersion auftreten, was in einigen Situationen problematisch sein kann.

[0079] Fig. 9 und Fig. 10 zeigen eine Aufriss- bzw. eine Schnittdarstellung eines Lasertrackers **2100** des Standes der Technik, der in Fig. 2 und Fig. 3 der veröffentlichten US-Patentanmeldung Nr. 2010/0158259 von Bridges et al. abgebildet ist und die durch Verweis einbezogen sind. Die Azimutanordnung **2110** enthält das Säulengehäuse **2112**, die Azimut-Kodieranordnung **2120**, das untere und das obere Azimutlager **2114A**, **2114B**, die Azimut-Motoranordnung **2125**, die Azimut-Gleitringanordnung **2130** und die Azimut-Leiterplatten **2135**.

[0080] Der Zweck der Azimut-Kodieranordnung **2120** besteht darin, den Drehwinkel des Jochs **2142** in Bezug auf das Säulengehäuse **2112** genau zu messen. Die Azimut-Kodieranordnung **2120** enthält die Kodierscheibe **2121** und die Lesekopfanordnung **2122**. Die Kodierscheibe **2121** ist an der Welle des Jochgehäuses **2142** angebracht, und die Lesekopfanordnung **2122** ist an der Säulenordnung **2110** angebracht. Die Lesekopfanordnung **2122** umfasst eine Leiterplatte, auf der einer oder mehrere Leseköpfe befestigt sind. Das von den Leseköpfen gesendete Laserlicht reflektiert an den feinen Gitterlinien auf der Kodierscheibe **2121**. Das von den Detektoren auf dem Lesekopf oder den Leseköpfen des Kodierers aufgenommene Licht wird verarbeitet, um den Winkel der sich drehenden Kodierscheibe in Bezug auf die feststehenden Leseköpfe zu erhalten.

[0081] Die Azimut-Motoranordnung **2125** enthält den Rotor **2126** des Azimutmotors und den Stator **2127** des Azimutmotors. Der Rotor **2126** des Azimutmotors umfasst Dauermagnete, die direkt an der Welle des Jochgehäuses **2142** angebracht sind. Der Stator **2127** des Azimutmotors umfasst Feldwicklungen, die ein vorgeschriebenes Magnetfeld erzeugen. Dieses Magnetfeld steht mit den Magneten des Rotors **2126** des Azimutmotors in Wechselwirkung, um die gewünschte Drehbewegung zu erzeugen. Der Stator **2127** des Azimutmotors ist am Säulensystem **2112** angebracht.

[0082] Die Azimut-Leiterplatten **2135** stellen eine oder mehrere Leiterplatten dar, welche die elektrischen Funktionen liefern, die von den Azimutkomponenten benötigt werden wie beispielsweise Kodierer und Motor. Die Azimut-Gleitringanordnung **2130** umfasst den äußeren Teil **2131** und den inneren Teil **2132**. In einer Ausführungsform tritt ein Adernbündel **2138** aus dem Hilfsprozessor **50** aus. Dieses Adernbündel kann die Leistung für den Tracker übertragen oder Signale an den Tracker oder von diesem. Einige der Adern des Adernbündels **2138** können zu Anschlüssen auf den Leiterplatten führen. In dem in Fig. 10 gezeigten Beispiel sind Adern zur Azimut-Leiterplatte **2135**, zur Lesekopfanordnung **2122** des Kodierers und zur Azimut-Motoranordnung **2125** geführt. Weitere Adern sind zum inneren Teil **2132** der Gleitringanordnung **2130** geführt. Der innere Teil

2132 ist an der Säulenordnung **2110** angebracht und bleibt folglich stationär. Der äußere Teil ist an der Jochanordnung **2140** angebracht und dreht sich folglich in Bezug auf den inneren Teil **2132**. Die Gleitringanordnung **2130** ist so ausgelegt, dass sie einen elektrischen Kontakt mit geringer Impedanz ermöglicht, während sich der äußere Teil **2131** in Bezug zum inneren Teil **2132** dreht.

[0083] Die Zenitanordnung **2140** umfasst das Jochgehäuse **2142**, die Zenit-Kodieranordnung **2150**, das linke und das rechte Zenitlager **2144A**, **2144B**, die Zenit-Motoranordnung **2155**, die Zenit-Gleitringanordnung **2160** und die Zenit-Leiterplatte **2165**.

[0084] Der Zweck der Zenit-Kodieranordnung **2150** besteht darin, den Drehwinkel des Nutzmassensystems **2172** in Bezug auf das Jochgehäuse **2142** genau zu messen. Die Zenit-Kodiereinrichtung **2150** umfasst die Zenit-Kodierscheibe **2151** und die Zenit-Lesekopfanordnung **2152**. Die Kodierscheibe **2151** ist am Gehäuse **2142** der Nutzmasse angebracht, und die Lesekopfanordnung **2152** ist am Jochgehäuse **2142** angebracht. Die Zenit-Lesekopfanordnung **2152** umfasst eine Leiterplatte, auf der ein oder mehrere Leseköpfe befestigt sind. Das von den Leseköpfen gesendete Laserlicht reflektiert an den feinen Gitterlinien auf der Kodierscheibe **2151**. Das von den Detektoren auf dem Lesekopf oder den Leseköpfen des Kodierers aufgenommene reflektierte Licht wird verarbeitet, um den Winkel der sich drehenden Kodierscheibe in Bezug auf die feststehenden Leseköpfe zu ermitteln.

[0085] Die Zenit-Motoranordnung **2155** umfasst den Rotor **2156** des Azimutmotors und den Stator **2157** des Azimutmotors. Der Rotor **2156** des Zenitmotors umfasst Dauermagnete, die an der Welle des Nutzmassensystems **2172** direkt angebracht sind. Der Stator **2157** des Zenitmotors umfasst Feldwicklungen, die ein vorgeschriebenes Magnetfeld erzeugen. Dieses Magnetfeld steht mit den Rotormagneten in Wechselwirkung, um die gewünschte Drehbewegung zu erzeugen. Der Stator **2157** des Zenitmotors ist am Jochsystem **2142** angebracht.

[0086] Die Zenit-Leiterplatte **2165** stellt eine oder mehrere Leiterplatten dar, welche die elektrischen Funktionen liefern, die von den Komponenten benötigt werden wie beispielsweise Kodierer und Motor. Die Zenit-Gleitringanordnung **2160** umfasst den äußeren Teil **2161** und den inneren Teil **2162**. Ein Adernbündel **2168** tritt aus dem äußeren Teil **2131** des Azimut-Gleittrings aus. Dieses Adernbündel kann die Leistung oder Signale übertragen. Einige der Adern des Adernbündels **2168** können an Anschlüsse auf der Leiterplatte führen. In dem in Fig. 10 gezeigten Beispiel sind Adern zur Zenit-Leiterplatte **2165**, zur Zenit-Motoranordnung **2150** zur Lesekopfanordnung **2152** des Kodierers geführt. Weitere

Adern sind zum inneren Teil **2162** der Gleitringanordnung **2160** geführt. Der innere Teil **2162** ist am Jochsystem **2142** angebracht und dreht sich folglich nur im Azimutwinkel, aber nicht im Zenitwinkel. Der äußere Teil **2161** ist am Nutzmassensystem **2172** angebracht und dreht sich folglich sowohl im Zenit- als auch im Azimutwinkel. Die Gleitringanordnung **2160** ist so ausgelegt, dass sie einen elektrischen Kontakt mit geringer Impedanz ermöglicht, während sich der äußere Teil **2161** in Bezug zum inneren Teil **2162** dreht. Die Nutzmassenanordnung **2170** enthält die primäre Optikanordnung **2180** und die sekundäre Optikanordnung **2190**.

[0087] Fig. 11 ist ein Blockschaltbild, in dem die Elektronik des Verarbeitungssystems **1500** für die Dimensionsmessungen abgebildet ist. Dieses System enthält die Elektronik des Verarbeitungssystems **1510** für den Lasertracker, die Verarbeitungssysteme **1582**, **1584**, **1586** für die peripheren Bauteile, den Computer **1590** und weitere Netzkomponenten **1600**, die hier als Wolke dargestellt sind. Das als Beispiel dargestellte Verarbeitungssystem **1510** der Elektronik des Lasertrackers enthält einen Hauptprozessor **1520**, die Elektronik **1530** für die Nutzmassenfunktionen, die Elektronik **1560** für die Anzeige und die Benutzer-Schnittstelle (BS), die Hardware **1565** für den herausnehmbaren Speicher, die Elektronik für die Hochfrequenz-Identifizierung (RFID) und eine Antenne **1572**. Die Elektronik **1530** für die Nutzmassenfunktionen enthält eine Mehrzahl von Unterfunktionen, darunter die 6-DOF-Elektronik **1531**, die Kamera-Elektronik **1532**, die ADM-Elektronik **1533**, die Positionsdetektor-Elektronik (PSD) **1534** und die Nivellierungselektronik **1535**. Die meisten der Unterfunktionen verfügen über mindestens eine Prozessoreinheit, die beispielsweise ein digitaler Signalprozessor (DSP) oder eine am Einsatzort programmierbare Gate Array (FPGA) sein kann. Die Elektronik-Einheiten **1530**, **1540** und **1550** sind wegen ihrer Unterbringung im Lasertracker getrennt, wie das auch dargestellt ist. In einer Ausführungsform sind die Nutzmassenfunktionen **1530** im Nutzmassensystem **2170** der Fig. 9 und Fig. 10 untergebracht, während die Elektronik **1540** des Azimut-Kodierers sich in der Azimut-Anordnung **2110** befindet und die Elektronik **1550** des Zenit-Kodierers sich in der Zenit-Anordnung **2140** befindet.

[0088] Viele Typen von peripheren Geräten sind möglich, aber hier werden nur drei derartige Geräte gezeigt: ein Temperatursensor **1582**, eine 6-DOF-Sonde **1584** und ein digitaler Personalassistent **1586**, der beispielsweise ein Smart Phone sein kann. Der Lasertracker kann mit den peripheren Geräten über eine Vielfalt an Mitteln kommunizieren, darunter die drahtlose Kommunikation über die Antenne **1572**, mittels eines visuellen Systems wie beispielsweise einer Kamera und mittels Entfernungs- und Winkelanzeigen des Lasertrackers an einem Kooperati-

onsziel wie beispielsweise der 6-DOF-Sonde **1584**. Die peripheren Geräte können Prozessoren enthalten. Das 6-DOF-Zubehör kann 6-DOF-Sondensysteme, 6-DOF-Scanner, 6-DOF-Projektoren, 6-DOF-Sensoren und 6-DOF-Anzeigevorrichtungen enthalten. Die Prozessoren in diesen 6-DOF-Geräten können in Verbindung mit Verarbeitungsgeräten im Lasertracker sowie in einem externen Computer und in Cloud-Verarbeitungsanlagen eingesetzt werden. Generell kann gesagt werden, dass, wenn der Ausdruck Lasertracker-Prozessor oder Messgeräteprozessor benutzt wird, dies bedeutet, dass mögliche externe Computer und Cloud-Anlagen darin enthalten sind.

[0089] In einer Ausführungsform führt ein getrennter Kommunikationsbus vom Hauptprozessor **1520** zu jeder der Elektronik-Einheiten **1530**, **1540**, **1550**, **1560**, **1565** und **1570**. Jede Kommunikationsleitung kann beispielsweise drei serielle Leitungen aufweisen, zu denen die Datenleitung, die Zeitleitung und die Systemleitung gehören. Die Systemleitung zeigt an, ob die Elektronik-Einheit auf die Zeitleitung achten sollte oder nicht. Falls sie zur Anzeige bringt, dass auf diese geachtet werden soll, dann liest die Elektronik-Einheit den aktuellen Wert der Datenleitung bei jedem Zeitsignal. Das Zeitsignal kann beispielsweise einer ansteigenden Flanke des Zeitimpulses entsprechen. In einer Ausführungsform werden Informationen über die Datenleitung in Form eines Paketes übertragen. In einer Ausführungsform enthält jedes Paket eine Adresse, einen numerischen Wert, eine Datenmeldung und eine Prüfsumme. Die Adresse zeigt an, wohin innerhalb der Elektronik-Einheit die Datenmeldung geschickt werden soll. Der Ort kann beispielsweise einer Prozessor-Subroutine innerhalb der Elektroneinheit entsprechen. Der numerische Wert gibt die Länge der Datenmeldung an. Die Prüfsumme ist ein numerischer Wert, der dazu benutzt wird, um die Möglichkeit, dass Fehler über die Kommunikationsleitung übertragen werden, auf ein Mindestmaß herabgesetzt wird.

[0090] In einer Ausführungsform sendet der Hauptprozessor **1520** Pakete von Informationen über den Bus **1610** zur Elektronik **1530** für die Nutzmassenfunktionen, über den Bus **1611** zur Elektronik **1540** des Azimut-Kodierers, über den Bus **1612** zur Elektronik **1550** des Zenit-Kodierers, über den Bus **1613** zur Elektronik **1560** für die Anzeige und die Nutzer-Schnittstelle, über den Bus **1614** zur Hardware **1565** des Wechselspeichers und über den Bus **1616** zur drahtlosen Elektronik **1570** für die Hochfrequenz-Identifizierung und die Funkübertragung.

[0091] In einer Ausführungsform sendet der Hauptprozessor **1520** zur selben Zeit auch einen Synch-Impuls (Synchronisierung) über den Synch-Bus **1630** an jede der Elektroneinheiten. Dieser Synch-Impuls liefert einen Weg zur Synchronisierung der Werte, die

durch die Messfunktionen des Lasertrackers gesammelt werden. Zum Beispiel rasten die Elektronik **1540** des Azimut-Kodierers und die Elektronik **1550** des Zenit-Kodierers **1550** ihre Kodierwerte ein, sobald der Synch-Impuls eingegangen ist. Auf ähnliche Weise rastet die Elektronik **1530** für die Nutzmassenfunktionen die Daten ein, von der im Nutzmassensystem enthaltenen Elektronik gesammelt werden. Alle beide, der 6-DOF-ADM und der Positionsdetektor, rasten die Daten ein, wenn der Synch-Impuls gegeben worden ist. In den meisten Fällen sammeln die Kamera und der Neigungsmesser Daten mit einer niedrigeren Rate als die des Synch-Impulses, können aber Daten bei einem Vielfachen der Periode des Synch-Impulses einrasten.

[0092] Die Elektronik **1540** des Azimut-Kodierers und die Elektronik **1550** des Zenit-Kodierers sind voneinander getrennt und auch von der Elektronik **1530** für die Nutzmasse, und zwar durch die Gleitringe **2130**, **2160**, wie das in **Fig. 9** und **Fig. 10** dargestellt ist. Dies ist der Grund dafür, dass die Busleitungen **1610**, **1611** und **1612** als separate Buslinien in **Fig. 11** abgebildet sind.

[0093] Die Elektronik **1510** des Verarbeitungssystems für den Lasertracker kann mit einem externen Computer **1590** kommunizieren oder kann das Berechnen, die Anzeige und die Funktionen der Nutzer-Schnittstelle im Innern des Lasertrackers bereit stellen. Der Lasertracker kommuniziert mit dem Computer **1590** über die Kommunikationsverbindung **1606**, die beispielsweise eine Ethernet-Leitung oder eine Funkverbindung sein kann. Der Lasertracker kann auch mit anderen Elementen **1600**, die durch die Wolke dargestellt sind, über die Kommunikationsverbindung **1602** kommunizieren, zu denen ein oder mehrere elektrische Leitungen wie beispielsweise Ethernet-Kabel und eine oder mehrere Funkverbindungen gehören können. Ein Beispiel für ein Element **1600** ist ein weiteres dreidimensionales Prüfgerät wie zum Beispiel ein Gelenkarm-CMM, der durch den Lasertracker verschoben werden kann. Eine Kommunikationsverbindung **1604** zwischen dem Computer **1590** und den Elementen **1600** kann über Draht (z. B. Ethernet) oder Funk bestehen. Eine Bedienperson, die an einem entfernt befindlichen Computer **1590** sitzt, kann eine Verbindung zum Internet, das durch die Wolke **2600** dargestellt ist, über ein Ethernet oder Funkleitung einrichten, die ihrerseits die Verbindung zum Hauptprozessor **1520** über eine Ethernet- oder Funkverbindung herstellt. Auf diese Weise kann ein Nutzer die Arbeitsweise eines entfernt befindlichen Lasertrackers steuern.

[0094] Die heutigen Lasertracker benutzen eine Wellenlänge im sichtbaren Bereich (üblicherweise im Roten) und eine im Infraroten für den ADM. Die rote Wellenlänge kann durch einen frequenzstabilisierten (HeNe)-Laser bereit gestellt werden, der für die An-

wendung in einem Interferometer und auch für den Einsatz zur Bereitstellung eines roten Zeigerstrahls geeignet ist. Ein Nachteil der Benutzung von zwei Lichtquellen besteht in dem zusätzlichen Platzbedarf und in den zusätzlichen Kosten, die für die zusätzlichen Lichtquellen, die Strahlteiler, die Isolator und für weitere Komponenten erforderlich sind. Ein weiterer Nachteil der Benutzung von zwei Lichtquellen besteht darin, dass es schwierig ist, die zwei Lichtquellen längs ihrer gesamten Wege, welche die Strahlen durchlaufen, auf perfekte Weise auszurichten. Dies kann zu einer Vielfalt von Problemen führen. Dazu zählt, dass man nicht imstande ist, gleichzeitig gute Leistungsdaten von unterschiedlichen Subsystemen zu erhalten, die mit unterschiedlichen Wellenlängen arbeiten. Ein System, das eine einzelne Lichtquelle benutzt und dadurch diese Nachteile vermeidet, ist in dem optoelektronischen System **500** der **Fig. 12A** dargestellt.

[0095] **Fig. 12A** enthält eine Quelle **110** für sichtbares Licht, einen Isolator **115**, ein faseroptisches Netz **420**, die ADM-Elektronik **530**, eine Fasereinkopplung **170**, einen Strahlteiler **145** und einen Positionsdetektor **150**. Die Quelle **110** für sichtbares Licht kann beispielsweise ein roter oder grüner Diodenlaser oder ein flächenemittierender Laser mit vertikalem Hohlraum (VCSEL) sein. Der Isolator kann ein Faraday-Entkoppler, ein Dämpfungsglied oder jede andere Vorrichtung sein, die imstande ist, die Menge an Licht ausreichend zu vermindern, die zurück in die Lichtquelle hinein gespeist wird. Das Licht vom Isolator **115** gelangt in das faseroptische Netz **420**, das in einer Ausführungsform das faseroptische Netz **420A** von **Fig. 8A** ist.

[0096] **Fig. 12B** zeigt eine Ausführungsform eines optoelektronischen Systems **400**, in dem eine einzige Wellenlänge Licht benutzt wird, aber bei dem die Modulation durch Mittel der elektrooptischen Modulation des Lichts und nicht durch die direkte Modulation einer Lichtquelle erzielt wird. Das elektrooptische System **400** enthält eine Quelle **110** für sichtbares Licht, einen Isolator **115**, einen elektrooptischen Modulator **410**, die ADM-Elektronik **475**, ein faseroptisches Netz **420**, eine Fasereinkopplung **170**, einen Strahlteiler **145** und einen Positionsdetektor **150**. Die Quelle **110** für sichtbares Licht **110** kann beispielsweise eine rote oder grüne Laserdiode sein. Das Laserlicht wird durch einen Isolator **115** geschickt, der beispielsweise ein Faraday-Entkoppler oder ein Dämpfungsglied sein kann. Der Isolator **115** kann an seinem Eingangsanschluss und seinem Ausgangsanschluss fasergekoppelt sein. Der Isolator **115** schickt das Licht zum elektrooptischen Modulator **410**, der das Licht mit einer ausgewählten Frequenz moduliert, die bis hoch zu 10 GHz oder noch höher liegen kann, falls gewünscht. Ein elektrisches Signal **476** von der ADM-Elektronik **475** dient als Treiber für die Modulation im elektrooptischen Modulator **410**. Das modulier-

te Licht vom elektrooptischen Modulator **410** gelangt zum faseroptischen Netz **420**, welches das faseroptische Netz **420A**, **420B**, **420C** oder **420D** sein kann, die weiter oben schon besprochen worden sind. Ein Teil des Lichts gelangt über den Lichtleiter **422** zum Referenzkanal der ADM-Elektronik **475**. Ein weiterer Teil des Lichts gelangt aus dem Tracker heraus, wird am Retroreflektor **90** reflektiert, gelangt zum Tracker zurück und erreicht den Strahlteiler **145**. Ein kleiner Anteil des Lichts wird vom Strahlteiler reflektiert und gelangt zum Positionsdetektor **150**, der schon unter Bezug auf **Fig. 6A–F** besprochen worden ist. Ein Teil des Lichts tritt durch den Strahlteiler **145** in die Fasereinkopplung **170**, durch das faseroptische Netz **420** in den Lichtleiter **424** und in den Messkanal der ADM-Elektronik **475**. Im Allgemeinen kann das System **500** von **Fig. 12A** für weniger Geld als das System **400** von

[0097] **Fig. 12B** gefertigt werden, jedoch kann der elektrooptische Modulator **410** imstande sein, eine höhere Modulationsfrequenz zu erzielen, was in einigen Situationen von Vorteil sein kann.

[0098] **Fig. 13** zeigt eine Ausführungsform eines Positionierkamerasystems **950** und eines optoelektronischen Systems **900**, in dem eine Orientierungskamera **910** mit der optoelektronischen Funktionalität eines 3D-Lasertrackers kombiniert ist, um sechs Freiheitsgrade zu messen. Das optoelektronische System **900** enthält eine Quelle **905** für sichtbares Licht, einen Isolator **910**, einen optoelektronischen Modulator **410**, die ADM-Elektronik **715**, ein faseroptisches Netz **420**, eine Fasereinkopplung **170**, einen Strahlteiler **145**, einen Positionsdetektor **150**, einen Strahlteiler **922** und eine Orientierungskamera **910**. Das Licht von der Quelle für sichtbares Licht wird in den Lichtleiter **980** emittiert und gelangt durch den Isolator **910**, der Lichtleiter aufweisen kann, die an die Eingangs- und Ausgangsanschlüsse angekoppelt sein können. Das Licht kann durch den elektrooptischen Modulator **410** treten, wo es durch ein elektrisches Signal **716** von der ADM-Elektronik **715** moduliert wird. Alternativ kann die ADM-Elektronik **715** ein elektrisches Signal über das Kabel **717** schicken, um die Quelle **905** für sichtbares Licht zu modulieren. Ein Teil des Lichts, das in das faseroptische Netz eintritt, gelangt durch den Faserlängenausgleicher **423** und den Lichtleiter **422**, um in den Referenzkanal der ADM-Elektronik **715** zu gelangen. Ein elektrisches Signal **469** kann wahlweise an das faseroptische Netz **420** angelegt werden, um ein Schaltsignal an den Lichtleiter-Schalter im faseroptischen Netz **420** anzulegen. Ein Teil des Lichts gelangt vom faseroptischen Netz zu der Fasereinkopplung **170**, die das Licht auf dem Lichtleiter in den freien Raum als Lichtstrahl **982** schickt. Ein kleiner Teil des Lichts wird am Strahlteiler **145** reflektiert und geht verloren. Ein Teil des Lichts tritt durch den Strahlteiler **145**, durch den Strahlteiler **922** und gelangt aus dem Tracker heraus zur 6-DOF-Vorrich-

tung **4000**. Diese 6-DOF-Vorrichtung **4000** kann eine Sonde, ein Scanner, ein Projektor, ein Sensor oder ein anderes Gerät sein.

[0099] Auf seinem Weg zurück gelangt das Licht von der 6-DOF-Vorrichtung **4000** in das optoelektronische System **900** und kommt am Strahlteiler **922** an. Ein Teil des Lichts wird vom Strahlteiler **922** reflektiert und tritt in die Orientierungskamera **910**. Die Orientierungskamera **910** erfasst die Positionen einiger Marken, die sich auf dem Retroreflektorziel befinden. Aus diesen Marken wird der Orientierungswinkel (d. h. drei Freiheitsgrade) der 6-DOF-Sonde gefunden. Die Prinzipien der Orientierungskamera werden nachfolgend in der vorliegenden Anmeldung und auch im Patent '758 beschrieben. Ein Teil des Lichts am Strahlteiler **145** tritt durch den Strahlteiler und wird durch die Fasereinkopplung **170** auf einen Lichtleiter gebracht. Das Licht gelangt zum faseroptischen Netz **420**. Ein Teil dieses Lichts gelangt zum Lichtleiter **424**, von dem aus es in den Messkanal der ADM-Elektronik **715** eintritt.

[0100] Das Positionierkamerasystem **950** enthält eine Kamera **960** und eine oder mehrere Lichtquellen **970**. Das Positionierkamerasystem ist auch in **Fig. 1** dargestellt, wo die Kameras die Elemente **52** und die Lichtquellen die Elemente **54** sind. Die Kamera enthält ein Linsensystem **962**, eine lichtempfindliche Anordnung **964** und einen Körper **966**. Eine Nutzenanwendung des Positionierkamerasystems **950** besteht darin, die Retroreflektorziele im Arbeitsvolumen zu orten. Dies erfolgt durch Aufblitzen der Lichtquelle **970**, was von der Kamera als heller Fleck auf der lichtempfindlichen Anordnung **964** aufgenommen wird. Eine zweite Nutzenanwendung des Positionierkamerasystems **950** besteht darin, eine grobe Orientierung der 6-DOF-Vorrichtung **4000** auf der Grundlage der beobachteten Stelle eines Reflektorflecks oder LED auf der 6-DOF-Vorrichtung zu liefern. Falls zwei oder mehr Positionierkamerasysteme auf dem Lasertracker zur Verfügung stehen, kann die Richtung zu jedem Retroreflektorziel im Arbeitsvolumen unter Anwendung der Prinzipien der Triangulierung berechnet werden. Falls eine einzelne Positionierkamera positioniert wird, um das längs der optischen Achse des Lasertracker reflektierte Licht aufzunehmen, dann kann die Richtung zu jedem Retroreflektorziel gefunden werden. Falls eine einzelne Kamera weg von der optischen Achse des Lasertracker positioniert wird, dann können angenäherte Richtungen zu den Retroreflektorzielen unmittelbar aus der Abbildung auf der lichtempfindlichen Anordnung erhalten werden. In diesem Fall kann eine genauere Richtung zu einem Ziel dadurch gefunden werden, dass man die mechanischen Achsen des Lasers in mehr als eine Richtung dreht und die Veränderung in der Lage des Flecks auf der lichtempfindlichen Anordnung beobachtet.

[0101] Fig. 14 zeigt eine Ausführungsform einer 6-DOF-Sonde **2000**, die in Verbindung mit einem optoelektronischen System **900** und einem Positionierkameranystem **950** benutzt wird. Das optoelektronische System **900** und das Positionierkameranystem **950** wurden mit Bezug auf Fig. 13 bereits besprochen. In einer anderen Ausführungsform ist das optoelektronische System **900** durch das optoelektronische System ersetzt, das zwei oder mehr als zwei Wellenlängen Licht aufweist. Die 6-DOF-Sonde **2000** enthält einen Körper **2014**, einen Retroreflektor **2010**, eine Sondenerweiterungsanordnung **2050**, ein wahlweise vorhandenes elektrisches Kabel **2046**, eine wahlweise vorhandene Batterie **2044**, ein Schnittstellenbauteil **2012**, ein Identifizierelement **2049**, Betätigungsknöpfe **2016**, eine Antenne **2048** und eine Elektronik-Leiterplatte **2042**. Der Retroreflektor kann ein Würfecken-Retroreflektor mit einem Hohlkern oder einem Glaskern sein. Der Retroreflektor kann auf eine Weise markiert sein, welche die Ermittlung der drei Orientierungsfreiheitsgrade der 6-DOF-Sonde **2000** durch die Orientierungskamera im optoelektronischen System **900** ermöglicht. Ein Beispiel für derartige Markierungen ist das Abdunkeln der Schnittlinien zwischen den drei planaren Reflektorflächen des Retroreflektors **2010**, wie das im Patent '758 diskutiert wird. Die Sondenerweiterungsvorrichtung **2050** enthält eine Sondenerweiterung **2052** und eine Sondenspitze **2054**. Die Sondenspitze wird mit dem zu prüfenden Objekt in Kontakt gebracht. Auch wenn die Sondenspitze **2054** vom Retroreflektor **2010** getrennt ist, ist es für einen 6-DOF-Lasertracker möglich, die drei Dimensionskoordinaten der Sondenspitze **2054** an einem Punkt zu ermitteln, der in der Sichtlinie des Lichtstrahls **784** vom Lasertracker verborgen ist. Deswegen wird eine 6-DOF-Sonde manchmal als Versteckpunkt-Sonde bezeichnet.

[0102] Die Elektroenergie kann über ein wahlweise vorhandenes elektrisches Kabel **2046** oder über eine wahlweise vorhandene Batterie **2044** bereit gestellt werden. Auf diese Weise wird der Elektronik-Leiterplatte **2042** elektrische Energie zugeführt. Die Elektronik-Leiterplatte **2042** liefert die Energie an die Antenne **2048**, die mit dem Lasertracker oder einem externen Computer kommunizieren kann, und an die Betätigungsknöpfe **2016**, die dem Nutzer eine bequeme Weise zur Kommunikation mit dem Lasertracker oder dem externen Computer bieten. Die Elektronik-Leiterplatte **2042** kann auch Energie an eine LED, einen (nicht dargestellten) Sensor für die Temperatur des Materials, einen (nicht dargestellten) Lufttemperatursensor, einen (nicht dargestellten) Trägheitssensor oder einen (nicht dargestellten) Neigungsmesser liefern. Das Schnittstellenbauteil **2012** kann beispielsweise eine Lichtquelle (wie beispielsweise eine LED), ein kleiner Retroreflektor, ein Gebiet mit reflektivem Material oder eine Bezugsmarke sein. Das Schnittstellenbauteil **2012** wird dazu benutzt, um die Grobausrichtung des Retroreflektors

2010 herzustellen, die bei den Berechnungen des 6-DOF-Winkels benötigt wird. Das Identifizierelement **2049** wird benutzt, um den Lasertracker mit Parametern oder einer Seriennummer für die 6-DOF-Sonde auszustatten. Das Identifizierelement kann beispielsweise ein Strich-Code oder ein Funkfrequenz-Kennungszeichen sein.

[0103] Alternativ kann der Lasertracker den Lichtstrahl **784** für einen Retroreflektor **2011** bereit stellen. Indem der Lichtstrahl **784** einem Retroreflektor aus einer Mehrzahl von Retroreflektoren bereit gestellt wird, kann die 6-DOF-Sonde über eine weitere Vielfalt von Richtungen ausgerichtet werden, während mit der Sondenerweiterungsvorrichtung **2050** gearbeitet wird.

[0104] Die sechs Freiheitsgrade, die durch den Lasertracker gemessen werden, können so betrachtet werden, als enthielten sie drei Translationsfreiheitsgrade und drei Orientierungsfreiheitsgrade. Die drei Translationsfreiheitsgrade können eine radiale Entfernungsmessung, eine erste Winkelmessung und eine zweite Winkelmessung enthalten. Die radiale Entfernungsmessung kann mit einem IFM oder einem ADM erfolgen. Die erste Winkelmessung kann mit einem Azimut-Winkelmessgerät wie beispielsweise einem Azimut-Winkelkodierer durchgeführt werden, und die zweite Winkelmessung kann mit einem Zenit-Winkelmessgerät vorgenommen werden. Als Alternative kann das erste Winkelmessgerät das Zenit-Winkelmessgerät sein, und das zweite Winkelmessgerät kann das Azimut-Winkelmessgerät sein. Die radiale Entfernung, die erste Winkelmessung und die zweite Winkelmessung bilden drei Koordinaten in einem Kugelkoordinatensystem, die in drei Koordinaten in einem Cartesischen Koordinatensystem oder einem anderen Koordinatensystem transformiert werden können.

[0105] Die drei Orientierungsfreiheitsgrade können unter Verwendung einer mit Muster versehenen Würfecke ermittelt werden, wie dies weiter oben und im Patent '758 beschrieben ist. Als Alternative können andere Methoden zur Bestimmung der drei Orientierungsfreiheitsgrade angewendet werden. Die drei Translationsfreiheitsgrade und die drei Orientierungsfreiheitsgrade legen die Position und die Orientierung der 6-DOF-Sonde **2000** im Raum völlig fest. Es ist wichtig anzumerken, dass dies der Fall ist für diejenigen Systeme, die hier betrachtet werden, weil es auch möglich ist, dass Systeme vorliegen, in denen die sechs Freiheitsgrade nicht unabhängig voneinander sind, so dass sechs Freiheitsgrade nicht ausreichend sind, um die Position einer Position und die Orientierung im Raum völlig zu bestimmen. Der Ausdruck „Translationssatz“ ist der Kurzbezug für drei Translationsfreiheitsgrade eines 6-DOF-Ausrüstungsteils (beispielsweise einer 6-DOF-Sonde) im Tracker-Bezugssystem (oder Geräte-Be-

zugsystem). Der Ausdruck „Orientierungssatz“ ist der Kurzbegriff für drei Orientierungsfreiheitsgrade eines 6-DOF-Ausrüstungsteils im Tracker-Bezugssystem. Der Ausdruck „Flächensatz“ ist der Kurzbegriff für die dreidimensionalen Koordinaten eines Punktes auf der Objektoberfläche in einem Geräte-Bezugssystem.

[0106] Fig. 15 zeigt eine Ausführungsform eines 6-DOF-Scanners **2500**, der in Verbindung mit einem optoelektronischen System **900** und einem Positionierkamerasystem **950** benutzt wird. Der 6-DOF-Scanner **2500** kann auch als „Ziel-Scanner“ bezeichnet werden. Das optoelektronische System **900** und das Positionierkamerasystem **950** wurden bereits mit Bezug auf Fig. 13 besprochen. In einer anderen Ausführungsform ist das optoelektronische System **900** durch das optoelektronische System ersetzt, bei dem zwei oder mehr als zwei Wellenlängen Licht benutzt werden. Der 6-DOF-Scanner **2500** enthält einen Körper **2514**, einen oder mehrere Retroreflektoren **2510**, **2511**, eine Scanner-Kamera **2530**, einen Scanner-Lichtprojektor **2520**, ein wahlweise vorhandenes elektrisches Kabel **2546**, eine wahlweise vorhandene Batterie **2544**, ein Schnittstellenbauteil **2512**, ein Identifizierelement **2549**, Betätigungsknöpfe **2516**, eine Antenne **2548** und eine Elektronik-Leiterplatte **2542**. Der Retroreflektor **2510**, das wahlweise vorhandene elektrische Kabel **2546**, die wahlweise vorhandene Batterie **2544**, das Schnittstellenbauteil **2512**, das Identifizierelement **2549**, die Betätigungsknöpfe **2516**, die Antenne **2548** und die Elektronik-Leiterplatte **2542** in Fig. 15 entsprechen dem Retroreflektor **2010**, dem wahlweise vorhandenen elektrischen Kabel **2046**, der wahlweise vorhandenen Batterie **2044**, dem Schnittstellenbauteil **2012**, dem Identifizierelement **2049**, den Betätigungsknöpfen **2016**, der Antenne **2048** bzw. der Elektronik-Leiterplatte **2042** in Fig. 14. Die Beschreibungen für diese einander entsprechenden Bauteile sind dieselben wie diejenigen mit Bezug auf Fig. 14. Der Scanner-Projektor **2520** und die Scanner-Kamera werden gemeinsam benutzt, um die drei Dimensionskoordinaten eines Werkstücks **2528** zu messen. Die Kamera **2530** enthält ein Kamera-Linsensystem **2532** und eine lichtempfindliche Anordnung **2534**. Die lichtempfindliche Anordnung **2534** kann beispielsweise eine CCD- oder eine CMOS-Anordnung sein. Der Scanner-Projektor **2520** enthält ein Projektor-Linsensystem **2523** und ein Quellen-Lichtmuster **2524**. Das Quellen-Lichtmuster kann einen Lichtpunkt, eine Lichtlinie oder ein (zweidimensionales) strukturiertes Lichtmuster aussenden. Falls die Scanner-Lichtquelle einen Lichtpunkt aussendet, kann der Punkt beispielsweise mit einem sich bewegenden Spiegel abgetastet werden, um eine Linie oder eine Anordnung von Linien zu erzeugen. Falls die Scanner-Lichtquelle eine Lichtlinie aussendet, kann diese Linie beispielsweise mit einem sich bewegenden Spiegel abgetastet werden, um eine Anordnung von Linien zu erhal-

ten. In einer Ausführungsform könnte das Quellen-Lichtmuster eine LED, ein Laser oder eine andere Lichtquelle sein, das von einer Mikrospiegelvorrichtung (DMD) wie beispielsweise einem digitalen Lichtprojektor (DLP) von Texas Instruments, einer Flüssigkristallvorrichtung (LCD) oder einer Flüssigkristall-Silicon-Vorrichtung (LCOS) reflektiert wird, oder es kann eine ähnliche Vorrichtung sein, die im Transmissionsmodus und weniger im Reflexionsmodus benutzt wird. Das Quellen-Lichtmuster könnte auch ein Objektträgermuster sein wie beispielsweise ein Objektträger vom Typ Chrom auf Glas, der ein einzelnes Muster oder ein Mehrfachmuster aufweist, wobei die Objektträger je nach Bedarf in ihre Position und wieder heraus gebracht werden. Zusätzliche Retroreflektoren wie beispielsweise Retroreflektor **2511** können zum ersten Retroreflektor **2510** zugefügt werden, um den Lasertracker in die Lage zu versetzen, den 6-DOF-Scanner von einer Vielfalt von Richtungen aus zu verfolgen, wodurch eine größere Flexibilität in den Richtungen entsteht, in die Licht vom 6-DOF-Projektor projiziert werden kann.

