



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2020 201 536.8**
(22) Anmeldetag: **07.02.2020**
(43) Offenlegungstag: **12.08.2021**

(51) Int Cl.: **G01B 11/25 (2006.01)**
G06T 7/593 (2017.01)

(71) Anmelder:
**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung eingetragener Verein,
80686 München, DE; Friedrich-Schiller-Universität
Jena, 07745 Jena, DE**

(72) Erfinder:
**Landmann, Martin, 07745 Jena, DE; Dietrich,
Patrick, 07745 Jena, DE; Heist, Stefan, Dr., 07745
Jena, DE; Kühmstedt, Peter, Dr., 07745 Jena, DE;
Notni, Gunther, Prof. Dr., 07745 Jena, DE**

(74) Vertreter:
**Pfenning, Meinig & Partner mbB Patentanwälte,
10719 Berlin, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

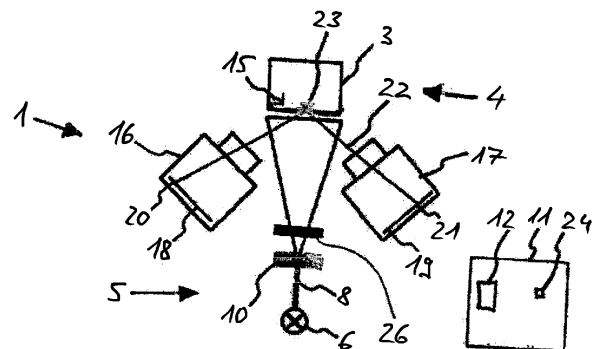
DE	10 2015 211 954	B4
DE	10 2008 064 104	A1
DE	10 2015 211 954	A1
US	6 239 436	B1
US	2018 / 0 356 213	A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Vorrichtung zum berührungslosen Vermessen einer Objektoberfläche**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung (1) und ein Verfahren zum berührungslosen Vermessen einer Objektoberfläche (2). Bei dem vorgeschlagenen Verfahren wird eine zeitlich veränderliche Temperaturverteilung auf der Objektoberfläche (2) durch serielles Aufprägen von mehreren thermischen Mustern (9) auf die Objektoberfläche (2) erzeugt. Anschließend wird jeweils ein Wärmebild der Objektoberfläche (2) durch mindestens eine Wärmebildkamera (16, 17) zu mehreren aufeinanderfolgenden Aufnahmezeitpunkten erfasst, so dass für Punkte in einer Bildebene (18, 19) der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras (16, 17) jeweils eine Folge von Wärmebildwerten erfasst wird. Daraufhin werden korrespondierende Punkte (20, 21) in den Bildebenen (18, 19) der Wärmebildkameras (16, 17) oder in der Bildebene der Wärmebildkamera und in einer der Strahlungsquelle (6) zugeordneten Bildebene identifiziert, indem eine Ähnlichkeit zwischen den für potentiell korrespondierende Punkte erfassten bzw. simulierten Folgen von Wärmebildwerten maximiert wird. Dann werden Raumkoordinaten der Objektoberfläche (2) durch Triangulation auf Basis der als korrespondierend identifizierten Punkte (20, 21) bestimmt. Beim Aufprägen der Muster (9) bestrahlte Oberflächenelemente sind dabei räumlich so begrenzt, dass ein Bild jeder durch einen einzelnen der Bestrahlungsimpulse bestrahlten Fläche in der Bildebene (18, 19) der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras (16, 17) kleiner ist als 5 % einer Gesamtfläche dieser Bildebene (18, 19).



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum berührungslosen geometrischen Vermessen einer Objektoberfläche durch Bestrahlen mit einer Strahlungsquelle, wobei die Strahlungsquelle derart eingerichtet ist, dass durch die Strahlung beim Auftreffen auf die Objektoberfläche an dieser eine Temperaturerhöhung stattfindet, sowie die Aufnahme und Verarbeitung von mit mindestens einer Wärmebildkamera aufgenommenen Wärmebildern. Die Erfindung bezieht sich außerdem auf eine Vorrichtung zum berührungslosen geometrischen Vermessen einer Objektoberfläche, mit der sich dieses Verfahren durchführen lässt.

[0002] Verfahren zum berührungslosen Vermessen von Objektoberflächen sind in vielfältigen Ausprägungen bekannt. Solche Verfahren verwenden typischerweise einen Projektor zum Aufprojizieren von Mustern auf eine zu vermessende Oberfläche sowie mindestens eine Kamera zum Aufnehmen der Oberfläche mit den darauf projizierten Mustern. So ist beispielsweise in der Druckschrift DE 10 2006 049 695 A1 ein Verfahren beschrieben, bei dem Streifenmuster auf ein Objekt projiziert werden und mittels zweier in einem definierten Abstand zueinander angeordneter Kameraobjektive aus zwei verschiedenen Richtungen jeweils zwei Bilder des Objekts mit den aufprojizierten Streifenmustern aufgenommen werden, so dass für Bildpunkte in den Bildern des Objekts jeweils Phasenwerte ermittelt werden können. Darauf basierend werden dann einander entsprechende Bildpunkte in den mit den beiden Kameraobjektiven aufgenommenen Bildern identifiziert. Auf Basis der einander entsprechenden Bildpunkte werden dann durch Triangulation Tiefeninformationen für auf diese Bildpunkte abgebildete Objektpunkte ermittelt.

[0003] Mit diesem und ähnlichen Verfahren aus dem Stand der Technik können Oberflächen aus einer Reihe von Materialien zufriedenstellend vermessen werden. Bei stark reflektierenden, transparenten, transluzenten oder stark absorbierenden Objektoberflächen liefern solche bekannten Verfahren dagegen keine brauchbaren oder nur sehr ungenaue Ergebnisse. Für Objekte aus einer Vielzahl technologisch relevanter Materialien, wie Glas, Metall oder Faserverbundwerkstoff, und auch für Objekte mit glatten lackierten Oberflächen sind diese Verfahren daher nicht geeignet.

[0004] Aus der Thermographie ist die Formvermessung von Objekten durch großflächige Erwärmung der Objekte mittels einer thermischen Quelle (6 Röhren, 1200 W pro Röhre) und anschließende Auswertung der Temperaturprofile in den Bildern einer Wärmebildkamera bekannt.

[0005] Es wurde auch bereits die Formvermessung mittels strukturierter thermischer Erwärmung und Wärmebildauswertung an Glas demonstriert, wobei mittels eines CO₂-Lasers aktiv Streifenmuster projiziert, dadurch Wärmezonen generiert und diese wiederum mit einer Wärmebildkamera erfasst wurden. Basierend auf dem Triangulationsprinzip konnten die 3D-Geometriedaten der Glaskörper berechnet und dargestellt werden. Ein ähnliches Messprinzip unter Verwendung einer strukturierten Emissionsfläche mit oder ohne zusätzliches Musterelement zur Generierung definierter flächenhafter Muster ist aus der Druckschrift DE 10 2008 064 104 B4 bekannt. Die projizierten Muster erzeugen auf den Objekten eine flächenhafte Wärmeverteilung, die von der Objektoberfläche abgestrahlt und mit einer Wärmebildkamera erfasst wird.

[0006] Im Gegensatz zu den definierten thermischen Mustersequenzen werden gemäß der DE 10 2015 211 954 B4 unregelmäßige statistisch variierende flächenhafte Muster (z. B. speckle-artige Muster oder aperiodische Sinusmuster wie in DE 10 2013 013 791 B4) nicht nur auf das Messobjekt abgebildet sondern infolge der lokalen Erwärmung thermisch eingepreßt. Diese thermischen Muster verändern sich zeitlich aufgrund der Diffusion der Wärme im Material.

[0007] Aus der DE 10 2015 211 954 A1 ist ein thermographisches Verfahren zum berührungslosen Vermessen einer Objektoberfläche bekannt, bei dem mindestens ein flächenhaftes thermisches Muster auf die Objektoberfläche aufgeprägt wird und durch zwei Wärmebildkameras Sequenzen von Wärmebildern aufgenommen werden, für die jeweils homologe Punkte einander zugeordnet werden können, wobei die Ermittlung der Objektoberfläche durch Triangulation auf der Basis der als jeweils korrespondierend erkannten Punkte der beiden Wärmebildkameras geschieht.

[0008] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren vorzuschlagen, das auch transparente, transluzente oder stark reflektierende oder absorbierende Objektoberflächen auch von Objekten mit beträchtlicher Wärmeleitung berührungslos und gegenüber dem Stand der Technik schneller und genauer zu vermessen erlaubt. Außerdem liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, eine entsprechende Vorrichtung vorzuschlagen, mit der sich auch derartige Oberflächen berührungslos vermessen lassen.

[0009] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Hauptanspruchs sowie durch eine Vorrichtung mit den Merkmalen des Nebenanspruchs. Vorteilhafte Weiterbildungen ergeben sich mit den Merkmalen der abhängigen Ansprüche und der Ausführungsbeispiele.