[0107] Der 6-DOF-Scanner **2500** kann mit der Hand gehalten werden oder beispielsweise an einem Dreifuß, einem Gerätestativ, einem motorgetriebenen Schlitten oder einem Roboter-Endeffektor montiert werden. Die drei Dimensionskoordinaten des Werkstücks **2528** werden mit der Scanner-Kamera **2530** unter Anwendung der Prinzipien der Triangulierung gemessen. Es gibt mehrere Wege, die Messungen der Triangulierung auszuführen, was vom Muster des von der Scanner-Lichtquelle **2520** ausgesendeten Lichts und vom Typ der lichtempfindlichen Anordnung **2534** abhängt. Wenn zum Beispiel das Muster des von der Scanner-Lichtquelle **2520** ausgesendeten Lichts eine Lichtlinie oder ein in die Gestalt einer Linie gescannter Lichtpunkt ist und wenn die lichtempfindliche Anordnung **2534** eine zweidimensionale Anordnung ist, dann entspricht eine Dimension der zweidimensionalen Anordnung **2534** einer Richtung eines Punktes **2526** auf der Oberfläche des Werkstücks **2528**. Die andere Dimension der zweidimensionalen Anordnung **2534** entspricht der Entfernung des Punktes **2526** von der Scanner-Lichtquelle **2520**. Somit sind die drei Dimensionskoordinaten eines jeden Punktes **2526** längs der von der Scanner-Lichtquelle **2520** ausgesendeten Lichtlinie relativ zum örtlichen Bezugssystem des 6-DOF-Scanners **2500** bekannt. Die sechs Freiheitsgrade des 6-DOF-Scanners sind durch den 6-DOF-Lasertracker unter Anwendung der im Patent '758 beschriebenen Verfahren bekannt. Von den sechs Freiheitsgraden können die drei Dimensionskoordinaten der abgetasteten Lichtlinie im Tracker-Bezugssystem gefunden werden, das wiederum in das Bezugssystem des Werkstücks **2528** beispielsweise durch die Messung von drei Punkten auf dem Werkstück durch den Lasertracker umgewandelt werden kann.

[0108] Falls der 6-DOF-Scanner **2500** mit der Hand gehalten wird, kann eine Linie des von der Scanner-Lichtquelle **2520** ausgesendeten Laserlichts dergestalt bewegt werden, dass die Oberfläche des Werkstückes **2528** „bemalt“ wird, wodurch die drei Dimensionskoordinaten der gesamten Oberfläche erhalten werden. Es ist auch möglich, die Oberfläche eines Werkstückes unter Verwendung einer Scanner-Lichtquelle **2500** zu „bemalen“, die ein strukturiertes Lichtmuster aussendet, und genauere Messungen können durchgeführt werden, wenn man den 6-DOF-Scanner auf einen Dreifuß oder ein Gerüstativ montiert. Das von der Scanner-Lichtquelle **2500** ausgesendete strukturierte Lichtmuster könnte beispielsweise ein Muster von Streifen aufweisen, wobei jeder Streifen eine Bestrahlungsstärke aufweist, die sich sinusförmig über die Oberfläche des Werkstückes **2528** erstreckt. In einer Ausführungsform sind die Sinuskurven durch drei oder mehr als drei Phasenwerte verschoben. Der von jedem Bildpunkt der Kamera **2530** erfasste Amplitudenwert für jeden der drei oder mehr als drei Phasenwerte wird dazu benutzt, um die Position eines jeden Bildpunktes auf der Sinuskurve zu liefern. Diese Informationen werden als Hilfe bei der Ermittlung der drei Dimensionskoordinaten eines jeden Punktes **2526** benutzt. In einer anderen Ausführungsform kann das strukturierte Licht in Form eines kodierten Musters vorliegen, das ausgewertet werden kann, um die dreidimensionalen Koordinaten auf der Grundlage eines einzelnen Bildsystems an Stelle von mehreren, die von der Kamera **2530** aufgenommen werden, zu ermitteln. Die Verwendung eines kodierten Musters kann relativ genaue Messungen ermöglichen, während der 6-DOF-Scanner **2500** mit der Hand mit einer angemessenen Geschwindigkeit bewegt wird.

[0109] Das Projizieren eines strukturierten Lichtmusters hat gegenüber dem einer Lichtlinie einige Vorteile. Bei einer Lichtlinie, die von einem in der Hand gehaltenen 6-DOF-Scanner **2500** projiziert wird, kann die Dichte der Punkte längs der Linie hoch sein, aber zwischen den Linien ist sie viel niedriger. Bei einem strukturierten Lichtmuster ist die Entfernung der Punkte üblicherweise ungefähr dieselbe in jeder der zwei zueinander orthogonalen Richtungen. Zusätzlich können bei einigen Betriebsmodi die dreidimensionalen Punkte, die mit einem strukturierten Lichtmuster berechnet werden, genauer sein als mit anderen Verfahren. Zum Beispiel kann durch das Befestigen des 6-DOF-Scanners **2500** an Ort und Stelle, beispielsweise durch das Anbringen an einer stationären Stütze oder einem Ständer, eine Folge von strukturierten Lichtmustern ausgesendet werden, wodurch eine genauere Berechnung ermöglicht wird, als dies mit anderen Verfahren möglich wäre, bei denen ein einzelnes Muster aufgenommen wurde (z. B. Einzelbildverfahren). Ein Beispiel für eine Folge von strukturierten Lichtmustern ist ein solches, bei dem ein Muster mit einer ersten Raumfrequenz

auf das Objekt projiziert wird. In einer Ausführungsform ist das projizierte Muster ein Muster von Streifen, die sich in ihrer optischen Leistung sinusförmig verändern. In einer Ausführungsform ist die Phase des sich sinusförmig verändernden Musters verschoben, wodurch bewirkt wird, dass die Streifen zur Seite verschoben werden. Zum Beispiel kann das Muster so ausgeführt werden, dass es mit drei Phasenwinkeln projiziert wird, von denen jeder um 120 Grad gegenüber dem vorangehenden Muster verschoben ist. Diese Folge von Projektionen liefert genügend Informationen, um eine relativ genaue Ermittlung der Phase eines jeden Punktes des Musters unabhängig von der Hintergrundbeleuchtung zu ermöglichen. Dies kann erfolgen auf der Grundlage eines Punkt-für-Punkt-Vorgehens ohne Rücksicht auf benachbarte Punkte auf der Objektoberfläche.

[0110] Auch wenn mit dem obigen Verfahren eine Phase für jeden Punkt mit Phasen, die sich von 0 bis 360 Grad zwischen zwei benachbarten Linien erstrecken, ermittelt wird, so bleibt doch die Frage, welche Linie welche ist. Ein Weg, die Linien zu identifizieren, besteht darin, die Folge der Phasen zu wiederholen, wie das weiter oben beschrieben ist, aber unter Verwendung eines sinusförmigen Musters mit einer anderen Raumfrequenz (d. h. eines anderen Streifenabstandes). In einigen Fällen muss dieselbe Vorgehensweise für drei oder vier unterschiedliche Streifenabstände wiederholt werden. Das Verfahren zur Beseitigung von Mehrdeutigkeiten unter Anwendung dieser Methode ist auf dem Fachgebiet bekannt und bedarf hier keiner weiteren Erörterung.

[0111] Um unter Anwendung eines Verfahrens der sequentiellen Projektion – wie beispielsweise des oben beschriebenen Verfahrens der sinusförmigen Phasenverschiebung – die höchstmögliche Genauigkeit zu erzielen, kann es von Vorteil sein, die Bewegung des 6-DOF-Scanners auf ein Mindestmaß herabzusetzen. Auch wenn die Position und die Orientierung des 6-DOF-Scanners aus den mit dem Lasertracker durchgeführten 6-DOF-Messungen bekannt sind und auch wenn Korrekturen für die Bewegungen eines in der Hand gehaltenen 6-DOF-Scanners durchgeführt werden können, wird das sich ergebende Rauschen doch etwas höher liegen, als dies der Fall wäre, wenn der Scanner durch Anbringen an einem stationären Ständer, einer Stütze oder Halterung stationär gehalten würde.

[0112] Die in Fig. 15 dargestellten Scanning-Verfahren beruhen auf dem Prinzip der Triangulierung. Eine vollständigere Erläuterung der Prinzipien der Triangulierung wird mit Bezug auf das System **2560** der Fig. 15A und das System **4760** der Fig. 15B dargeboten. Zunächst soll auf Fig. 15A Bezug genommen werden. Hier enthält das System **2560** einen Projektor **2562** und eine Kamera **2564**. Der Projektor **2562** enthält ein Quellen-Lichtmuster **2570**, das auf einer

Quellebene liegt, und ein Projektorobjektiv **2572**. Das Projektorobjektiv kann mehrere Linsenelemente enthalten. Das Projektorobjektiv weist ein Objektiv-Perspektivitätszentrum **2575** und eine optische Achse **2576** des Projektors auf. Der Lichtstrahl **2573** gelangt von einem Punkt **2571** auf dem Quellen-Lichtmuster durch das Objektiv-Perspektivitätszentrum auf das Objekt **2590**, auf das er im Punkt **2574** trifft.

[0113] Die Kamera **2564** enthält ein Kameraobjektiv **2582** und eine lichtempfindliche Anordnung **2580**. Das Kameraobjektiv **2582** weist ein Objektiv-Perspektivitätszentrum **2585** und eine optische Achse **2586** auf. Ein Lichtstrahl **2583** läuft vom Objektpunkt **2574** durch das Kamera-Perspektivitätszentrum **2585** und trifft auf die lichtempfindliche Anordnung **2580** im Punkt **2581**.

[0114] Das Liniensegment, das die Perspektivitätszentren verbindet, ist die Grundlinie **2588** in **Fig. 15A** und die Grundlinie **4788** in **Fig. 15B**. Die Länge der Grundlinie wird Grundlinienlänge (**2592**, **4792**) genannt. Der Winkel zwischen der optischen Achse des Projektors und der Grundlinie ist der Grundlinie-Projektor-Winkel (**2594**, **4794**). Der Winkel zwischen der optischen Achse der Kamera (**2583**, **4786**) und der Grundlinie ist der Grundlinie-Kamera-Winkel (**2596**, **4796**). Falls von einem Punkt auf dem Quellen-Lichtmuster (**2570**, **4771**) bekannt ist, dass er einem Punkt auf der lichtempfindlichen Anordnung (**2581**, **4781**) entspricht, ist es möglich, die Grundlinienlänge, den Grundlinie-Projektor-Winkel und den Grundlinie-Kamera-Winkel zu benutzen, um die Seiten des Dreiecks zu ermitteln, das die Punkte **2585**, **2574** und **2575** verbindet, und hieraus die Flächenkoordinaten von Punkten auf der Objektoberfläche **2590** in Bezug zum Bezugssystem des Messsystems **2560** zu ermitteln. Um dies auszuführen, werden die Winkel der Seiten des kleinen Dreiecks zwischen dem Projektorobjektiv **2572** und dem Quellen-Lichtmuster **2570** ermittelt, wozu die bekannte Entfernung zwischen dem Objektiv **2572** und der Ebene **2570** und die Entfernung zwischen dem Punkt **2571** und der Schnittlinie der optischen Achse **2576** mit der Ebene **2570** benutzt werden. Diese kleinen Winkel werden zu den größeren Winkeln **2596** und **2594** addiert oder von diesen abgezogen, je nachdem, wie dies geeignet ist, um die gewünschten Winkel des Dreiecks zu erhalten. Einer Person mit durchschnittlichen Fertigkeiten auf dem Fachgebiet ist es klar, dass äquivalente mathematische Verfahren benutzt werden können, um die Längen der Seiten des Dreiecks **2574–2585–2575** zu finden, oder dass andere dazu in Bezug stehende Dreiecke benutzt werden können, um die gewünschten Koordinaten der Objektoberfläche **2590** zu erhalten.

[0115] Es soll nun zuerst auf **Fig. 15B** Bezug genommen werden. Hier ist das System **4760** ähnlich dem System **2560** der **Fig. 15A**, jedoch mit der Aus-

nahme, dass das System **4760** kein Objektiv enthält. Das System kann einen Projektor **4762** und eine Kamera **4764** enthalten. In der in **Fig. 15B** veranschaulichten Ausführungsform enthält der Projektor eine Lichtquelle **4778** und einen Lichtmodulator **4770**. Die Lichtquelle **4778** kann eine Laserlichtquelle sein; da eine solche Lichtquelle über eine lange Entfernung im Brennpunkt bleiben kann, wenn die Geometrie von **Fig. 15B** angewendet wird. Ein Lichtstrahl **4773** von der Lichtquelle **4778** fällt auf den optischen Modulator **4770** am Punkt **4771**. Andere Lichtstrahlen von der Lichtquelle **4778** treffen auf den optischen Modulator an anderen Stelle auf der Modulatoroberfläche. In einer Ausführungsform verändert der optische Modulator **4770** die Leistung des emittierten Lichts, in den meisten Fälle durch das Verringern der optischen Leistung um einem Grad. Auf diese Weise prägt der optische Modulator dem Licht ein optisches Muster auf, was hier als Quellen-Lichtmuster bezeichnet werden soll, das an der Oberfläche des optischen Modulators **4770** anliegt. Der optische Modulator **4770** kann beispielsweise ein DLP- oder ein LCOS-Gerät sein. In einigen Ausführungsformen ist der Modulator **4770** eher transmittierend als reflektierend. Das aus dem optischen Modulator **4770** austretende Licht erscheint, als trete es aus dem virtuellen Licht-Perspektivitätszentrum **4775** aus. Der Lichtstrahl erscheint, als trete er aus dem virtuellen Licht-Perspektivitätszentrum **4775** aus, durchlaufe den Punkt **4771** und gelange zum Punkt **4774** auf der Objektoberfläche **4790**.

[0116] Die Grundlinie ist das Liniensegment, das sich vom Kameraobjektiv-Perspektivitätszentrum **4785** zum virtuellen Licht-Perspektivitätszentrum **4775** erstreckt. Im Allgemeinen beinhaltet die Triangulierung das Ermitteln der Längen der Seiten eines Dreiecks zum Beispiel des Dreiecks mit den Scheitelpunkten **4774**, **4785** und **4775**. Ein Weg hierzu besteht darin, die Länge der Grundlinie, den Winkel zwischen der Grundlinie und der optischen Achse **4786** der Kamera und den Winkel zwischen der Grundlinie und der Bezugsachse **4776** des Projektors zu finden. Um den gewünschten Winkel zu finden, werden zusätzliche kleinere Winkel ermittelt. Zum Beispiel kann der kleine Winkel zwischen der optischen Achse **4786** der Kamera und dem Strahl **4783** dadurch gefunden werden, dass man nach dem Winkel des kleinen Dreiecks zwischen dem Kameraobjektiv **4782** und der lichtempfindlichen Anordnung **4780** auf der Grundlage der Entfernung vom Objektiv zur lichtempfindlichen Anordnung und der Entfernung des Bildpunktes von der optischen Achse der Kamera auflöst. Der Winkel des kleinen Dreiecks wird dann zum Winkel zwischen der Grundlinie und der optischen Achse der Kamera addiert, um den gewünschten Winkel zu finden. Ähnlich ist es für den Projektor. Der Winkel zwischen der Projektor-Bezugsachse **4776** und dem Strahl **4773** kann gefunden werden, indem man nach dem Winkel des kleinen Dreiecks

zwischen diesen beiden Linien auf der Grundlage der bekannten Entfernung der Lichtquelle **4777** und der Oberfläche der optischen Modulation und der Entfernung des Projektor-Bildpunktes **4771** vom Schnitt der Bezugsachse **4776** mit der Oberfläche des optischen Modulators **4770** auflöst. Dieser Winkel wird von dem Winkel zwischen der Grundlinie und der Projektor-Bezugsachse subtrahiert, um den gewünschten Winkel zu erhalten.

[0117] Die Kamera **4764** enthält ein Kameraobjektiv **4782** und eine lichtempfindliche Anordnung **4780**. Das Kameraobjektiv **4782** hat ein Kameraobjektiv-Perspektivitätszentrum **4785** und eine optische Kameraachse **4786**. Die optische Kameraachse ist ein Beispiel für eine Kamera-Bezugsachse. Vom mathematischen Gesichtspunkt aus kann jede Achse, die durch das Kameraobjektiv-Perspektivitätszentrum führt, in gleichem Maße auf einfache Weise bei den Berechnungen der Triangulierung benutzt werden, aber üblicherweise wird die optische Achse der Kamera ausgewählt, die eine Symmetrieachse für das Objektiv ist. Ein Lichtstrahl **4783** wandert vom Objektpunkt **4774** durch das Kameraobjektiv-Perspektivitätszentrum **4785** und fällt auf die lichtempfindliche Anordnung **4780** im Punkt **4781**. Es können andere äquivalente mathematische Verfahren benutzt werden, um die Längen der Seiten eines Dreiecks **4774–4785–4775** herauszufinden, wie einer Person mit durchschnittlichen Fertigkeiten auf dem Fachgebiet klar ist.

[0118] Auch wenn das hier beschriebene Verfahren der Triangulierung allgemein bekannt ist, sollen hier der Vollständigkeit halber einige zusätzliche Informationen gegeben werden. Jedes Linsensystem weist eine Eintrittsöffnung und eine Austrittsöffnung auf. Die Eintrittsöffnung ist der Punkt, von dem das Licht erscheint, als trete es dort aus, wenn dies vom Gesichtspunkt der Optik erster Ordnung aus betrachtet wird. Die Austrittsöffnung ist derjenige Punkt, an dem das Licht bei seinem Austritt auf seinem Weg vom Linsensystem zur lichtempfindlichen Anordnung in Erscheinung tritt. Für ein Mehrfach-Linsensystem fallen die Eintrittsöffnung und die Austrittsöffnung nicht notwendigerweise zusammen, und die Winkel der Strahlen in Bezug auf die Eintrittsöffnung und die Austrittsöffnung sind nicht unbedingt dieselben. Jedoch kann das Modell vereinfacht werden, indem man das Perspektivitätszentrum als die Eintrittsöffnung des Objektivs betrachtet und dann die Entfernung vom Objektiv zur Quell- oder Bildebene einstellt, so dass die Strahlen weiterhin längs gerader Linien laufen, um auf die Quell- oder Bildebene zu treffen. Auf diese Weise wird das einfache und breite Anwendung findende Modell erhalten, das in **Fig. 15A** dargestellt ist. Dies sollte so verstanden werden, dass diese Beschreibung für das Verhalten des Lichts in erster Ordnung eine gute Annäherung liefert und dass zusätzliche Feinkorrekturen zur Berücksichti-

gung von Linsenaberrationen vorgenommen werden können, die bewirken können, dass die Strahlen gegenüber den Positionen leicht verschoben sein können, die unter Anwendung des Modells von **Fig. 15A** berechnet werden. Auch wenn die Grundlinienlänge, der Grundlinie-Projektor-Winkel und der Grundlinie-Kamera-Winkel ganz allgemein verwendet werden, so sollte dies so verstanden werden, dass durch die Aussage, dass diese Größen erforderlich sind, die Möglichkeit nicht ausgeschlossen wird, dass andere ähnliche, aber doch geringfügig abweichende Formulierungen zur Anwendung gelangen können, ohne dass ein Verlust an Allgemeingültigkeit der hier gegebenen Beschreibung eintritt.

[0119] Bei der Benutzung eines 6-DOF-Scanners können mehrere Typen von Scan-Mustern benutzt werden, und es kann vorteilhaft sein, verschiedene Typen zu kombinieren, um die größte Leistungsfähigkeit in der kürzesten Zeit zu erhalten. Zum Beispiel wird in einer Ausführungsform bei einer schnellen Messmethode ein zweidimensionales kodiertes Muster benutzt, in dem dreidimensionale Koordinatendaten mit einer Einzelaufnahme erhalten werden können. Bei einem Verfahren, bei dem kodierte Muster angewendet werden, können beispielsweise unterschiedliche Zeichen, unterschiedliche Gestalten, unterschiedliche Dicken oder Größen oder unterschiedliche Farben benutzt werden, um Elemente zu liefern, die sich unterscheiden, die auch als kodierte Elemente oder kodierte Merkmale bekannt sind. Derartige Merkmale können benutzt werden, um das Angleichen des Punktes **2571** an den Punkt **2581** zu ermöglichen. Ein kodierte Merkmal auf dem Quellen-Lichtmuster **2570** kann auf der lichtempfindlichen Anordnung **2580** identifiziert werden.

[0120] Eine Technik, die dazu benutzt werden kann, um das Angleichen von kodierten Merkmalen zu vereinfachen, ist die Anwendung von epipolaren Linien. Epipolare Linien sind mathematische Linien, die durch den Schnitt von epipolaren Flächen mit der Quellebene **2570** oder der Bildebene **2580** gebildet werden. Eine epipolare Ebene ist eine beliebige Ebene, die durch das Projektor-Perspektivitätszentrum und das Kamera-Perspektivitätszentrum führt. Die epipolaren Linien auf der Quellebene und der Bildebene können in einigen speziellen Fällen parallel sein, aber im Allgemeinen sind sie nicht parallel. Ein Aspekt der epipolaren Linien besteht darin, dass eine gegebene epipolare Linie auf der Projektorebene eine entsprechende epipolare Linie auf der Bildebene hat. Daher kann jedes beliebige Muster, das auf einer epipolaren Linie in der Projektorebene bekannt ist, in der Bildebene unmittelbar beobachtet und ausgewertet werden. Falls zum Beispiel ein kodierte Muster längs einer epipolaren Linie in der Projektorebene positioniert wird, können die Abstände zwischen den kodierten Elementen in der Bildebene unter Verwendung der Werte, die durch Bildpunkte der licht-

empfindlichen Anordnung **2580** wiedergegeben werden, ermittelt werden, und diese Informationen können benutzt werden, um die dreidimensionalen Koordinaten des Objektpunktes **2574** zu ermitteln. Es ist auch möglich, kodierte Muster unter einem bekannten Winkel mit einer epipolaren Linie zu kippen und auf effiziente Weise die Koordinaten der Objektoberfläche zu erhalten.

[0121] Ein Vorteil der Verwendung von kodierten Mustern besteht darin, dass die dreidimensionalen Koordinaten für Punkte der Objektoberfläche schnell erhalten werden können. Jedoch wird in den meisten Fällen eine Herangehensweise mit sequentiell strukturiertem Licht wie beispielsweise mit der weiter oben diskutierten Methode der sinusförmigen Phasenverschiebung genauere Ergebnisse liefern. Daher kann der Nutzer vorteilhafterweise die Wahl haben, bestimmte Objekte oder bestimmte Objektbereiche oder Merkmale unter Anwendung von unterschiedlichen Projektionsmethoden je nach der gewünschten Genauigkeit zu messen. Durch Verwendung eines programmierbaren Quellen-Lichtmusters wird ein derartiges Auswählen leicht gemacht.

[0122] Für bestimmte Typen von Objekten kann eine beträchtliche Einschränkung in der Genauigkeit von Scannern vorliegen. Zum Beispiel können manche Merkmale wie Löcher oder Vertiefungen schwierig zu scannen sein. Es kann schwierig sein, die Kanten von Objekten oder Löchern so glatt zu erhalten, wie das erwünscht ist. Einige Typen von Materialien können nicht so viel Licht zurück werfen, wie dies erwünscht ist, oder sie können eine große Eindringtiefe für das Licht aufweisen. In anderen Fällen kann das Licht an mehr als einer Oberfläche reflektiert werden (Mehrwege-Interferenz), bevor es zum Scanner zurück kommt, so dass das beobachtete Licht ‚ungewollt verfälscht‘ ist, was zu Messfehlern führt. In jedem dieser Fälle kann es vorteilhaft sein, die schwierigen Regionen unter Verwendung eines 6-DOF-Scanners **2505** zu messen, der in **Fig. 15C** dargestellt ist und der eine Tastsonde wie beispielsweise die Sondenspitze **2554** enthält, die Teil der Sonden-erweiterungsanordnung **2550** ist. Nachdem festgestellt worden ist, dass es von Vorteil ist, mit einer Tastsonde zu messen, kann der Projektor **2520** einen Laserstrahl aussenden, um den zu messenden Bereich zu bestrahlen. In **Fig. 15C** bestrahlt ein projizierter Lichtstrahl **2522** einen Punkt **2527** auf einem Objekt **2528** und bringt zur Anzeige, dass dieser Punkt mit der Sonden-erweiterungsanordnung **2550** zu messen ist. In einigen Fällen kann die Tastsonde außerhalb des Projektionsfeldes des Projektors **2550** bewegt werden, so dass vermieden wird, den Messbereich des Scanners zu verkleinern. In diesem Fall kann der Strahl **2522** vom Projektor einen Bereich bestrahlen, den die Bedienperson im Blick haben kann. Die Bedienperson kann dann die Tastsonde **2550** an Ort und Stelle bewegen, um das vorgeschriebene Gebiet

zu messen. In anderen Fällen kann das zu messende Gebiet außerhalb des Projektionsbereichs des Scanners liegen. In diesem Fall kann der Scanner den Strahl **2522** in dem Ausmaß, wie es sein Bereich zulässt, in die zu messende Richtung lenken oder kann den Strahl **2522** in einem Muster bewegen, das die Richtung angibt, in die der Strahl gelenkt werden soll. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, ein CAD-Modell oder gesammelte Daten auf einem Anzeigemonitor darzustellen und dann auf der Anzeigevorrichtung jene Bereiche des CAD-Modells oder der gesammelten Daten hervorzuheben, die wiederholt gemessen werden sollten. Es ist auch möglich, die hervorgehobenen Bereiche unter Verwendung anderer Werkzeuge wie beispielsweise eines sphärisch montierten Retroreflektors oder einer 6-DOF-Sonde mit Hilfe der Steuerung eines Lasertracker zu messen.

[0123] Der Projektor **2520** kann ein zweidimensionales Lichtmuster projizieren, das manchmal strukturiertes Licht genannt wird. Solches Licht tritt aus dem Perspektivitätszentrum des Projektorobjektivs aus und läuft in einem sich erweiternden Muster nach außen, bis es auf das Objekt **2528** trifft. Beispiele für diesen Typ von Muster sind das kodierte Muster und das periodische Muster, die beide weiter oben besprochen worden sind. Der Projektor **2520** kann als Alternative ein eindimensionales Lichtmuster projizieren. Derartige Projektoren werden manchmal als Laser-Liniensonden oder Laser-Linienscanner bezeichnet. Auch wenn die mit diesem Typ von Scanner projizierte Linie eine Breite und eine Gestalt aufweist (zum Beispiel kann es im Schnitt das Gausssche Strahlprofil sein), so sind doch die Informationen, die sie enthält, für die Belange der Ermittlung der Gestalt eines Objekts eindimensional. So trifft eine von einem Laser-Linienscanner ausgesendete Linie in einer linearen Projektion auf ein Objekt. Die beleuchtete Gestalt, die auf dem Objekt verfolgt wird, ist zweidimensional. Dagegen erzeugt ein Projektor, der ein zweidimensionales Lichtmuster projiziert, eine beleuchtete Gestalt auf dem Objekt, die dreidimensional ist. Ein Weg, zwischen dem Laser-Linienscanner und dem Strukturlichtscanner einen Unterschied zu machen, besteht darin, dass der Strukturlichtscanner als ein Typ von Scanner festgelegt wird, der mindestens drei nicht-kollineare Musterelemente enthält. Für den Fall eines zweidimensionalen Musters, das ein kodierte Lichtmuster projiziert, sind die drei nicht-kollinearen Musterelemente auf Grund ihrer Codes erkennbar, und da sie in zwei Dimensionen projiziert werden, müssen die mindestens drei Musterelemente nicht-kollinear sein. Für den Fall des periodischen Musters wie beispielsweise des sich sinusförmig wiederholenden Musters stellt jede Sinusperiode eine Mehrzahl von Musterelementen dar. Da eine Vielfalt von periodischen Mustern in zwei Dimensionen vorliegt, müssen die Musterelemente nicht-kollinear sein. Dagegen liegen für den Fall des Laser-Linienscanners, der eine Lichtlinie aussendet, alle Musterelemente auf ei-

ner geraden Linie. Auch wenn die Linie eine Breite aufweist und der Schweif des Linienschnitts eine geringere optische Leistung aufweisen mag als der Spitzenwert des Signals, werden diese Aspekte der Linie beim Ermitteln der Oberflächenkoordinaten eines Objekts nicht gesondert ausgewertet und stellen daher keine gesonderten Musterelemente dar. Auch wenn die Linie mehrfache Musterelemente enthalten mag, sind diese Elemente kollinear.

[0124] Ein Verfahren zur Berechnung der drei Dimensionskoordinaten einer Objektoberfläche soll nun mit Bezug auf **Fig. 15D** vorgestellt werden. Das Linienscannersystem **4500** enthält einen Projektor **4520** und eine Kamera **4522**. Der Projektor **4520** enthält ein Quellen-Lichtmuster **4521** und ein Projektorobjektiv **4522**. Das Quellen-Lichtmuster enthält ein beleuchtetes Muster in Form einer Linie. Das Projektorobjektiv enthält ein Projektor-Perspektivitätszentrum und eine optische Projektorachse, die durch das Projektor-Perspektivitätszentrum führt. In dem Beispiel von **Fig. 15D** wird ein zentraler Strahl des Lichtstrahls **4524** mit der perspektivischen optischen Achse des Projektors ausgerichtet. Die Kamera **4540** enthält ein Kameraobjektiv und eine lichtempfindliche Anordnung **4541**. Das Objektiv weist eine optische Kameraachse **4543** auf, die durch das Kameraobjektiv-Perspektivitätszentrum **4544** führt. In dem exemplarischen System **4500** verlaufen die optische Achse des Projektors, die zum Lichtstrahl **4524** ausgerichtet ist, und die optische Achse **4544** des Kameraobjektivs rechtwinklig zur Lichtlinie **4526**, die vom Quellen-Lichtmuster **4521** projiziert wird. Mit anderen Worten, die Linie **4526** liegt in der Richtung rechtwinklig zur Zeichnungsebene von **Fig. 15D**. Die Linie trifft auf eine Objektoberfläche, die in einer ersten Entfernung vom Projektor die Objektoberfläche **4510A** ist und in einer zweiten Entfernung vom Projektor die Objektoberfläche **4520A** ist. Das ist so zu verstehen, dass bei unterschiedlichen Höhen über oder unter der Zeichnungsebene von **Fig. 15D** die Objektoberfläche sich in einer anderen Entfernung vom Projektor befinden kann als die Entfernung entweder zur Objektoberfläche **4520A** oder **4520B**. Für einen Punkt auf der Lichtlinie **4526**, der auch in der Zeichnungsebene von **Fig. 15D** liegt, trifft die Lichtlinie auf die Oberfläche **4520** im Punkt **4526** und trifft auf die Oberfläche **4520B** im Punkt **4527**. Für den Fall des Schnittpunktes **4526** tritt ein Lichtstrahl vom Punkt **4526** durch das Kameraobjektiv-Perspektivitätszentrum **4544**, um auf die lichtempfindliche Anordnung **4541** im Bildpunkt **4546** zu treffen. Für den Fall des Schnittpunktes **4527** läuft ein Lichtstrahl vom Punkt **4527** durch das Kameraobjektiv-Perspektivitätszentrum, um auf die lichtempfindliche Anordnung **4541** im Bildpunkt **4547** zu treffen. Indem die Position des Schnittpunktes relativ zur Position der optischen Achse **4544** des Kameraobjektivs vermerkt wird, kann die Entfernung vom Projektor (und der Kamera) zur Objektoberfläche ermittelt werden. Die Ent-

fernung vom Projektor zu anderen Punkten auf der Lichtlinie **4526**, d. h. solchen Punkten auf der Lichtlinie, die nicht in der Zeichnungsebene der **Fig. 15D** liegen, kann auf ähnliche Weise gefunden werden. Im üblichen Fall wird das Muster auf der lichtempfindlichen Anordnung eine Lichtlinie (im Allgemeinen keine gerade Linie) sein, wo jeder Punkt auf der Linie einer abweichenden Position rechtwinklig zur Zeichnungsebene entspricht und die Position rechtwinklig zur Zeichnungsebene die Information über die Entfernung vom Projektor zur Kamera enthält. Durch Auswertung des Musters der Linie im Bild der lichtempfindlichen Anordnung können folglich die dreidimensionalen Koordinaten der Objektoberfläche längs der projizierten Linie gefunden werden. Es ist zu beachten, dass die Information, die in dem Bild auf der lichtempfindlichen Anordnung für den Fall eines Linienscanners in einer (im Allgemeinen nicht geraden) Linie enthalten ist. Dagegen enthalten die Informationen, die in dem zweidimensionalen Projektionsmuster des strukturierten Lichts enthalten sind, Informationen über beide Dimensionen des Bildes in der lichtempfindlichen Anordnung hinweg.

[0125] Es soll angemerkt werden, dass, auch wenn die oben vorgenommenen Beschreibungen einen Unterschied machen zwischen Linienscannern und Flächenscannern (Strukturlichtscannern), der darauf beruht, ob drei oder mehr als drei Musterelemente kollinear sind, die Absicht dieses Kriteriums darin besteht, dass zwischen Mustern unterschieden wird, die als Flächen und als Linien projiziert werden. Folglich sind Muster, die auf eine lineare Weise projiziert werden und Informationen nur längs eines einzelnen Weges enthalten, noch immer Linienmuster, selbst wenn das eindimensionale Muster gekrümmt sein mag.

[0126] Ein wichtiger Vorteil, den ein Linienscanner gegenüber einem Strukturlichtscanner aufweisen kann, besteht in seiner größeren Fähigkeit, die Mehrwegeinterferenz aufzudecken. In einem gewöhnlichen (gewünschten) Fall kann jeder Lichtstrahl, der aus dem Projektor austritt und auf die Objektoberfläche trifft, betrachtet werden, als werde er generell in einer Richtung vom Objekt weg reflektiert. Für den gewöhnlichen Fall hat die Oberfläche des Objekts kein hohes Reflexionsvermögen (d. h. keine spiegelähnliche Oberfläche), so dass der größte Teil des Lichts auf diffuse Weise reflektiert (gestreut) wird und nicht wie mit einem Spiegel reflektiert wird. Das diffuse reflektierte Licht bewegt sich nicht insgesamt in eine einzelne Richtung, wie das im Fall einer spiegelähnlichen Oberfläche der Fall wäre, sondern wird vielmehr in einem Muster gestreut. Die allgemeine Richtung des gestreuten Lichts kann jedoch auf dieselbe Weise gefunden werden wie bei der Reflexion von Licht an einer spiegelähnlichen Oberfläche. Diese Richtung kann dadurch gefunden werden, dass man eine Normale zur Oberfläche des Objekts am Auftreffpunkt des Lichts vom Projektor auf das Ob-

jekt. Die allgemeine Richtung des gestreuten Lichts wird dann als Reflexion des auftreffenden Lichts um die Oberflächennormale gefunden. Mit anderen Worten, der Reflexionswinkel ist gleich dem Auftreffwinkel, auch wenn der Reflexionswinkel in diesem Fall lediglich eine allgemeine Streurichtung ist.

[0127] Der Fall der Mehrwegeinterferenz tritt dann auf, wenn ein Teil des Lichts, das auf die Objektoberfläche auftrifft, zunächst von einer anderen Oberfläche des Objekts gestreut wird, bevor es zur Kamera zurückkehrt. Für den Punkt auf dem Objekt, der dieses gestreute Licht aufnimmt, entspricht das an die lichtempfindliche Anordnung gesendete Licht nicht nur dem Licht, das auf direktem Wege vom Projektor projiziert wird, sondern auch dem Licht, das an einen anderen Punkt auf dem Projektor gesendet wird und vom Objekt gestreut wird. Das Ergebnis der Mehrwegeinterferenz, insbesondere für den Fall von Scannern, die zweidimensionales (strukturiertes) Licht projizieren, kann darin bestehen, dass die Entfernung, die vom Projektor zur Objektoberfläche berechnet wird, an diesem Punkt ungenau ist.

[0128] Für den Fall eines Linienscanners gibt es einen Weg um festzustellen, wann Mehrwegeinterferenz vorliegt. In einer Ausführungsform verlaufen die Reihen einer lichtempfindlichen Anordnung parallel zur Zeichnungsebene in **Fig. 15E**, und die Spalten sind rechtwinklig zur Zeichnungsebene. Jede Reihe stellt einen Punkt auf der projizierten Linie **4526** in der Richtung rechtwinklig zur Zeichnungsebene dar. In einer Ausführungsform wird die Entfernung vom Projektor zum Objekt für diesen Punkt auf der Linie gefunden, indem zunächst für jede Reihe der Wellenlängenschwerpunkt berechnet wird. Das Licht auf jeder Reihe sollte jedoch über einen Bereich von benachbarten Bildpunkten konzentriert sein. Falls es zwei oder mehr als zwei Gebiete gibt, die eine signifikante Menge an Licht erhalten, ist Mehrwegeinterferenz angezeigt. Ein Beispiel für eine solche Bedingung für Mehrwegeinterferenz und der sich ergebende gesonderte Bereich der Beleuchtung auf der lichtempfindlichen Anordnung sind in **Fig. 15E** dargestellt. Die Oberfläche **4510A** weist nun in der Nähe des Schnittpunktes **4526** eine stärkere Krümmung auf. Die Oberflächennormale an dem Schnittpunkt ist die Linie **4528**, und der Einfallswinkel ist **4531**. Die Richtung der reflektierten Lichtlinie **4529** wird aus dem Reflexionswinkel **4532** gefunden, der gleich dem Einfallswinkel ist. Wie bereits weiter oben festgestellt worden ist, stellt die Lichtlinie **4529** tatsächlich eine Gesamtrichtung für Licht dar, das über einen Bereich von Winkeln streut. Die Mitte des gestreuten Lichts fällt auf das Objekt **4510A** am Punkt **4527**, der durch das Objektiv **4544** auf den Punkt **4548** auf der lichtempfindlichen Anordnung abgebildet wird. Die unerwartet große Menge an Licht, die in der Nähe des Punktes **4548** aufgenommen wird, deutet darauf hin, dass vermutlich Mehrwegeinterferenz vorliegt. Für ei-

nen Linienscanner besteht die Hauptsorge mit der Mehrwegeinterferenz nicht für den in **Fig. 15E** dargestellten Fall, wo die beiden Flecke **4546** und **4541** durch einen beträchtlichen Abstand getrennt sind und getrennt analysiert werden können, sondern eher in dem Fall, in dem die beiden Flecke einander überlappen oder zusammenfließen. In diesem Fall ist es nicht möglich, den Wellenlängenschwerpunkt zu ermitteln, der dem gewünschten Punkt entspricht, der in **Fig. 15E** dem Punkt **4546** entspricht. Das Problem wird größer für den Fall eines Scanners, der Licht in zwei Dimensionen projiziert, was verständlich ist, wenn man sich abermals auf **Fig. 15E** bezieht. Falls all das Licht, das auf die lichtempfindliche Anordnung **4541** abgebildet wird, benötigt wird, um zweidimensionale Koordinaten zu ermitteln, ist es klar, dass das Licht am Punkt **4527** dem gewünschten Lichtmuster entsprechen würde, das vom Projektor direkt projiziert wird, sowie dem unerwünschten Licht, das zum Punkt **4527** von der von der Objektoberfläche erfolgenden Reflexion reflektiert wird. Das Ergebnis ist, dass in diesem Fall für den Punkt **4527** wahrscheinlich drei schlechte Dimensionskoordinaten für zweidimensional projiziertes Licht berechnet würden.

[0129] Für eine projizierte Lichtlinie ist es in vielen Fällen möglich, die Mehrwegeinterferenz zu eliminieren, indem die Richtung der Linie geändert wird. Eine Möglichkeit besteht darin, dass ein Linienscanner dazu gebracht wird, dass er einen Projektor mit innewohnender zweidimensionaler Funktionalität einsetzt, wodurch die Linie in die Lage versetzt wird, hin und her bewegt zu werden oder automatisch in verschiedene Richtungen gedreht zu werden. Wenn zum Beispiel der Verdacht auf Mehrwegeinterferenz bei einem besonderen Scanning mit strukturiertem Licht besteht, könnte ein Messsystem automatisch so konfiguriert werden, dass es auf ein Messverfahren umschaltet, bei dem eine hin und her bewegte Lichtlinie benutzt wird.

[0130] Ein weiterer und vollständigerer Weg zur Eliminierung von Mehrwegeinterferenz besteht darin, einen Lichtpunkt über jene Bereiche, für die Mehrwegeinterferenz angezeigt worden ist, hin und her zu bewegen an Stelle einer Lichtlinie oder einer Lichtfläche. Durch das Beleuchten eines einzelnen Lichtpunktes können keine anderen beleuchteten Punkte gestreutes Licht auf den für die Messung vorgesehenen Punkt reflektiert werden. Wenn zum Beispiel die Linie **4526** als Sammlung individueller Lichtflecke gescannt würde, wäre die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Mehrwegeinterferenz eliminiert.

[0131] Ein weiteres Reflexionsproblem, auf das man bei Scannermessungen stoßen kann, ist das des reflektierten Spiegellichts. Zuweilen weist eine relativ glatte Oberfläche eine derartige Krümmung auf, dass eine große Menge an Licht auf die lichtempfindliche Anordnung spiegelartig reflektiert wird, wodurch

ein „hot spot“ erzeugt wird, der mehr Licht abekommt als die umgebenden Bildpunkte. Solche Hotspots an Licht werden manchmal als „Glints“ (Glitzern) bezeichnet. Diese Hotspots können es schwierig machen, ein Objekt mit einem Scanner einwandfrei zu messen. Wie beim Fall der Mehrwegeinterferenz kann das Problem des Glitzerns dadurch überwunden werden, dass eine Laserlinie benutzt wird, die eine einstellbare Richtung oder einen Spot aufweist.

[0132] Es ist einfach festzustellen, ob ein Glint vorhanden ist, da kleine gesättigte Bereiche auf einer lichtempfindlichen Anordnung leicht nachgewiesen werden können. Es ist jedoch ein systematisches Herangehen erforderlich, um Mehrwegeprobleme zu erkennen und zu überwinden. Eine allgemeine Herangehensweise kann benutzt werden, um nicht nur Mehrwegeinterferenz, sondern auch die Qualität im Allgemeinen einschließlich Auflösung und Einflüsse des Materialtyps, der Oberflächenqualität und der Geometrie abzuschätzen. Es soll nun auch auf **Fig. 15F** Bezug genommen werden. In einer Ausführungsform kann das Verfahren **4600** automatisch mit Hilfe der Steuerung durch einen Computer durchgeführt werden. Der Schritt **4602** besteht darin, dass ermittelt wird, ob Informationen über dreidimensionale Koordinaten eines zu untersuchenden Objekts verfügbar sind. Ein erster Typ von dreidimensionalen Informationen sind die CAD-Daten. Die CAD-Daten geben üblicherweise die Nennabmessungen eines zu untersuchenden Objekts an. Ein zweiter Typ von dreidimensionalen Informationen sind gemessene dreidimensionale Daten – beispielsweise solche Daten, die bereits mit einem Scanner oder einem anderen Gerät gemessen worden sind. In einigen Fällen kann der Schritt **4602** einen weiteren Schritt der Ausrichtung des Bezugssystems des Koordinatenmessgeräts wie beispielsweise eines Lasertrackers oder eines 6-DOF-Scannerzubehörs mit dem Bezugssystem des Objekts enthalten. In einer Ausführungsform erfolgt dies durch Messung von mindestens drei Punkten auf der Objektoberfläche mit dem Lasertracker.

[0133] Falls die Antwort auf die im Schritt **4602** gestellte Frage dahingehend lautet, dass dreidimensionale Informationen verfügbar sind, wird im Schritt **4604** der Computer oder der Projektor dazu benutzt, die Störanfälligkeit der Objektmessung gegenüber Mehrwegeinterferenz zu berechnen. In einer Ausführungsform erfolgt dies dadurch, dass jeder vom Scannerprojektor ausgesandte Lichtstrahl projiziert und für jeden Fall der Reflexionswinkel berechnet wird. Ein für den Fall des Linienscanners angegebenes Beispiel wurde mit Bezug auf **Fig. 5E** beschrieben. Die Berechnungen für den Strukturlichtscanner werden auf dieselbe Weise durchgeführt. Die Computersoftware identifiziert jedes Gebiet der Objektoberfläche, das gegenüber Fehlern, die sich aus der Mehrwe-

geinterferenz ergeben, störanfällig sind. Mit Schritt **6404** kann auch eine Analyse der Störanfälligkeit gegenüber Mehrwegefehlern für eine Vielfalt von Positionen der 6-DOF-Sonde in Bezug auf das zu untersuchende Objekt durchgeführt werden. In einigen Fällen kann die Mehrwegeinterferenz dadurch vermieden oder auf ein Mindestmaß abgesenkt werden, dass eine geeignete Position und Orientierung der 6-DOF-Sonde relativ zum zu untersuchenden Objekt ausgewählt wird. Falls die Antwort auf die im Schritt **4602** gestellte Frage dahingehend ausfällt, dass dreidimensionale Informationen nicht verfügbar sind, besteht Schritt **4606** darin, dass die dreidimensionalen Koordinaten der Objektoberfläche unter Anwendung eines beliebigen gewünschten oder bevorzugten Messverfahrens gemessen werden. Nach Ausführung der Berechnung der Mehrwegeinterferenz kann Schritt **4608** ausgeführt werden, um andere Aspekte der erwarteten Qualität des Scannens zu bewerten. Ein derartiger Qualitätsfaktor ist, ob die Auflösung des Scannens für die Merkmale des zu untersuchenden Objekts ausreichend ist. Falls beispielsweise die Auflösung eines Gerätes 3 mm beträgt und es Merkmale im Submillimeterbereich gibt, für die aussagefähige Scanningdaten gewünscht werden, sollten diese Problembereiche des Objekts für spätere Korrekturmaßnahmen vorgemerkt werden. Ein weiterer Qualitätsfaktor, der zum Teil nur mit der Auflösung im Zusammenhang steht, ist die Fähigkeit, Kanten des Objekts und die Ränder von Löchern zu messen. Die volle Kenntnis der Leistungsfähigkeit des Scanners wird die Feststellung ermöglichen, ob die Auflösung des Scanners für die vorliegenden Kanten ausreichend ist. Ein weiterer Qualitätsfaktor ist die erwartete Menge an Licht, die von einem gegebenen Merkmalszug zurück kommt. Beispielsweise wird man erwarten können, dass vom Inneren eines kleinen Loches oder von einem Glanzwinkel nur wenig oder gar kein Licht zurück kommt. Auch kann man erwarten, dass von bestimmten Materialarten und -farben wenig Licht zurück kommt. Bestimmte Typen von Materialien können eine große Eindringtiefe für das Licht vom Scanner haben, und in diesem Fall wären gute Messergebnisse nicht zu erwarten. In einigen Fällen kann ein automatisches Programm zusätzliche Nutzerinformationen verlangen. Falls beispielsweise ein Computerprogramm die Schritte **4604** und **4608** auf der Grundlage von CAD-Daten ausführt, kann es vorkommen, dass der zum Einsatz gelangende Materialtyp oder die Oberflächeneigenschaften des zu untersuchenden Objekts nicht bekannt sind. In diesen Fällen kann der Schritt **4608** einen zusätzlichen Schritt enthalten, der auf die Gewinnung der Materialeigenschaften für das zu untersuchende Objekt abzielt.

[0134] Nach erfolgter Ausführung der Analyse der Schritte **4604** und **4608** besteht Schritt **4610** in der Entscheidung, ob weitere Diagnoseverfahren durchgeführt werden sollten oder nicht. Ein erstes Beispiel eines möglichen Diagnoseverfahrens ist der Schritt

4612, wo ein Streifen unter einem bevorzugten Winkel projiziert wird, um festzustellen, ob Mehrwegeinterferenz beobachtet wird oder nicht. Die allgemeinen Hinweise auf das Vorliegen von Mehrwegeinterferenz für einen projizierten Linienstreifen wurden bereits weiter oben mit Bezug auf **Fig. 15E** erörtert. Ein weiteres Beispiel für einen Diagnoseschritt ist der Schritt **6414**, der darin besteht, dass eine Sammlung von Linien projiziert wird, die in der Richtung von epipolaren Linien auf dem Quellen-Lichtmuster, beispielsweise dem Quellen-Lichtmuster **2570** in **Fig. 15A** oder dem Quellen-Lichtmuster **4770** in **Fig. 15B** ausgerichtet sind. Für den Fall, in dem Lichtlinien im Quellen-Lichtmuster zu den epipolaren Linien ausgerichtet sind, werden diese Linien auch als gerade Linien in der Bildebene der lichtempfindlichen Anordnung erscheinen wie beispielsweise in der Ebene **2580** der **Fig. 15A** oder der Ebene **4780** der **Fig. 15B**. Falls diese Muster auf der lichtempfindlichen Anordnung keine geraden Linien sind oder falls diese Linien unscharf oder verrauscht sind, ist ein Problem angezeigt, möglicherweise als Ergebnis einer Mehrwegeinterferenz.

[0135] Der Schritt **4616** besteht darin, dass eine Kombination von bevorzugten Maßnahmen auf der Grundlage der Analysen und des Diagnoseverfahrens ausgewählt wird. Falls die Geschwindigkeit bei einer Messung von besonderem Interesse ist, kann der Schritt **4618** bevorzugt werden, bei dem die Messung unter Benutzung eines (strukturierten) 2D-Musters von kodiertem Licht durchgeführt wird. Falls eine höhere Genauigkeit von größerem Interesse ist, kann der Schritt **4620** bevorzugt werden, bei dem die Messung unter Benutzung eines (strukturierten) 2D-Musters von kodiertem Licht mit sequentiellen Mustern wie beispielsweise einer Folge von sinusförmigen Mustern mit veränderlicher Phase und Abstand durchgeführt wird. Falls das Verfahren **4618** oder **4620** ausgewählt wird, kann es wünschenswert sein, auch den Schritt **4628** auszuwählen, der darin besteht, dass der Scanner neu positioniert wird, mit anderen Worten, dass die Position und die Orientierung des Scanners auf diejenige Position eingestellt werden, welche die Mehrwegeinterferenz und die spiegelähnlichen Reflexionen (Glints) auf ein Mindestmaß absenkt, wie das durch die Analyse vom Schritt **4604** vorgestellt wird. Derartige Hinweise können einem Nutzer durch das Beleuchten der problembehafteten Bereiche mit Licht vom Scannerprojektor oder dadurch, dass derartige Bereiche auf einem Bildschirm zur Anzeige gebracht werden, gegeben werden. Auf alternative Weise können die nächsten Schritte im Messverfahren automatisch durch einen Computer oder Prozessor ausgewählt werden. Falls durch die bevorzugte Scannerposition die Mehrwegeinterferenz und die Glints nicht beseitigt werden können, stehen mehrere Optionen zur Verfügung. In einigen Fällen kann die Messung mit dem Scanner in einer anderen Position wiederholt werden,

und die gültigen Messergebnisse werden kombiniert. In anderen Fällen können dem Verfahren alternative Schritte der Messung zugefügt werden oder können an Stelle der Verwendung von strukturiertem Licht ausgeführt werden. Wie bereits weiter oben erörtert worden ist, bietet der Schritt **4622**, bei dem ein Lichtstreifen gescannt wird, einen bequemen Weg, Informationen über eine Fläche mit verminderter Aussicht auf Vorliegen eines sich aus der Mehrwegeinterferenz ergebenden Problems zu erhalten. Der Schritt **4624** des Hin- und Herbewegens eines kleinen Lichtflecks über das interessierende Gebiet verringert außerdem die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Problemen aus der Mehrwegeinterferenz. Der Schritt des Messens eines Gebietes einer Objektoberfläche mit einer Tastsonde oder einem anderen mechanischen Sensor wie beispielsweise einem SMR eliminiert die Möglichkeit der Mehrwegeinterferenz. Eine Tastsonde liefert eine bekannte Auflösung auf der Grundlage der Sondenspitze, und sie eliminiert Fälle mit niedrigem Reflexionsvermögen von Licht oder hoher Eindringtiefe, die bei einigen zu untersuchenden Objekten vorgefunden werden können.

[0136] In den meisten Fällen kann die Qualität der in einer Kombination der Schritte **4618–4628** gesammelten Daten im Schritt **4630** auf der Grundlage der aus den Messungen erhaltenen Daten ausgewertet werden, kombiniert mit den Ergebnissen der vorher durchgeführten Analysen. Falls im Schritt **4632** befunden wird, dass die Qualität akzeptabel ist, wird die Messung im Schritt **4634** zum Abschluss gebracht. Ansonsten wird die Analyse beim Schritt **4604** wieder aufgenommen. In einigen Fällen kann es vorkommen, dass die 3D-Information nicht so genau gewesen ist, wie das gewünscht war. In diesem Fall kann das Wiederholen von einigen früheren Schritten hilfreich sein.

[0137] In einer Ausführungsform können die Kamera **2530** und der Projektor **2520** dergestalt konfiguriert sein, dass sie Merkmale messen, die zu klein sind, um vom menschlichen Auge gesehen zu werden. Im Allgemeinen wird für diesen Anwendungsfall das Strukturlichtmuster in seiner Größe mit der Kamera verkleinert, die dergestalt konfiguriert ist, dass sie ein Muster dieser Größe misst. Beispiele für Anwendungen unter Benutzung dieses Typs von Projektor **2500** enthalten das Messen von kleinen Schweißstellen, das Messen der Oberflächenrauigkeit und der Welligkeit, das Messen der Eigenschaften von Materialien wie beispielsweise Papier, das Messen von Schneidkanten, das Messen von Verschleiß, Abnutzung und Erosion, das Messen von Planheit und Stufenhöhe. Das Scannersystem von **Fig. 15**, das einen 6-DOF-Scanner und einen Lasertracker umfasst, ermöglicht die Messung von kleinen Merkmalen über große Flächen.

[0138] Fig. 16 zeigt eine Ausführungsform eines 6-DOF-Anzeigegerätes **2800**, das in Verbindung mit einem optoelektronischen System **900** und einem Positionierkamerasystem **950** benutzt wird. Das optoelektronische System **900** und das Positionierkamerasystem **950** wurden bereits in Verbindung mit Fig. 13 erörtert, und diese Erörterung soll hier nicht wiederholt werden. In einer Ausführungsform ist das optoelektronische System **900** durch das optoelektronische System **1900** ersetzt. Das 6-DOF-Anzeigegerät **2800** enthält einen Körper **2814**, einen oder mehrere Retroreflektoren **2810**, **2811**, eine Stützvorrichtung **2890**, ein wahlweise vorhandenes elektrisches Kabel **2836**, eine wahlweise vorhandene Batterie **2834**, ein Schnittstellenbauteil **2812**, ein Identifizierelement **2839**, Betätigungsknöpfe **2816**, eine Antenne **2838** und eine Elektronik-Leiterplatte **2832**. Der Retroreflektor **2810**, das wahlweise vorhandene elektrische Kabel **2836**, die wahlweise vorhandene Batterie **2834**, das Schnittstellenbauteil **2812**, das Identifizierelement **2839**, die Betätigungsknöpfe **2816**, die Antenne **2838** und die Elektronik-Leiterplatte **2832** in Fig. 16 entsprechen dem Retroreflektor **2010**, dem wahlweise vorhandenen elektrischen Kabel **2046**, der wahlweise vorhandenen Batterie **2044**, dem Schnittstellenbauteil **2012**, dem Identifizierelement **2049**, den Betätigungsknöpfen **2016**, der Antenne **2048** bzw. der Elektronik-Leiterplatte **2042** in Fig. 14. Die Beschreibungen für diese einander entsprechenden Bauteile sind dieselben, wie sie bereits weiter oben angeführt sind, und sollen hier nicht wiederholt werden. Die Stützvorrichtung **2890** kann an einem sich bewegenden Element angebracht werden, wodurch ermöglicht wird, dass der Lasertracker die sechs Freiheitsgrade des sich bewegenden Elements misst. Das sich bewegende Element kann ein Roboter-Endeffektor, eine Werkzeugmaschine oder ein Werkzeug an einem Aggregat (z. B. einem Schlitten einer Montagelinie) sein. Das 6-DOF-Anzeigegerät kann kompakt sein, da der Retroreflektor **2810** klein sein kann und die meisten anderen Bauteile von Fig. 16 nur wahlweise vorhanden sind und auch weggelassen werden können. Diese geringe Größe kann in einigen Fällen einen Vorteil bieten. Zusätzliche Retroreflektoren wie beispielsweise der Retroreflektor **2611** können dem ersten Retroreflektor **2610** zugefügt werden, um den Lasertracker in die Lage zu versetzen, den 6-DOF-Scanner aus einer Vielfalt von Richtungen zu verfolgen.

[0139] Fig. 16A zeigt eine Ausführungsform, in der das 6-DOF-Anzeigegerät **4730** ein sphärisch montierter 6-DOF-Retroreflektor (SMR) **4734** ist, der an eine magnetische Haltevorrichtung **4732** montiert ist. Dieser 6-DOF-SMR kann einen gemusterten Retroreflektor enthalten, der ein offener Luft- oder Glas-Retroreflektor sein kann, der Markierungen längs der Schnitte der reflektierenden Elemente aufweist. In einer Ausführungsform wird die anfängliche Orientierung des 6-DOF-Anzeigegerätes durch die Bedien-

person in der Weise festgelegt, indem diese den 6-DOF-SMR in eine bevorzugte Orientierung bringt wie beispielsweise gemäß einer Marke oder einem Kennzeichen, das nach oben zeigt. Bei diesem Verfahren kann das 6-DOF-Anzeigegerät völlig passiv sein, und es erfordert keinerlei elektrische Energie oder elektrische Signale von irgend einem anderen Gerät. Ein derartiges 6-DOF-Anzeigegerät bietet beträchtliche Vorteile, da magnetische Haltevorrichtungen schnell und einfach an irgend einer gewünschten Stelle montiert werden können wie beispielsweise an einem Roboter oder einer Werkzeugmaschine, ohne dass es irgendwelcher elektrischer Kabel bedarf oder dass komplexe Halterungen installiert werden müssen. In einer Ausführungsform ist die magnetische Haltevorrichtung **4732** mit einer Gewindeschraube in einer mit Gewinde versehenen Öffnung **4734** an dem Gerät angebracht, das ein Roboter oder eine Werkzeugmaschine sein kann. In anderen Ausführungsformen ist die magnetische Haltevorrichtung am Gerät mit Heißkleber oder Epoxidharz befestigt.

[0140] Fig. 16B zeigt eine Ausführungsform **4760**, in der das 6-DOF-Anzeigegerät **4734** ein 6-DOF-SMR ist, der an einer Haltevorrichtung **4732** befestigt ist, die eine Einspannung aufweist. Diese Einspannung enthält ein Element, das mit dem 6-DOF-SMR **4734** in Kontakt kommt, beispielsweise ein maschinell bearbeitetes Stück Metall, eine Kunststoffabdeckung oder eine Lasche. Die Einspannung wird mit dem 6-DOF-SMR **4734** mittels eines Befestigungsmechanismus **4764** in engen körperlichen Kontakt gebracht. Beispiele für Befestigungsmechanismen sind Hakenklammern und Schraubzwingen. Diese Einspannungen **4762** bieten Schutz gegen Stöße oder hohe Beschleunigungen.

[0141] Fig. 17 zeigt eine Ausführungsform eines 6-DOF-Projektors **2600**, der in Verbindung mit einem optoelektronischen System **900** und einem Positionierkamerasystem **950** verwendet wird. Das optoelektronische System **900** und das Positionierkamerasystem **950** wurden in Verbindung mit Fig. 13 erörtert, und diese Erörterung soll hier nicht wiederholt werden. In einer Ausführungsform ist das optoelektronische System **900** durch ein optoelektronisches System ersetzt, das mit zwei oder mehr als zwei Wellenlängen Licht arbeitet. Der 6-DOF-Projektor **2600** enthält einen Körper **2614**, einen oder mehrere Retroreflektoren **2610**, **2611**, einen Projektor **2620**, ein wahlweise vorhandenes elektrisches Kabel **2636**, eine wahlweise vorhandene Batterie **2634**, ein Schnittstellenbauteil **2612**, ein Identifizierelement **2639**, Betätigungsknöpfe **2616**, eine Antenne **2638** und eine Elektronik-Leiterplatte **2632**. Der Retroreflektor **2610**, das wahlweise vorhandene elektrische Kabel **2636**, die wahlweise vorhandene Batterie **2634**, das Schnittstellenbauteil **2612**, das Identifizierelement **2639**, die Betätigungsknöpfe **2616**, die Antenne **2638** und die Elektronik-Leiterplatte

te **2632** von **Fig. 17** entsprechen dem Retroreflektor **2010**, dem wahlweise vorhandenen elektrischen Kabel **2036**, der wahlweise vorhandenen Batterie **2034**, dem Schnittstellenbauteil **2012**, dem Identifizierelement **2039**, den Betätigungsknöpfen **2016**, der Antenne **2038** bzw. der Elektronik-Leiterplatte **2032** von **Fig. 14**. Die Beschreibungen dieser einander entsprechenden Bauteile sind dieselben, wie sie weiter oben schon angeführt worden sind, und sollen daher hier nicht wiederholt werden. Der 6-DOF-Projektor **2600** kann eine Lichtquelle, eine Lichtquelle mit einem Lenkspiegel, einen MEMS-Mikrospiegel, einen Flüssigkristall-Projektor oder jede andere Vorrichtung enthalten, die imstande ist, auf ein Werkstück **2600** ein Lichtmuster zu projizieren. Die sechs Freiheitsgrade des Projektors **2600** werden durch den Lasertracker unter Anwendung der im Patent '758 beschriebenen Verfahren ermittelt. Aus diesen sechs Freiheitsgraden können die drei Dimensionskoordinaten des projizierten Lichtmusters im Tracker-Bezugssystem gefunden werden, das seinerseits über die Messung von drei Punkten auf dem Werkstück durch den Lasertracker in das Werkstück-Bezugssystem umgewandelt werden kann. Zusätzliche Retroreflektoren wie beispielsweise der Retroreflektor **2611** können dem ersten Retroreflektor **2610** zugefügt werden, um den Lasertracker in die Lage zu versetzen, den 6-DOF-Scanner von einer Vielfalt von Richtungen aus zu verfolgen, wodurch eine größere Flexibilität in den Richtungen erzielt wird, in die das Licht durch den 6-DOF-Projektor **2600** projiziert werden kann.

[0142] Wenn das projizierte Lichtmuster **2640** auf der Oberfläche des Werkstücks **2660** im Werkstück-Bezugssystem bekannt ist, ist es möglich, eine Vielfalt von nützlichen Leistungsmerkmalen zu erhalten. Als ein erstes Beispiel kann das projizierte Muster angeben, wo eine Bedienperson Löcher bohren soll oder andere Arbeitsgänge ausführen soll, um das Anbringen von Komponenten am Werkstück **2660** zu ermöglichen. So können zum Beispiel am Cockpit eines Flugzeugs Anzeigeinstrumente angebracht werden. Ein derartiges Verfahren der In-situ-Montage kann in vielen Fällen kosteneffektiv sein. Als ein zweites Beispiel kann das projizierte Muster unter Verwendung eines Konturmusters, von farbkodierten Toleranzmustern oder grafischen Mitteln angeben, wo Material einem Werkzeug zugefügt oder von diesem entfernt werden muss. Eine Bedienperson kann ein Werkzeug benutzen, um unerwünschtes Material abzutragen oder ein Füllmaterial benutzen, um eine Fläche auszufüllen. Da es durchaus möglich ist, dass der Lasertracker oder ein am Lasertracker angebrachter externer Computer die Details des CAD-Modells kennt, kann der 6-DOF-Projektor ein relativ schnelles und einfaches Verfahren zur Abänderung eines Werkzeugs bieten, um die CAD-Toleranzen einzuhalten. Zu weiteren Montagevorgängen können das Anreißen, das Anbringen von Klebstoff, das Aufbrin-

gen einer Beschichtung, das Anbringen einer Markierung und das Reinigen gehören. Als ein drittes Beispiel kann das projizierte Muster verborgene Komponenten angeben. Zum Beispiel können Rohrleitungen oder elektrische Kabel hinter einer Fläche verlaufen und vor direkter Sicht verborgen sein. Die Position dieser Komponenten kann auf das Werkstück projiziert werden, wodurch die Bedienperson in die Lage versetzt wird, diese bei der Montage oder bei Reparaturarbeiten auszulassen.

[0143] Um Licht vom Projektor-Scanner in das Werkstück-Bezugssystem zu projizieren, ist es im Allgemeinen notwendig, das Werkstück-Bezugssystem im Lasertracker-Bezugssystem zu ermitteln. Ein Weg dazu besteht darin, drei Punkte auf dem Werkstück mit dem Lasertracker zu messen. Dann können ein CAD-Modell oder früher gemessene Daten benutzt werden, um eine Beziehung zwischen einem Werkstück und einem Lasertracker aufzustellen.

[0144] Wenn eine Bedienperson Montagearbeiten mit der Unterstützung eines 6-DOF-Projektors ausführt, besteht eine nützliche Technik darin, den 6-DOF-Projektor auf ein stationäres Stativ oder eine Stützvorrichtung zu montieren, wodurch die Bedienperson in die Lage versetzt wird, die Montagearbeiten mit zwei freien Händen auszuführen. Eine nützliche Betriebsart des Lasertrackers und des 6-DOF-Projektors besteht darin, dass der 6-DOF-Projektor fortfährt, ein Lichtmuster zu projizieren, selbst wenn der Lasertracker aufgehört hat, den Retroreflektor auf dem 6-DOF-Scanner zu verfolgen. Auf diese Weise kann die Bedienperson den Lasertracker benutzen, um Messungen beispielsweise mit einem SMR, einer 6-DOF-Sonde oder einem 6-DOF-Scanner durchzuführen, während der Projektor fortfährt, das Lichtmuster anzuzeigen, das auf die auszuführenden Arbeitsgänge hinweist. Auf eine ähnliche Weise kann der Tracker dazu benutzt werden, um zwei oder mehr als zwei Scanner-Projektoren einzurichten, die fortfahren, Muster zu projizieren, nachdem der Tracker aufgehört hat, den Retroreflektor auf jedem Scanner-Projektor zu verfolgen. Hieraus ergibt sich, dass eine hohe Detailtreue auf relativ große Flächen projiziert werden kann, was ermöglicht, dass mehrere Bedienperson gleichzeitig diese Unterstützung erfahren können. In einer Betriebsart ist es auch möglich, den 6-DOF-Scanner in die Lage zu versetzen, jedes beliebige von mehreren alternativen Mustern zu projizieren, wodurch die Bedienperson in die Lage versetzt wird, Montagearbeiten in einer vorgeschriebenen Reihenfolge auszuführen.

[0145] Neben der Unterstützung bei Montagevorgängen kann der Projektor-Scanner auch bei der Durchführung von Inspektionsmaßnahmen behilflich sein. In einigen Fällen kann eine Inspektionsmaßnahme von einer Bedienperson verlangen, eine Folge von Messungen in einer besonderen Reihenfolge

durchzuführen. Der 6-DOF-Scanner kann auf die Positionen zeigen, an denen die Bedienperson den jeweiligen Schritt der Messung ausführen soll. Der 6-DOF-Scanner kann ein Gebiet abstecken, über dem eine Messung durchgeführt werden soll. Zum Beispiel kann beim Zeichnen eines Kastens der 6-DOF-Scanner angeben, dass die Bedienperson eine Scanning-Messung über den Bereich im Inneren des Kastens ausführen soll, vielleicht um die Planheit der Bereiche zu ermitteln oder vielleicht als Teil einer längeren Folge von Messungen. Da der Projektor imstande ist, die Folge von Schritten mit dem 6-DOF-Retroreflektor, der vom Lasertracker verfolgt wird, weiterhin durchzuführen, kann die Bedienperson eine Inspektionsfolge unter Verwendung des Trackers oder von anderen Werkzeugen fortsetzen. Falls der Tracker die Messungen ausführt, wird dieser auch erfahren, wann Messungen erfolgreich abgeschlossen sind, und kann dann zum nächsten Schritt übergehen. Der Projektor-Scanner kann auch an die Bedienperson Informationen in Form von geschriebenen Meldungen oder akustischen Meldungen liefern. Die Bedienperson kann unter Verwendung von Gesten, die von den Trackerkameras oder anderen Mitteln aufgenommen werden, dem Lasertracker Kommandos signalisieren.

[0146] Der 6-DOF-Projektor kann Lichtmuster verwenden, die vielleicht auf dynamische Weise angewendet werden, um Informationen zu übermitteln. Zum Beispiel kann der 6-DOF-Projektor eine Vor- und Zurückbewegung benutzen, um eine Richtung anzuzeigen, in die ein SMR bewegt werden soll. Der 6-DOF-Projektor kann andere Muster zeichnen, um Meldungen abzugeben, die durch eine Bedienperson gemäß einem Satz von Regeln interpretiert werden können, wobei diese Regeln dem Nutzer in schriftlicher Form oder in Form einer Bildschirmanzeige zur Verfügung stehen können.

[0147] Der 6-DOF-Projektor kann auch dazu benutzt werden, Informationen an den Nutzer über die Natur eines in der Untersuchung befindlichen Objekts zu übermitteln. Falls Dimensionsmessungen durchgeführt worden sind, kann zum Beispiel der 6-DOF-Projektor ein farbkodiertes Muster projizieren, das fehlerbehaftete Gebiete in Verbindung mit den Oberflächenkoordinaten des untersuchten Objekts anzeigt. Alternativ kann er genau so gut auch Bereiche oder Werte zur Anzeige bringen, die außerhalb der Toleranzgrenzen liegen. Zum Beispiel kann er ein Gebiet hervorheben, für welches das Oberflächenprofil außerhalb der Toleranz liegt. Alternativ kann er eine Linie ziehen, um eine zwischen zwei Punkten gemessene Strecke anzugeben, und dann auf denjenigen Teil eine Meldung schreiben, welche die Höhe des Fehlers angibt, der dieser Entfernung zugeordnet ist.