[0010] Die Erfindung bezieht sich demgemäß auf ein Verfahren zum berührungslosen Vermessen einer Objektoberfläche mit folgenden Schritten:

- Erzeugen einer zeitlich veränderlichen Temperaturverteilung auf der Objektoberfläche durch Aufprägen von mehreren zeitlich aufeinander folgenden verschiedenen thermischen Mustern auf die Objektoberfläche durch Bestrahlen mit einer Strahlungsquelle mit zeitlich aufeinander folgenden Bestrahlungsimpulsen, bei denen auf der Objektoberfläche jeweils ein oder mehrere Oberflächenelemente bestrahlt werden, wobei die Strahlungsquelle so beschaffen ist, dass eine durch sie erzeugte Strahlung beim Auftreffen auf die Objektoberfläche an dieser eine Temperaturerhöhung verursacht,
- zu mehreren aufeinanderfolgenden Aufnahmezeitpunkten Erfassen der Objektoberfläche durch eine oder mehrere Wärmebildkameras, wobei im Falle der Erfassung durch mehrere Wärmebildkameras diese simultan erfolgt, so dass für Punkte in einer jeweiligen Bildebene der einen oder mehreren Wärmebildkameras jeweils eine Folge von Wärmebildwerten erfasst wird,
- Identifizieren miteinander korrespondierender Punkte entweder in den Bildebenen der Wärmebildkameras oder in einer Bildebene der Wärmebildkamera und in einer der Strahlungsquelle zugeordneten realen oder virtuellen Bildebene, indem für Paare potentiell korrespondierender Punkte unter Zugrundelegung eines mathematischen Ähnlichkeitsmaßes eine Ähnlichkeit zwischen den für die Punkte des jeweiligen Paares erfassten bzw. im Fall von Punkten in der der Strahlungsquelle zugeordneten realen oder virtuellen Bildebene durch Simulation bestimmten Folgen von Wärmebildwerten bestimmt wird und die Ähnlichkeit durch Variieren mindestens eines der Punkte des jeweiligen Paares maximiert wird, und
- Bestimmen von Raumkoordinaten der Objektoberfläche durch Triangulation auf Basis der als korrespondierend identifizierten Punkte,

wobei die bestrahlten Oberflächenelemente räumlich so begrenzt sind, dass ein Bild jeder durch einen einzelnen der Bestrahlungsimpulse bestrahlten Fläche in der Bildebene der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras kleiner ist als 5 % einer Gesamtfläche dieser Bildebene, vorzugsweise sogar kleiner als 2,5 % der Gesamtfläche der Bildebene. Der Begriff Bildebene bezeichne dabei nur den Bereich der entsprechenden Ebene, in dem die jeweilige Wärmebildkamera ein Bild zu erfassen in der Lage ist, typischerweise also eine Oberfläche eines Bildsensors der Wärmebildkamera. Die Bildebene im Sinne des vorliegenden Dokuments ist also begrenzt durch eine äußere Grenze eines durch die jeweilige Wärme-

bildkamera erfassbaren Bereichs der die Bildebene definierenden Ebene. Die erwähnte enge räumliche Begrenzung der bestrahlten Fläche bezieht sich dabei nur auf das oder die mit dem jeweiligen einzelnen Bestrahlungsimpuls tatsächlich bestrahlte Oberflächenelement bzw. Oberflächenelemente, nicht dagegen notwendigerweise auf die resultierenden thermischen Muster, deren flächenmäßige Größen aufgrund thermischer Diffusion mit der Zeit zunehmen werden und dabei die oben für die jeweils bestrahlte Fläche definierte Obergrenze auch überschreiten können.

[0011] Die mit den einzelnen Bestrahlungsimpulsen bestrahlten Oberflächenelemente können z.B. punktförmig oder linienförmig und jeweils so klein bzw. schmal sein, dass im Fall eines punktförmigen Oberflächenelements ein Durchmesser und im Fall eines linienförmigen Oberflächenelements eine Linienbreite eines Bildes des jeweiligen punktförmigen oder linienförmigen Oberflächenelements in der Bildebene der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras kleiner ist als 1/50 eines größten Durchmessers dieser Bildebene.

[0012] Der größte Durchmesser der Bildebene wird dabei typischerweise die Länge einer Bilddiagonale sein, z.B. eine Diagonale des Bildsensors der betroffenen Wärmebildkamera. Erfindungsgemäß sind die jeweils bestrahlten Oberflächenelemente also räumlich eng begrenzt und mithin flächenmäßig verhältnismäßig klein.

[0013] Besonders vorteilhaft ist es, wenn die in den verschiedenen Bestrahlungsimpulsen bestrahlten Oberflächenelemente -zumindest im Fall einiger der unmittelbar aufeinander folgenden Bestrahlungsimpulse - nicht nur verschieden, sondern auch voneinander beabstandet sind. Dass in aufeinander folgenden Bestrahlungsimpulsen bestrahlte Oberflächenelemente voneinander beabstandet sind, soll dabei heißen, dass sich zumindest im Fall einiger der Bestrahlungsimpulse die Oberflächenelemente, die in unmittelbar aufeinander folgenden Bestrahlungsimpulsen bestrahlt werden, nicht berühren. Dabei kann es vorteilhaft sein, wenn zwischen den unmittelbar nacheinander beleuchteten Oberflächenelementen ein Abstand verbleibt, der so groß ist, dass ein Bild dieses Abstandes in der Bildebene der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras größer ist als 1/100 oder 2/100 oder sogar 5/100 des größten Durchmessers dieser Bildebene und/oder im Fall punktförmiger oder linienförmiger bestrahlter Oberflächenelemente größer als der Durchmesser bzw. die Linienbreite der Bilder der jeweils bestrahlten punktförmigen oder linienförmigen Oberflächenelemente in der Bildebene. Der Durchmesser (im Fall eines punktförmigen Oberflächenelements) bzw. die Linienbreite (im Fall eines linienförmigen Oberflächenelements) des Bildes des jeweiligen punktförmigen oder linienförmigen Ober-

flächenelements in der Bildebene der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras wird bei typischen Ausführungen des Verfahrens sogar kleiner sein als 1/100 oder kleiner als 1/200 des größten Durchmessers dieser Bildebene.

[0014] Durch das erfindungsgemäße Verfahren werden sequenziell verschiedene thermische Muster auf die Objektoberfläche durch Bestrahlung mit einer Strahlungsquelle aufgeprägt. Die bestrahlten Oberflächenelemente können beispielsweise punkt- oder linienförmig ausgebildet sein. Die Ausdehnung der bestrahlten Oberflächenelemente ist jedenfalls eng begrenzt, so dass mit einer zur Verfügung stehenden Strahlungsquelle, beispielsweise einem optoelektronischen Bauelement, wie einer LED oder einem Laser, die wesentliche verfügbare Leistung auf einen sehr kleinen Anteil der gesamten bestrahlbaren und zu vermessenden Objektoberfläche konzentriert werden kann. Damit kann bei einer begrenzten zur Verfügung stehenden Leistung dennoch in kleinen Bereichen der Objektoberfläche eine beträchtliche Temperaturerhöhung in sehr kurzer Bestrahlungszeit erreicht werden. Die Strahlungsquelle kann dabei eine Infrarotlichtquelle sein, was allerdings nicht unbedingt erforderlich ist, weil auch mit Strahlung anderer Wellenlängen Wärme in die zu vermessenden Objektoberfläche eingetragen werden kann.

[0015] Durch die nur kurze notwendige Bestrahlungszeit kann bei Bedarf eine große Anzahl von verschiedenen Oberflächenelementen in kurzer Zeit nacheinander bestrahlt werden. Ebenso kann in kurzer Zeit eine hohe Zahl von Wärmebildern aufgenommen werden. Wegen der vergleichsweise kurzen Zeit, die zum Aufprägen der einzelnen thermischen Muster benötigt wird, sowie wegen der engen räumlichen Begrenzung dieser Muster oder der einzelnen Oberflächenelemente dieser Muster lassen sich dabei trotz unvermeidlicher Wärmediffusion ein hohe Kontraste in den thermischen Mustern und mithin auch in den aufgenommenen Wärmebildern erreichen, was für eine genaue und rasche Identifikation korrespondierender Punkte oder homologer Punkte (beide Begriffe werden hier synonym verwendet) hilfreich ist und daher das vorgeschlagene Verfahren zum Vermessen von Oberflächen gegenüber dem Stand der Technik schneller und genauer macht.

[0016] Durch diese neue Strukturierung beim Aufprägen von Temperaturverteilungen auf die Objektoberfläche werden gegenüber dem Stand der Technik wesentliche Vorteile erreicht.

[0017] Beim Stand der Technik ist durch die flächenhafte Bestrahlung der Objektoberfläche die Bestrahlungsstärke nicht ausreichend hoch, sodass das Messobjekt pro Muster über eine relativ lange Zeitspanne im Bereich von Sekunden bestrahlt werden muss. Nach dieser Zeitspanne ist der maximale Tem-

peratur- bzw. Strahldichtekontrast geringer, als wenn mit höherer Bestrahlungsstärke und entsprechend kürzerer Bestrahlungsdauer gearbeitet wird. Die thermische Diffusion wirkt mit zunehmender Zeit dem sich aufbauenden thermischen Kontrast entgegen. Dadurch werden das Signal-Rausch-Verhältnis und die Messgenauigkeit bei Messungen gemäß dem Stand der Technik begrenzt.

[0018] Durch diese lange Zeitspanne der Bestrahlung der Objektoberfläche erhöht sich auch der Gesamt-Wärmeeintrag in das Volumen des Messobjektes aufgrund thermischer Diffusion. Die Temperatur des Messobjektes erhöht sich gegebenenfalls um mehrere Kelvin.

[0019] Bei Mustergenerierung unter Verwendung von Absorptionsmasken hat man hohe Strahlungsverluste bei der Bestrahlung.

[0020] Die Vermessung von Objekten mit hoher Wärmeleitfähigkeit (z. B. Metalle) ist aufgrund eines geringen maximalen Temperatur- bzw. Strahlungsdichtekontrasts gemäß dem Stand der Technik kaum möglich.

[0021] Die genannten Nachteile, die bei der Erzeugung von Temperaturverteilungen mit einer auf einen zu großen Oberflächenbereich verteilten Bestrahlung entstehen, werden sämtlich durch die erfindungsgemäße Begrenzung der Größe der bestrahlten Oberflächenelemente vermieden. Messungen können daher schneller und mit größerem Kontrast als bisher durchgeführt werden.

[0022] Die Strahlungsquelle kann als LED oder Laser, beispielsweise Infrarotlaser, ausgebildet sein, wobei ein scannender Strahl oder eine Projektion der Strahlungsquelle mittels eines Projektors vorgesehen sein kann. Auf diese Weise kann, anders als beispielsweise bei der Verwendung von Masken, ein wesentlicher Teil der Leistung der Strahlungsquelle auf einen kleinen Teil der Objektoberfläche konzentriert werden.