[0148] Der 6-DOF-Projektor kann neben den dimensionellen Eigenschaften auch Information über ge-

messene Eigenschaften zur Anzeige bringen, wobei diese Eigenschaften den Positionskordinaten auf dem Objekt zugeordnet sind. Zu derartigen Eigenschaften eines untersuchten Objekts können Temperaturwerte, Ultraschallwerte, Mikrowellenwerte, Millimeterwellenwerte, Röntgenstrahlwerte, radiologische Werte, chemische Erfassungswerte und viele andere Arten von Werten gehören. Solche Objekteigenschaften können unter Verwendung eines 6-DOF-Scanners im Abgleich mit den dreidimensionalen Koordinaten auf einem Objekt gemessen werden, wie weiter unten noch erörtert werden soll. Andererseits können Objekteigenschaften auf einem Objekt unter Verwendung eines getrennten Messgerätes gemessen werden, wobei die Daten in gewisser Weise mit den Dimensionskoordinaten der Objektoberfläche mit einem Objekt-Bezugssystem korrelieren. Dann können durch Anpassen des Objekt-Bezugssystems an das Bezugssystem des Lasertrackers oder des 6-DOF-Projektors Information über die Objekteigenschaften auf dem Objekt beispielsweise in grafischer Form angezeigt werden. Zum Beispiel können Temperaturwerte einer Objektoberfläche unter Verwendung einer thermischen Anordnung gemessen werden. Jeder der Temperaturwerte kann durch einen Farbcode dargestellt werden, der auf die Objektoberfläche projiziert wird.

[0149] Ein 6-DOF-Scanner kann auch modellierte Daten auf eine Objektoberfläche projizieren. Zum Beispiel könnte er die Ergebnisse einer thermischen Finite-Element-Analyse (FEA) auf die Objektoberfläche projizieren und dann der Bedienperson ermöglichen, die Auswahl zu treffen, welche der beiden Anzeigeformen – FEA oder gemessene thermische Daten – zu einer beliebigen Zeit zur Anzeige gelangen. Da beide Sätze von Daten auf das Objekt projiziert werden, nämlich an die tatsächlichen Stellen, wo die Eigenschaften gefunden werden – beispielsweise die Positionen, an denen besondere Temperaturen gemessen oder vorausgesagt worden sind – wird dem Nutzer ein klares und unmittelbares Verständnis der das Objekt betreffenden physikalischen Effekte vermittelt. Der 6-DOF-Projektor kann auch an einem beweglichen Träger wie beispielsweise einem Roboter oder einer Werkzeugmaschine angebracht werden.

[0150] Falls die Messung eines kleinen Gebiets durchgeführt worden ist, wo die aufgelösten Merkmale zu klein sind, um vom menschlichen Auge gesehen zu werden, kann der 6-DOF-Projektor eine vergrößerte Ansicht derjenigen Eigenschaften, die vorher über einen Bereich der Objektoberfläche gemessen worden sind, auf die Objektoberfläche projizieren, wodurch der Nutzer in die Lage versetzt wird, Merkmale zu sehen, die zu klein sind, als dass sie ohne Vergrößerung gesehen werden könnten. In einer Ausführungsform wird eine Messung mit hoher Auflösung mit einem 6-DOF-Scanner wie beispielsweise dem Scanner **2500** von **Fig. 15** durchgeführt, und

die Ergebnisse werden mit einem Projektor projiziert, welcher der Projektor in dem 6-DOF-Scanner oder in einem 6-DOF-Projektor sein könnte.

[0151] Fig. 18 zeigt eine Ausführungsform eines 6-DOF-Projektors **2700**, der in Verbindung mit einem optoelektronischen System **2790** benutzt wird. Das optoelektronische System **2790** kann jede beliebige Vorrichtung sein, die imstande ist, die sechs Freiheitsgrade eines 6-DOF-Projektors **2700** zu messen. In einer Ausführungsform enthält das optoelektronische System **2790** eine oder mehrere Kameras, welche die bestrahlten Lichtquellen der Retroreflektoren auf dem 6-DOF-Projektor **2700** erfassen. Durch das Markieren der relativen Positionen der Bilder der Lichtquelle auf der einen oder auf mehreren Kameras werden die drei Orientierungsfreiheitsgrade gefunden. Drei zusätzliche Freiheitsgrade werden beispielsweise durch Verwendung eines Entfernungsmessers und zweier Winkelkodierer gefunden, um die drei Dimensionskoordinaten des Retroreflektors **2710** zu erhalten. In einer weiteren Ausführungsform werden die drei Orientierungsfreiheitsgrade dadurch gefunden, dass ein Lichtstrahl durch einen Scheitelpunkt eines Würfecken-Retroreflektor **2710** zu einem Positionsdetektor gesendet wird, der eine lichtempfindliche Anordnung sein kann, um zwei Freiheitsgrade zu ermitteln, und dadurch, dass ein polarisierter Lichtstrahl, der derselbe Lichtstrahl sein kann, durch mindestens einen polarisierenden Strahlteiler gesendet wird, um einen dritten Freiheitsgrad zu ermitteln. In einer dritten Ausführungsform sendet die optoelektronische Anordnung **2790** ein Lichtmuster auf den 6-DOF-Projektor **2700**. In dieser Ausführungsform enthält das Schnittstellenbauteil **2712** eine Mehrzahl von linearen Lagedetektoren, die lineare lichtempfindliche Anordnungen sein können, um das Muster zu erfassen und aus diesem die drei Orientierungsfreiheitsgrade des 6-DOF-Projektors **2700** zu ermitteln. Viele andere optoelektronische Systeme **2790** sind möglich, um die sechs Freiheitsgrade des 6-DOF-Projektors **2700** zu ermitteln, wie einer Person mit durchschnittlichen Fertigkeiten auf diesem Gebiet bekannt ist. Der 6-DOF-Projektor **2700** enthält einen Körper **2714**, einen oder mehrere Retroreflektoren **2710**, **2711**, einen Projektor **2720**, ein wahlweise vorhandenes elektrisches Kabel **2736**, eine wahlweise vorhandene Batterie **2734**, ein Schnittstellenbauteil **2712**, ein Identifizierelement **2739**, Betätigungsknöpfe **2715**, eine Antenne **2738** und eine Elektronik-Leiterplatte **2732**. Das wahlweise vorhandene elektrische Kabel **2736**, die wahlweise vorhandene Batterie **2734**, das Schnittstellenbauteil **2712**, das Identifizierelement **2739**, die Betätigungsknöpfe **2715**, die Antenne **2738** und die Elektronik-Leiterplatte **2732** der Fig. 18 entsprechen dem Retroreflektor **2010**, dem wahlweise vorhandenen elektrischen Kabel **2036**, der wahlweise vorhandenen Batterie **2034**, dem Schnittstellenbauteil **2012**, dem Identifizierelement **2039**, den Betätigungsknöpfen **2015**, der An-

tenne **2038** bzw. der Elektronik-Leiterplatte **2032** der Fig. 14. Die Beschreibungen für diese einander entsprechenden Elemente sind dieselben, wie sie weiter oben erörtert worden sind, und sollen hier nicht wiederholt werden. Zusätzliche Retroreflektoren wie beispielsweise der Retroreflektor **2711** können dem ersten Retroreflektor **2710** zugefügt werden, um den Lasertracker in die Lage zu versetzen, den 6-DOF-Scanner von einer Vielfalt von Richtungen aus zu verfolgen, wodurch eine größere Flexibilität in den Richtungen erzielt wird, in die das Licht vom 6-DOF-Projektor **2700** projiziert werden kann.

[0152] Es soll nun nochmals auf Fig. 15 Bezug genommen werden. Es ist festzustellen, dass für den Fall, dass die Scanner-Lichtquelle **2520** als Projektor zur Anzeige eines Musters dient, und zwar zusätzlich zur Bereitstellung einer Lichtquelle für die Benutzung in Kombination mit der Scanner-Kamera **2530** (zur Ermittlung der drei Dimensionskoordinaten des Werkstückes), auch andere Verfahren zum Auffinden der sechs Freiheitsgrade des Ziels **2500** benutzt werden können. Derartige Verfahren können die mit Bezug auf Fig. 18 erörterten Verfahren enthalten, auch wenn das in Fig. 15 nicht explizit dargestellt ist.

[0153] Fig. 17 und Fig. 18 sind sich ähnlich, abgesehen davon, dass beim 6-DOF-Projektor von Fig. 18 ein breiterer Bereich von 6-DOF-Messmethoden als beim 6-DOF-Projektor von Fig. 17 benutzt werden kann. Alle Angaben, die über die Anwendungen des 6-DOF-Projektors **2600** gemacht worden sind, treffen auch auf den 6-DOF-Projektor **2700** zu.

[0154] Fig. 19 zeigt eine Ausführungsform eines 6-DOF-Sensors **4900**, der in Verbindung mit einem optoelektronischen System **2790** benutzt wird. Das optoelektronische System **2790** kann jede beliebige Vorrichtung sein, die imstande ist, die sechs Freiheitsgrade eines 6-DOF-Sensors **4900** zu messen. In einer Ausführungsform enthält das optoelektronische System **2790** eine oder mehrere Kameras, welche die bestrahlten Lichtquellen der Retroreflektoren auf dem 6-DOF-Sensor **4900** erfassen. Durch Markieren der relativen Positionen der Lichtquellenbilder auf der einen oder auf mehreren Kameras werden die drei Orientierungsfreiheitsgrade gefunden. Drei zusätzliche Freiheitsgrade werden beispielsweise durch Benutzung eines Entfernungsmessers und zweier Winkelkodierer gefunden, um die drei Dimensionskoordinaten des Retroreflektors **4910** zu erhalten. In einer anderen Ausführungsform werden die drei Orientierungsfreiheitsgrade in der Weise gefunden, dass ein Lichtstrahl durch einen Scheitelpunkt eines Würfecken-Retroreflektors **4910** hindurch zu einem Positionsdetektor gesendet wird, der eine lichtempfindliche Anordnung sein kann, um zwei Freiheitsgrade zu ermitteln, und indem ein polarisierter Lichtstrahl, der derselbe Lichtstrahl sein kann, durch mindestens einen polarisierenden Strahlteiler gesendet wird, um

den dritten Freiheitsgrad zu ermitteln. In einer dritten Ausführungsform sendet die optoelektronische Anordnung **2790** ein Lichtmuster auf den 6-DOF-Sensor **4900**. In dieser Ausführungsform enthält das Schnittstellenbauteil **4912** eine Mehrzahl von linearen Lagedetektoren, die lineare lichtempfindliche Anordnungen sein können, um das Muster zu erfassen und aus diesem die drei Orientierungsfreiheitsgrade des 6-DOF-Projektors **2700** zu ermitteln. Es sind viele andere optoelektronische System **2790** möglich, um die sechs Freiheitsgrade des 6-DOF-Projektors **2700** zu ermitteln, wie einer Person mit durchschnittlichen Fertigkeiten auf diesem Gebiet bekannt ist. Der 6-DOF-Sensor **4900** enthält einen Körper **4914**, einen oder mehrere Retroreflektoren **4910**, **4911**, einen Sensor **4920**, eine wahlweise vorhandene Quelle **4950**, ein wahlweise vorhandenes elektrisches Kabel **4936**, eine wahlweise vorhandene Batterie **4934**, ein Schnittstellenbauteil **4912**, ein Identifizierelement **4939**, Betätigungsknöpfe **4916**, eine Antenne **4938** und eine Elektronik-Leiterplatte **4932**. Das wahlweise vorhandene elektrische Kabel **4936**, die wahlweise vorhandene Batterie **4934**, das Schnittstellenbauteil **4912**, das Identifizierelement **4939**, die Betätigungsknöpfe **4916**, die Antenne **4938** und die Elektronik-Leiterplatte **4932** von Fig. 18 entsprechen dem Retroreflektor **2010**, dem wahlweisen vorhandenen elektrischen Kabel **2036**, der wahlweise vorhandenen Batterie **2034**, dem Schnittstellenbauteil **2012**, dem Identifizierelement **2039**, den Betätigungsknöpfen **2016**, der Antenne **2038** bzw. der Elektronik-Leiterplatte **2032** in Fig. 14. Die Beschreibungen für diese einander entsprechenden Elemente sind dieselben, wie sie weiter oben angeführt worden sind, und sollen hier nicht wiederholt werden. Zusätzliche Retroreflektoren wie beispielsweise der Retroreflektor **4911** können dem ersten Retroreflektor **4910** zugefügt werden, um den Lasertracker in die Lage zu versetzen, den 6-DOF-Scanner von einer Vielfalt von Richtungen aus zu verfolgen, wodurch eine größere Flexibilität in den Richtungen erzielt wird, in denen ein Objekt vom 6-DOF-Sensor **4900** abgetastet werden kann.

[0155] Der Sensor **4920** kann einer aus einer Vielfalt von Typen sein. Zum Beispiel kann er auf die optische Energie im infraroten Bereich des Spektrums reagieren, also auf Licht mit Wellenlängen von 0,7 bis 20 Mikrometer, wodurch es möglich wird, die Temperatur einer Objektoberfläche am Punkt **4924** zu ermitteln. Der Sensor **4920** ist dergestalt konfiguriert, dass er Infrarotenergie aufnimmt, die von dem Objekt **4960** über ein Gesichtsfeld **4940** ausgesendet wird, das im Allgemeinen um eine Achse **4922** zentriert ist. Die dreidimensionalen Koordinaten des Punktes auf der Objektoberfläche, dem die gemessene Oberflächentemperatur entspricht, können dadurch gefunden werden, dass die Achse **4922** auf das Objekt **4960** projiziert und der Auftreffpunkt **4924** ermittelt wird. Um den Auftreffpunkt ermitteln zu können, muss die Beziehung zwischen dem Objekt-Bezugssystem

und dem Geräte-Bezugssystem (dem Tracker-Bezugssystem) bekannt sein. Als Alternative kann auch die Beziehung zwischen dem Objekt-Bezugssystem und dem Bezugssystem des 6-DOF-Sensors bekannt sein, da die Beziehung zwischen Tracker-Bezugssystem und dem Sensor-Bezugssystem bereits bekannt ist. Als Alternative kann die Beziehung zwischen dem Objekt-Bezugssystem und dem Bezugssystem des 6-DOF-Sensors bekannt sein, da die Beziehung zwischen dem Bezugssystem des Trackers und dem 6-DOF-Sensor bereits aus Messungen bekannt ist, die vom Tracker am 6-DOF-Sensor durchgeführt worden sind. Ein Weg zur Bestimmung der Beziehung zwischen dem Objekt-Bezugssystem und dem Tracker-Bezugssystem besteht darin, die dreidimensionalen Koordinaten von drei Punkten auf der Objektoberfläche zu messen. Indem man über Informationen über das Objekt verfügt, was die drei gemessenen Punkte betrifft, sind auch alle Punkte auf der Objektoberfläche bekannt. Informationen über das Objekt in Bezug auf die drei gemessenen Punkte können beispielsweise aus CAD-Zeichnungen oder aus früheren Messungen, die mit irgend einem Typ von Koordinatenmessgerät erfolgt sind, erhalten werden.

[0156] Neben der Messung der emittierten Infrarotenergie kann das elektromagnetische Spektrum über einen weiten Bereich von Wellenlängen – oder gleichwertig ausgedrückt: Frequenzen – gemessen oder abgetastet werden. Zum Beispiel kann die elektromagnetische Energie im optischen Bereich liegen und kann die Bereiche der sichtbaren, ultravioletten, infraroten und im Terahertzgebiet liegenden Strahlung enthalten. Einige Eigenschaften wie beispielsweise die thermische Energie, die vom Objekt je nach der Temperatur des Objekts emittiert wird, sind Eigenschaften, die dem Objekt innewohnen, und erfordern daher keine äußere Bestrahlung. Weitere Eigenschaften wie die Farbe eines Objekts hängen von der Hintergrundbeleuchtung ab, und die erfassten Ergebnisse können je nach den Eigenschaften der Beleuchtung schwanken, und zwar je nach der Menge an optischer Leistung, die in jeder der Wellenlängen der Bestrahlung verfügbar ist.

[0157] Zu den gemessenen optischen Eigenschaften kann die von einem optischen Detektor aufgenommene optische Leistung gehören, welche die Energie einer Vielzahl von Wellenlängen umfassen kann, um je nach der Ansprechempfindlichkeit des optischen Detektors auf jede Wellenlänge ein elektrisches Antwortsignal zu erzeugen.

[0158] In einigen Fällen kann das Objekt durch die Quelle **4950** absichtlich eine Bestrahlung erhalten. Falls ein Experiment durchgeführt wird, bei dem gewünscht wird, dass sich die angewendete Bestrahlung von der Hintergrundbeleuchtung unterscheidet, kann das angewendete Licht moduliert werden wie

beispielsweise durch eine Sinuswelle oder eine quadratische Wellenform. Ein Lock-in-Verstärker oder ein ähnliches Verfahren kann dann in Verbindung mit dem optischen Detektor im Sensor **4920** angewendet werden, um genau das angewendete Licht herauszuholen.

[0159] Weitere Beispiele für die Aufnahme von elektromagnetischer Strahlung durch den Sensor **4940** umfassen die Aufnahme von Röntgenstrahlen bei Wellenlängen, die kürzer sind als diejenigen, die im ultravioletten Licht enthalten sind, und die Aufnahme von Millimeterwellen, Mikrometerwellen, Hochfrequenzwellen usw. sind Beispiele für Wellenlängen, die länger sind als diejenigen, die in Terahertz-Wellen und anderen optischen Wellen enthalten sind. Röntgenstrahlen können benutzt werden, damit in Materialien eingedrungen werden kann, um Information über innere Eigenschaften des Objekts zu erhalten wie beispielsweise über das Vorhandensein von Defekten oder das Vorliegen von mehr als einem Typ an Material. Die Quelle **4950** kann benutzt werden, um Röntgenstrahlen auszusenden, damit das Objekt **4960** bestrahlt wird. Durch Bewegen des 6-DOF-Sensors **4900** und Beobachtung des Vorhandenseins eines Defekts oder einer Materialgrenzfläche aus einer Mehrzahl von Ansichten ist es möglich, die dreidimensionalen Koordinaten des Defekts oder der Materialgrenzfläche im Innern des Materials zu ermitteln. Falls ein Sensor **4940** mit einem Projektor wie beispielsweise dem Projektor **2720** in **Fig. 17** und **Fig. 18** kombiniert wird, kann außerdem ein Muster auf eine Objekt Oberfläche projiziert werden, das angibt, wo Reparaturarbeiten ausgeführt werden müssen, um den Defekt instand zu setzen.

[0160] In einer Ausführungsform liefert die Quelle **4950** elektromagnetische Energie im elektrischen Bereich des Spektrums, also im Bereich der Millimeterwellen, Mikrometerwellen oder HF-Wellen. Mit den Wellen aus der Quelle wird das Objekt **4960** bestrahlt, und die reflektierten oder gestreuten Wellen werden vom Sensor **4920** erfasst. In einer Ausführungsform werden die elektrischen Wellen dazu benutzt um hinter Wände oder andere Objekt vorzudringen. Zum Beispiel könnte eine solche Vorrichtung dazu benutzt werden, das Vorhandensein von HF-Etiketten nachzuweisen. Auf diese Weise kann der 6-DOF-Sensor **4900** dazu benutzt werden, die Position von HF-Etiketten festzustellen, die sich überall in einer Fabrik befinden können. Es können neben den HF-Etiketten auch andere Objekte geortet werden. Zum Beispiel kann unter Verwendung eines 6-DOF-Scanners eine Quelle von HF-Wellen oder Mikrowellen geortet werden wie beispielsweise eine Schweißapparatur, die einen hohen Pegel an breitbandiger elektromagnetische Energie aussendet, welche die Computer oder anderen elektrischen Geräte stört,.

[0161] In einer Ausführungsform liefert die Quelle **4950** Ultraschallwellen, und der Sensor **4920** ist eine Ultraschall-Sensor. Ultraschall-Sensoren können einen Vorteil gegenüber optischen Sensoren haben, wenn klare Objekte, Flüssigkeitsniveaus oder stark reflektierende oder metallische Oberflächen abgetastet werden. Im medizinischen Zusammenhang können Ultraschallsensoren dazu benutzt werden, die Position von betrachteten Merkmalen in Bezug auf den Körper eines Patienten festzustellen. Der Sensor **4920** kann ein chemischer Sensor sein, der dergestalt konfiguriert ist, dass er chemische Spurenbestandteile nachweist und die chemische Signatur für die nachgewiesenen chemischen Bestandteile liefert. Der Sensor **4920** kann dergestalt konfiguriert sein, dass er das Vorhandensein eines radioaktiven Zerfalls ermittelt, wodurch angezeigt wird, ob ein Objekt Risiken für den Aufenthalt von Personen birgt. Der Sensor **4920** kann dergestalt konfiguriert sein, dass er die Oberflächentextur misst wie beispielsweise die Oberflächenrauigkeit, die Welligkeit und den Schlag. Der Sensor kann ein Rautiefenmesser, ein Interferometer, ein konfokales Mikroskop, ein Kapazitätsmesser oder ein ähnliches Gerät sein. Ein 6-DOF-Scanner kann auch dazu benutzt werden, die Oberflächentextur zu messen. Andere Objekteigenschaften können unter Verwendung von weiteren Typen von Sensoren gemessen werden, die hier nicht erwähnt worden sind.

[0162] **Fig. 19A** zeigt eine Ausführungsform eines 6-DOF-Sensors **4990**, der genau so ist wie der 6-DOF-Sensor **4900** der **Fig. 19**, jedoch mit der Ausnahme, dass der Sensor **4992** des 6-DOF-Sensors **4990** ein Objektiv **4923** und eine lichtempfindliche Anordnung **4924** enthält. Ein emittierter oder reflektierter Energiestrahle **4925** aus den Inneren des Gesichtsfeldes **4940** des 6-DOF-Sensors taucht am Punkt **4926** auf der Objekt Oberfläche **4960** auf, tritt durch das Perspektivitätszentrum **4927** des Sensorobjektivs **4923**, um am Punkt **4928** der lichtempfindlichen Anordnung **4924** anzukommen. Eine Quelle **4950** kann ein Gebiet der Objekt Oberfläche **4960** bestrahlen, wodurch eine Reaktion auf der lichtempfindlichen Anordnung erzeugt wird. Jeder Punkt ist den dreidimensionalen Koordinaten der erfassten Eigenschaft auf der Objekt Oberfläche zugeordnet, und jeder dreidimensionale Punkt wird durch die drei Orientierungsfreiheitsgrade, die drei Translationsfreiheitsgrade, die Geometrie der Kamera und des Projektors in der Sensoranordnung und die Position der lichtempfindlichen Anordnung entsprechend dem Punkt auf der Objekt Oberfläche festgelegt. Ein Beispiel für den Sensor **4922** ist ein thermische Sensoranordnung, die in der Weise reagiert, dass sie die Temperatur an einer Vielfalt von Bildpunkten liefert, wobei jeder charakteristische Sensorwert einer dreidimensionalen Oberflächenkoordinate zugeordnet ist.

[0163] Fig. 20 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **5000** in einem Verfahren zur Messung von drei oder mehr als drei Flächensätzen mit Hilfe eines Koordinatenmessgeräts mit einem Zielscanner veranschaulicht, wobei jeder der drei oder mehr als drei Flächensätze dreidimensionale Koordinaten eines Punktes auf der Objektoberfläche in einem Geräte-Bezugssystem darstellt, jeder Flächensatz drei Werte enthält und das Geräte-Bezugssystem dem Koordinatenmessgerät zugeordnet ist.

[0164] Der Schritt **5005** besteht darin, den Zielscanner bereit zu stellen mit einem Körper, einem ersten Retroreflektor, einem Projektor, einer Kamera und einem Scanner-Prozessor, wobei der erste Retroreflektor, der Projektor und die Kamera starr am Körper befestigt sind und der Zielscanner vom Koordinatenmessgerät mechanisch getrennt ist. In diesem Schritt enthält der Projektor ein Quellen-Lichtmuster, wobei dieses Quellen-Lichtmuster sich auf einer Quellebene befindet und mindestens drei nicht-kollineare Musterelemente enthält, und der Projektor ist dergestalt konfiguriert, dass er das Quellen-Lichtmuster auf das Objekt projiziert, damit auf dem Objekt ein Objekt-Lichtmuster entsteht, und jedes der mindestens drei nicht-kollinearen Musterelemente mindestens einem Flächensatz entspricht. Auch enthält in diesem Schritt die Kamera ein Kameraobjektiv und eine lichtempfindliche Anordnung, und das Kameraobjektiv ist dergestalt konfiguriert, dass es das Objekt-Lichtmuster auf die lichtempfindliche Anordnung als ein Bild-Lichtmuster abbildet, die lichtempfindliche Anordnung Kamera-Bildpunkte enthält, die lichtempfindliche Anordnung dergestalt konfiguriert ist, dass sie für jeden Kamera-Bildpunkt einen entsprechenden digitalen Bildpunktwert erzeugt, der einer Lichtmenge entspricht, die von dem Kamera-Bildpunkt aus dem Bild-Lichtmuster aufgenommen wird.

[0165] Der Schritt **5010** besteht darin, dass das Koordinatenmessgerät bereit gestellt wird, wobei dieses Koordinatenmessgerät dergestalt konfiguriert ist, dass es einen Translationssatz und einen Orientierungssatz misst; der Translationssatz die Werte der drei Translationsfreiheitsgrade des Zielscanners in dem Geräte-Bezugssystem darstellt und der Orientierungssatz die Werte der drei Orientierungsfreiheitsgrade des Zielscanners in dem Geräte-Bezugssystem darstellt; der Translationssatz und der Orientierungssatz ausreichend sind, um die Position und die Orientierung des Zielscanners im Raum festzulegen; das Koordinatenmessgerät dergestalt konfiguriert ist, dass es einen ersten Lichtstrahl zum ersten Retroreflektor sendet und einen zweiten Lichtstrahl vom ersten Retroreflektor empfängt, wobei dieser zweite Lichtstrahl ein Teil des ersten Lichtstrahls ist; das Koordinatenmessgerät einen Geräte-Prozessor enthält, wobei dieser Geräte-Prozessor dergestalt konfiguriert ist, dass er den Orientierungssatz

und den Translationssatz ermittelt und der Translationssatz zumindest teilweise auf dem zweiten Lichtstrahl beruht. Auch sind in diesem Schritt der Scanner-Prozessor und der Geräte-Prozessor dergestalt gemeinsam konfiguriert, dass die drei oder mehr als drei Flächensätze ermittelt werden, wobei jeder der Flächensätze zumindest teilweise auf dem Translationssatz, dem Orientierungssatz und den digitalen Bildpunktwerten beruht.

[0166] Der Schritt **5015** besteht darin, dass das Quellen-Lichtmuster ausgewählt wird.

[0167] Der Schritt **5020** besteht darin, dass das Quellen-Lichtmuster auf das Objekt projiziert wird, um das Objekt-Lichtmuster zu erzeugen.

[0168] Der Schritt **5025** besteht darin, dass das Objekt-Lichtmuster auf die lichtempfindliche Anordnung abgebildet wird, um das Bild-Lichtmuster zu erzeugen

[0169] Der Schritt **5030** besteht darin, die digitalen Bildpunktwerte für das Bild-Lichtmuster zu gewinnen.

[0170] Der Schritt **5035** besteht darin, dass der erste Lichtstrahl vom Koordinatenmessgerät zum ersten Retroreflektor gesendet wird.

[0171] Der Schritt **5040** besteht darin, dass der zweite Lichtstrahl, der vom Retroreflektor kommt, empfangen wird.

[0172] Der Schritt **5045** besteht darin, dass der Orientierungssatz und der Translationssatz gemessen werden und der Translationssatz zumindest teilweise auf dem zweiten Lichtstrahl beruht.

[0173] Der Schritt **5050** besteht darin, die Flächensätze zu ermitteln, die jedem der mindestens drei nicht-kollinearen Musterelemente entsprechen.

[0174] Der Schritt **5055** besteht darin, die Flächensätze zu sichern. Das Verfahren **5000** schließt mit der Markierung A ab.

[0175] Fig. 21 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **5100** in einem Verfahren veranschaulicht, welches der Markierung A von Fig. 20 folgt.

[0176] Der Schritt **5105** besteht darin, dass mit der Tastsonde die Objektoberfläche berührt wird.

[0177] Der Schritt **5110** besteht darin, dass der Translationssatz und der Orientierungssatz gemessen werden.

[0178] Der Schritt **5115** besteht darin, dass ein erster Flächensatz gemessen wird, der zumindest teilweise

auf dem Translationssatz und dem Orientierungssatz beruht.

[0179] Fig. 22 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **5200** in einem Verfahren veranschaulicht, das der Markierung A von Fig. 20 folgt. Der Schritt **5205** besteht darin, die Flächensätze auszuwerten. Der Schritt **5210** besteht darin, dem Nutzer anzuzeigen, dass ein Gebiet der Objektoberfläche mit der Tastsonde auf der Grundlage von zumindest einem Teil der ausgewerteten Flächensätze zu messen ist.

[0180] Fig. 23 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **5300** in einem Verfahren veranschaulicht, das der Markierung A von Fig. 20 folgt. Der Schritt **5305** besteht darin, ein Muster in den ersten Retroreflektor einzubringen. Der Schritt **5310** besteht darin, ein zweites optisches System bereitzustellen, das ein zweites Objektiv und eine zweite lichtempfindliche Anordnung enthält, wobei das zweite Objektiv dergestalt konfiguriert ist, dass es ein zweites Bild von mindestens einem Teil des Retroreflektors auf der zweiten lichtempfindlichen Anordnung bildet. Der Schritt **5315** besteht darin, das zweite Bild in einen zweiten Satz von digitalen Werten umzuwandeln. Der Schritt **5320** besteht darin, den Orientierungssatz auf der Grundlage von zumindest einem Teil des zweiten Satzes von digitalen Daten zu berechnen.

[0181] Fig. 24 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **5400** in einem Verfahren veranschaulicht, bei dem mit einem Koordinatenmessgerät und einem Zielsensor eine Empfindlichkeitseigenschaft und ein dieser Empfindlichkeitseigenschaft zugeordneter Flächensatz gemessen werden, wobei dieser Flächensatz die dreidimensionalen Koordinaten eines Punktes auf der Objektoberfläche in einem Geräte-Bezugssystem darstellt, jeder Flächensatz drei Werte enthält und das Geräte-Bezugssystem dem Koordinatenmessgerät zugeordnet ist.

[0182] Der Schritt **5405** besteht darin, den Zielscanner bereitzustellen, der einen Körper, einen ersten Retroreflektor, einen Sensor und einen Sensor-Prozessor umfasst, wobei der erste Retroreflektor und der Sensor starr am Körper befestigt sind, der Zielscanner vom Koordinatenmessgerät mechanisch getrennt ist, der Zielsensor dergestalt konfiguriert ist, dass er die Empfindlichkeitseigenschaft misst und diese Empfindlichkeitseigenschaft ein Wert ist, der einer Größe zugeordnet ist, die vom Sensor gemessen wird.

[0183] Der Schritt **5410** besteht darin, das Koordinatenmessgerät bereitzustellen, wobei dieses Koordinatenmessgerät dergestalt konfiguriert ist, dass es einen Translationssatz und einen Orientierungssatz misst, der Translationssatz die Werte der drei Translationsfreiheitsgrade des Zielsensors im Geräte-Bezugssystem darstellt und der Orientierungssatz

die Werte der drei Orientierungsfreiheitsgrade des Zielsensors im Geräte-Bezugssystem darstellt, der Translationssatz und der Orientierungssatz ausreichend sind, um die Position und die Orientierung des Zielscanners im Raum festzulegen; und ferner dieses Koordinatenmessgerät dergestalt konfiguriert ist, dass es einen ersten Lichtstrahl zum ersten Retroreflektor sendet und einen zweiten Lichtstrahl vom ersten Retroreflektor empfängt, und dieser zweite Lichtstrahl ein Teil des ersten Lichtstrahls ist; und dieses Koordinatenmessgerät einen Geräte-Prozessor enthält, wobei dieser Geräte-Prozessor dergestalt konfiguriert ist, dass er den Orientierungssatz und den Translationssatz ermittelt und der Translationssatz zumindest teilweise auf dem zweiten Lichtstrahl beruht, wobei der Geräte-Prozessor zusammen mit dem Sensor-Prozessor dergestalt gemeinsam konfiguriert ist, dass sie die Empfindlichkeitseigenschaft und den Flächensatz ermitteln, wobei der Flächensatz zumindest teilweise auf dem Translationssatz und dem Orientierungssatz beruht.

[0184] Der Schritt **5415** besteht darin, dass vom Koordinatenmessgerät an den ersten Retroreflektor der erste Lichtstrahl gesendet wird.

[0185] Der Schritt **5420** besteht darin, dass der zweite Lichtstrahl, der vom ersten Retroreflektor kommt, empfangen wird.

[0186] Der Schritt **5425** besteht darin, dass der Orientierungssatz und der Translationssatz gemessen werden, wobei der Translationssatz zumindest teilweise auf dem zweiten Lichtstrahl beruht.

[0187] Der Schritt **5430** besteht darin, den Flächensatz zu ermitteln.

[0188] Der Schritt **5435** besteht darin, die Empfindlichkeitseigenschaft zu erfassen.

[0189] Der Schritt **5440** besteht darin, den Flächensatz und die Empfindlichkeitseigenschaft zu sichern. Das Verfahren **5400** schließt mit der Markierung B ab.

[0190] Fig. 25 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **5500** in einem Verfahren veranschaulicht, das mit der Markierung B von Fig. 24 beginnt. Der Schritt **5505** besteht darin, ein Muster in den ersten Retroreflektor einzubringen.

[0191] Der Schritt **5510** besteht darin, ein optisches System bereitzustellen, das ein zweites Objektiv und eine zweite lichtempfindliche Anordnung umfasst, wobei das zweite Objektiv dergestalt konfiguriert ist, dass es von mindestens einem Teil des mit Muster versehenen Retroreflektors ein zweites Bild auf der zweiten lichtempfindlichen Anordnung bildet.

[0192] Der Schritt **5515** besteht darin, dass das zweite Bild in einen zweiten Satz von digitalen Werten umgewandelt wird.

[0193] Der Schritt **5520** besteht darin, dass der Orientierungssatz auf der Grundlage von zumindest einem Teil des zweiten Satzes von digitalen Werten berechnet wird.

[0194] Fig. 26. ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **5600** in einem Verfahren veranschaulicht, in dem erste Informationen an einen Nutzer eines Koordinatenmessgerätes dadurch übermittelt werden, dass ein erstes Muster mit einem ersten Ziel-Projektor projiziert wird.

[0195] Der Schritt **5605** besteht darin, den ersten Zielprojektor bereitzustellen, der ein Zielprojektor-Bezugssystem aufweist und einen Körper, einen ersten Retroreflektor und einen Projektor umfasst, wobei der erste Retroreflektor und der Projektor starr an dem Körper befestigt sind, der erste Zielprojektor mechanisch vom Koordinatenmessgerät getrennt ist, der Projektor dergestalt konfiguriert ist, dass er ein Lichtmuster in zwei Dimensionen projiziert und dieses Lichtmuster ein dreidimensionales Lichtmuster bildet, wenn es auf ein dreidimensionales Objekt trifft.

[0196] Der Schritt **5610** besteht darin, das Koordinatenmessgerät bereitzustellen, das ein Geräte-Bezugssystem aufweist, wobei dieses Koordinatenmessgerät dergestalt konfiguriert ist, dass es den Translationssatz und den Orientierungssatz misst, wobei der Translationssatz die Werte der drei Translationsfreiheitsgrade des ersten Zielprojektors im Geräte-Bezugssystem darstellt und der Orientierungssatz die Werte der drei Orientierungsfreiheitsgrade des ersten Zielprojektors im Geräte-Bezugssystem darstellt, der Translationssatz und der Orientierungssatz ausreichend sind, um die Position und Orientierung des ersten Zielprojektors im Raum festzulegen; das Koordinatenmessgerät dergestalt konfiguriert ist, dass es einen ersten Lichtstrahl zum ersten Retroreflektor sendet und einen zweiten Lichtstrahl vom ersten Retroreflektor empfängt, wobei der zweite Lichtstrahl ein Teil des ersten Lichtstrahl ist; das Koordinatenmessgerät einen Geräte-Prozessor aufweist, der dergestalt konfiguriert ist, dass er den Orientierungssatz und den Translationssatz ermittelt, wobei der Translationssatz zumindest teilweise auf dem zweiten Lichtstrahl beruht.