[0023] Der Durchmesser eines beispielsweise punktförmigen oder die Breite eines beispielsweise linienförmigen bestrahlten Oberflächenelementes ist aufgrund der erwähnten engen räumlichen Begrenzung dieser Oberflächenelemente so klein, dass der entsprechende Oberflächenbereich ausreichend schnell und stark erhitzt werden kann, so dass der Temperatenausgleich durch thermische Diffusion während der Bestrahlung praktisch keine Rolle spielt. Dadurch kann bei der Bestimmung der thermischen Strukturen durch die Wärmebildkameras ein hoher Kontrast und damit ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis erreicht werden. Insgesamt kann sowohl das Aufprägen einer Reihe von thermischen Mustern als auch die Messung der notwendigen Wärmebilder

in kurzer Zeit beendet werden. Die erwähnte Flächenbegrenzung der durch die einzelnen Bestrahlungsimpulse bestrahlte Fläche oder im genannten Spezialfall punkt- oder linienförmiger bestrahlter Oberflächenelemente die Größenbegrenzung des Durchmessers eines punktförmigen oder der Breite eines linienförmigen bestrahlten Oberflächenelementes kann auch so formuliert werden, dass der Raumwinkel bzw. Winkel, unter dem die bestrahlte Fläche bzw. der Durchmesser des punktförmigen oder die Breite eines linienförmigen Oberflächenelementes von der Strahlungsquelle aus gesehen erscheint, kleiner ist als 5 % eines größten Raumwinkels bzw. $1/50$ des größten Winkels, unter dem die mit der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras erfassbare Oberfläche von der Wärmebildkamera aus gesehen erscheint.

[0024] Das für die Bestimmung der Ähnlichkeit der Folgen zugrunde gelegte Ähnlichkeitsmaß kann zwar, muss jedoch nicht unbedingt alle Eigenschaften einer Metrik im engeren Sinne des Wortes aufweisen. Wichtig ist hierbei lediglich, dass das Ähnlichkeitsmaß geeignet ist, ein zum Auffinden möglichst ähnlicher Folgen geeignetes Maß für die Ähnlichkeit zwischen Wertefolgen zu liefern. Im Fall der Verwendung einer Metrik im Sinne der mathematischen Definition des Begriffes ergäbe sich das erwähnte Maximieren der Ähnlichkeit natürlich durch ein Minimieren eines durch die Metrik definierten Abstandes.

[0025] Zweckmäßigerweise kann die Ähnlichkeit zwischen den Folgen von Wärmebildwerten durch Auswerten einer für Paare von Wertefolgen definierten Korrelationsfunktion bestimmt werden, wobei die korrespondierenden Punkte dann jeweils durch Maximieren oder Minimieren eines Wertes einer so gebildeten Korrelation identifiziert werden können. Die Korrelationsfunktion kann dabei in weiten Grenzen beliebig gewählt werden und muss nur die für Korrelationsfunktionen typische Eigenschaft zeigen, bei Identität der durch Auswertung der Korrelationsfunktion verglichenen Folgen ein Extremum - typischerweise ein Maximum - anzunehmen und diesem Extremum umso näher zu kommen, je ähnlicher die verglichenen Folgen sind.

[0026] Typischerweise wird das beschriebene Verfahren mittels mindestens zweier Wärmebildkameras durchgeführt werden durch:

- simultanes Erfassen jeweils eines Wärmebildes der Objektoberfläche durch jede von den mindestens zwei voneinander beabstandeten Wärmebildkameras zu mehreren aufeinanderfolgenden Aufnahmezeitpunkten, so dass für Punkte in einer Bildebene jeder der Wärmebildkameras jeweils eine Folge von Wärmebildwerten erfasst wird,

- Identifizieren korrespondierender Punkte in den Bildebenen der Wärmebildkameras, indem für Paare potentiell korrespondierender Punkte unter Zugrundelegung eines mathematischen Ähnlichkeitsmaßes eine Ähnlichkeit zwischen den für die Punkte des jeweiligen Paares erfassten Folgen von Wärmebildwerten bestimmt wird und die Ähnlichkeit durch Variieren mindestens eines der Punkte des jeweiligen Paares maximiert wird,

- Bestimmen von Raumkoordinaten der Objektoberfläche durch Triangulation auf Basis der als korrespondierend identifizierten Punkte.

[0027] In diesem Fall müssen die auf die Objektoberfläche aufgeprägten thermischen Muster nicht bekannt sein. Vielmehr können die Muster völlig zufällig gewählt und insbesondere statistischer oder quasistatistischer Natur sein, sofern sie nur hinreichend kontrastreich, strukturreich und verschieden sind. Das gleiche gilt - im Rahmen der zuvor genannten Bedingungen - folglich auch für die genauen geometrischen Eigenschaften der zur Erzeugung der thermischen Muster verwendeten Bestrahlungsimpulse, beispielsweise für die genauen Positionen und/oder Orientierungen der bestrahlten Oberflächenelemente. Daher muss vorteilhafter Weise auch die innere Geometrie einer zur Durchführung des Verfahrens verwendeten Vorrichtung bei einer Verwendung von mindestens zwei Wärmebildkameras nicht vollständig bekannt sein. So kommt es z.B. im Fall der Verwendung einer Projektionsvorrichtung zum Erzeugen der thermischen Muster nicht auf deren genaue Anordnung relativ zu den Wärmebildkameras an. Das macht das Verfahren vergleichsweise unempfindlich gegenüber Toleranzen im Aufbau der verwendeten Vorrichtung. Bei alledem basiert die Triangulation auf einer ausgesprochen unkomplizierten Auswertung der Wärmebilder.

[0028] Unter Umständen kann es jedoch genügen, nur eine Wärmebildkamera zu verwenden. Bei Verwendung nur einer einzigen Wärmebildkamera wird die Strahlungsquelle bzw. eine Einrichtung zum Aufprägen der thermischen Muster mit der Strahlungsquelle im Hinblick auf die Schritte des Identifizierens homologer Punkte und des Bestimmens von Raumkoordinaten der Objektoberfläche durch Triangulieren wie eine zweite, sozusagen virtuelle Kamera behandelt, die also der Strahlungsquelle bzw. der Einrichtung zum Aufprägen der thermischen Muster zugeordnet werden kann. Auch Punkten in einer virtuellen oder (im Fall einer Strahlungsquellenmatrix) realen Bildebene dieser sozusagen virtuellen Kamera (also Punkten in einer der Strahlungsquelle bzw. der Einrichtung zum Aufprägen der thermischen Muster zugeordneten realen oder virtuellen Bildebene) können (simulierte) Wärmebildwerte zugeordnet werden. Diese Wärmebildwerte ergeben sich nämlich aus der integrierten Strahlungsleistung, die jeweils in

eine dem jeweiligen Punkt (in der realen oder virtuellen Bildebene) entsprechende Strahlrichtung abgestrahlt wurde. Sofern die Wärmediffusion in den betroffenen Zeiträumen nicht vernachlässigbar ist, kann es allerdings erforderlich sein, die Wärmediffusion durch Simulation zu berücksichtigen, um brauchbare (zeitlich sich entwickelnde) Wärmebildwerte in der der Strahlungsquelle zugeordneten Bildebene zu bestimmen. Dass kann aber insbesondere dann problemlos möglich sein, wenn das die Objektoberfläche bildende Material und/oder eine ungefähre Form der Objektoberfläche bereits bekannt ist. Möglicherweise ist in diesem Fall also eine teilweise oder annähernd bekannte Oberflächenform der zu vermessenden Objektoberfläche vorauszusetzen und auf dieser Basis mittels einer Simulationsrechnung die Entwicklung entsprechender Wärmewerte auf der Objektoberfläche näherungsweise zu bestimmen. Wird dann durch Triangulation mit den Wärmebildwerten der Kamera eine Oberflächenform bestimmt, so kann diese Form iterativ für die Simulationsrechnung verwendet werden, so dass der Prozess auf eine endgültig bestimmte Form der Objektoberfläche konvergiert.

[0029] Durch die Verwendung von Wärmebildkameras eignet sich das Verfahren, anders als vergleichbare Verfahren, bei denen Lichtmuster aufprojiziert und aufgenommen werden, auch zum Vermessen von Objektoberflächen, die im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums transparent oder transluzent oder auch stark reflektierend oder absorbierend sind. Bei Oberflächen dieser Art wäre ein aufprojiziertes Lichtmuster in einem Bild einer gewöhnlichen Kamera nämlich entweder möglicherweise überhaupt nicht sichtbar, weil aufprojiziertes Licht zu stark transmittiert, absorbiert oder in für die Kamera ungünstiger Richtung gerichtet reflektiert würde, oder es fielen zurückgestreute Lichtanteile in die Kamera, die aus tieferen Schichten hinter der Objektoberfläche kämen. Beides würde ein zuverlässiges Identifizieren korrespondierender Punkte und daher auch die richtige Ermittlung der nötigen Tiefeninformation durch Triangulation vereiteln. Dieses Problem wird bei dem vorgeschlagenen Verfahren dadurch gelöst, dass statt Lichtmustern Temperaturverteilungen verwendet werden. Diese lassen sich nämlich einerseits auch bei transparenten oder transluzenten Materialien leichter auf einen Oberflächenbereich begrenzt erzeugen, während Lichtmuster in diesen Fällen unweigerlich tief ins Material eindringen. Andererseits erlaubt die Aufnahme mit Wärmebildkameras auch dann zuverlässig Bilder der vom jeweiligen thermischen Muster geprägten Objektoberfläche zu erzeugen, wenn man mit einer im sichtbaren Bereich arbeitenden Kamera entweder wegen ungünstiger Reflexion oder starker Absorption nicht genug sähe oder zu tief ins Material hineinblicken würde.