[0197] Schritt **5615** besteht darin, dass der erste Lichtstrahl vom Koordinatenmessgerät zum ersten Retroreflektor gesendet wird.

[0198] Der Schritt **5620** besteht darin, dass der zweite Lichtstrahl, der vom Retroreflektor kommt, empfangen wird.

[0199] Der Schritt **5625** besteht darin, dass der Translationssatz und der Orientierungssatz gemessen werden, wobei der Translationssatz zumindest teilweise auf dem zweiten Lichtstrahl beruht.

[0200] Der Schritt **5630** besteht darin, dass die erste zu übermittelnde Information ausgewählt wird, wobei diese erste Information ausgewählt wird aus der Gruppe, die aus einer Position auf dem Objekt, einer Mehrzahl von Positionen auf dem Objekt, einer von einem sich bewegenden Muster angezeigten Richtung, einer Meldung, die ein oder mehrere Symbole oder alphanumerische Zeichen enthält, einem verborgenen Merkmal, einer gemessenen Objekteigenschaft, einer modellierten Eigenschaft, einer vergrößerten Darstellung von Oberflächeneigenschaften, einem Muster in der Bedeutung einer Vorschrift und aus Kombinationen aus diesen besteht.

[0201] Der Schritt **5635** besteht darin, dass das erste Lichtmuster ermittelt wird, das der ersten Information entspricht.

[0202] Der Schritt **5640** besteht darin, dass das erste Muster gespeichert wird. Der Schritt **5645** besteht darin, dass vom Projektor aus das erste Lichtmuster auf das Objekt zumindest teilweise auf der Grundlage des Translationssatzes und des Orientierungssatzes projiziert wird. Das Verfahren **5600** schließt mit der Markierung C ab.

[0203] Fig. 27 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **5700** in einem Verfahren veranschaulicht, das mit der Markierung C von Fig. 26 beginnt. Der Schritt **5705** besteht darin, dass mit dem Koordinatenmessgerät gemessen wird, während der erste Zielprojektor weiterhin das erste Lichtmuster auf das Objekt projiziert.

[0204] Fig. 28 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **5800** in einem Verfahren veranschaulicht, das mit der Markierung C von Fig. 26 beginnt. Der Schritt **5805** besteht darin, dass ein zweiter Zielprojektor bereit gestellt wird, der einen dritten Retroreflektor aufweist. Der Schritt **5810** besteht darin, dass der erste Lichtstrahl zum dritten Retroreflektor gesendet wird. Der Schritt **5815** besteht darin, dass der zweite Lichtstrahl vom dritten Retroreflektor zum Koordinatenmessgerät zurück geführt wird.

[0205] Fig. 29 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **5900** in einem Verfahren veranschaulicht, das mit der Markierung C von Fig. 26 beginnt. Der Schritt **5905** besteht darin, dass ein Muster in den ersten Retroreflektor eingebracht wird. Der Schritt **5910** besteht darin, dass ein zweites optisches System bereit gestellt wird. Der Schritt **5915** besteht darin, dass das zweite Bild in einen zweiten Satz von digitalen Daten umgewandelt wird. Der Schritt **5920** besteht darin, dass der Orientierungssatz auf der Grundlage

von zumindest einem Teil des zweiten Satzes von digitalen Daten berechnet wird.

[0206] Fig. 30 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **6000** in einem Verfahren veranschaulicht, das mit der Markierung C von Fig. 26 beginnt. Der Schritt **6005** besteht darin, dass der erste Zielprojektor mit einem Lautsprecher bereit gestellt wird. Der Schritt **6010** besteht darin, dass die zweite zu übermittelnde Information ausgewählt wird. Der Schritt **6015** besteht darin, dass eine erste akustische Meldung, die der zweiten Information entspricht, festgelegt wird. Der Schritt **6020** besteht darin, dass die erste akustische Meldung vom Lautsprecher abgegeben wird.

[0207] Fig. 31 ist ein Ablaufdiagramm, das die Schritte **6100** zur Messung einer Mehrzahl von Flächensätzen auf einer Objektoberfläche mit einem Koordinatenmessgerät und einem Zielscanner veranschaulicht, wobei jeder der Flächensätze die dreidimensionalen Koordinaten eines Punktes auf der Objektoberfläche in einem Geräte-Bezugssystem darstellt, jeder Flächensatz drei Werte enthält und das Geräte-Bezugssystem dem Koordinatenmessgerät zugeordnet ist.

[0208] Der Schritt **6105** besteht darin, den Zielscanner bereitzustellen, der einen Körper, einen ersten Retroreflektor mit einem eingebrachten Muster, einen Projektor, eine Kamera und einen Scanner-Prozessor umfasst und in dem der erste Retroreflektor, der Projektor und die Kamera starr an dem Körper befestigt sind und der Zielscanner mechanisch vom Koordinatenmessgerät getrennt ist; und in dem der Projektor eine Lichtquelle enthält, diese Lichtquelle auf einer Quellebene angeordnet ist und eine Mehrzahl von kollinearen Musterelementen enthält und dieser Projektor dergestalt konfiguriert ist, dass er das Quellen-Lichtmuster auf das Objekt projiziert, damit auf dem Objekt ein Objekt-Lichtmuster gebildet wird und jedes der Musterelemente mindestens einem Flächensatz entspricht; und in dem die Kamera ein erstes Objektiv und eine erste lichtempfindliche Anordnung enthält und dieses erste Objektiv dergestalt konfiguriert ist, dass es das Objekt-Lichtmuster auf die erste lichtempfindliche Anordnung als Bild-Lichtmuster abbildet, die erste lichtempfindliche Anordnung Kamera-Bildpunkte enthält, die erste lichtempfindliche Anordnung dergestalt konfiguriert ist, dass sie für jeden Kamera-Bildpunkt einen entsprechenden digitalen Bildpunktwert erzeugt, der einer Lichtmenge entspricht, die vom Kamera-Bildpunkt aus dem Bild-Lichtmuster aufgenommen wird.

[0209] Der Schritt **6110** besteht darin, das Koordinatenmessgerät bereitzustellen, wobei dieses Koordinatenmessgerät dergestalt konfiguriert ist, dass es einen Translationssatz und einen Orientierungssatz misst, wobei der Translationssatz die Werte der drei

Translationsfreiheitsgrade des Zielscanners im Geräte-Bezugssystem darstellt, und der Orientierungssatz die Werte der drei Orientierungsfreiheitsgrade des Zielscanners im Geräte-Bezugssystem darstellt und der Translationssatz und der Orientierungssatz ausreichend sind, um die Position und die Orientierung des Zielscanners im Raum zu ermitteln; dieses Koordinatenmessgerät ferner dergestalt konfiguriert ist, dass es einen ersten Lichtstrahl zum ersten Retroreflektor sendet und einen zweiten Lichtstrahl vom ersten Retroreflektor aufnimmt, wobei der zweite Lichtstrahl ein Teil des ersten Lichtstrahles ist; und dieses Koordinatenmessgerät einen ersten Geräte-Prozessor enthält, wobei dieser Geräte-Prozessor dergestalt konfiguriert ist, dass er den Orientierungssatz und den Translationssatz ermittelt, und der Translationssatz zumindest teilweise auf dem zweiten Lichtstrahl beruht; ferner das Koordinatenmessgerät ein zweites optisches System enthält, und dieses zweite optische System ein zweites Objektiv und eine zweite lichtempfindliche Anordnung enthält, wobei dieses zweite Objektiv dergestalt konfiguriert ist, dass es ein zweites Bild von mindestens einem Teil des ersten Retroreflektors auf der zweiten lichtempfindlichen Anordnung bildet; und dieses Koordinatenmessgerät dergestalt konfiguriert ist, dass es das zweite Bild in einen zweiten Satz von digitalen Werten umwandelt und den Orientierungssatz auf der Grundlage von zumindest einem Teil des zweiten Satzes von digitalen Werten berechnet, wobei dieser Geräte-Prozessor zusammen mit dem Scanner-Prozessor gemeinsam dergestalt konfiguriert ist, dass diese die Mehrzahl von Flächensätzen ermitteln, wobei jeder dieser Flächensätze zumindest teilweise auf dem Translationssatz, dem Orientierungssatz und den digitalen Bildpunktwerten beruht.

[0210] Der Schritt **6115** besteht darin, das Quellen-Lichtmuster auszuwählen.

[0211] Der Schritt **6120** besteht darin, dass das Quellen-Lichtmuster auf das Objekt projiziert wird, um das Objekt-Lichtmuster zu erzeugen.

[0212] Der Schritt **6125** besteht darin, dass das Objekt-Lichtmuster auf die lichtempfindliche Anordnung abgebildet wird, um das Bild-Lichtmuster zu erzeugen

[0213] Der Schritt **6130** besteht darin, die digitalen Bildpunktwerte für das Bild-Lichtmuster zu gewinnen.

[0214] Der Schritt **6135** besteht darin, dass der erste Lichtstrahl vom Koordinatenmessgerät zum ersten Retroreflektor gesendet wird.

[0215] Der Schritt **6140** besteht darin, dass der zweite Lichtstrahl, der vom Retroreflektor kommt, empfangen wird.

[0216] Der Schritt **6145** besteht darin, dass der Orientierungssatz und der Translationssatz auf der Grundlage von zumindest einem Teil des zweiten Lichtstrahls gemessen werden.

[0217] Der Schritt **6150** besteht darin, die Flächensätze zu ermitteln, die der Mehrzahl von kollinearen Musterelementen entsprechen.

[0218] Der Schritt **6155** besteht darin, die Flächensätze zu sichern.

[0219] Fig. 32 ist ein Ablaufdiagramme, das die Schritte **6200** zur Messung einer Mehrzahl von Flächensätzen auf einer Objektoberfläche mit einem Koordinatenmessgerät und einem Zielscanner veranschaulicht, wobei jeder der Flächensätze die dreidimensionalen Koordinaten eines Punktes auf der Objektoberfläche in einem Geräte-Bezugssystem darstellt, jeder Flächensatz drei Werte enthält und das Geräte-Bezugssystem dem Koordinatenmessgerät zugeordnet ist.

[0220] Der Schritt **6205** besteht darin, einen Zielscanner bereitzustellen, der einen Körper, einen ersten Retroreflektor, einen Projektor eine Kamera und einen Scanner-Projektor umfasst und in dem der erste Retroreflektor, der Projektor und die Kamera starr an dem Körper befestigt sind und der Zielscanner vom Koordinatenmessgerät mechanisch getrennt ist; in dem der Projektor ein Quellen-Lichtmuster enthält und dieses Quellen-Lichtmuster auf einer Quellebene angeordnet ist und eine Mehrzahl von kollinearen Musterelementen enthält, der Projektor dergestalt konfiguriert ist, dass er das Quellen-Lichtmuster auf das Objekt projiziert, damit auf dem Objekt ein Objekt-Lichtmuster gebildet wird und jedes der Musterelemente mindestens einem Flächensatz entspricht; und in dem die Kamera ein erstes Objektiv und eine erste lichtempfindliche Anordnung enthält und das erste Objektiv dergestalt konfiguriert ist, dass es das Objekt-Lichtmuster auf die erste lichtempfindliche Anordnung als Bild-Lichtmuster abbildet, und die erste lichtempfindliche Anordnung Kamera-Bildpunkte enthält, wobei diese erste lichtempfindliche Anordnung dergestalt konfiguriert ist, dass sie für jeden Kamera-Bildpunkt einen entsprechenden digitalen Bildpunktwert erzeugt, der einer Lichtmenge entspricht, die vom Kamera-Bildpunkt aus dem Bild-Lichtmuster aufgenommen wird.

[0221] Der Schritt **6210** besteht darin, das Koordinatenmessgerät bereitzustellen, wobei dieses Koordinatenmessgerät dergestalt konfiguriert ist, dass es einen Translationssatz und einen Orientierungssatz misst, wobei der Translationssatz die Werte der drei Translationsfreiheitsgrade des Zielscanners im Geräte-Bezugssystem darstellt und der Orientierungssatz die Werte der drei Orientierungsfreiheitsgrade des Zielscanners im Geräte-Bezugssystem darstellt

und der Translationssatz und der Orientierungssatz ausreichend sind, um die Position und die Orientierung des Zielscanners im Raum zu ermitteln; das Koordinatenmessgerät dergestalt konfiguriert ist, dass es einen ersten Lichtstrahl zum ersten Retroreflektor sendet und einen zweiten Lichtstrahl vom ersten Retroreflektor aufnimmt, wobei der zweite Lichtstrahl ein Teil des ersten Lichtstrahles ist; in dem der Geräte-Prozessor und der Scanner-Prozessor gemeinsam dergestalt konfiguriert sind, dass sie die Mehrzahl von Flächensätzen ermitteln, wobei jeder dieser Flächensätze zumindest teilweise auf dem Translationssatz, dem Orientierungssatz und den digitalen Bildpunktwerten beruht.

[0222] Der Schritt **6215** besteht darin, das Quellen-Lichtmuster auszuwählen.

[0223] Der Schritt **6220** besteht darin, dass das Quellen-Lichtmuster auf das Objekt projiziert wird, um das Objekt-Lichtmuster zu erzeugen.

[0224] Der Schritt **6225** besteht darin, dass das Objekt-Lichtmuster auf die lichtempfindliche Anordnung abgebildet wird, um das Bild-Lichtmuster zu erzeugen.

[0225] Der Schritt **6230** besteht darin, die digitalen Bildpunktwerte für das Bild-Lichtmuster zu gewinnen.

[0226] Der Schritt **6235** besteht darin, dass der erste Lichtstrahl vom Koordinatenmessgerät zum ersten Retroreflektor gesendet wird.

[0227] Der Schritt **6240** besteht darin, dass der zweite Lichtstrahl, der vom Retroreflektor kommt, empfangen wird.

[0228] Der Schritt **6245** besteht darin, dass der Orientierungssatz und der Translationssatz gemessen werden, wobei der Translationssatz zumindest teilweise auf dem zweiten Lichtstrahl beruht.

[0229] Der Schritt **6250** besteht darin, die Flächensätze zu ermitteln, die der Mehrzahl von kollinearen Musterelementen entsprechen.

[0230] Der Schritt **2155** besteht darin, die Flächensätze zu sichern.

[0231] Während die Erfindung unter Bezugnahme auf exemplarische Ausführungsformen beschrieben worden ist, werden die Personen mit Fachkenntnissen auf diesem Gebiet verstehen, dass vielfältige Änderungen vorgenommen werden können und dass Bauteile daraus durch äquivalente Bauteile ersetzt werden können, ohne dass vom Schutzzumfang der Erfindung abgewichen wird. Außerdem können viele Änderungen vorgenommen werden, um eine besondere Situation oder ein besonderes Material an den

Inhalt der Erfindung anzupassen, ohne dass vom wesentlichen Schutzzumfang der Erfindung abgewichen wird. Die Absicht besteht folglich darin, dass die Erfindung nicht auf die speziellen Ausführungsformen beschränkt ist, die hier als die beste Art und Weise zur Verwirklichung dieser Erfindung offenbart worden sind, sondern dass die Erfindung alle Ausführungsformen umfasst, die in den Schutzzumfang der angefügten Ansprüche fallen. Darüber hinaus wird mit dem Gebrauch von Ausdrücken wie erster, zweiter usw. nicht irgend eine Reihenfolge oder Wichtigkeit zum Ausdruck gebracht, sondern die Ausdrücke erster, zweiter usw. werden lediglich dazu benutzt, um ein Bauteil von einem anderen zu unterscheiden. Außerdem bedeuten die Ausdrücke ‚ein, eine, einer‘ usw. nicht eine mengenmäßige Begrenzung, sondern vielmehr das Vorhandensein von mindestens einem der angeführten Bauteile.

Patentansprüche

1. Verfahren (**5000**) zur Messung von drei oder mehr als drei Flächensätzen auf einer Objektoberfläche (**2528, 2590, 4790**) mit einem Koordinatenmessgerät (**10**) und einem Zielscanner (**2500, 2505**), wobei jeder der drei oder mehr als drei Flächensätze die dreidimensionalen Koordinaten eines Punktes (**2526, 2527, 2574, 4774**) auf der Objektoberfläche in einem Geräte-Bezugssystem darstellt, jeder Flächensatz drei Werte enthält, das Geräte-Bezugssystem mit dem Koordinatenmessgerät zugeordnet ist und das Verfahren die folgenden Schritte umfasst: die Bereitstellung des Zielscanners, welcher einen Körper (**2514**), einen ersten Retroreflektor (**2510**), einen Projektor (**2520, 2562, 4762**), eine Kamera (**2530, 2564, 4764**) und einen Scanner-Prozessor (**1584**) umfasst, wobei der erste Retroreflektor, der Projektor und die Kamera starr am Körper befestigt sind und der Zielscanner mechanisch vom Koordinatenmessgerät getrennt ist, bei welchem der Projektor ein Quellen-Lichtmuster (**2524, 2570, 4770**) enthält, dieses Quellen-Lichtmuster sich auf einer Quellebene befindet und mindestens drei nicht-kollineare Musterelemente aufweist; der Projektor dergestalt konfiguriert ist, dass er das Quellen-Lichtmuster auf das Objekt projiziert, damit auf dem Objekt ein Objekt-Lichtmuster gebildet wird; und jedes der mindestens drei nicht-kollinearen Musterelemente mindestens einem Flächensatz entspricht, bei welchem die Kamera ein Objektiv (**2532, 2582, 4782**) und eine lichtempfindliche Anordnung (**2534, 2580, 4780**) umfasst, wobei das Kameraobjektiv dergestalt konfiguriert ist, dass es das Objekt-Lichtmuster auf die erste lichtempfindliche Anordnung als ein Bild-Lichtmuster abbildet; die lichtempfindliche Anordnung Kamera-Bildpunkte enthält und diese lichtempfindliche Anordnung dergestalt konfiguriert ist, dass sie für jeden Kamera-Bildpunkt einen entsprechenden digitalen Bildpunkt-

wert erzeugt, welcher derjenigen Menge an Licht entspricht, die vom Kamera-Bildpunkt aus dem Bild-Lichtmuster (**5005**) erhalten wird; die Bereitstellung des Koordinatenmessgerätes, wobei dieses Koordinatenmessgerät dergestalt konfiguriert ist, dass es einen Translationssatz und einen Orientierungssatz misst, wobei der Translationssatz die Werte von drei Translationsfreiheitsgraden des Zielscanners in dem Geräte-Bezugssystem darstellt und der Orientierungssatz die Werte von drei Richtungsfreiheitsgraden des Zielscanners in dem Geräte-Bezugssystem darstellt; der Translationssatz und der Orientierungssatz ausreichend sind, um die Position und die Orientierung des Zielscanners im Raum festzulegen; dieses Koordinatenmessgerät dergestalt konfiguriert ist, dass es einen ersten Lichtstrahl (**784**) zum ersten Retroreflektor sendet und einen zweiten Lichtstrahl (**786**) vom ersten Retroreflektor empfängt, wobei der zweite Lichtstrahl ein Teil des ersten Lichtstrahls ist; dieses Koordinatenmessgerät einen Geräteprozessor (**1520, 1530-1536, 1540, 1550 1560, 1565, 1570, 1590**) enthält und dieser Geräteprozessor dergestalt konfiguriert ist, dass er den Orientierungssatz und den Translationssatz ermittelt, wobei der Translationssatz zumindest teilweise auf dem zweiten Lichtstrahl beruht; und der Scanner-Prozessor und der Geräte-Prozessor gemeinsam dergestalt konfiguriert sind, dass sie die drei oder mehr als drei Flächensätze ermitteln, wobei jeder dieser Flächensätze zumindest teilweise auf dem Translationssatz, dem Orientierungssatz und den digitalen Bildpunktwerten (**5010**) beruht; die Auswahl des Quellen-Lichtmusters (**5015**); das Projizieren des Quellen-Lichtmusters auf das Objekt, um das Objekt-Lichtmuster (**5020**) zu erhalten; das Abbilden des Objekt-Lichtmusters auf die lichtempfindliche Anordnung, um das Bild-Lichtmuster (**5025**) zu erhalten; das Gewinnen der digitalen Bildpunktwerte für das Bild-Lichtmuster (**5030**); das Senden des ersten Lichtstrahls vom Koordinatenmessgerät zum ersten Retroreflektor (**5035**); das Empfangen des zweiten Lichtstrahls vom ersten Retroreflektor (**5040**); das Messen des Orientierungssatzes und des Translationssatzes, wobei der Translationssatz zumindest teilweise auf dem zweiten Lichtstrahl (**5045**) beruht; das Ermitteln der Flächensätze, welche einem jeden der mindestens drei nicht kollinearen Musterelemente (**5050**) entsprechen; und das Sichern der Flächensätze (**5055**).

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei welchem: der Projektor ein virtuelles Licht-Perspektivitätszentrum (**2572, 4775**) und eine Projektor-Bezugsachse (**2576, 4776**) aufweist, wobei die Projektor-Bezugsachse durch das virtuelle Licht-Perspektivitätszentrum führt und das projizierte Quellen-Lichtmuster so erscheint, als trete es aus dem virtuellen Licht-Perspektivitätszentrum aus;

das Kameraobjektiv ein Kameraobjektiv-Perspektivitätszentrum (**2585, 4785**) und eine Kamera-Bezugsachse (**2586, 4786**) aufweist, wobei die Kamera-Bezugsachse durch das Kameraobjektiv-Perspektivitätszentrum führt;

der Zielscanner eine Grundlinie (**2588, 4788**), eine Grundlinienlänge (**2592, 4792**), einen Grundlinie-Projektorwinkel (**2594, 4794**) und einen Grundlinie-Kamera-Winkel (**2596, 4796**) aufweist, wobei die Grundlinie ein Linienabschnitt ist, welcher das virtuelle Licht-Perspektivitätszentrum und das Kameraobjektiv-Perspektivitätszentrum verbindet, die Grundlinienlänge eine bestimmte Länge der Grundlinie ist, der Grundlinie-Projektor-Winkel der Winkel zwischen der Projektor-Bezugsachse und der Grundlinie ist, der Grundlinie-Kamera-Winkel der Winkel zwischen der Grundlinie und der Kamera-Bezugsachse ist; und der Schritt der Bereitstellung des Koordinatenmessgerätes außerdem die Bereitstellung des Koordinatenmessgerätes mit dem Geräte-Prozessor enthält, welcher gemeinsam mit dem Scanner-Prozessor dergestalt konfiguriert ist, dass die drei oder mehr als drei Flächensätze ermittelt werden, wobei jeder der Flächensätze außerdem zumindest teilweise auf der Grundlinienlänge, dem Kamera-Grundlinie-Winkel und dem Projektor-Grundlinie-Winkel beruht.

3. Verfahren nach Anspruch 2, bei welchem der Schritt der Bereitstellung des Zielscanners außerdem die Bereitstellung eines Projektorobjektivs enthält, welches dergestalt konfiguriert ist, dass es das Quellen-Lichtmuster projiziert, das virtuelle Licht-Perspektivitätszentrum ein Perspektivitätszentrum des Projektorobjektivs ist, die Projektor-Bezugsachse die optische Achse des Projektorobjektivs ist und die Kamera-Bezugsachse die optische Achse des Kameraobjektivs ist.

4. Verfahren nach Anspruch 1, bei welchem der Schritt der Bereitstellung des Koordinatenmessgerätes außerdem die Bereitstellung eines solchen Koordinatenmessgerätes umfasst, welches einen ersten Motor (**2125**), einen zweiten Motor (**2155**), eine erste Winkelmessvorrichtung (**2120**), eine zweite Winkelmessvorrichtung (**2150**), einen Entfernungsmesser (**160, 120**), einen Positionsdetektor (**151**), ein Steuerungssystem (**1520, 1530, 1540, 1550**) und einen Geräte-Prozessor enthält, wobei der erste Motor und der zweite Motor gemeinsam dergestalt konfiguriert sind, dass sie den ersten Lichtstrahl in eine erste Richtung lenken, wobei diese erste Richtung durch einen ersten Drehwinkel um eine erste Achse (**20**) und einen zweiten Drehwinkel um eine zweite Achse (**18**) festgelegt ist und der erste Drehwinkel durch den ersten Motor und der zweite Drehwinkel durch den zweiten Motor erzeugt werden; und die erste Winkelmesseinrichtung dergestalt konfiguriert ist, dass sie den ersten Drehwinkel misst, und die zweite Winkelmesseinrichtung dergestalt konfiguriert ist, dass sie den zweiten Drehwinkel misst; der Entfernungsmes-

ser dergestalt konfiguriert ist, dass er die erste Entfernung vom Koordinatenmessgerät zum ersten Retroreflektor misst; der Positionsdetektor dergestalt konfiguriert ist, dass er einen zweiten Teil des zweiten Lichtstrahls empfängt und ein erstes Signal an das Steuerungssystem sendet, wobei das erste Signal als Reaktion auf die Position des zweiten Teils auf dem Positionsdetektor erzeugt wird; das Steuerungssystem dergestalt konfiguriert ist, dass es ein zweites Signal an den ersten Motor sendet und dass es ein drittes Signal an den zweiten Motor sendet und dass es die erste Richtung des ersten Lichtstrahls auf die Position des ersten Retroreflektors im Raum einstellt, wobei das zweite Signal und das dritte Signal zumindest zum Teil auf dem ersten Signal beruhen; und der Geräte-Prozessor dergestalt konfiguriert ist, dass er den Translationssatz und den Orientierungssatz ermittelt, wobei der Translationssatz zumindest teilweise auf der ersten Entfernung, dem ersten Drehwinkel und dem zweiten Drehwinkel beruht.

5. Verfahren nach Anspruch 2, bei welchem der Schritt der Auswahl des Quellen-Lichtmusters außerdem die Auswahl eines solchen Quellen-Lichtmusters umfasst, welches mindestens drei kodierte Merkmale enthält, die als Musterelemente in dem Quellen-Lichtmuster vorhanden sind, wobei diese drei kodierten Merkmale im Bild-Lichtmuster identifizierbar sind.

6. Verfahren nach Anspruch 5, bei welchem der Schritt der Auswahl des Quellen-Lichtmusters außerdem das Ausrichten der Gruppen der kodierten Merkmale in einer vorgeschriebenen Richtung in Bezug auf epipolare Linien auf der Quellebene umfasst, wobei diese epipolaren Linien auf der Quellebene Schnittlinien der Quellebene mit epipolaren Ebenen sind und die epipolaren Ebenen solche Ebenen sind, welche das virtuelle Licht-Perspektivitätszentrum und das Kameraobjektiv-Perspektivitätszentrum enthalten.

7. Verfahren nach Anspruch 6, bei welchem der Schritt der Auswahl des Quellen-Lichtmusters außerdem das Ausrichten einer jeden Gruppe der kodierten Merkmalen längs einer einzelnen epipolaren Linie umfasst sowie die Ermittlung der Flächensätze außerdem für jede Gruppe von kodierten Merkmalen die Notierung der Positionen der kodierten Merkmale längs einer jeden der einzelnen epipolaren Linien umfasst.

8. Verfahren nach Anspruch 1, bei welchem der Schritt der Auswahl des Quellen-Lichtmusters außerdem die Auswahl von mindestens drei Instanzen des Quellmusters umfasst, und zwar mindestens einer ersten Instanz, einer zweiten Instanz und einer dritten Instanz, wobei das Quellmuster in jeder Instanz eine optische Leistung aufweist, welche sich bei einer ersten Raumfrequenz periodisch ändert und

für jede Instanz das Quellmuster eine Phasenverschiebung gegenüber den anderen Instanzen erfährt; der Schritt des Projizierens des Quellen-Lichtmusters außerdem umfasst: das Projizieren der ersten Instanz des Quellmusters zu einem ersten Zeitpunkt und mit einer ersten Phase, um eine erste Instanz des Objekt-Lichtmusters zu erhalten, das Projizieren der zweiten Instanz des Quellmusters zu einem zweiten Zeitpunkt und mit einer zweiten Phase, um eine zweite Instanz des Objekt-Lichtmusters zu erhalten, und das Projizieren der dritten Instanz des Quellmusters zu einem dritten Zeitpunkt und mit einer dritten Phase, um eine dritte Instanz des Objekt-Lichtmusters zu erhalten;

der Schritt der Abbildung des Objekt-Lichtmusters außerdem umfasst: die Abbildung der ersten Instanz des Objekt-Lichtmusters auf die lichtempfindliche Anordnung, um eine erste Instanz des Bild-Lichtmusters zu erhalten, die Abbildung der zweiten Instanz des Objekt-Lichtmusters auf die lichtempfindliche Anordnung, um eine zweite Instanz des Bild-Lichtmusters zu erhalten, und die Abbildung der dritten Instanz des Objekt-Lichtmusters auf die lichtempfindliche Anordnung, um eine dritte Instanz des Bild-Lichtmusters zu erhalten;

der Schritt des Gewinnens der digitalen Bildpunktwerte außerdem umfasst: das Gewinnen einer ersten Instanz der digitalen Bildpunktwerte für die erste Instanz des Bild-Lichtmusters, das Gewinnen einer zweiten Instanz der digitalen Bildpunktwerte für die zweite Instanz des Bild-Lichtmusters und das Gewinnen einer dritten Instanz der digitalen Bildpunktwerte für die dritte Instanz des Bild-Lichtmusters; sowie der Schritt der Ermittlung der Flächensätze für jedes der mindestens drei nicht-kollinearen Musterelemente außerdem umfasst: die Ermittlung der Flächensätze für jedes der drei nicht-kollinearen Musterelemente zumindest teilweise auf der Grundlage der ersten Raumfrequenz, der ersten Phase, der zweiten Phase, der dritten Phase, der ersten Instanz der digitalen Bildpunktwerte, der zweiten Instanz der digitalen Bildpunktwerte und der dritten Instanz der digitalen Bildpunktwerte.

9. Verfahren nach Anspruch 8, bei welchem: der Schritt der Auswahl des Quellen-Lichtmusters außerdem die Auswahl von mindestens drei Instanzen eines zweiten Quellmusters, mindestens einer vierten Instanz, einer fünften Instanz und einer sechsten Instanz umfasst, wobei das zweite Quellmuster in jeder Instanz eine optische Leistung aufweist, die sich periodisch bei einer zweiten Raumfrequenz ändert, wobei für jede Instanz das zweite Quellmuster eine Phasenverschiebung gegenüber den anderen Instanzen erfährt; der Schritt der Projizierung des zweiten Quellen-Lichtmusters außerdem umfasst: die Projizierung der vierten Instanz des zweiten Quellmusters zu einem vierten Zeitpunkt mit einer vierten Phase, um eine vierte Instanz des Objekt-Lichtmusters zu erhalten,

ten, die Projizierung der fünften Instanz des zweiten Quellmusters zu einem fünften Zeitpunkt mit einer fünften Phase, um eine fünfte Instanz des Objekt-Lichtmusters zu erhalten, und die Projizierung der sechsten Instanz des Quellmusters zu einem sechsten Zeitpunkt mit einer sechsten Phase, um eine sechste Instanz des Objekt-Lichtmusters zu erhalten; der Schritt der Abbildung des Objekt-Lichtmusters außerdem umfasst: das Abbilden der vierten Instanz des Objekt-Lichtmusters auf die lichtempfindliche Anordnung, um eine vierte Instanz des Bild-Lichtmusters zu erhalten, das Abbilden der fünften Instanz des Objekt-Lichtmusters auf die lichtempfindliche Anordnung, um eine fünfte Instanz des Bild-Lichtmusters zu erhalten, und das Abbilden der sechsten Instanz des Objekt-Lichtmusters auf die lichtempfindliche Anordnung, um eine sechste Instanz des Bild-Lichtmusters zu erhalten;

der Schritt des Gewinnens der digitalen Bildpunktwerte außerdem umfasst: das Gewinnen einer vierten Instanz von digitalen Bildpunktwerten für die vierte Instanz des Bild-Lichtmusters, das Gewinnen einer fünften Instanz von digitalen Bildpunktwerten für die fünfte Instanz des Bild-Lichtmusters und das Gewinnen einer sechsten Instanz von digitalen Bildpunktwerten für die sechste Instanz des Bild-Lichtmusters; sowie

der Schritt der Ermittlung der Flächenwerte für jedes der mindestens drei nicht-kollinearen Musterelemente außerdem umfasst: das Ermitteln der Flächensätze für jedes der drei nicht-kollinearen Musterelemente, die außerdem auf der zweiten Raumfrequenz, der vierten Phase, der fünften Phase, der sechsten Phase, der vierten Instanz der digitalen Bildpunktwerte, der fünften Instanz der digitalen Bildpunktwerte und der sechsten Instanz der digitalen Bildpunktwerte beruhen.

10. Verfahren nach Anspruch 1, bei welchem der Schritt der Bereitstellung des Zielscanners außerdem die Bereitstellung einer starr am Körper angebrachten Halterung enthält, wobei diese Halterung in Bezug auf das Geräte-Bezugssystem stationär ist.

11. Verfahren nach Anspruch 1, bei welchem der Schritt der Bereitstellung des Zielscanners außerdem die Bereitstellung des Projektors und der Kamera umfasst, die so skaliert sind, dass solche Merkmale gemessen werden können, die zu klein sind, um vom menschlichen Auge ohne Vergrößerung gesehen zu werden.

12. Verfahren nach Anspruch 1, bei welchem: der Schritt der Bereitstellung des Zielscanners außerdem die Bereitstellung eines zweiten Retroreflektors (4911) umfasst, welcher starr am Körper angebracht ist; und der Schritt der Messung des Translationssatzes und des Orientierungssatzes mit dem Koordinatenmessgerät außerdem die Drehung des Zielscanners um-

fasst, um den zweiten Retroreflektor mit dem ersten Lichtstrahl des Koordinatenmessgerätes zu erreichen.

13. Verfahren nach Anspruch 1, bei welchem der Schritt der Bereitstellung des Zielscanners außerdem die Bereitstellung eines Handgriffs am Zielscanner enthält.

14. Verfahren nach Anspruch 1, bei welchem beim Schritt der Bereitstellung des Zielscanners der Zielscanner außerdem eine taktile Sonde (**2552**) enthält, die am Körper starr befestigt ist.

15. Verfahren (**5100**) nach Anspruch 14, welches außerdem die folgenden Schritte umfasst:
das Berühren der Objektoberfläche (**5105**) mit der taktilen Sonde;
das Messen des Translationssatzes und des Orientierungssatzes (**5110**); und
das Ermitteln eines zweiten Flächensatzes (**5115**) auf der Grundlage zumindest eines Teils des Translationssatzes und des Orientierungssatzes.

16. Verfahren (**5200**) nach Anspruch 14, welches außerdem die folgenden Schritte umfasst:
die Auswertung der Flächensätze (**5205**); und
die Anzeige an den Nutzer, dass ein Gebiet der Objektoberfläche mit der taktilen Sonde zumindest teilweise auf der Grundlage der ausgewerteten Flächensätze zu messen ist (**5210**).

17. Verfahren nach Anspruch 16, bei welchem der Schritt der Auswertung der Flächensätze außerdem den Schritt einer solchen Auswertung der Flächensätze umfasst, die auf einem Auswertekriterium beruht, welches aus der Gruppe ausgewählt wird, die aus Folgendem besteht: der Aufnahme von Licht mit niedriger optischer Leistung für mindestens einen der Flächensätze, das Vorhandensein von mindestens einem der Flächensätze auf einer Kante, das Ermitteln, dass in mindestens einem der Flächensätze Mehrwegeinterferenz vorliegen mag, und Kombinationen aus diesen.

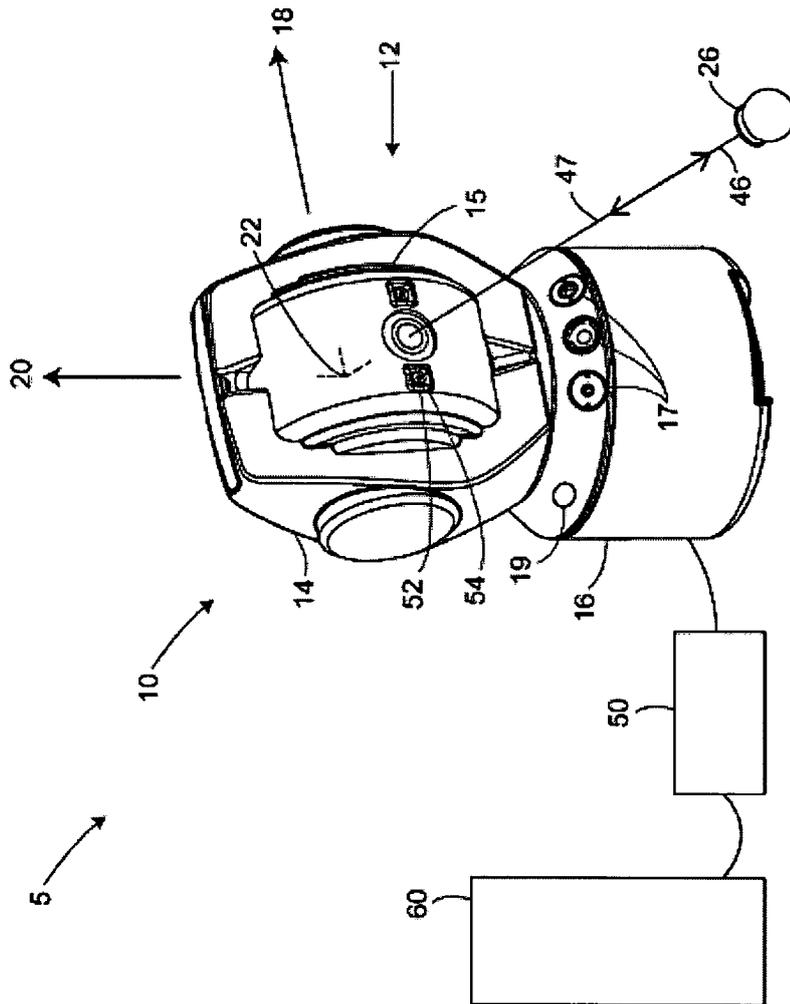
18. Verfahren nach Anspruch 16, bei welchem der Schritt der Anzeige an einen Nutzer, dass ein Gebiet der Objektoberfläche mit der taktilen Sonde zu messen ist, außerdem eine Anzeige enthält, welche aus der Gruppe ausgewählt wird, zu der gehören: das Beleuchten des Gebiets mit Licht, das vom Projektor projiziert wird, die Darstellung des zu beleuchtenden Gebiets auf einer Anzeigevorrichtung und Kombinationen von diesen.

19. Verfahren (**5300**) nach Anspruch 1, welches außerdem die folgenden Schritte umfasst:
den Einbau eines Musters in den ersten Retroreflektor (**5305**);

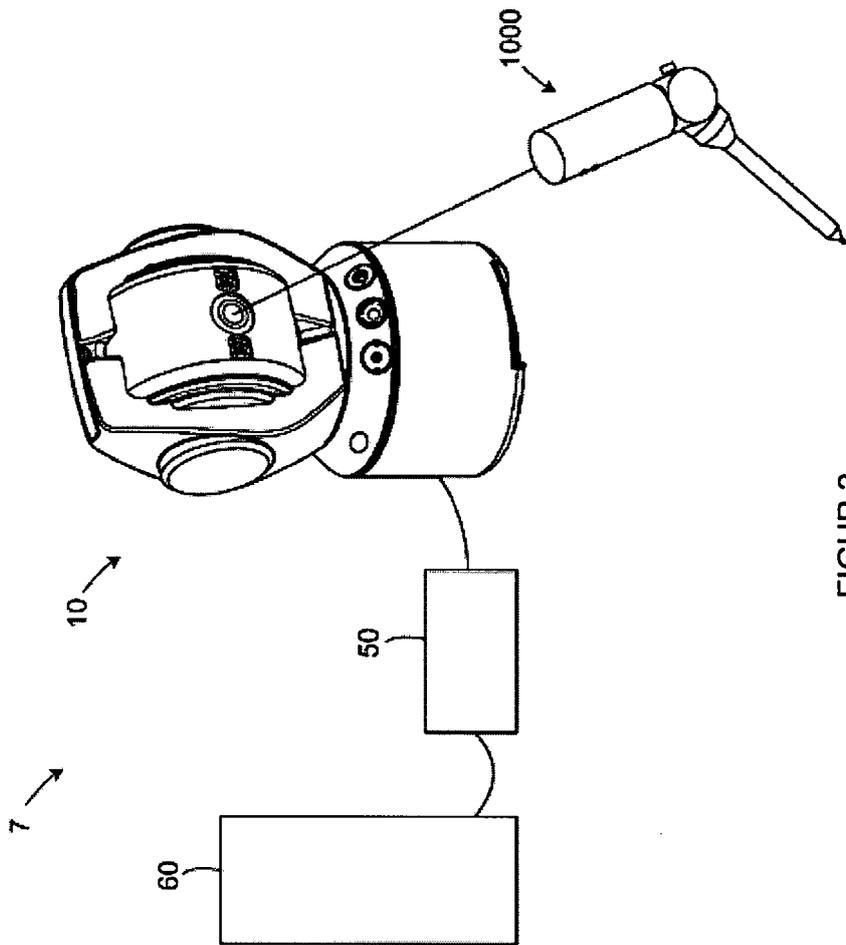
die Bereitstellung eines zweiten optischen Systems (**910**) einschließlich eines zweiten Objektivs und einer zweiten lichtempfindlichen Anordnung, wobei das zweite Objektiv dergestalt konfiguriert ist, dass es ein zweites Bild von mindestens einem Teil des ersten Retroreflektors auf der zweiten lichtempfindlichen Anordnung erzeugt (**5310**);
die Umwandlung des zweiten Bildes in einen zweiten Satz von digitalen Daten (**5315**); und
die Berechnung des Orientierungssatzes auf der Grundlage von zumindest einem Teil des zweiten digitalen Datensatzes (**5320**).

Es folgen 39 Seiten Zeichnungen

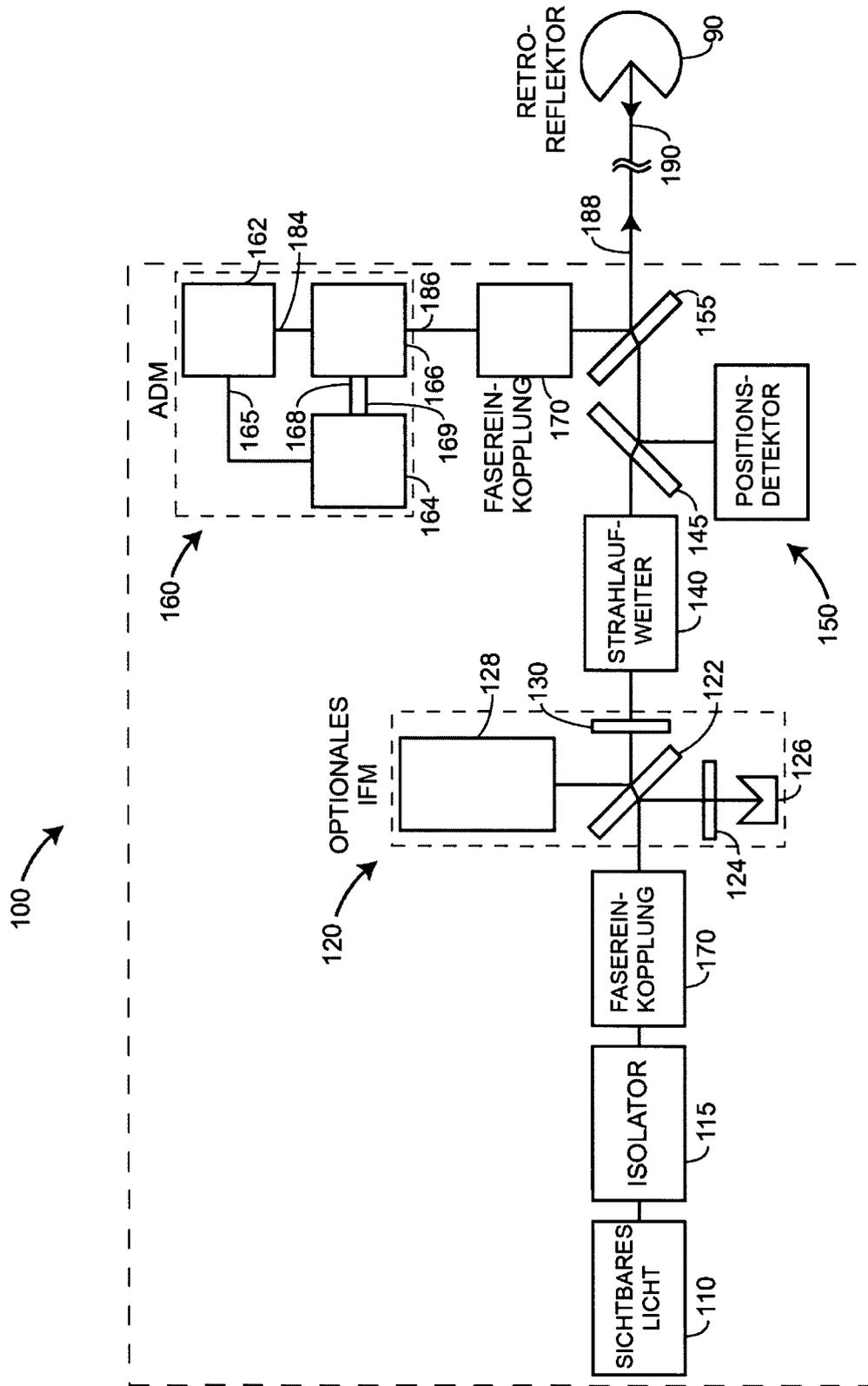
Anhängende Zeichnungen



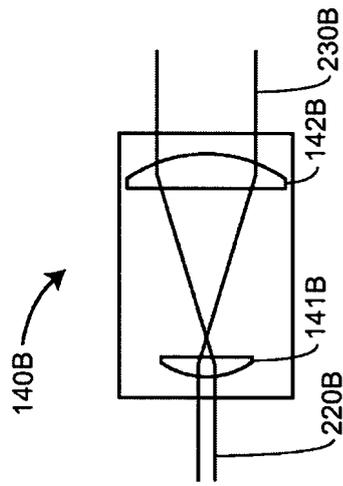
FIGUR 1



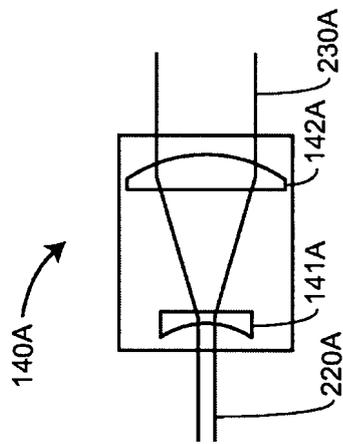
FIGUR 2



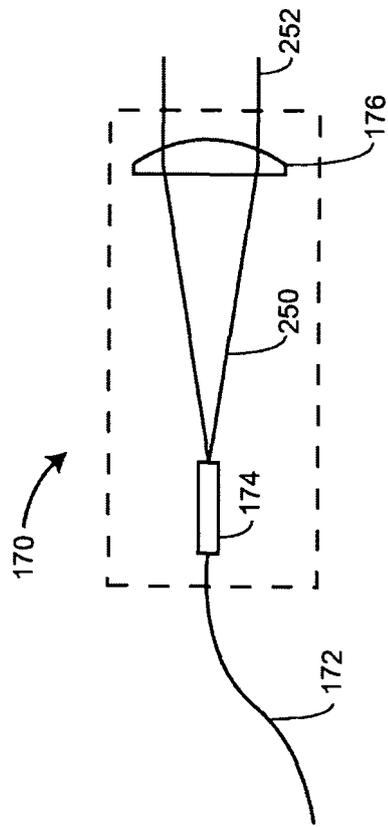
FIGUR 3



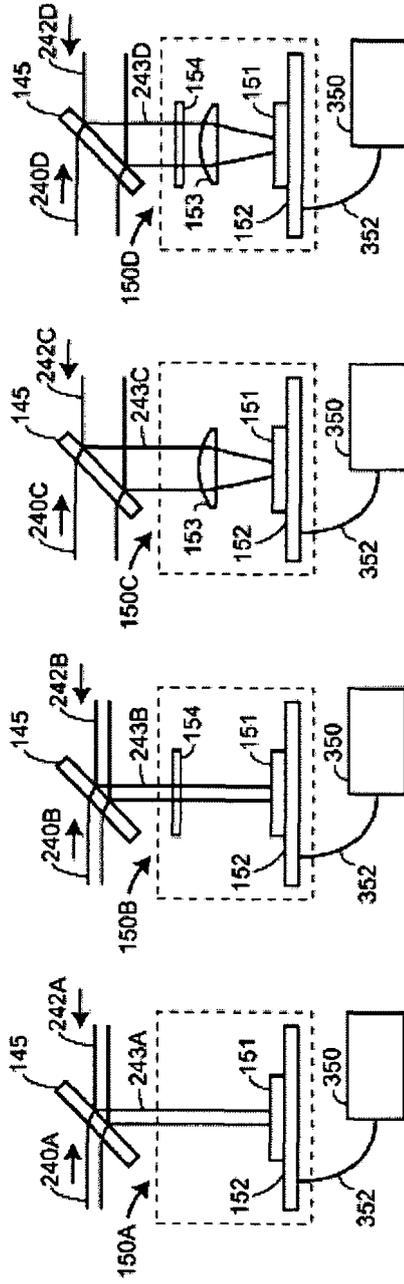
STAND DER TECHNIK
FIGUR 4B



STAND DER TECHNIK
FIGUR 4A



STAND DER TECHNIK
FIGUR 5



STAND DER TECHNIK STAND DER TECHNIK STAND DER TECHNIK STAND DER TECHNIK

FIGUR 6D

FIGUR 6C

FIGUR 6B

FIGUR 6A

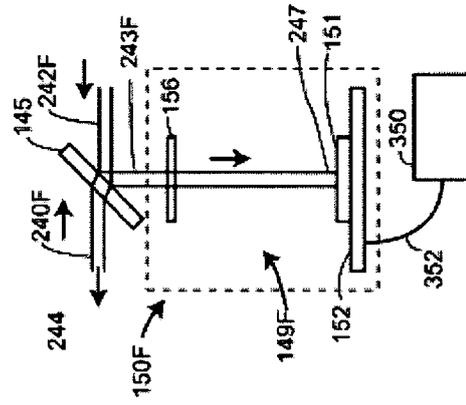


FIG. 6F

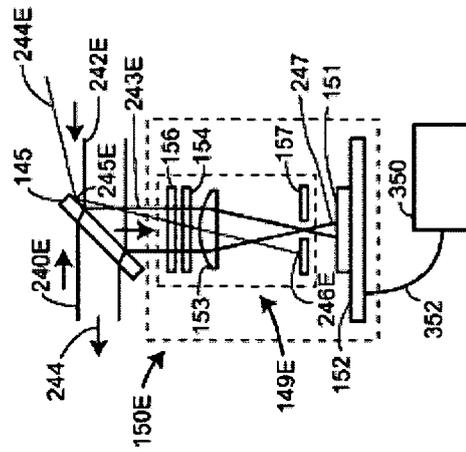
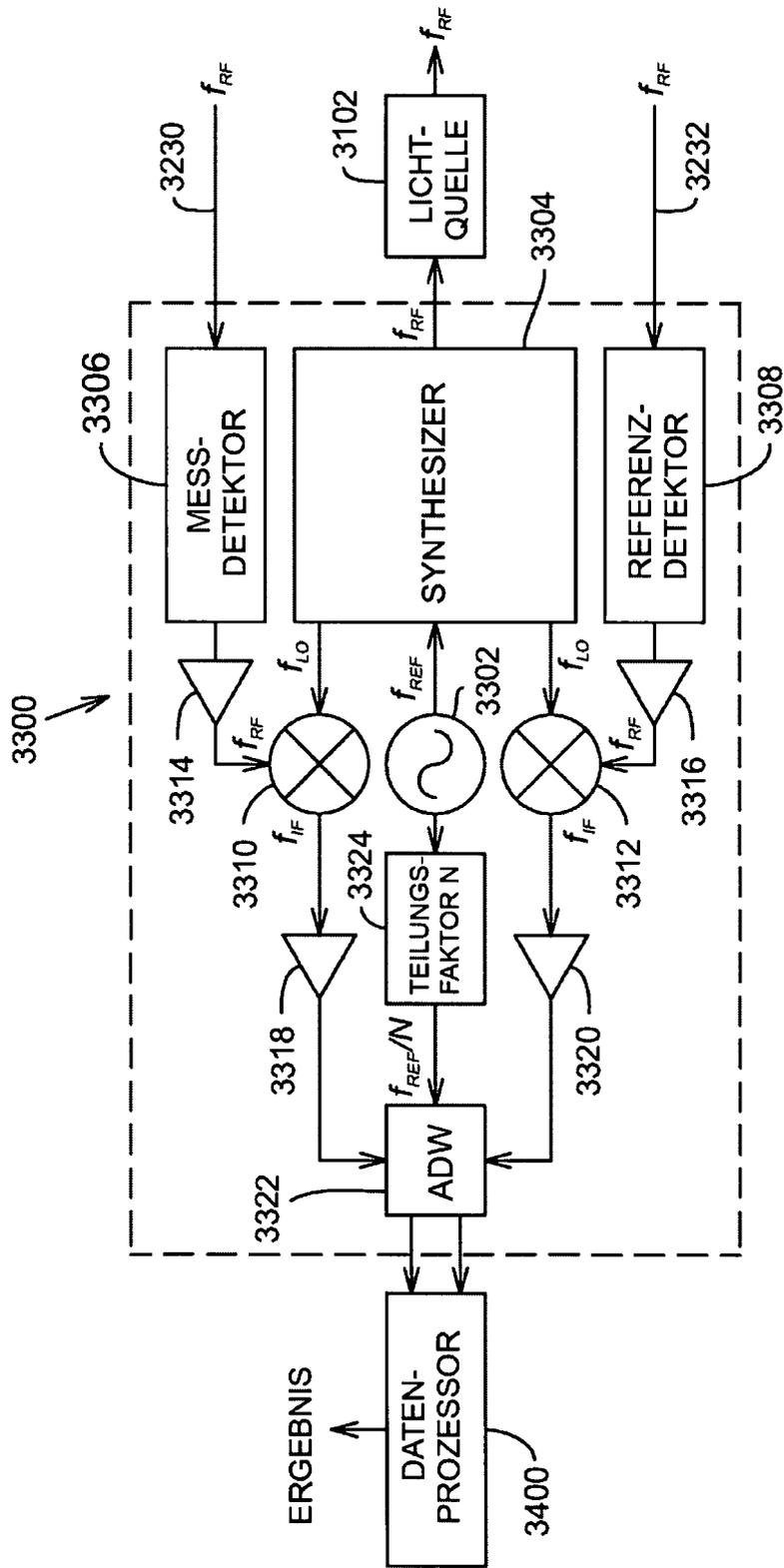
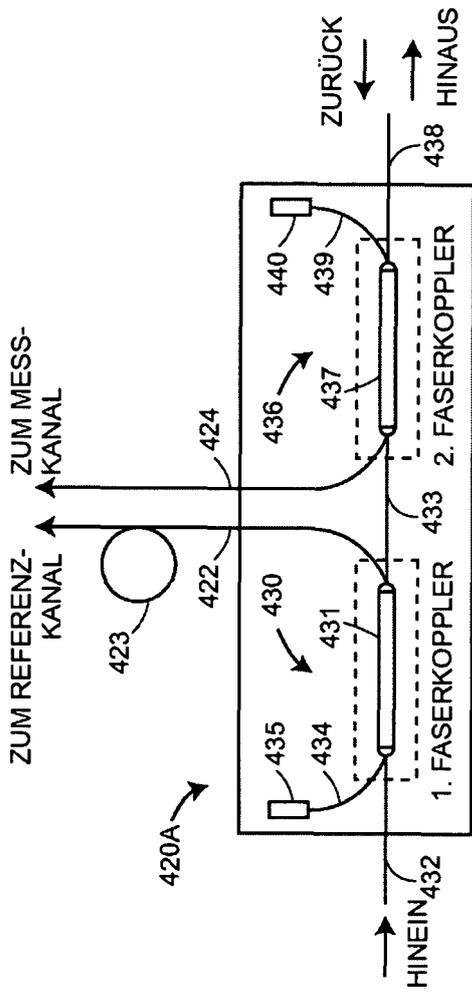