[0030] Es kann auch vorgesehen sein, dass in aufeinander unmittelbar folgenden Bestrahlungsimpulsen sprunghaft wechselnde und voneinander beabstandete Oberflächenelemente, insbesondere in Form jeweils einer einzigen Linie, bestrahlt werden. Ein nicht zu kleiner Abstand zwischen den mit aufeinander folgenden thermischen Mustern bestrahlten Oberflächenelementen hat dabei den Vorteil, dass ein Kontrast anschließend aufgenommenen Wärmebildern nicht unnötig stark durch Diffusion zuvor projizierter Muster gestört wird.

[0031] Damit lassen sich in kurzen Zeitabständen hinreichend verschiedene thermische Strukturen auf die Objektoberfläche aufprägen, wodurch bei ausreichender Intensität der Bestrahlung/Wärmeerzeugung die Gesamtmesszeit deutlich verringert wird, die für eine hinreichend eindeutige Bestimmung von hinreichend vielen Paaren homologer Punkte benötigt wird.

[0032] Es kann vorgesehen sein, dass die Strahlungsquelle zunächst einen Strahl, beispielsweise einen Laserstrahl, erzeugt, wobei dieser Strahl durch ein optisches Aufweitelement, beispielsweise bestehend aus einer oder mehreren Zylinderlinsen, derart aufgeweitet wird, dass er auf der Objektoberfläche ein Oberflächenelement in Form einer Linie bestrahlt.

[0033] Durch eine solches optisches Aufweitelement kann somit beispielsweise durch einen auf einen Punkt fokussierten Laserstrahl ein linienförmiger Strahl erzeugt werden.

[0034] Es kann zudem vorgesehen sein, dass mindestens einer der Aufnahmezeitpunkte von Wärmebildern in einem Zeitintervall liegt, während dessen kein neues thermisches Muster auf die Objektoberfläche aufgeprägt wird, so dass sich die Temperaturverteilung auf der Objektoberfläche zwischen dem vorangegangenen Aufnahmezeitpunkt und diesem mindestens einen Aufnahmezeitpunkt im Wesentlichen nur durch thermische Diffusion verändert.

[0035] Alternativ oder zusätzlich kann auch vorgesehen sein, dass mindestens einer der Aufnahmezeitpunkte von Wärmebildern zu einem Zeitpunkt nach dem Aufprägen eines weiteren thermischen Musters auf die Objektoberfläche liegt, so dass sich die Temperaturverteilung auf der Objektoberfläche zwischen dem vorangegangenen Aufnahmezeitpunkt und diesem mindestens einen Aufnahmezeitpunkt einerseits durch thermische Diffusion und zudem durch einen weiteren Energieeintrag durch einen weiteren Bestrahlungsimpuls verändert.

[0036] Es kann vorgesehen sein, dass die Ähnlichkeit zwischen den Folgen von Wärmebildwerten oder zwischen den Folgen von Wärmebildwerten durch Auswerten einer für Paare von Wertefolgen definier-

ten Korrelationsfunktion bestimmt wird und die korrespondierenden Punkte jeweils durch Maximieren oder Minimieren eines Wertes einer so gebildeten Korrelation identifiziert werden.

[0037] Entsprechend vorteilhaft wie das beschriebene Verfahren ist die vorgeschlagene Vorrichtung zum berührungslosen Vermessen von Oberflächen. Diese Vorrichtung umfasst eine Einrichtung zum Aufprägen thermischer Muster auf eine zum Vermessen in einem Objektraum anzuordnende Objektoberfläche mit einer Strahlungsquelle, wobei die Strahlungsquelle so beschaffen ist, dass eine durch sie erzeugte Strahlung beim Auftreffen auf die Objektoberfläche an dieser eine Temperaturerhöhung verursacht, eine oder mehrere voneinander beabstandete Wärmebildkameras zum Aufnehmen von Wärmebildern der Objektoberfläche im Objektraum sowie eine Steuer- und Auswerteeinheit zum Ansteuern der Einrichtung zum Aufprägen thermischer Muster und der einen oder mehreren Wärmebildkameras und zum Auswerten der damit aufgenommenen Wärmebilder, wobei die Steuer- und Auswerteeinheit im Zusammenwirken mit der Einrichtung zum Aufprägen thermischer Muster dazu eingerichtet ist, folgende Schritte auszuführen:

- Erzeugen einer zeitlich veränderlichen Temperaturverteilung auf der Objektoberfläche durch Aufprägen von mehreren zeitlich aufeinander folgenden verschiedenen thermischen Mustern auf die Objektoberfläche durch Bestrahlen mit der Strahlungsquelle mit zeitlich aufeinander folgenden Bestrahlungsimpulsen, die jeweils zum Bestrahlen eines oder mehrerer Oberflächenelemente auf der Objektoberfläche geeignet sind, wobei die bestrahlten Oberflächenelemente räumlich so begrenzt sind, dass ein Bild jeder durch einen einzelnen der Bestrahlungsimpulse bestrahlten Fläche in einer Bildebene der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras kleiner ist als 5 % oder als 2,5 % einer Gesamtfläche dieser Bildebene,

- zu mehreren aufeinanderfolgenden Aufnahmezeitpunkten Erfassen der Objektoberfläche durch die eine oder mehrere Wärmebildkameras, wobei im Falle der Erfassung durch mehrere Wärmebildkameras diese simultan erfolgt, so dass für Punkte in der jeweiligen Bildebene der einen oder mehreren Wärmebildkameras jeweils eine Folge von Wärmebildwerten erfasst wird,

- Identifizieren miteinander korrespondierender Punkte entweder in den Bildebenen der Wärmebildkameras oder in einer Bildebene der Wärmebildkamera und in einer realen oder virtuellen Bildebene der Einrichtung zum Aufprägen thermischer Muster, indem für Paare potentiell korrespondierender Punkte unter Zugrundelegung eines mathematischen Ähnlichkeitsmaßes eine Ähnlichkeit zwischen den für die Punkte

des jeweiligen Paares erfassten bzw. im Fall von Punkten in der der Strahlungsquelle zugeordneten realen oder virtuellen Bildebene durch Simulation bestimmten Folgen von Wärmebildwerten bestimmt wird und die Ähnlichkeit durch Variieren mindestens eines der Punkte des jeweiligen Paares maximiert wird, und

- Bestimmen von Raumkoordinaten der Objektoberfläche durch Triangulation auf Basis der als korrespondierend identifizierten Punkte.

[0038] Die Einrichtung zum Aufprägen thermischer Muster und die Steuer- und Auswerteeinheit können dabei derart eingerichtet sein, dass die in den verschiedenen Bestrahlungsimpulsen bestrahlten Oberflächenelemente zumindest im Fall einiger der unmittelbar aufeinander folgenden Bestrahlungsimpulse verschieden und voneinander beabstandet sind und/oder dass die mit den einzelnen Bestrahlungsimpulsen bestrahlten Oberflächenelemente punkt- oder linienförmig und jeweils so klein bzw. schmal sind, dass im Fall eines punktförmigen Oberflächenelements ein Durchmesser und im Fall eines linienförmigen Oberflächenelements eine Linienbreite eines Bildes des jeweiligen punkt- oder linienförmigen Oberflächenelements in der Bildebene der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras kleiner ist als $1/50$ - in manchen Ausführungen auch kleiner als $1/100$ oder sogar kleiner als $1/200$ - eines größten Durchmessers dieser Bildebene.

[0039] Eine solche Vorrichtung kann zur Durchführung des beschriebenen Verfahrens verwendet werden und auch so eingerichtet sein, dass sie für die Durchführung der hier beschriebenen optionalen Ausgestaltungen des Verfahrens geeignet ist.

[0040] Für eine Reduzierung des Suchaufwandes bei der Identifikation der korrespondierenden Punkte kann eine Einschränkung der als potentiell korrespondierend infrage kommenden Punkte unter Ausnutzung der Epipolarometrie erfolgen. So kann die Variation des mindestens einen der Punkte auf einen eingeschränkten Bereich der jeweiligen Bildebene beschränkt werden, weil als korrespondierende Punkte nur die Punkte in Frage kommen, die auf durch den jeweils anderen Punkt und die innere Geometrie des Systems der zwei Wärmebildkameras definierten Epipolarlinien liegen. So kann das Identifizieren der korrespondierenden Punkte beispielsweise dadurch geschehen, dass für jeden einer Vielzahl von Punkten in der Bildebene einer ersten der Wärmebildkameras auf einer korrespondierenden Epipolarlinie in der Bildebene einer zweiten der Wärmebildkameras nach dem dazu korrespondierenden Punkt gesucht wird, indem die verwendete Korrelationsfunktion bzw. das Ähnlichkeitsmaß zwischen der Folge von Wärmebildwerten, die für den jeweiligen Punkt in der Bildebene der ersten Wärmebildkamera erfasst worden ist, und den Folgen von Wärmebildwerten,

die für die Punkte auf der korrespondierenden Epipolarlinie in der Bildebene der zweiten Wärmebildkamera erfasst worden sind, ausgewertet wird. Der korrespondierende Punkt lässt sich dann finden als der Punkt in der Bildebene der zweiten Kamera, für den die auf diese Weise gebildete Korrelation bzw. Ähnlichkeit den größten Wert annimmt, für den also z. B. die Korrelationsfunktion ein Maximum annimmt und mithin der Wert der Korrelation maximiert wird. Dabei kann der jeweils korrespondierende Punkt subpixelgenau, also inklusive Subpixelinterpolation, bestimmt werden.

[0041] Es kann vorgesehen sein, dass mindestens einer der Aufnahmezeitpunkte in einem Zeitintervall liegt, während dessen kein neues thermisches Muster auf die Objektoberfläche aufgeprägt wird, so dass sich die Temperaturverteilung auf der Objektoberfläche zwischen dem vorangegangenen Aufnahmezeitpunkt und diesem mindestens einen Aufnahmezeitpunkt durch thermische Diffusion verändert. Die Temperaturverteilung auf der Objektoberfläche kann sich zu diesem mindestens einen Aufnahmezeitpunkt also insbesondere von dem zuletzt auf die Objektoberfläche aufgeprägten thermischen Muster unterscheiden. Die Tatsache, dass sich die Temperaturverteilung auf der Objektoberfläche selbsttätig ändert, kann dadurch in vorteilhafter Weise ausgenutzt werden, um vergleichsweise einfach und rasch hinreichend viele hinreichend unterschiedliche Wärmebildpaare zu erfassen, die dann zum Identifizieren homologer Punkte und zum Triangulieren verwendet werden können.