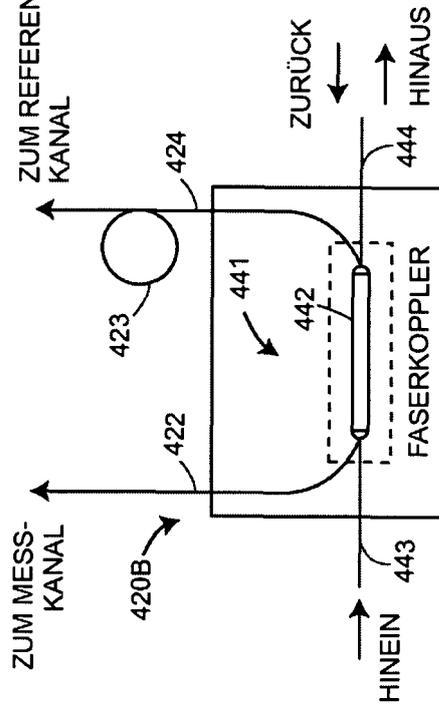
FIG. 6E



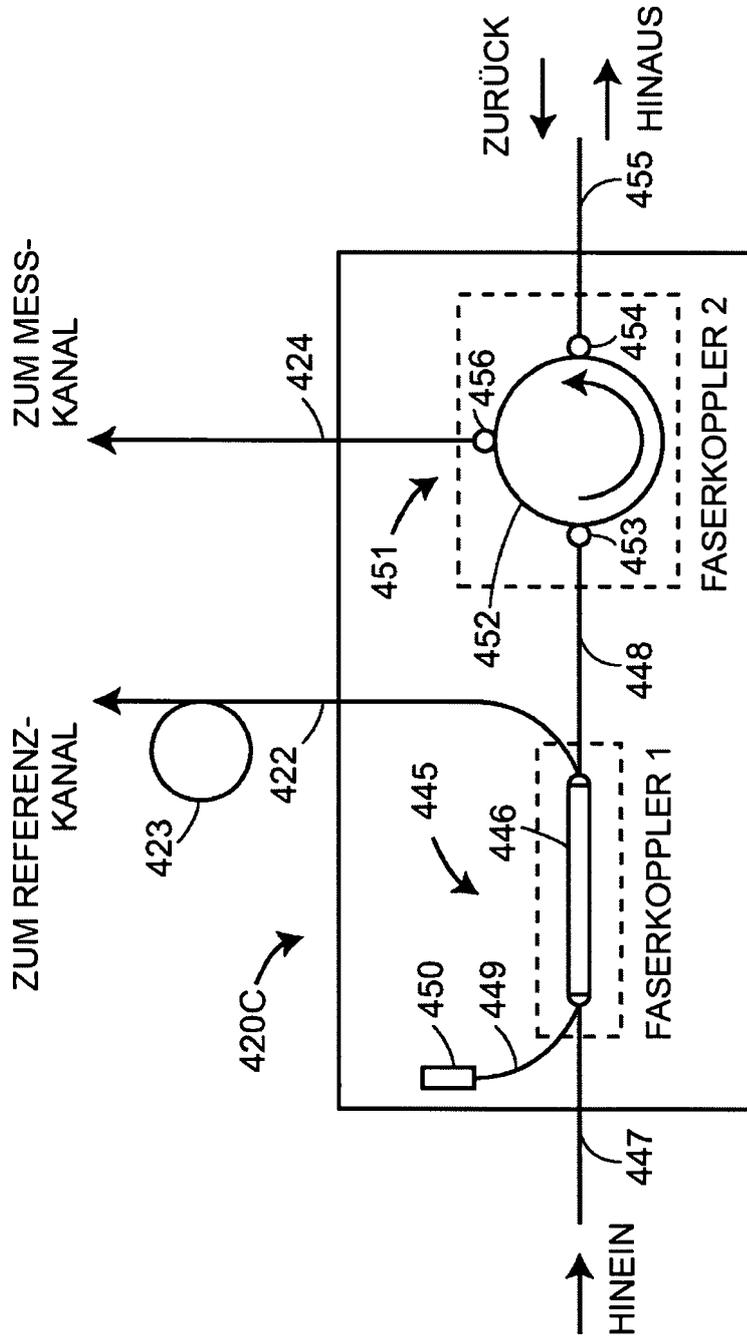
STAND DER TECHNIK
FIGUR 7



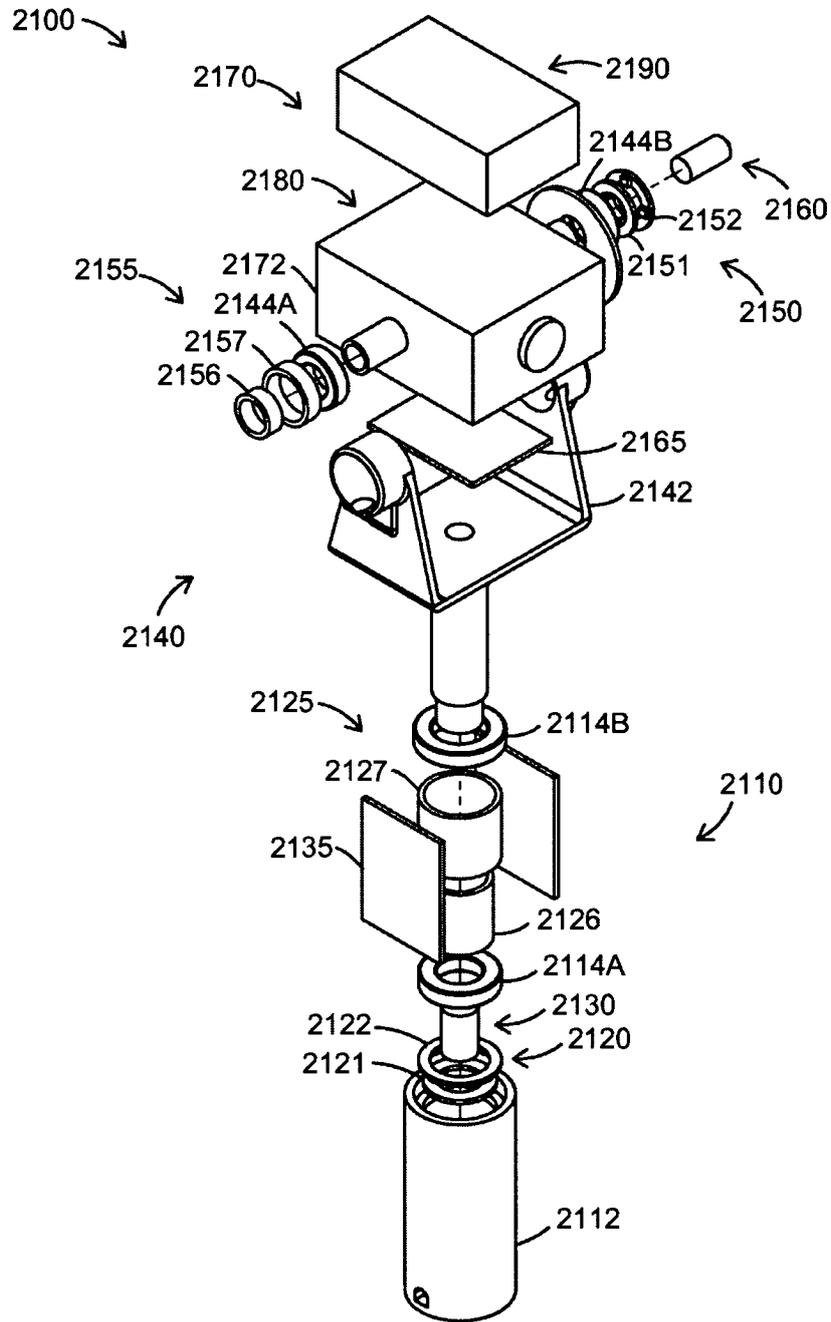
STAND DER TECHNIK
FIGUR 8A



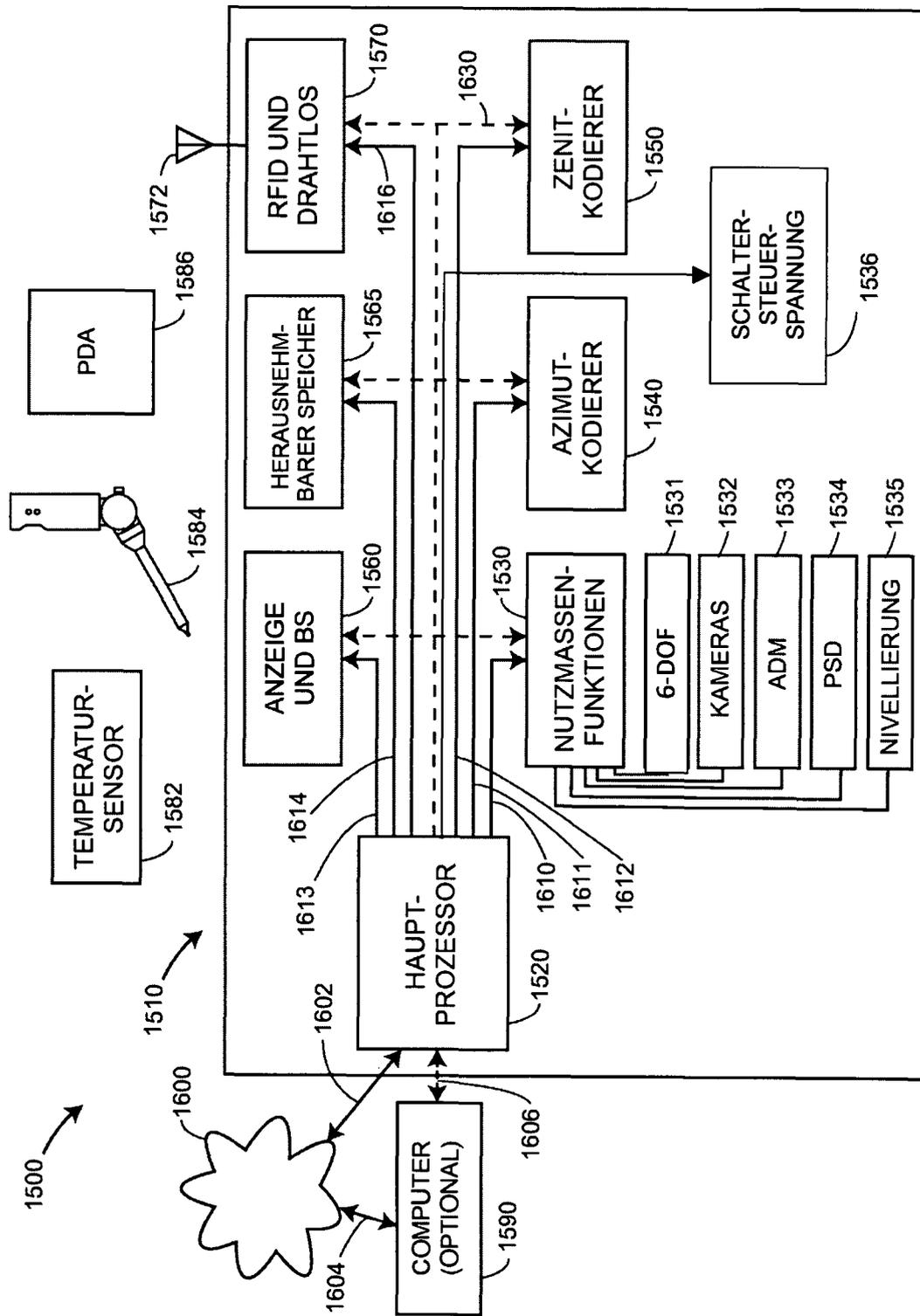
STAND DER TECHNIK
FIGUR 8B



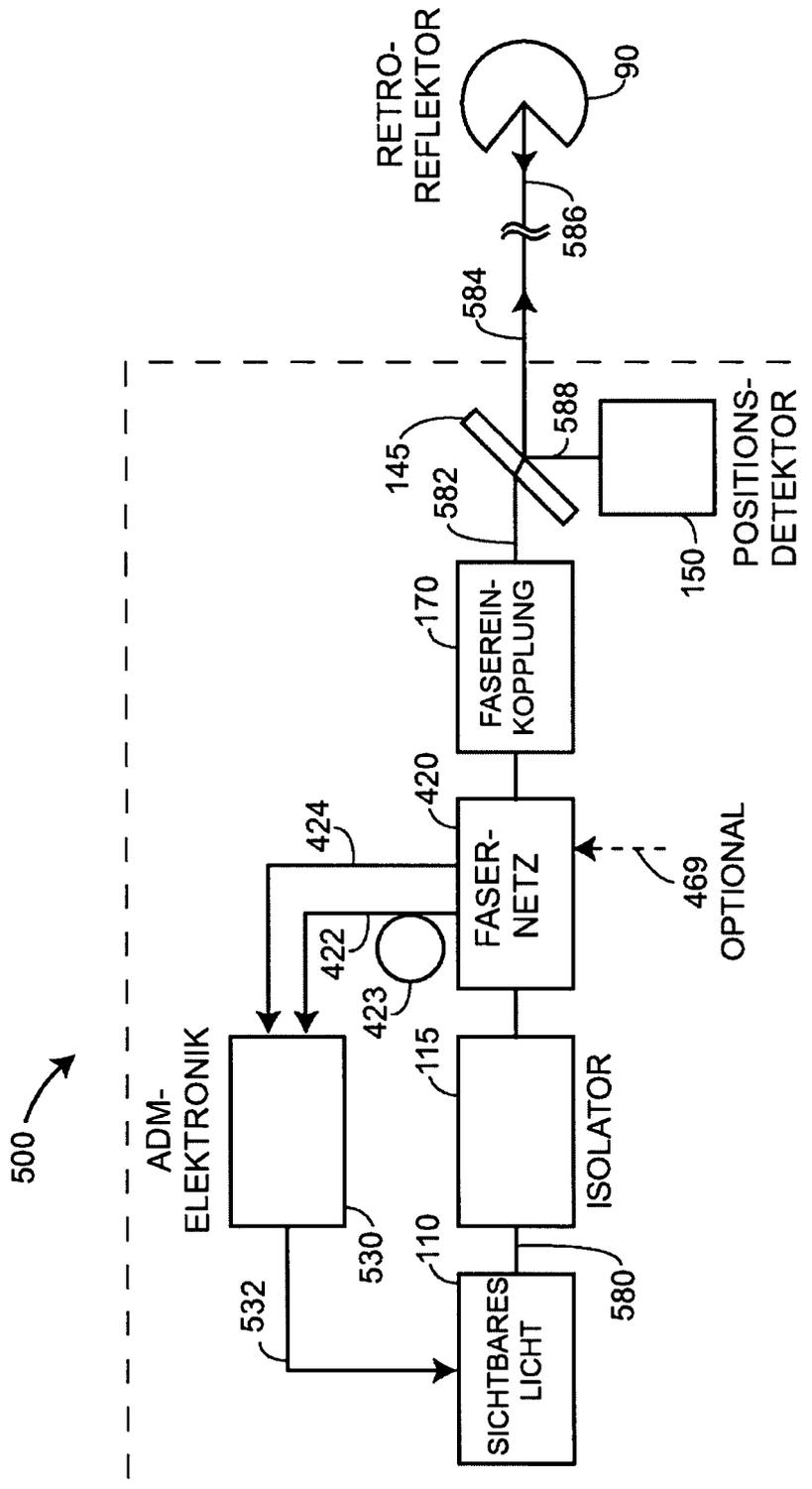
FIGUR 8C



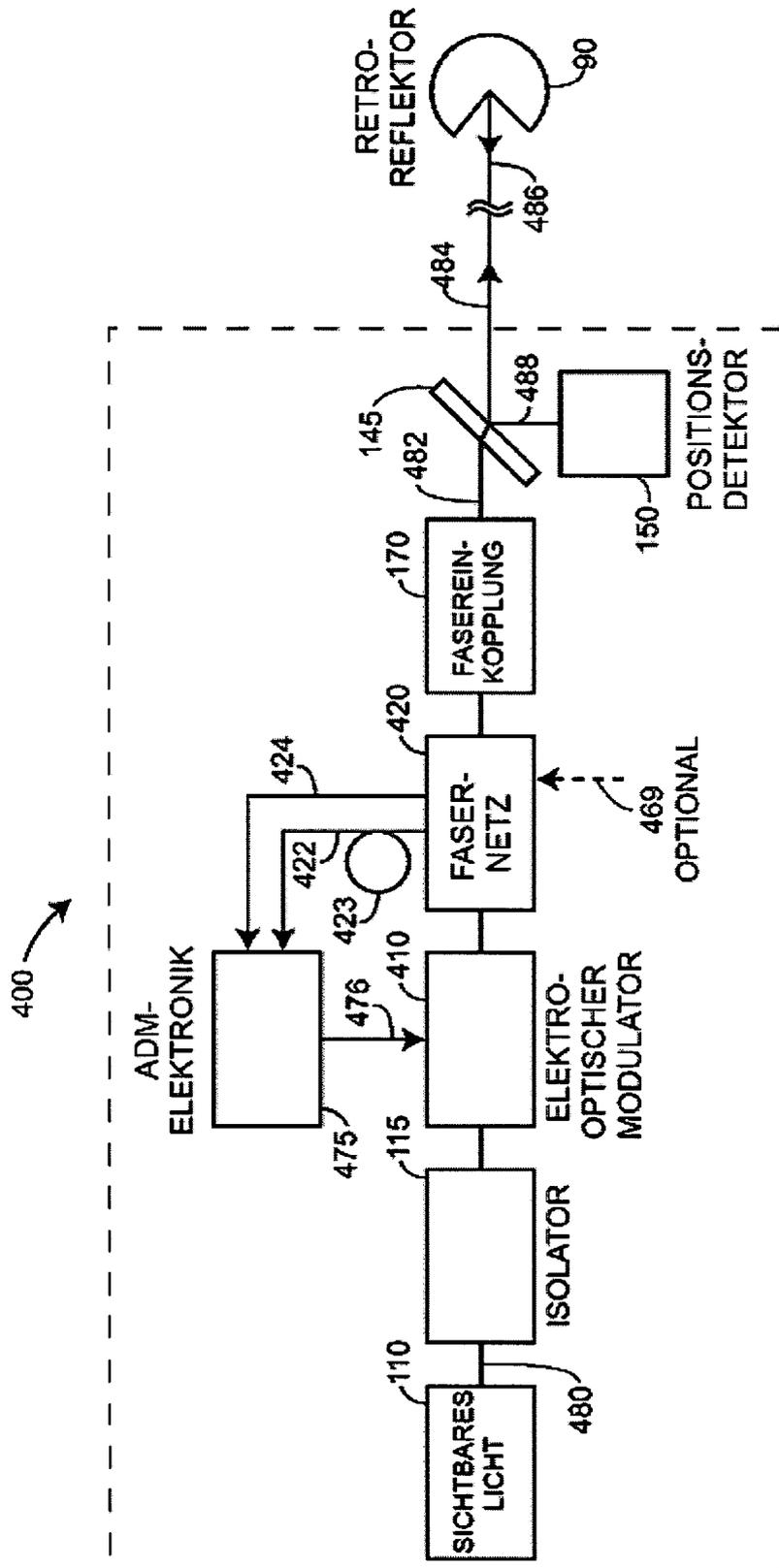
STAND DER TECHNIK
FIGUR 9



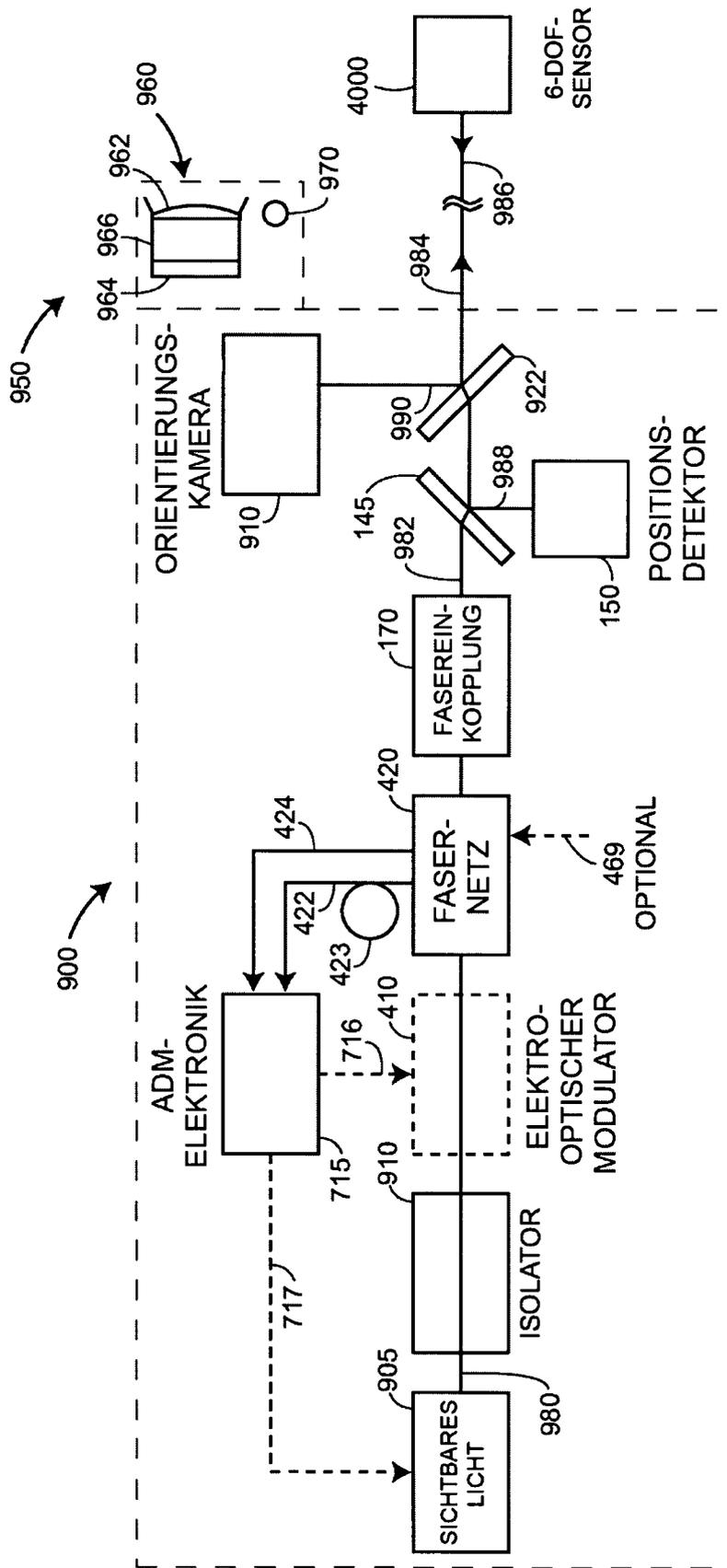
FIGUR 11



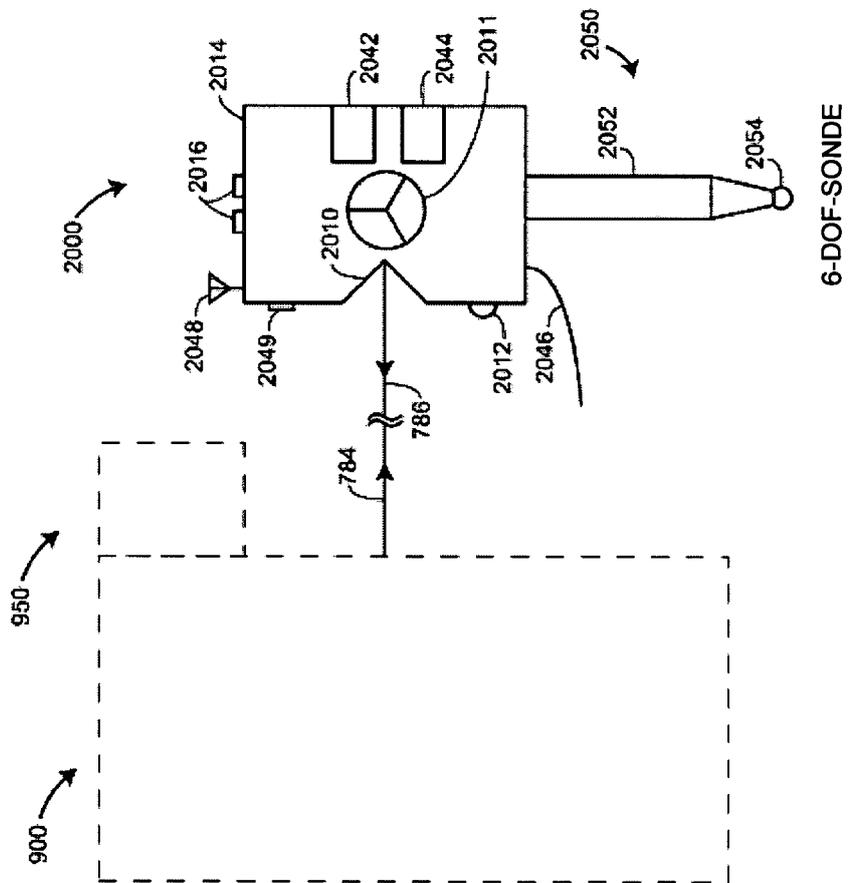
FIGUR 12A



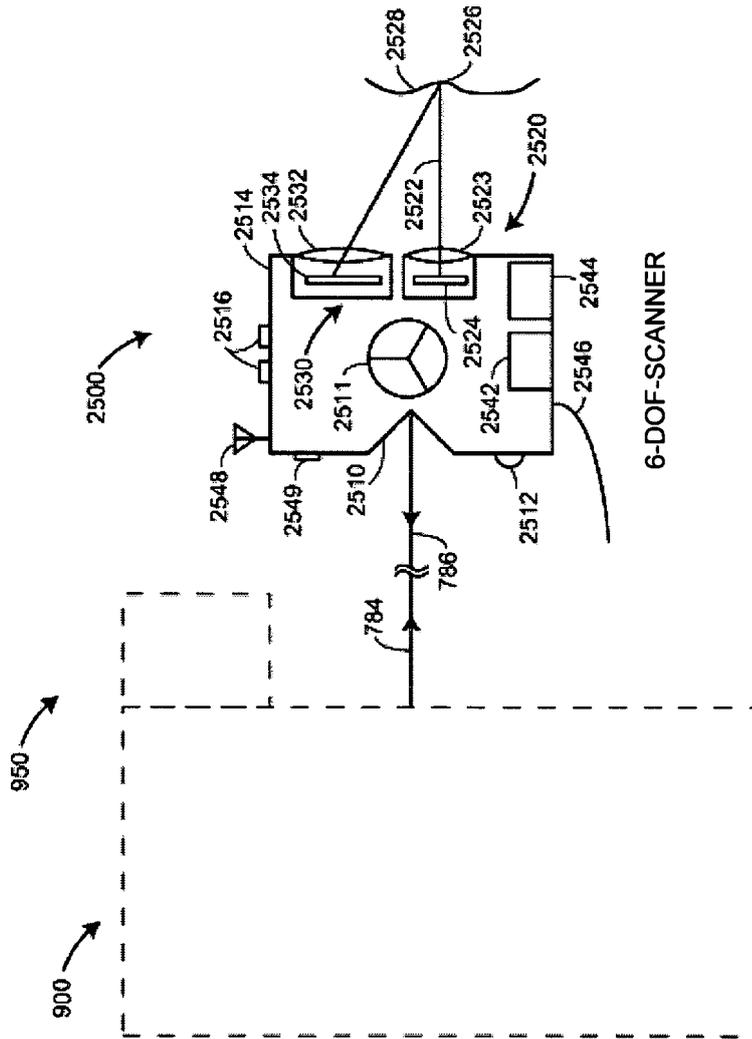
FIGUR 12B



FIGUR 13



FIGUR 14



FIGUR 15

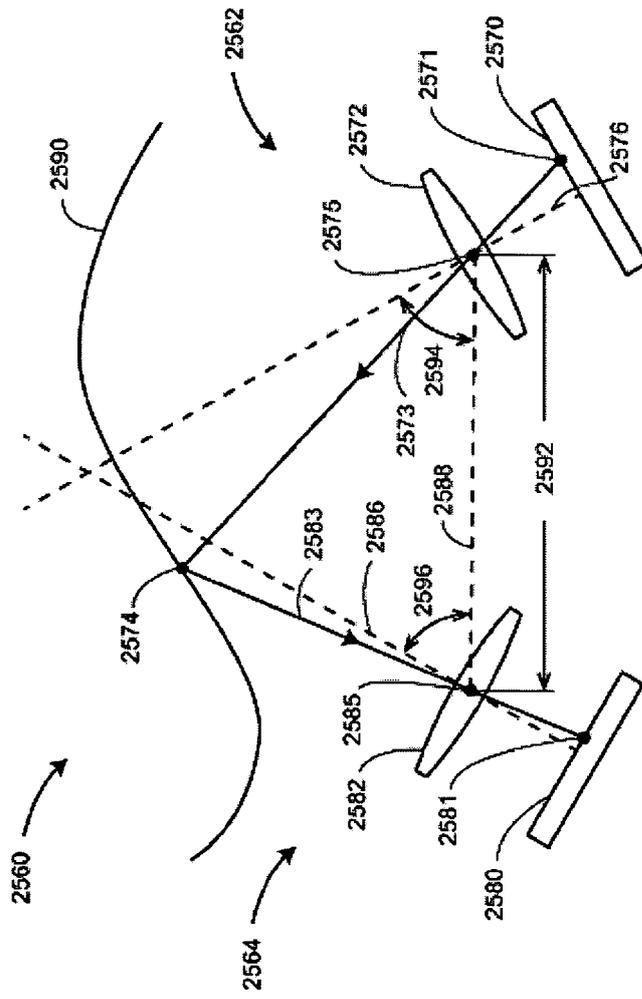


FIG. 15A

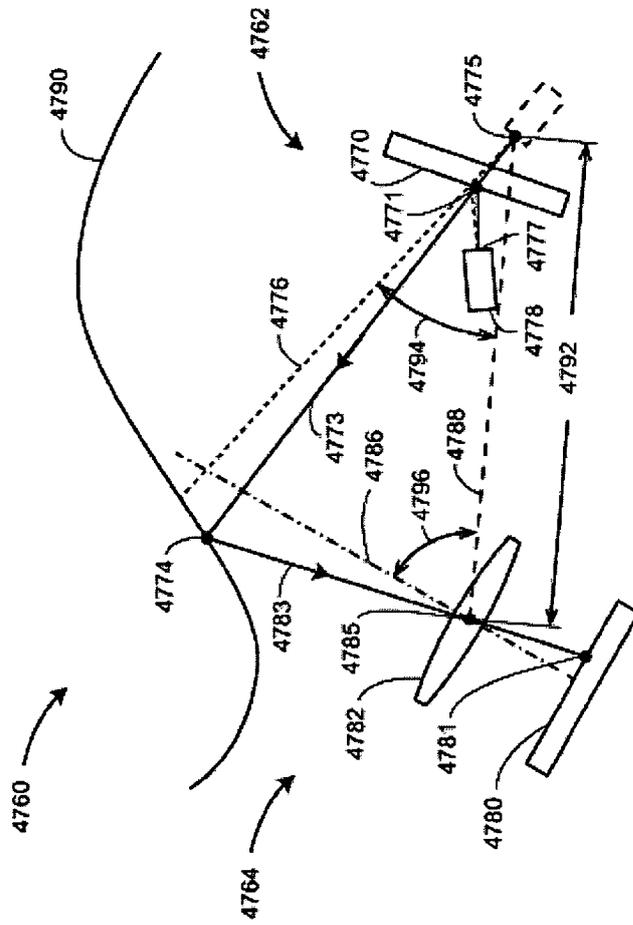


FIG. 15B

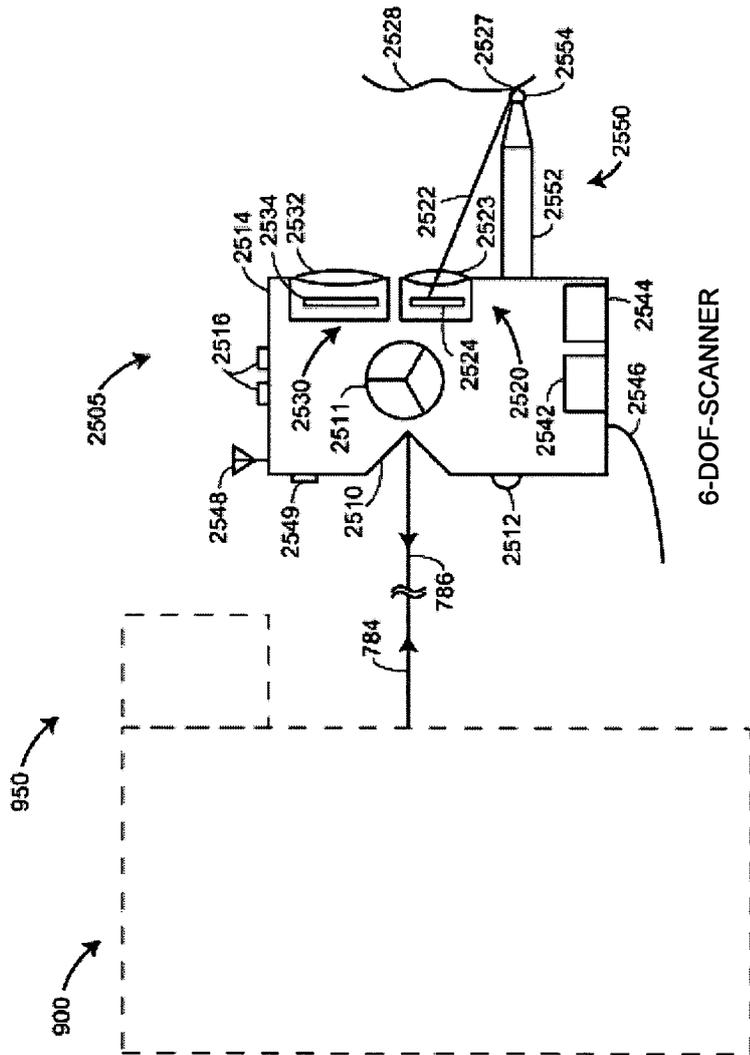


FIG. 15C

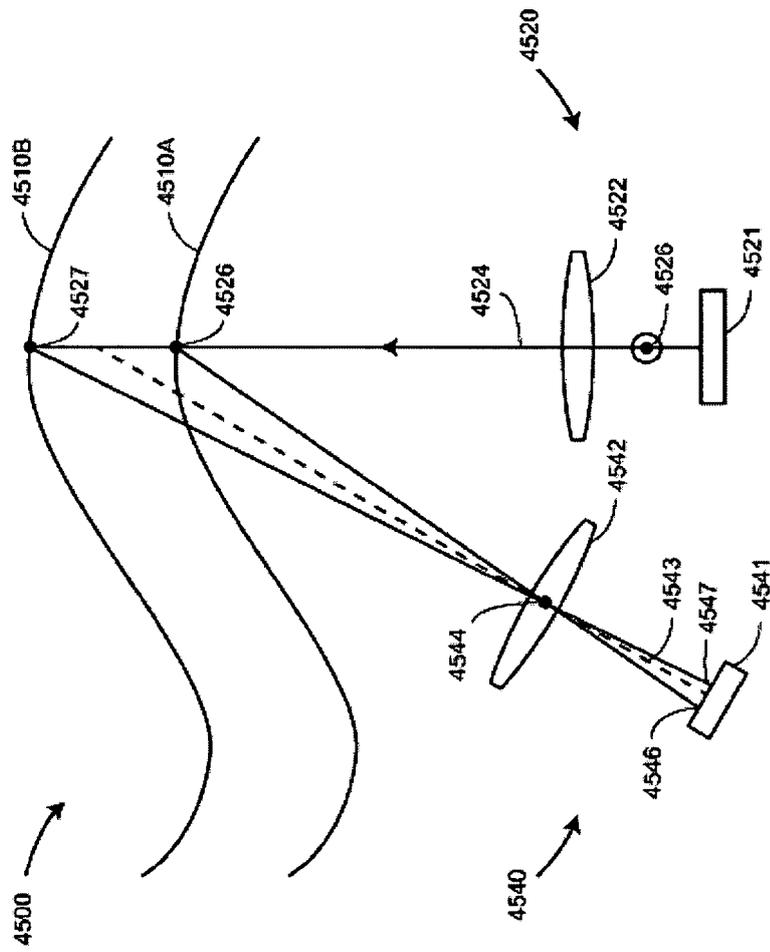


FIG. 15D

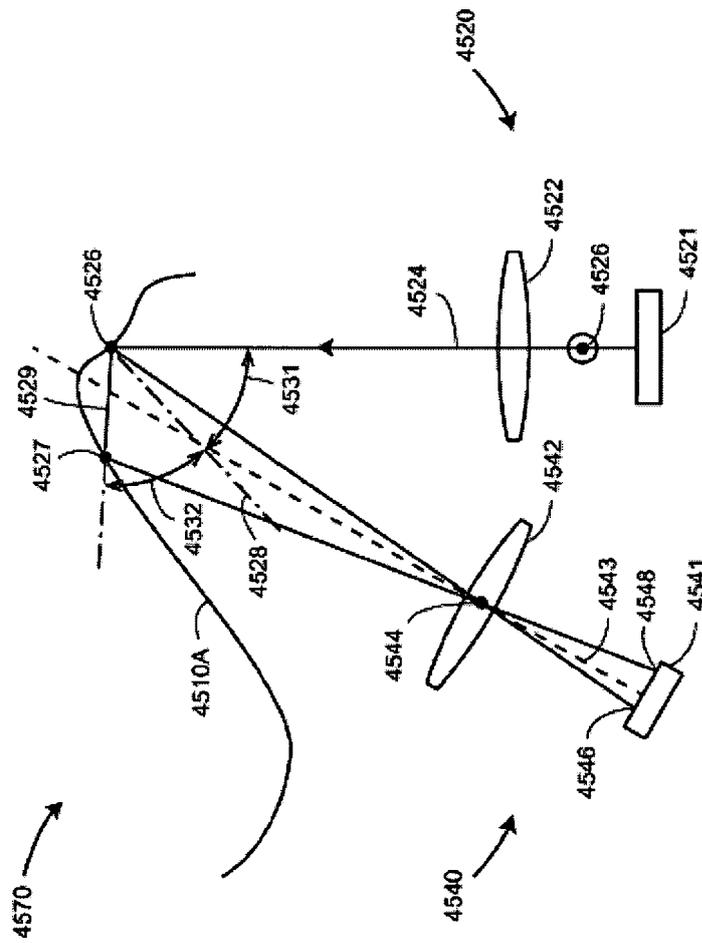


FIG. 15E

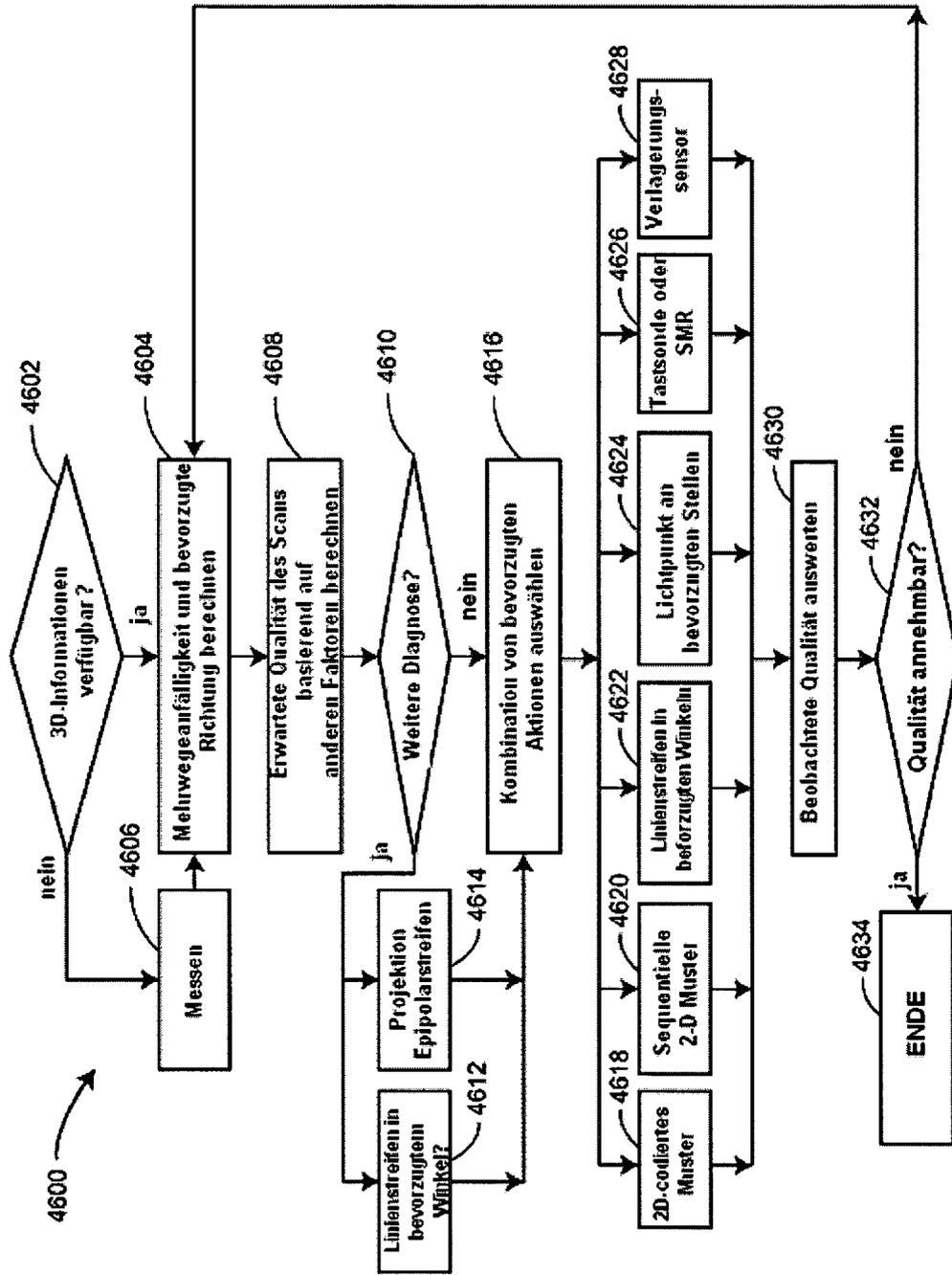
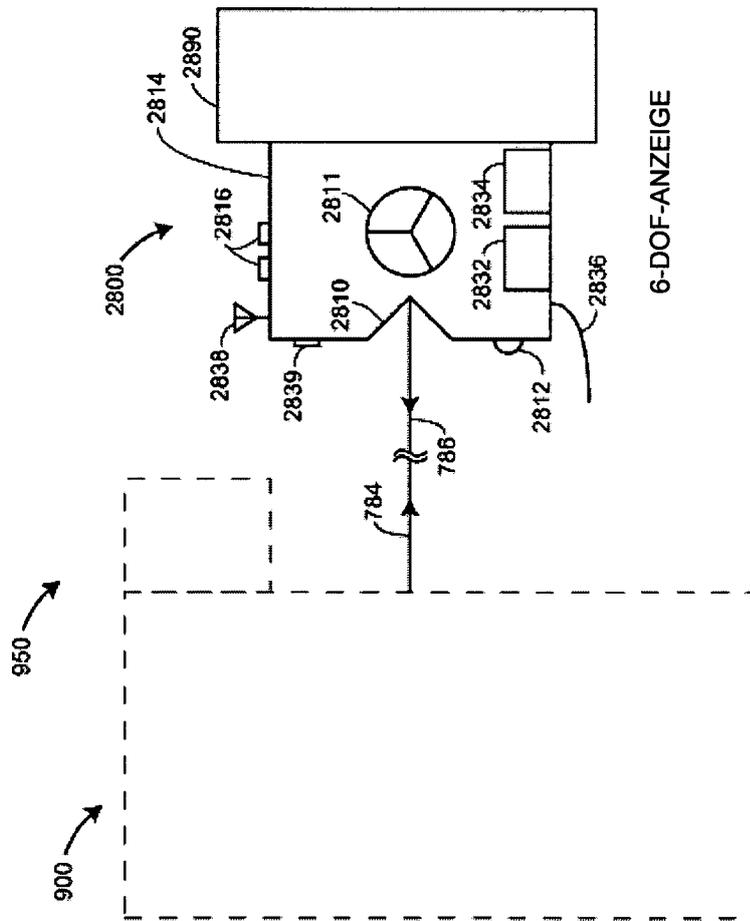


FIG. 15F



FIGUR 16

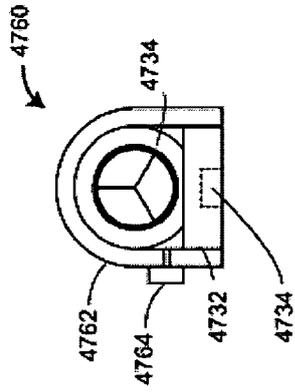


FIG. 16B

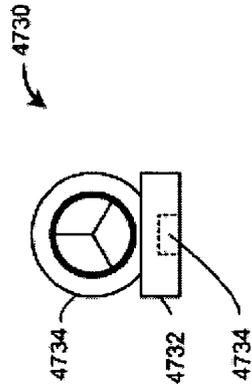
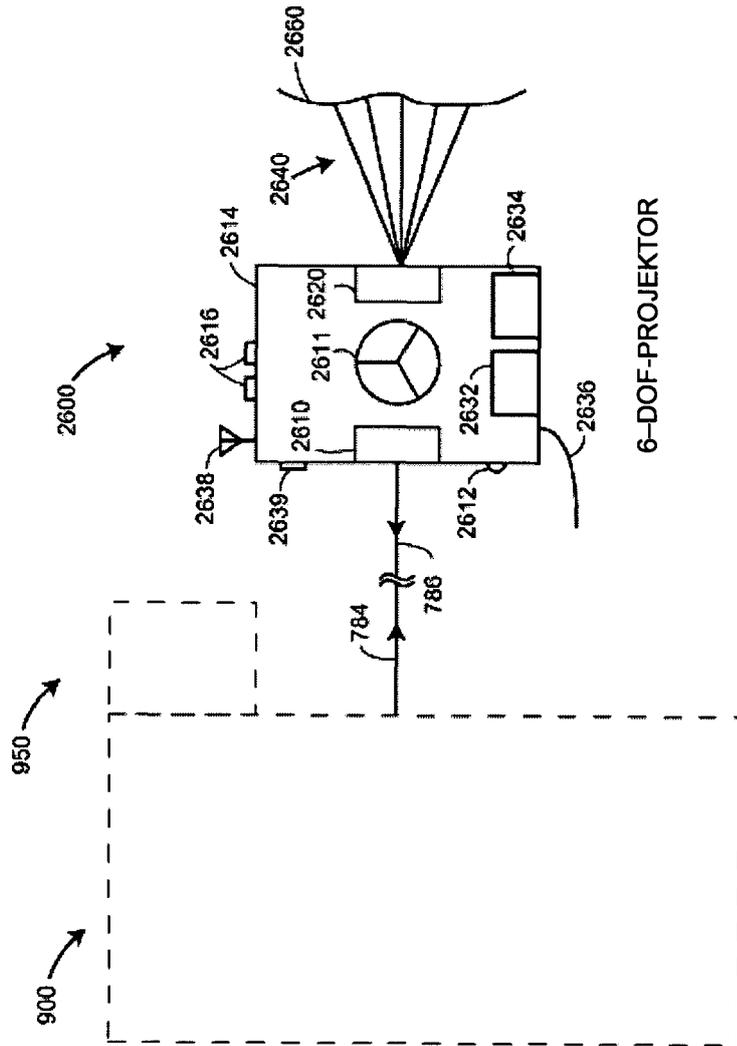
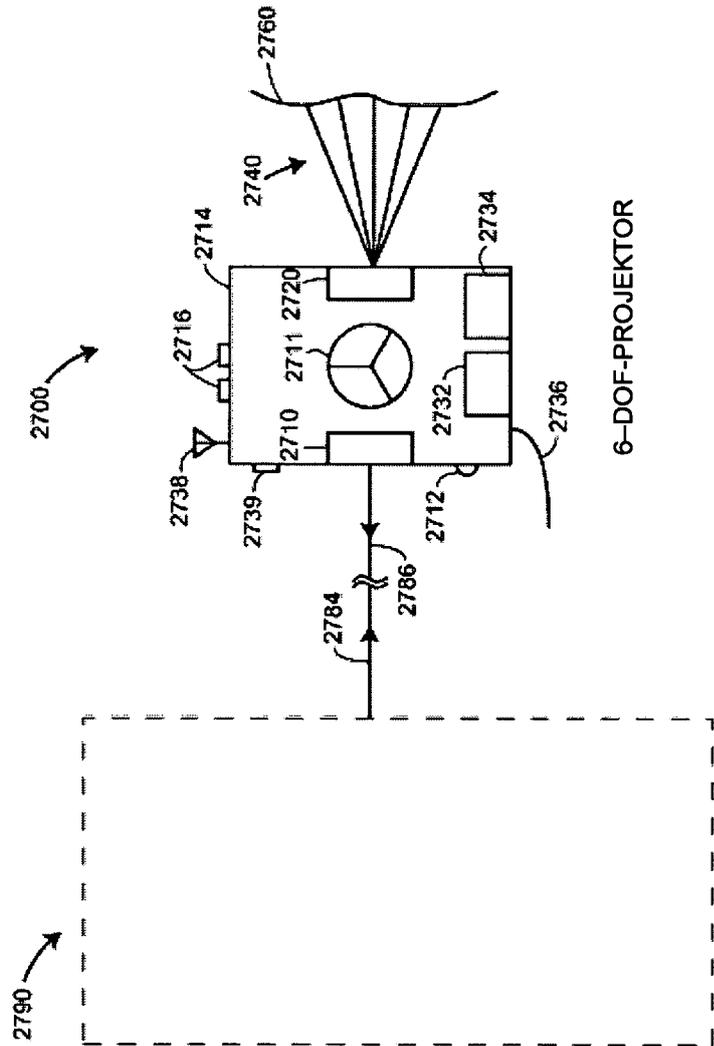