[0042] Sobald ein thermisches Muster auf eine Objektoberfläche aufgeprägt ist, nimmt die Temperaturverteilung durch Thermodiffusion eine zeitliche Entwicklung. In der Regel klingen Temperaturdifferenzen zwischen wärmeren und kälteren Bereichen der Oberflächen zeitlich ab. Dabei muss ein Erfassen und Aufprägen, anders als bei einer Verwendung gewöhnlicher Lichtmuster, nicht zwingend zeitlich synchron erfolgen. Insbesondere kann beispielweise durch ein einmaliges Aufprägen gefolgt von anschließend mindestens zweimaligem Erfassen von Wärmebildern eine hinreichend starke zeitliche Änderung der Wärmebildwerte erreicht werden. Typischerweise wird ein Aufprägen gefolgt von mehrmaligem Erfassen. Es ist auch denkbar, dass zunächst ein gleichzeitiges Aufprägen und Erfassen erfolgt und anschließend ohne neuerliches Aufprägen mehrmals Wärmebilder erfasst werden. Auch wenn es nicht ausgeschlossen ist, dass vor jedem Erfassen ein neues thermisches Muster aufgeprägt wird oder dass das Erfassen und das Aufprägen grundsätzlich synchron erfolgt, so können jedoch auch bei einem Aufprägen mehrerer thermischer Muster, nach und unter Umständen auch beim Aufprägen jedes dieser thermischen Muster jeweils mehrere Wärmebildpaare auf-

genommen werden, bevor das nächste thermische Muster aufgeprägt wird.

[0043] Im Hinblick auf die erläuterte Möglichkeit der Ausnutzung thermischer Diffusion kann es zweckmäßig sein, wenn die Steuer- und Auswerteeinheit eingerichtet ist, die Einrichtung zum Aufprägen thermischer Muster und die Wärmebildkameras so anzu steuern, dass mindestens einer der Aufnahmezeitpunkte in einem Zeitintervall liegt, während dessen die Einrichtung zum Aufprägen thermischer Muster kein neues thermisches Muster aufprägt. Das jüngste Aufprägen eines thermischen Musters kann zu diesem mindestens einen Aufnahmezeitpunkt dagegen schon beendet sein.

[0044] Das mindestens eine thermische Muster kann z. B. durch eine Projektionsvorrichtung aufgeprägt werden. Die genannte Einrichtung zum Aufprägen thermischer Muster kann also insbesondere eine Projektionsvorrichtung sein. Bei der Strahlungsquelle kann es sich um ein opto-elektronisches Bauelement und oder eine Infrarotlichtquelle handeln. Typischerweise ist die Strahlungsquelle eine LED oder ein Laser sein. Die Wahl der Strahlungsquelle kann vom Material eines zu vermessenden Objektes abhängen kann. Zweckmäßigerweise wird eine Strahlungsquelle verwendet, die eine effiziente Erwärmung des Materials erlaubt. Dabei kann die Strahlungsquelle für eine gepulste oder eine kontinuierliche Abgabe der Strahlungsleistung eingerichtet sein.

[0045] Im Fall der Verwendung einer Projektionsvorrichtung kann es zweckmäßig sein, wenn diese das mindestens eine optische Muster durch Infrarotstrahlung auf die Objektoberfläche aufprägt. Zweckmäßigerweise weist die Projektionsvorrichtung also eine Strahlungsquelle zur Erzeugung von Infrarotstrahlung auf. Beispielsweise kann die Projektionsvorrichtung einen Kohlenstoffdioxidlaser umfassen, der Infrarot-Strahlung mit einer Wellenlänge von etwa 10,6 μm abgibt. Eine solche Strahlungsquelle ist vorteilhaft zum Vermessen von Oberflächen aus Glas, da viele Glassorten in diesem Wellenlängenbereich einen hohen Absorptionskoeffizienten aufweisen, so dass sie sich bei einer Bestrahlung durch einen Kohlenstoffdioxidlaser besonders effizient erwärmen lassen.

[0046] Da die Vermessung, anders als bei herkömmlichen Musterprojektionsverfahren, nicht auf einer Detektion von Reflexion oder Streuung elektromagnetischer Strahlung beruht, sondern auf einer Emission elektromagnetischer Strahlung durch das zu vermessende Objekt und auf einer Detektion der so emittierten Strahlung, kann ein Spektralbereich der verwendeten Wärmebildkameras entsprechend der Emissionswellenlängen gewählt bzw. variiert werden. So kann der Spektralbereich der verwendeten Wärmebildkameras z. B. im Bereich der fernen Infrarotstrahlung zwischen 5 μm und 14 μm oder auch im

Bereich der mittleren Infrarotstrahlung zwischen 3 μm und 5 μm liegen. Je nachdem, was für Temperaturen die zeitabhängige Temperaturverteilung umfasst, ist unter Umständen auch eine Detektion von elektromagnetischer Strahlung im nahen Infrarot-Bereich oder auch bei Wellenlängen oberhalb von 14 μm denkbar. Zum Vermessen beispielsweise einer Oberfläche eines Objektes aus Glas ist eine Detektion bei Wellenlängen von mehr als 5 μm vorteilhaft, da viele Glassorten in diesem Wellenlängenbereich keine Transparenz aufweisen. Deshalb kann auf diese Weise erreicht werden, dass die mit den Wärmebildkameras detektierte Strahlung von der zu vermessenden Oberfläche des Objektes herrührt und nicht aus dem Volumen des Objektes kommt. Empfindlichkeiten im zuerst genannten Wellenlängenbereich wiederum können insbesondere auch deshalb vorteilhaft sein, weil in diesem Wellenlängenbereich bei einer Erwärmung durch die thermischen Muster ausgehend von üblichen Raumtemperaturen besonders signifikante Intensitätsänderungen der Wärmestrahlung auftreten. Dabei ist es zwar möglich, nicht jedoch notwendig, dass der Empfindlichkeitsbereich der Wärmebildkameras mit dem Spektrum einer zum Erzeugen der thermischen Muster verwendeten Projektionsvorrichtung in Deckung liegt oder sich mit diesem auch nur überschneidet.

[0047] Die Einrichtung zum Aufprägen thermischer Muster kann ein optisches Aufweitelement, beispielsweise in Form einer Zylinderlinse oder eines Zylinderlinsensystems oder eines Spiegels, aufweisen, das einen auf einen Punkt auf der Objektoberfläche gerichteten Strahl der Strahlungsquelle zu einer Linie aufweitet.

[0048] Eine weitere Ausgestaltung ist möglich durch eine steuerbare optische Ablenkeinrichtung für die durch die Strahlungsquelle ausgesandte Strahlung zur sprunghaften Verschiebung von den durch die Strahlungsquelle bestrahlten - beispielsweise punkt- und/oder linienförmigen - Oberflächenelementen.

[0049] Dabei kann es vorteilhaft sein, wenn der durch die Verschiebung geschaffene Abstand zwischen den unmittelbar nacheinander beleuchteten Oberflächenelementen so groß ist, dass ein Bild dieses Abstandes in der Bildebene der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras größer ist als 1/100 oder 2/100 oder sogar 5/100 des größten Durchmessers dieser Bildebene und/oder - im Fall punkt- oder linienförmiger bestrahlter Oberflächenelemente - größer als der Durchmesser bzw. die Linienbreite der Bilder der jeweils bestrahlten punkt- bzw. linienförmigen Oberflächenelemente in der Bildebene.

[0050] Es kann ferner vorgesehen sein, dass die Steuer- und Auswerteeinheit dazu eingerichtet ist, die Einrichtung zum Aufprägen thermischer Muster und die Wärmebildkameras so anzusteuern, dass min-

destens einer der Aufnahmezeitpunkte in einem Zeitintervall liegt, während dessen die Einrichtung zum Aufprägen thermischer Muster kein neues thermisches Muster aufprägt, und/oder dass die Steuer- und Auswerteeinheit dazu eingerichtet ist, die Einrichtung zum Aufprägen thermischer Muster und die Wärmebildkameras so anzusteuern, dass mindestens einer der Aufnahmezeitpunkte zu einem Zeitpunkt nach dem Aufprägen eines weiteren thermischen Musters auf die Objektoberfläche liegt, so dass sich die Temperaturverteilung auf der Objektoberfläche zwischen dem vorangegangenen Aufnahmezeitpunkt und diesem mindestens einen Aufnahmezeitpunkt einerseits durch thermische Diffusion und zudem durch einen weiteren Energieeintrag durch einen weiteren Bestrahlungsimpuls verändert.

[0051] Die Vorrichtung kann weiter dadurch ausgestaltet werden, dass die Steuer- und Auswerteeinheit dazu eingerichtet ist, die Ähnlichkeit zwischen den Folgen von Wärmebildwerten durch Auswerten einer für Paare von Wertefolgen definierten Korrelationsfunktion zu bestimmen und die korrespondierenden Punkte jeweils durch Maximieren oder Minimieren eines Wertes einer so gebildeten Korrelation zu identifizieren.

[0052] Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend anhand der Abbildungen beschrieben. Es zeigen

Fig. 1 eine schematische Aufsicht auf eine Vorrichtung zum berührungslosen Vermessen einer Objektoberfläche sowie ein damit vermessenes Objekt,

Fig. 2 eine schematische Aufsicht auf eine weitere Vorrichtung zum berührungslosen Vermessen einer Objektoberfläche sowie ein damit vermessenes Objekt und

Fig. 3 eine schematische Darstellung einer ähnlichen Vorrichtung, bei der jeweils simultan drei separate, zueinander parallele Linien als thermisches Muster auf die Objektoberfläche eingeprägt werden.

[0053] **Fig. 1** zeigt eine Ausführung einer Vorrichtung **1** zum berührungslosen Vermessen einer Objektoberfläche **2** eines Objekts **3** in einem Objekt- raum **4**. Die Vorrichtung **1** umfasst eine Projektions- vorrichtung **5** als Einrichtung zum Aufprägen linien- förmiger thermischer Muster **9** auf die Objektoberfläche **2** des Objekts **3**. Die Projektionsvorrichtung **5** umfasst eine Strahlungsquelle **6**, beispielsweise einen Kohlenstoffdioxidlaser, sowie ein optisches Element **7** in Form eines reflektierenden Elements, das die Strahlung zu der Objektoberfläche **2** lenkt und dabei so angesteuert und angetrieben werden kann, dass es seine Winkelstellung sprunghaft ändert, um jeweils durch die Strahlungsquelle **6** bestrahlte Oberflächenelemente sprunghaft auf der Objektoberfläche

che zu verschieben und dadurch zu erreichen, dass die durch unmittelbar aufeinander folgende Bestrahlungsimpulse erzeugten thermischen Muster **9** sehr signifikant voneinander unterscheiden. Das reflektierende Element kann durch ein Gitter, einen Spiegel, oder ein Freiformelement gegeben sein. Der Kohlenstoffdioxidlaser emittiert Infrarotstrahlung **8** in Form eines fokussierten Strahls, die an dem optischen Element **7** reflektiert oder gebeugt wird und anschließend auf die Objektoberfläche **2** trifft und diese beispielsweise entlang einer sehr schmalen Linie erwärmt. Im Strahlengang des Strahls **8** ist eine Zylinderlinse **25** angeordnet, die den Laserstrahl auf der Objektoberfläche **2** zu einem Muster **9** in Form einer - hier senkrecht zur Zeichenebene orientierten - Linie aufweitet. Statt der Zylinderlinse **25** kann auch ein anderes optisches Aufweitelement vorgesehen sein, beispielsweise ein Linsensystem mit mehreren Zylinderlinsen. Auch kann die Zylinderlinse **25** oder das an deren Stelle tretende Aufweitelement statt vor hinter dem optischen Element **7** angeordnet sein. Anstelle des Kohlenstoffdioxidlasers kann auch z.B. ein anderen Laser oder eine LED als Strahlungsquelle **6** verwendet werden. Dabei muss die Strahlungsquelle **6** nicht notwendigerweise eine Infrarotlichtquelle sein, sofern sie nur geeignet ist, eine lokale Temperaturerhöhung auf der Objektoberfläche **2** zu verursachen. Dementsprechend kann auch eine andere elektromagnetische Strahlung, insbesondere Licht anderer Wellenlänge, an die Stelle der Infrarotstrahlung **8** treten.

[0054] Das zu vermessende Objekt **3** ist beispielsweise aus Silikat-Glas, es kann jedoch auch aus einem anderen Material bestehen, wobei sogar Materialien möglich sind, die eine bessere Wärmeleitung aufweisen, und die Oberfläche des Objekts **3** wird auf einem sehr kleinen, linienförmigen Teil der Objektoberfläche durch die am optischen Element **7** reflektierte oder gebeugte Infrarotstrahlung **8** erwärmt. Das reflektierende Element **7** wird in kurzen Abständen sprunghaft weiterbewegt, und es wird jeweils ein Bestrahlungsimpuls mit hoher Intensität über das Element auf jeweils einen anderen linienförmigen Bereich der Objektoberfläche gelenkt. Das reflektierende Element kann beispielsweise, wenn die Zylinderlinse weggelassen werden soll, auch so gestaltet sein, dass es einen eng auf einen Punkt fokussierten Strahl auf eine Linie auf der Objektoberfläche lenkt. Das reflektierende Element kann jedoch auch so gestaltet sein, dass es die Strahlung lediglich unverzerrt reflektiert, wenn zusätzlich bspw. eine Zylinderlinse vorgesehen ist.

[0055] Eine weitere Ausführung einer Vorrichtung **1** mit einer Projektionsvorrichtung **5** ist in **Fig. 2** schematisch dargestellt. Wiederkehrende Merkmale sind in dieser und auch in folgenden Abbildungen mit denselben Bezugszeichen versehen. In dieser Ausführung weist die Projektionsvorrichtung ein transmittie-

rendes optisches Element **10** auf, das wieder ein Gitter oder ein Freiformelement oder konkret eine Zylinderlinse sein kann und das zwischen der Strahlungsquelle **6** und der Objektoberfläche **2** angeordnet ist. Hierbei erzeugt die Strahlungsquelle **6** eine Infrarotstrahlung **8**, die auf das optische Element **10** trifft, durch diese transmittiert und dabei beispielsweise zu einem in einer Dimension linienartig aufgeweiteten Strahl geformt wird. Die durch die Strahlungsquelle **6** erzeugte Infrarotstrahlung **8** trifft nach Durchgang durch das optische Element **10** auf ein verschiebbares optisches Element **26**, wird durch dieses an gewünschte Bereiche der Objektoberfläche **2** gelenkt und erwärmt diese in Form eines thermischen, linienförmigen Musters **9**. Das verschiebbare optische Element kann als Linse ausgebildet sein, beispielsweise auch als Zylinderlinse, wenn das Element **10** den Strahl **8** nicht formt, sondern nur fokussiert oder kollimiert. Das optische Element **26** ist motorisch antreibbar und durch einen Computer **11** bzw. eine Steuer- und Auswerteeinheit **12** steuerbar.

[0056] Die Vorrichtung **1** weist also - auch in der zuvor beschriebenen Ausführung - unter anderem einen Computer **11** mit einer Steuer- und Auswerteeinheit **12** auf. Die Projektionsvorrichtung **5** und auch das antreibbare optische Element **7** bzw. das verschiebbare optische Element **26** wird durch die Steuer- und Auswerteeinheit **12** angesteuert. Diese legt damit fest, zu welchen Zeitpunkten welche thermischen Muster **9** auf die Objektoberfläche **2** aufgeprägt werden. Außerdem ist die Steuer- und Auswerteeinheit **12** eingerichtet zum Verfahren des optischen Elementes **7** bzw. **10** und/oder **26**, so dass das linienförmige thermische Muster **9** durch die Steuer- und Auswerteeinheit **12** zeitabhängig räumlich verschoben werden kann.

[0057] Nach Abschalten der Strahlungsquelle **6** entwickelt sich eine durch das thermische Muster **9** aufgeprägte Temperaturverteilung zeitlich durch eine Wärmeleitung in dem Objekt **3** weiter.

[0058] Die Vorrichtung **1** umfasst - wie auch bei dem zuvor beschriebenen Ausführungsbeispiel - eine erste Wärmebildkamera **16** und eine zweite Wärmebildkamera **17**, die jeweils Filter aufweisen können, um Volumenstrahlung des Objekts **3** zu unterdrücken. Die Wärmebildkameras **16**, **17** sind für elektromagnetische Strahlung im IR-Bereich empfindlich, beispielsweise für Wärmestrahlung in einem Wellenlängenbereich zwischen 7,5 µm und 14 µm. Die Wärmebildkameras **16**, **17** sind voneinander beabstandet angeordnet und werden ebenfalls durch die Steuer- und Auswerteeinheit **12** angesteuert. Die erste Wärmebildkamera **16** und die zweite Wärmebildkamera **17** sind so eingerichtet und ausgerichtet, dass sie die Temperaturverteilung **15** zumindest in einem Bereich der Objektoberfläche **2** in ihren jeweiligen Bildebenen **18**, **19** simultan, d.h. durch eine zeitgleiche Aufnah-

me jeweils eines Wärmebildes, erfassen können. Zu diesem Zweck wird die in Punkten **20**, **21** in den jeweiligen Bildebenen **18**, **19** gemessene Intensität einer Wärmestrahlung **22** ausgewertet.

[0059] Bei einer simultanen Erfassung der jeweiligen Wärmebilder wird ein Punkt **23** der Objektoberfläche **2** auf einen ersten Punkt **20** in der Bildebene **18** der ersten Wärmebildkamera **16** und auf einen zweiten Punkt **21** in der Bildebene **19** der zweiten Wärmebildkamera **17** abgebildet, wie in **Fig. 2** gezeigt ist. Der erste Punkt **20** und der zweite Punkt **21** bilden ein Paar korrespondierender Punkte.

[0060] Nach dem Aufprägen des thermischen Musters **9** regelt die Steuer- und Auswerteeinheit **12** ein Abschalten der Strahlungsquelle **6** durch ein Schließen eines Shutters oder Abschalten der Infrarotlichtquelle (z.B. des Lasers) und löst ein simultanes Erfassen von Wärmebildern durch die Wärmebildkameras **16**, **17** aus. Anschließend entwickelt sich die Temperaturverteilung auf der Objektoberfläche **2** durch Wärmediffusion. Die Steuer- und Auswerteeinheit **12** löst ein mehrmaliges erneutes simultanes Erfassen von Wärmebildern bei abgeschalteter Strahlungsquelle **6** und auch nach erneuter Bestrahlung der Objektoberfläche mit einem gegenüber dem ersten Bestrahlungsimpuls verschobenen linienförmigen Muster aus. Die beschriebenen Schritte des Aufprägens eines thermischen Musters **9** und Erfassens von Wärmebildern werden mehrmals mit unterschiedlichen oder jeweils gleichen, aber gegeneinander verschobenen thermischen Mustern **9** wiederholt. Die durch die verschiedenen aufgeprägten thermischen Muster **9** erzeugte zeitabhängige Temperaturverteilung **15** kann auch während des Aufprägens des jeweiligen thermischen Musters **9** erfasst werden, also ohne vorheriges Schließen eines Shutters oder Abschalten der Infrarotlichtquelle. In dem Fall kann es vorteilhaft sein, durch für Strahlung der Strahlungsquelle **6** undurchlässige Filter oder durch ein die Wellenlänge dieser Strahlung - im vorliegenden Beispiel also $10,6 \mu\text{m}$ - nicht umfassendes Empfindlichkeitsspektrum der Wärmebildkameras **16**, **17** sicherzustellen, dass nur die von der Objektoberfläche **2** emittierte Strahlung erfasst wird, nicht aber die gestreute oder reflektierte Strahlung der Strahlungsquelle **6**. Sofern hinreichend viele verschiedene thermische Muster **9** aufgeprägt werden, kann es unter Umständen auch ausreichen, wenn für jedes Aufprägen lediglich ein Paar von Wärmebildern erfasst wird, sei es während des Aufprägens, sei es kurz danach. Möglich ist auch ein Aufnehmen jeweils mindestens eines Wärmebildpaares während des Aufprägens jedes der thermischen Muster **9** und jeweils ein ein- oder mehrmaliges Erfassen von Wärmebildpaaren nach Schließen des Shutters und ggf. vor Aufprägen des nächsten thermischen Musters **9**. Die jeweiligen Wärmebilder werden auf einem Datenspeicher **24** zwischengespeichert, so dass auf diesem für jeden Punkt in den Bildebenen **18**, **19**

der Wärmebildkameras **16**, **17** jeweils eine Folge von Wärmebildwerten gespeichert wird.