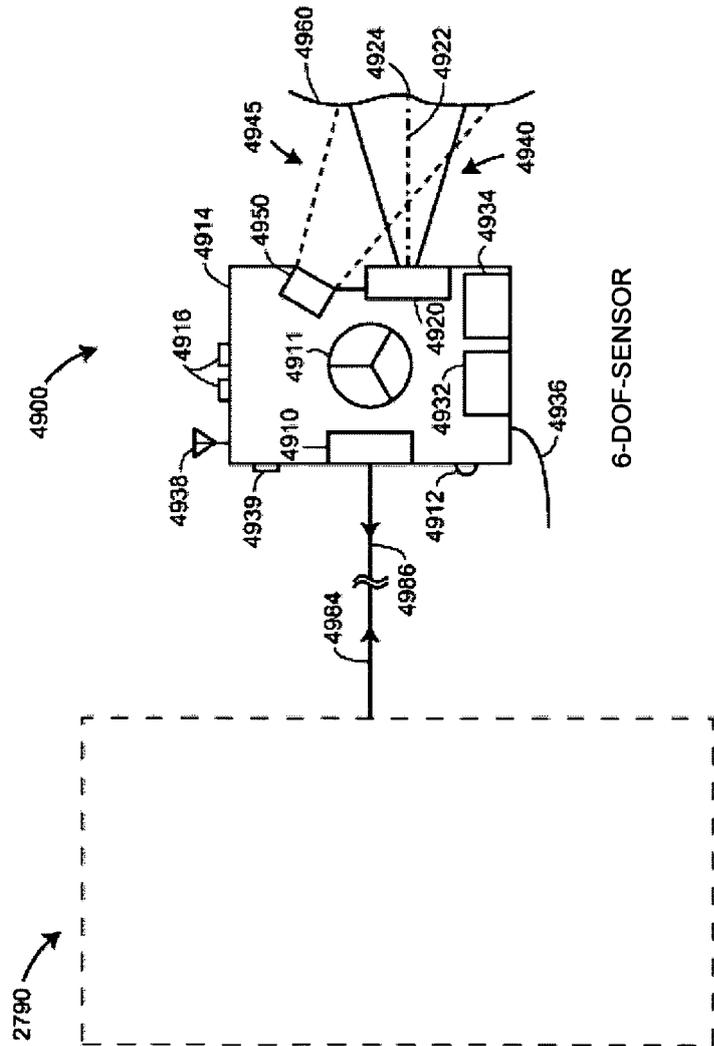
FIG. 16A



FIGUR 17



FIGUR 18



6-DOF-SENSOR

FIGUR 19

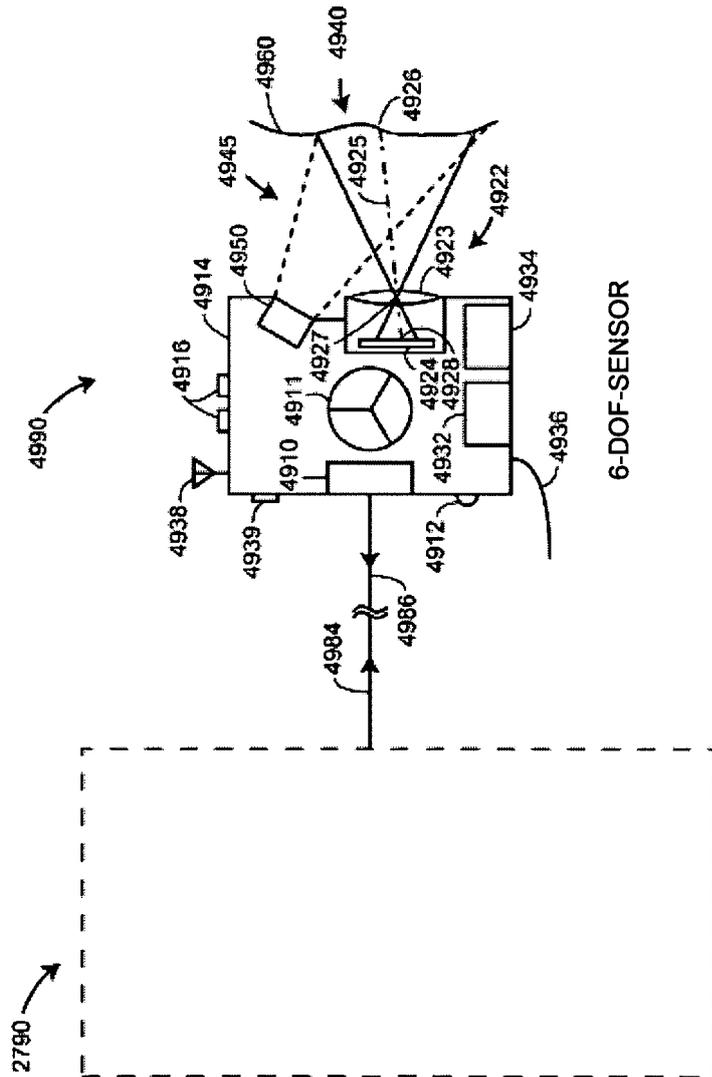


FIGURE 19A

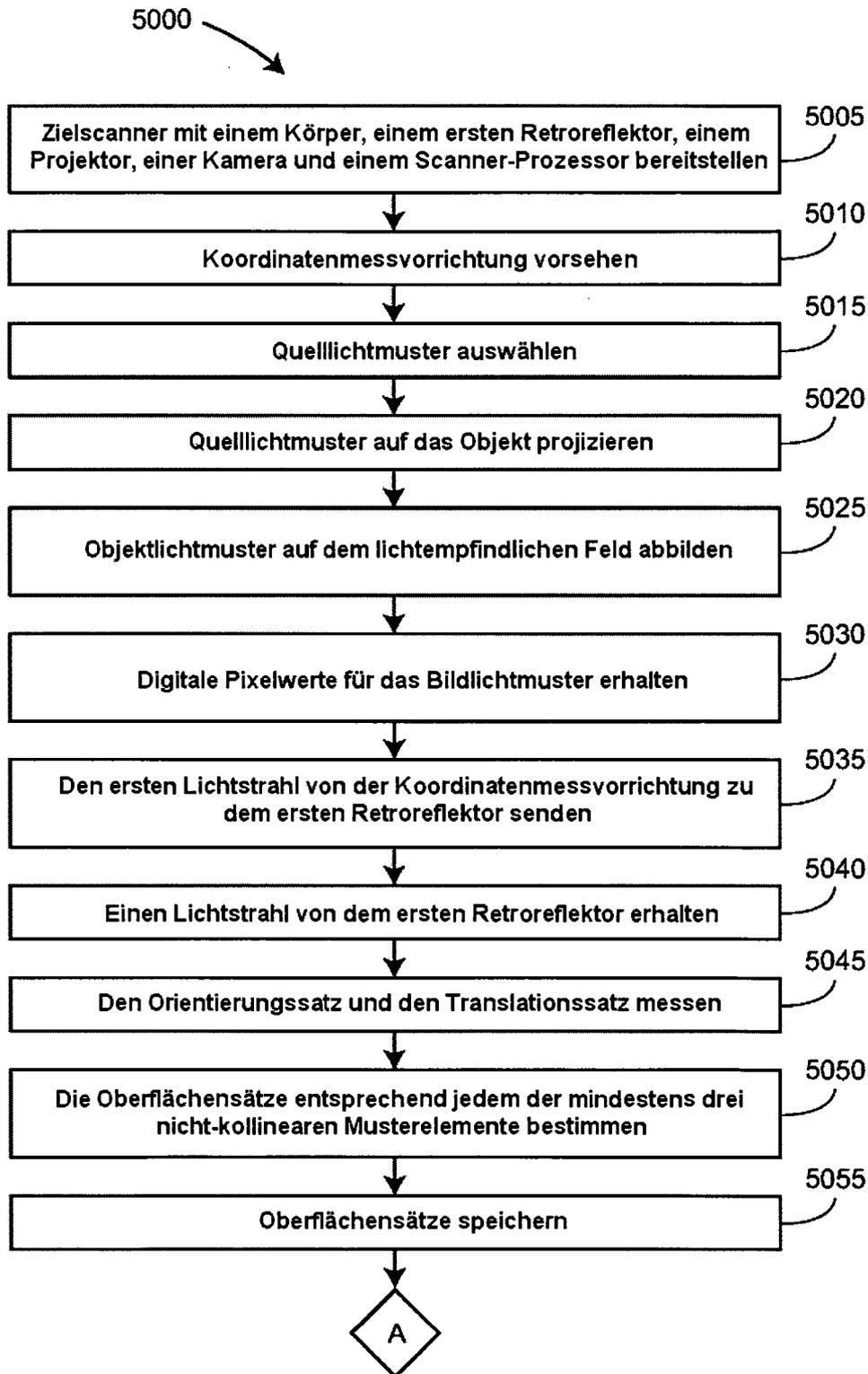


FIG.20

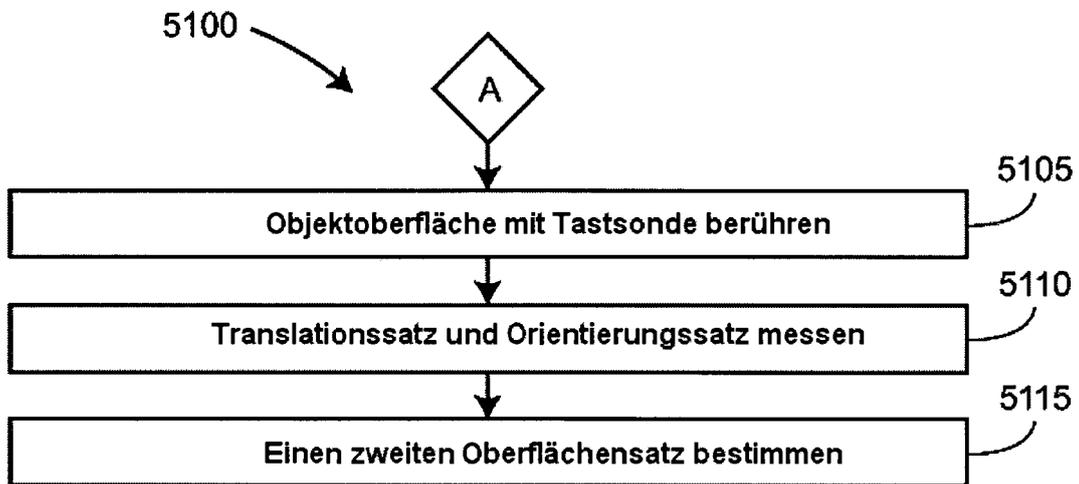


FIG. 21

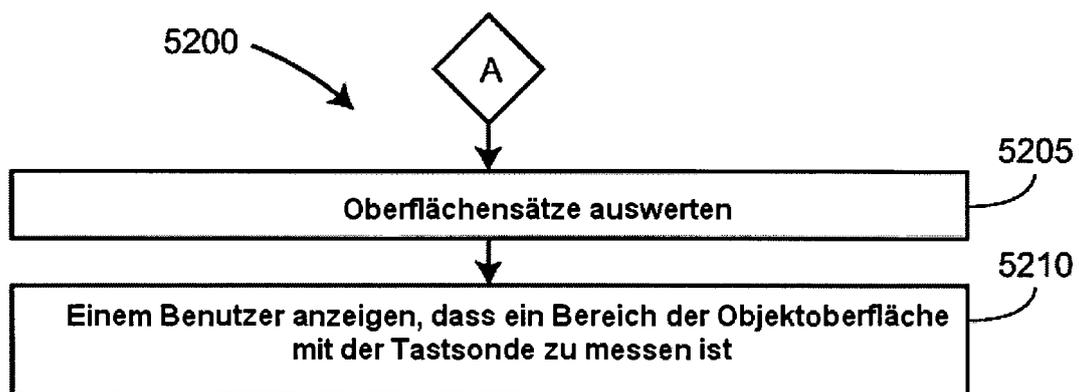


FIG. 22

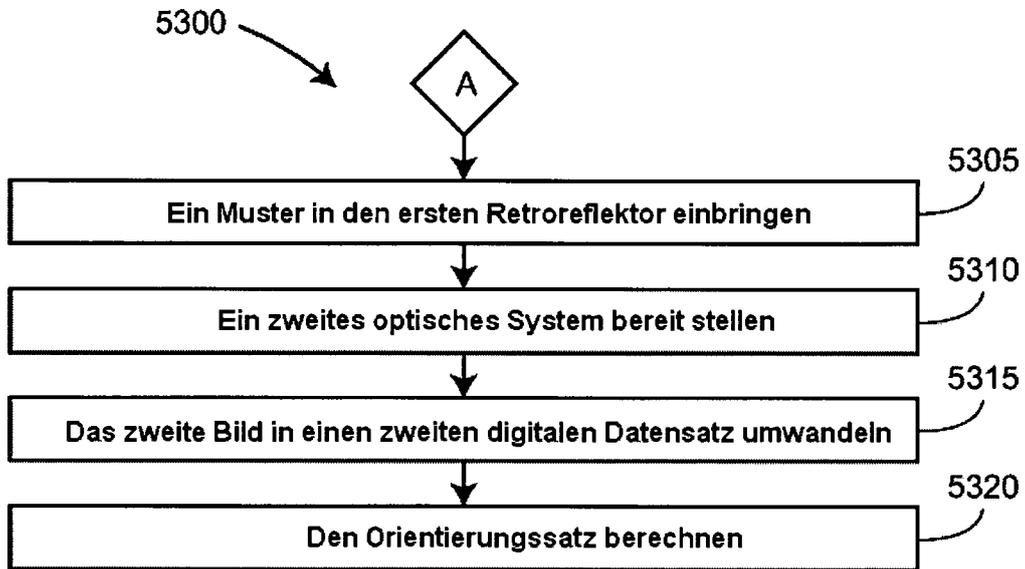


FIG. 23

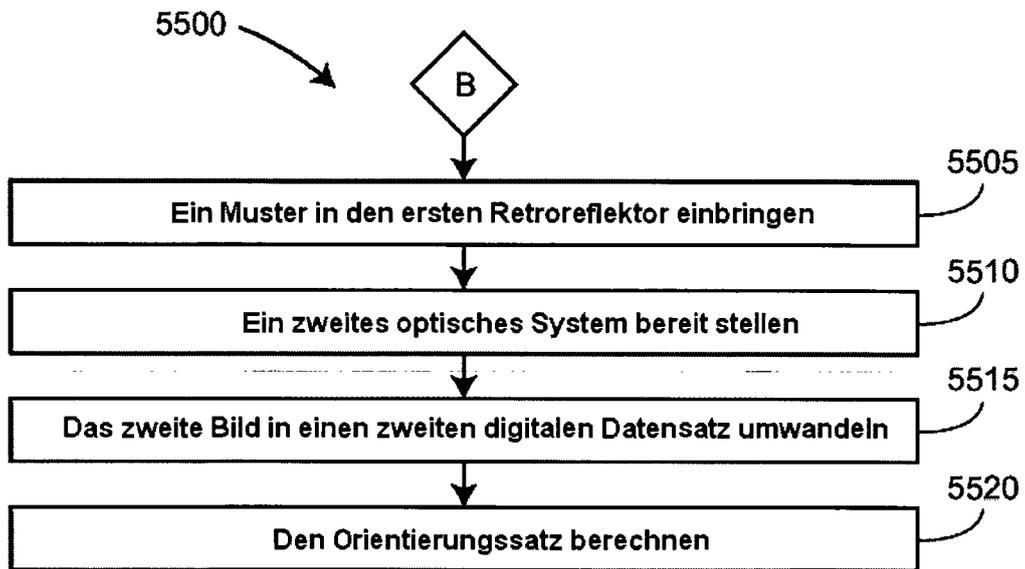


FIG. 25

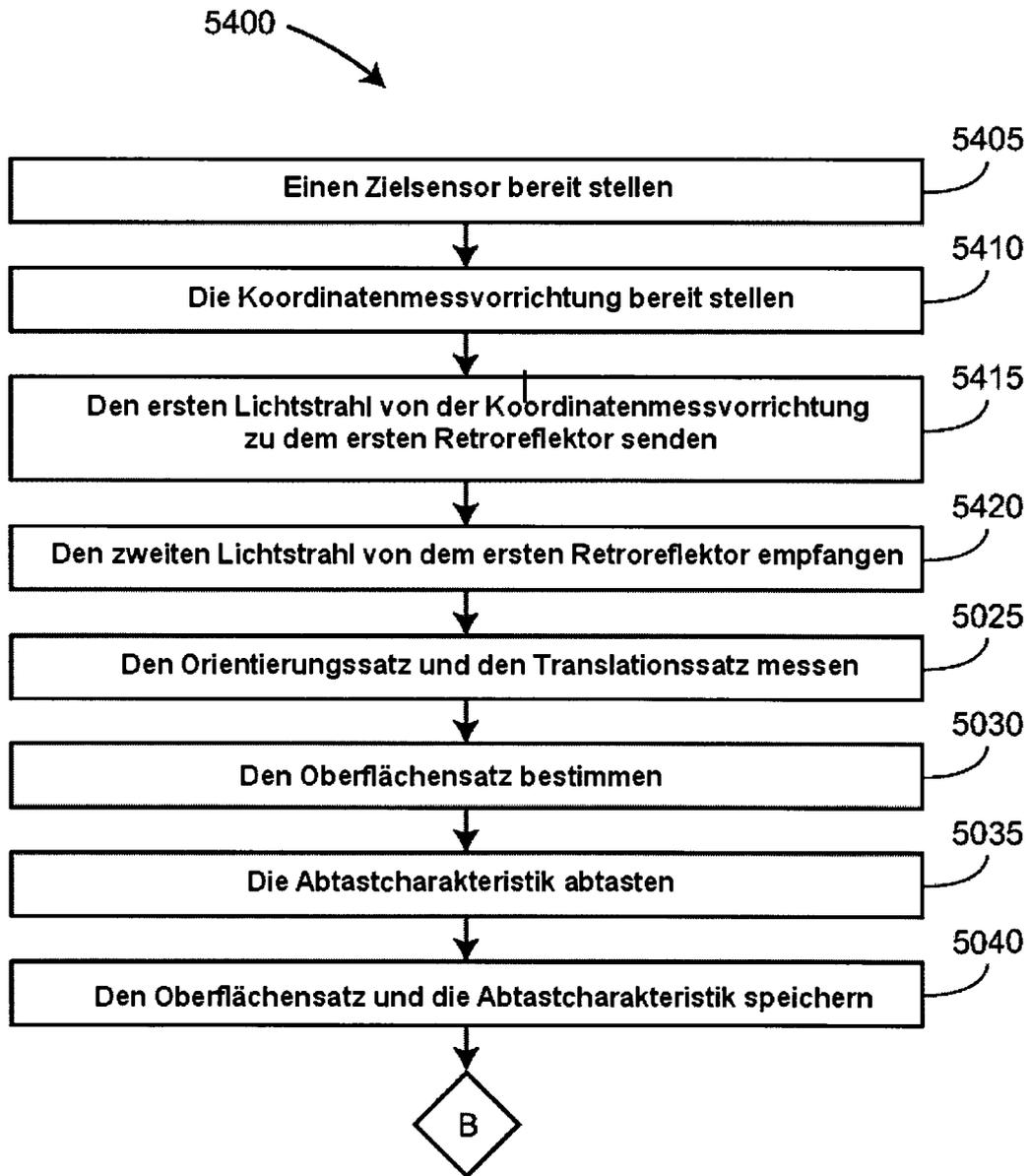


FIG. 24

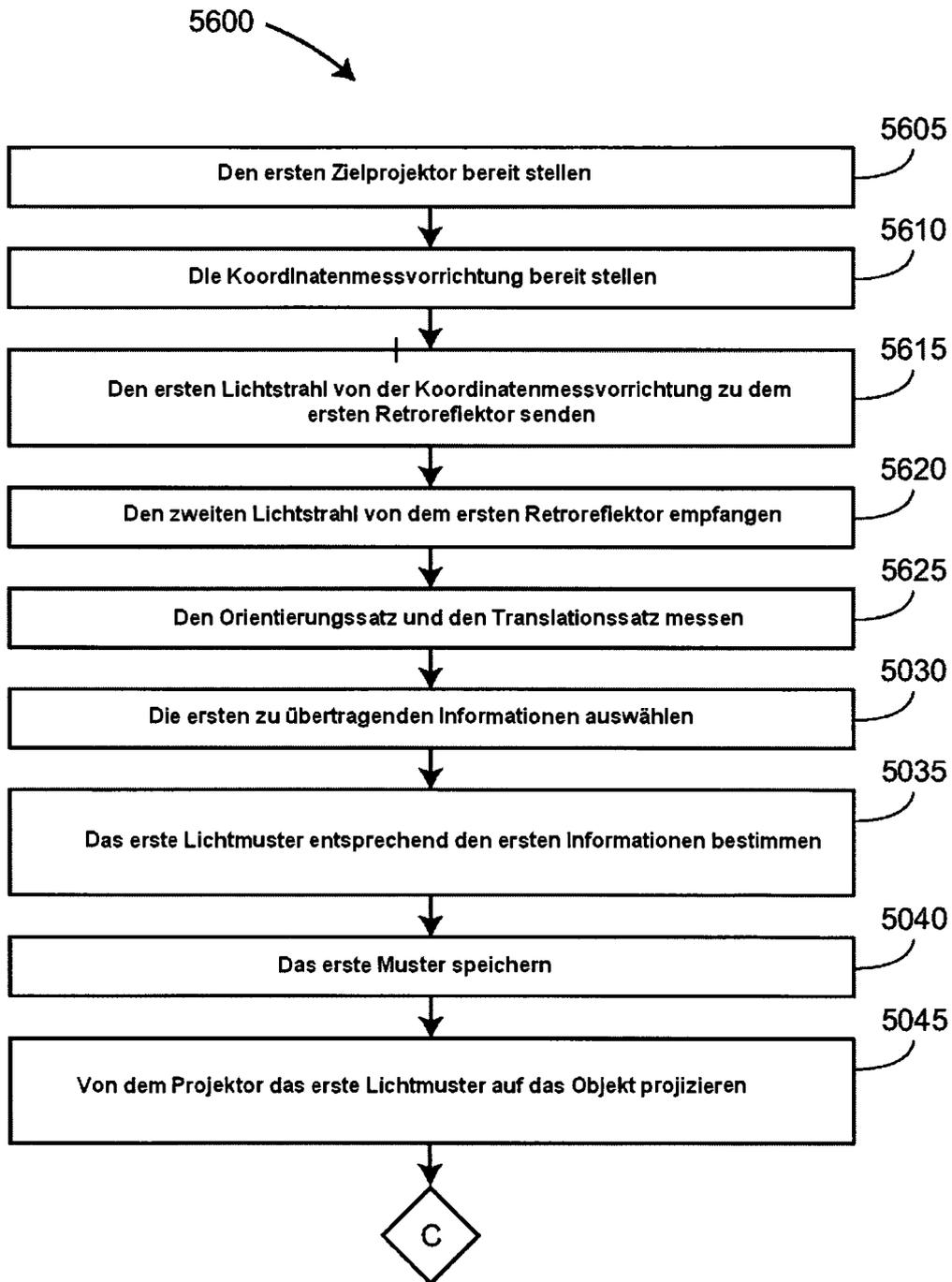


FIG. 26

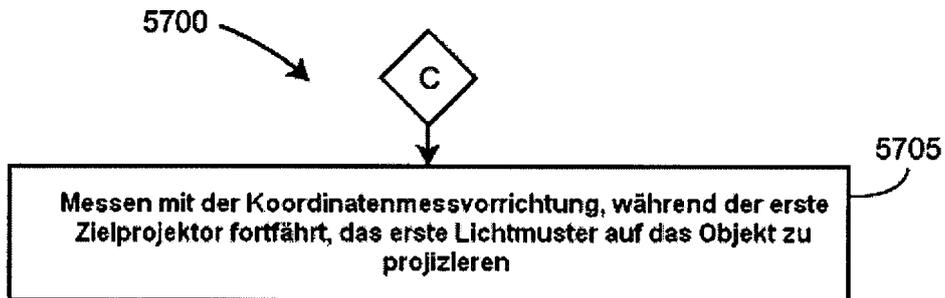


FIG. 27

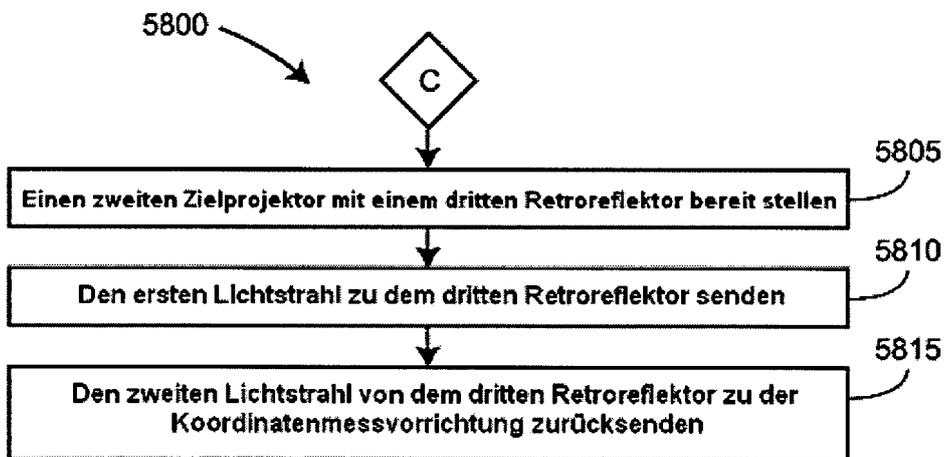


FIG. 28

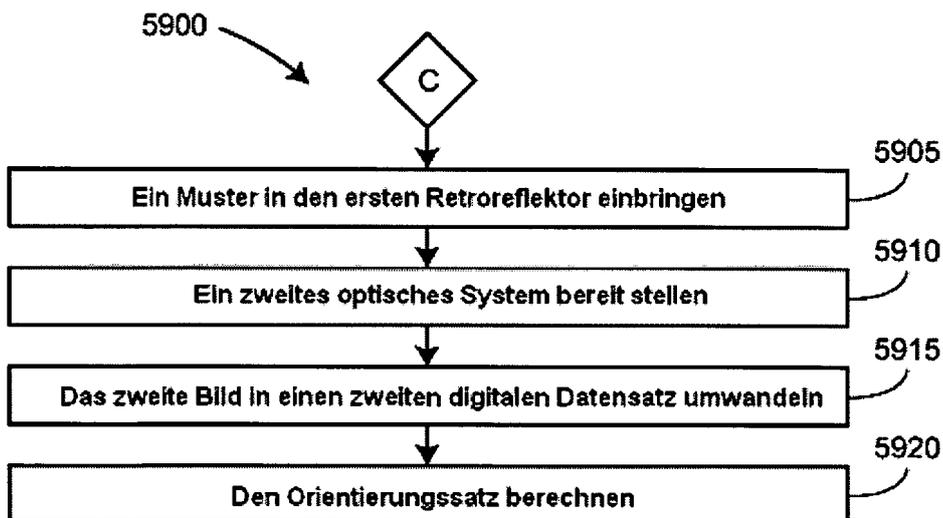


FIG. 29

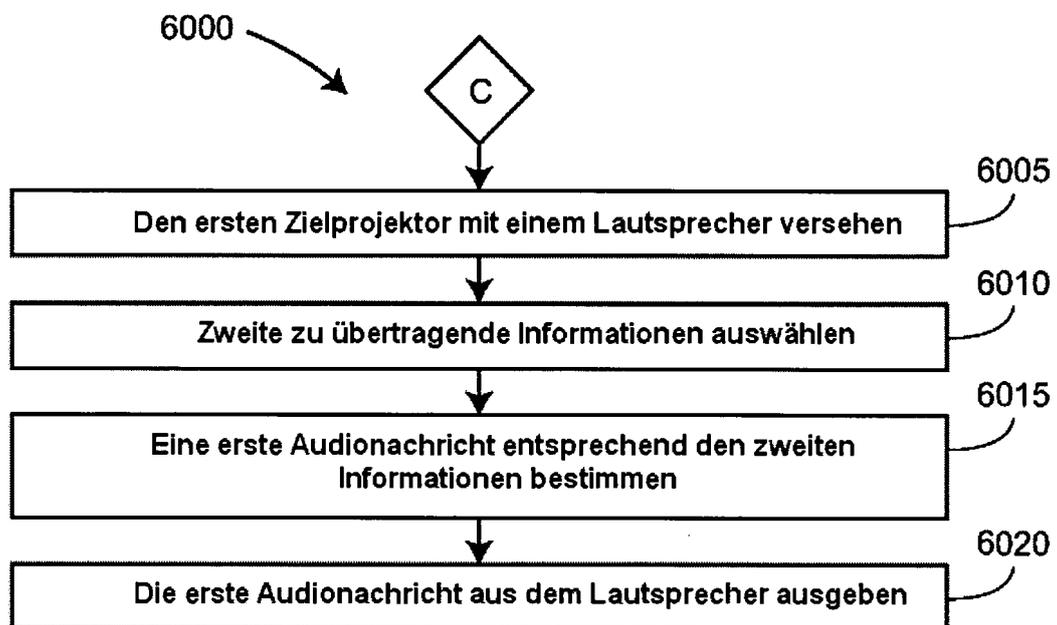


FIG. 30

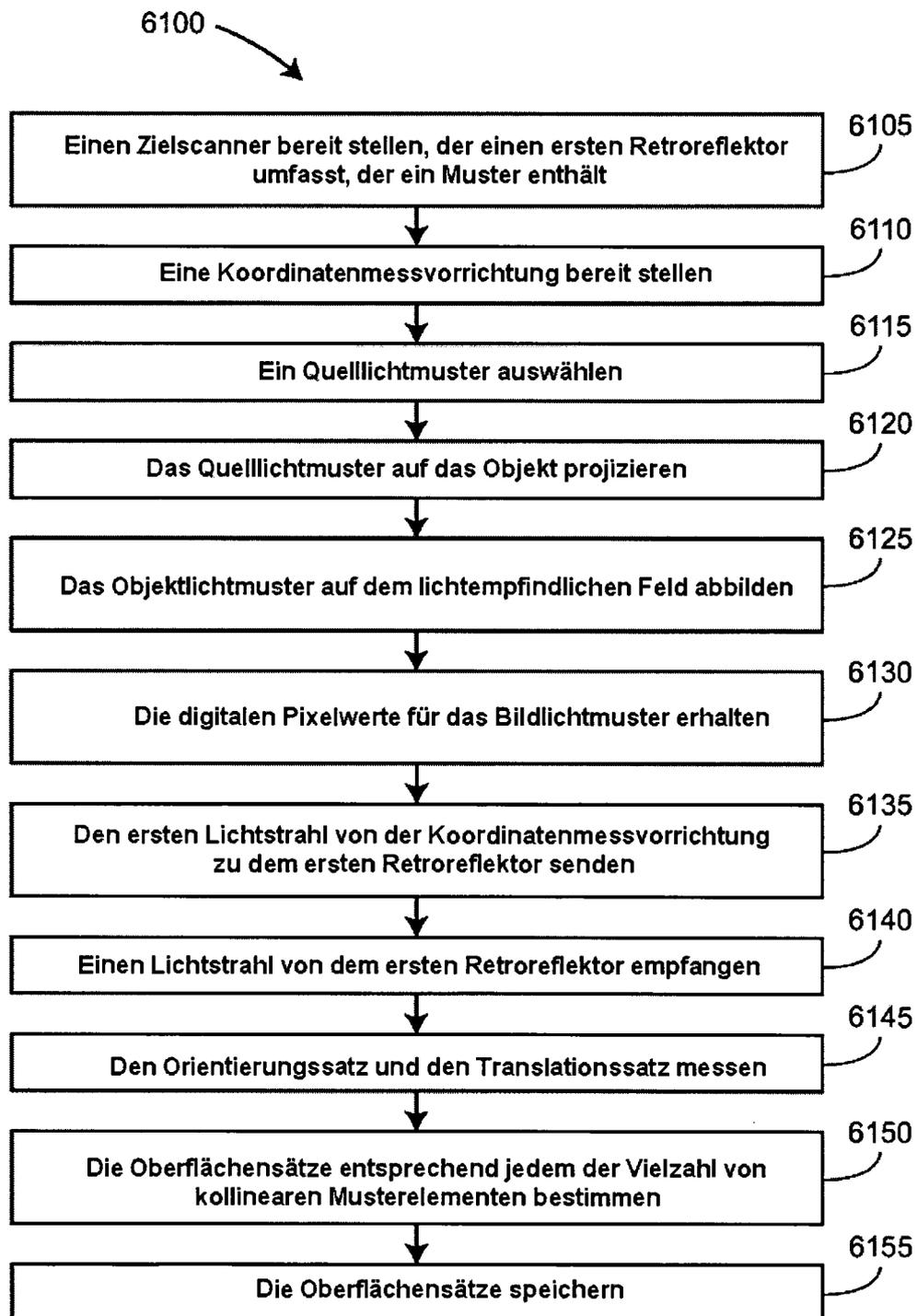


FIG. 31

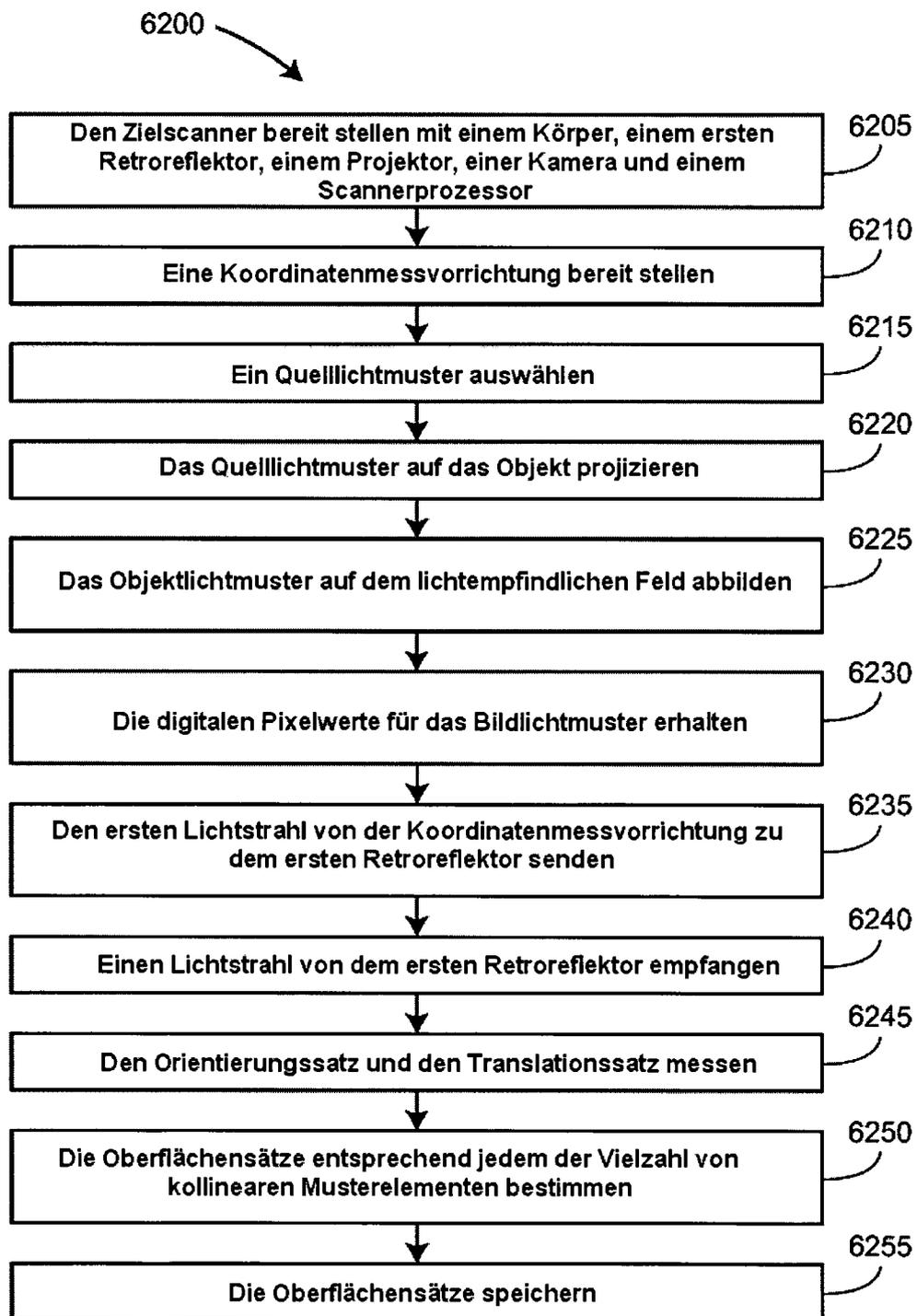


FIG. 32