[0061] In einem nächsten Schritt vergleicht die Steuer- und Auswerteeinheit **12** die erfasste Folge von Wärmebildwerten für jeden Punkt **20** in der Bildebene **18** der ersten Wärmebildkamera **16** mit den Folgen von Wärmebildwerten der Punkte in der Bildebene **19** der zweiten Wärmebildkamera **17**, um die korrespondierenden Punkte **20**, **21** zu identifizieren. Die Steuer- und Auswerteeinheit **12** beschränkt sich beim Auffinden des zum Punkt **20** in der Bildebene **18** der ersten Wärmebildkamera **16** korrespondierenden Punktes **21** in der Bildebene **19** der zweiten Wärmebildkamera **17** auf Punkte in der Bildebene **19** der zweiten Wärmebildkamera **17**, die auf einer durch den Punkt **20** in der Bildebene **18** der ersten Wärmebildkamera **16** festgelegten Epipolarlinie liegen.

[0062] Die Paare von Folgen von Wärmebildwerten werden verglichen, indem die Steuer- und Auswerteeinheit **12** mithilfe einer Korrelationsfunktion jedem der Paare von Folgen einen Ähnlichkeitswert zuordnet, wobei der Ähnlichkeitswert einen großen Wert für eine ausgeprägte Ähnlichkeit der Folgen annimmt und einen niedrigen Wert für sehr unterschiedliche Folgen. Nacheinander wertet die Steuer- und Auswerteeinheit **12** die Korrelationsfunktion der Folgen für potentiell korrespondierende Punkte paarweise aus, und unter Maximieren des Ähnlichkeitswertes können die tatsächlich korrespondierenden Punkte **20**, **21** in den Bildebenen **18**, **19** der beiden Wärmebildkameras **16**, **17** aufgefunden werden. Bei einer anderen Definition der Korrelationsfunktion ist es auch denkbar, dass die korrespondierenden Punkte **20**, **21** durch ein Minimieren anstatt durch ein Maximieren eines Ähnlichkeitswertes aufgefunden werden.

[0063] Anschließend bestimmt die Steuer- und Auswerteeinheit **12** Raumkoordinaten von Punkten **23** auf der Objektoberfläche **2** anhand der zuvor aufgefundenen korrespondierenden Punkte **20**, **21** in den Bildebenen **18**, **19** der beiden Wärmebildkameras **16**, **17**. Dafür wird ausgenutzt, dass die relative Position der Wärmebildkameras **16**, **17** bekannt ist, wobei die Raumkoordinaten darauf basierend durch Triangulation bestimmt werden.

[0064] **Fig. 3** zeigt eine ähnliche und entsprechend verwendete Vorrichtung **1**, bei der ein Strahl **8** einer Strahlungsquelle **6** in einem optischen Element **10** in drei zueinander parallele Strahlen **8a**, **8b** und **8c** aufgeteilt wird. Diese passieren ein Form- und Verschiebungselement **26**, das beispielsweise Zylinderlinsen aufweist, die jeweils linienförmige Strahlenformen, welche auf die Objektoberfläche **2** des Objekts **3** fallen. Dort werden durch die Strahlen thermische Muster **9'** von jeweils 3 parallelen Linien gebildet, die von den Wärmebildkameras **16**, **17** auf-

genommen werden. In kurzen zeitlichen Abständen wird das Verschiebeelement **26** senkrecht zur Richtung des Strahls **8a, 8b, 8c** sprunghaft verschoben, so dass sich auch das durch die Linien gebildete thermische Muster **9'** jeweils sprunghaft verschiebt. Die Bereiche, in denen auf diese Weise die drei Linien auf der Objektoberfläche bewegt werden, können disjunkt sein. Durch eine Folge von gegeneinander verschobenen thermischen Strukturen **9'** kann somit die gesamte Objektoberfläche erschlossen werden. Die Steuer- und Auswerteeinrichtung **11, 12, 24** steuert einerseits die Bestrahlungsimpulse der Strahlungsquelle **6**, weiter die Verschiebung des Elementes **26** und die Wärmebildkameras **16, 17** und nimmt auch die weiteren Verfahrensschritte bis zur Triangulation vor.

[0065] Die in den beschriebenen Beispielen linienförmigen bestrahlten Oberflächenelemente sind räumlich so begrenzt, dass ein Bild jeder durch einen einzelnen der Bestrahlungsimpulse bestrahlten Fläche in der Bildebene **18, 19** der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras **16, 17** kleiner ist als 2,5 % einer Gesamtfläche dieser Bildebene **18, 19**, also kleiner als 1/40 der Gesamtfläche der Bildebene, wobei diese Bildebene **18** bzw. **19** durch die sensitive Oberfläche eines Wärmebildsensors der jeweiligen Wärmebildkamera **16** bzw. **17** gegeben ist und als durch deren Rand begrenzt zu verstehen ist. Bei Abwandlungen der beschriebenen Ausführungsbeispiele können anstelle der linienförmigen thermischen Muster oder zusätzlich dazu auch punktförmige thermische Muster oder auch beliebige andere Muster auf die Objektoberfläche **2** aufgeprägt werden, sofern die dazu verwendeten Bestrahlungsimpulse diese Bedingung erfüllen oder flächenmäßig bzw. raumwinkelmäßig zumindest nicht mehr als doppelt so groß sind. Auch ist es möglich, eine der beiden Wärmebildkameras **16, 17** wegzulassen und stattdessen die Projektionsvorrichtung **5**, wie bereits weiter oben in allgemeinerem Kontext erläutert, als virtuelle Kamera zu behandeln und ihr eine - reale oder virtuelle - Bildebene zuzuordnen sowie Punkten in dieser Bildebene durch Simulation abhängig von den aufgeprägten thermischen Mustern Wärmebildwerte zuzuordnen, um dann Paare von jeweils einem dieser Wärmebildwerte und einem der mit der verbleibenden Wärmebildkamera **16** oder **17** tatsächlich erfassten zu bilden und in ansonsten analoger Weise - durch Identifizieren von Paaren korrespondierender Punkte und durch Triangulieren auf Basis dieser - die Raumkoordinaten der Punkte **23** auf der Objektoberfläche **2** zu bestimmen.

[0066] In den hier beschriebenen Ausführungsbeispielen werden zum Aufprägen der thermischen Muster durch die Strahlungsquelle **6** jeweils einzelne oder voneinander beabstandete punkt- oder linienförmigen Oberflächenelemente bestrahlt, die jeweils so klein bzw. schmal sind, dass im Fall eines punktför-

migen Oberflächenelements ein Durchmesser und im Fall eines linienförmigen Oberflächenelements eine Linienbreite eines Bildes des jeweiligen punkt- oder linienförmigen Oberflächenelements in der Bildebene **18** oder **19** der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras **16, 17** kleiner ist als 1/100 oder sogar 1/200 eines größten Durchmessers dieser Bildebene **18** bzw. **19**. Dabei verbleibt zwischen den für unmittelbar aufeinander folgend aufgeprägte thermische Muster unmittelbar nacheinander beleuchteten Oberflächenelementen ein Abstand, der so groß ist, dass ein Bild dieses Abstandes in der Bildebene **18** bzw. **19** der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras **16, 17** größer ist als 2/100 oder sogar 5/100 des größten Durchmessers dieser Bildebene **18, 19**. Ein Bild dieses Abstandes in der Bildebene **18** bzw. **19** der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras **16, 17** ist dabei insbesondere größer als der Durchmesser bzw. die Linienbreite der Bilder der jeweils bestrahlten punkt- bzw. linienförmigen Oberflächenelemente in der Bildebene **18** bzw. **19**. Der größte Durchmesser der Bildebene **18** und **19** ist bei den beschriebenen Ausführungsbeispielen jeweils durch eine Diagonale des Wärmebildsensors der jeweiligen Wärmebildkamera **16** bzw. **17** gegeben.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

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

Zitierte Patentliteratur

- DE 102006049695 A1 [0002]
- DE 102008064104 B4 [0005]
- DE 102015211954 B4 [0006]
- DE 102013013791 B4 [0006]
- DE 102015211954 A1 [0007]

Patentansprüche

1. Verfahren zum berührungslosen Vermessen einer Objektoberfläche (2) mit folgenden Schritten:

- Erzeugen einer zeitlich veränderlichen Temperaturverteilung (15) auf der Objektoberfläche (2) durch Aufprägen von mehreren zeitlich aufeinander folgenden verschiedenen thermischen Mustern (9, 9') auf die Objektoberfläche (2) durch Bestrahlen mit einer Strahlungsquelle (6) mit zeitlich aufeinander folgenden Bestrahlungsimpulsen, bei denen auf der Objektoberfläche (2) jeweils ein oder mehrere Oberflächenelemente bestrahlt werden, wobei die Strahlungsquelle (6) so beschaffen ist, dass eine durch sie erzeugte Strahlung beim Auftreffen auf die Objektoberfläche (2) an dieser eine Temperaturerhöhung verursacht,
- zu mehreren aufeinanderfolgenden Aufnahmezeitpunkten Erfassen der Objektoberfläche (2) durch eine oder mehrere Wärmebildkameras (16, 17), wobei im Falle der Erfassung durch mehrere Wärmebildkameras diese simultan erfolgt, so dass für Punkte in einer jeweiligen Bildebene (18, 19) der einen oder mehreren Wärmebildkameras (16, 17) jeweils eine Folge von Wärmebildwerten erfasst wird,
- Identifizieren miteinander korrespondierender Punkte (20, 21) entweder in den Bildebenen (18, 19) der Wärmebildkameras (16, 17) oder in einer Bildebene der Wärmebildkamera und in einer der Strahlungsquelle (6) zugeordneten realen oder virtuellen Bildebene, indem für Paare potentiell korrespondierender Punkte unter Zugrundelegung eines mathematischen Ähnlichkeitsmaßes eine Ähnlichkeit zwischen den für die Punkte des jeweiligen Paares erfassten bzw. im Fall von Punkten in der der Strahlungsquelle (6) zugeordneten realen oder virtuellen Bildebene durch Simulation bestimmten Folgen von Wärmebildwerten bestimmt wird und die Ähnlichkeit durch Variieren mindestens eines der Punkte des jeweiligen Paares maximiert wird, und
- Bestimmen von Raumkoordinaten der Objektoberfläche (2) durch Triangulation auf Basis der als korrespondierend identifizierten Punkte (20, 21), wobei die bestrahlten Oberflächenelemente räumlich so begrenzt sind, dass ein Bild jeder durch einen einzelnen der Bestrahlungsimpulse bestrahlten Fläche in der Bildebene (18, 19) der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras (16, 17) kleiner ist als 5 % einer Gesamtfläche dieser Bildebene (18, 19).

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die in den verschiedenen Bestrahlungsimpulsen bestrahlten Oberflächenelemente zumindest im Fall einiger der unmittelbar aufeinander folgenden Bestrahlungsimpulse verschieden und voneinander beabstandet sind und/oder dass die mit den einzelnen Bestrahlungsimpulsen bestrahlten Oberflächenelemente punkt- oder linienförmig und jeweils so klein bzw. schmal sind, dass im Fall eines punktförmigen Oberflächenelements ein Durchmes-

ser und im Fall eines linienförmigen Oberflächenelements eine Linienbreite eines Bildes des jeweiligen punkt- oder linienförmigen Oberflächenelements in der Bildebene (18, 19) der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras (16, 17) kleiner ist als 1/50 eines größten Durchmessers dieser Bildebene (18, 19).

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass in aufeinander unmittelbar folgenden Bestrahlungsimpulsen sprunghaft wechselnde und voneinander beabstandete Oberflächenelemente, vorzugsweise in Form jeweils einer einzigen Linie, bestrahlt werden.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwischen den unmittelbar nacheinander beleuchteten Oberflächenelementen ein Abstand verbleibt, der so groß ist, dass ein Bild dieses Abstandes in der Bildebene (18, 19) der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras (16, 17) größer ist als 1/100 des größten Durchmessers dieser Bildebene (18, 19).

5. Verfahren nach Anspruch 1 bis 4, **gekennzeichnet durch**:

- simultanes Erfassen jeweils eines Wärmebildes der Objektoberfläche (2) durch jede von mindestens zwei voneinander beabstandeten Wärmebildkameras (16, 17) zu mehreren aufeinanderfolgenden Aufnahmezeitpunkten, so dass für Punkte in einer Bildebene (18, 19) jeder der Wärmebildkameras (16, 17) jeweils eine Folge von Wärmebildwerten erfasst wird,
- Identifizieren korrespondierender Punkte (20, 21) in den Bildebenen (18, 19) der Wärmebildkameras (16, 17), indem für Paare potentiell korrespondierender Punkte unter Zugrundelegung eines mathematischen Ähnlichkeitsmaßes eine Ähnlichkeit zwischen den für die Punkte des jeweiligen Paares erfassten Folgen von Wärmebildwerten bestimmt wird und die Ähnlichkeit durch Variieren mindestens eines der Punkte des jeweiligen Paares maximiert wird,
- Bestimmen von Raumkoordinaten der Objektoberfläche (2) durch Triangulation auf Basis der als korrespondierend identifizierten Punkte (20, 21).

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Strahlungsquelle (6) eine Infrarotlichtquelle und/oder ein optoelektronisches Bauelement ist, vorzugsweise eine LED oder ein Laser, wobei vorzugsweise ein dadurch erzeugter Laserstrahl durch ein optisches Aufweitelement derart aufgeweitet wird, dass er auf der Objektoberfläche (2) ein Oberflächenelement in Form einer Linie bestrahlt.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens einer der Aufnahmezeitpunkte in einem Zeitintervall liegt, während dessen kein neues thermisches Mus-

ter (9, 9') auf die Objektoberfläche (2) aufgeprägt wird, so dass sich die Temperaturverteilung auf der Objektoberfläche (2) zwischen dem vorangegangenen Aufnahmezeitpunkt und diesem mindestens einen Aufnahmezeitpunkt durch thermische Diffusion verändert.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens einer der Aufnahmezeitpunkte zu einem Zeitpunkt nach dem Aufprägen eines weiteren thermischen Musters (9, 9') auf die Objektoberfläche (2) liegt, so dass sich die Temperaturverteilung auf der Objektoberfläche (2) zwischen dem vorangegangenen Aufnahmezeitpunkt und diesem mindestens einen Aufnahmezeitpunkt einerseits durch thermische Diffusion und zudem durch einen weiteren Energieeintrag durch einen weiteren Bestrahlungsimpuls verändert.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Ähnlichkeit zwischen den Folgen von Wärmebildwerten durch Auswerten einer für Paare von Wertefolgen definierten Korrelationsfunktion bestimmt wird und die korrespondierenden Punkte (20, 21) jeweils durch Maximieren oder Minimieren eines Wertes einer so gebildeten Korrelation identifiziert werden.

10. Vorrichtung (1) zum berührungslosen Vermessen von Oberflächen (2), umfassend eine Einrichtung (5) zum Aufprägen thermischer Muster (9, 9') auf eine zum Vermessen in einem Objektraum (4) anzuordnende Objektoberfläche (2) mit einer Strahlungsquelle (6), wobei die Strahlungsquelle (6) so beschaffen ist, dass eine durch sie erzeugte Strahlung beim Auftreffen auf die Objektoberfläche (2) an dieser eine Temperaturerhöhung verursacht, eine oder mehrere voneinander beabstandete Wärmebildkameras (16, 17) zum Aufnehmen von Wärmebildern der Objektoberfläche (2) im Objektraum (4) sowie eine Steuer- und Auswerteeinheit (12) zum Ansteuern der Einrichtung (5) zum Aufprägen thermischer Muster (9, 9') und der einen oder mehreren Wärmebildkameras (16, 17) und zum Auswerten der damit aufgenommenen Wärmebilder, wobei die Steuer- und Auswerteeinheit (12) im Zusammenwirken mit der Einrichtung (5) zum Aufprägen thermischer Muster (9, 9') dazu eingerichtet ist, folgende Schritte auszuführen:

- Erzeugen einer zeitlich veränderlichen Temperaturverteilung (15) auf der Objektoberfläche (2) durch Aufprägen von mehreren zeitlich aufeinander folgenden verschiedenen thermischen Mustern (9, 9') auf die Objektoberfläche (2) durch Bestrahlen mit der Strahlungsquelle (6) mit zeitlich aufeinander folgenden Bestrahlungsimpulsen, die jeweils zum Bestrahlen eines oder mehrerer Oberflächenelemente auf der Objektoberfläche (2) geeignet sind, wobei die bestrahlten Oberflächenelemente räumlich so begrenzt

sind, dass ein Bild jeder durch einen einzelnen der Bestrahlungsimpulse bestrahlten Fläche in einer Bildebene (18, 19) der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras (16, 17) kleiner ist als 5 % einer Gesamtfläche dieser Bildebene (18, 19),

- zu mehreren aufeinanderfolgenden Aufnahmezeitpunkten Erfassen der Objektoberfläche (2) durch die eine oder mehrere Wärmebildkameras (16, 17), wobei im Falle der Erfassung durch mehrere Wärmebildkameras diese simultan erfolgt, so dass für Punkte in der jeweiligen Bildebene (18, 19) der einen oder mehreren Wärmebildkameras (16, 17) jeweils eine Folge von Wärmebildwerten erfasst wird,

- Identifizieren miteinander korrespondierender Punkte (20, 21) entweder in den Bildebenen (18, 19) der Wärmebildkameras (16, 17) oder in einer Bildebene der Wärmebildkamera und in einer realen oder virtuellen Bildebene der Einrichtung (5) zum Aufprägen thermischer Muster (9, 9'), indem für Paare potentiell korrespondierender Punkte unter Zugrundelegung eines mathematischen Ähnlichkeitsmaßes eine Ähnlichkeit zwischen den für die Punkte des jeweiligen Paares erfassten bzw. im Fall von Punkten in der der Strahlungsquelle (6) zugeordneten realen oder virtuellen Bildebene durch Simulation bestimmten Folgen von Wärmebildwerten bestimmt wird und die Ähnlichkeit durch Variieren mindestens eines der Punkte des jeweiligen Paares maximiert wird, und

- Bestimmen von Raumkoordinaten der Objektoberfläche (2) durch Triangulation auf Basis der als korrespondierend identifizierten Punkte (20, 21).

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Einrichtung (5) zum Aufprägen thermischer Muster (9, 9') und die Steuer- und Auswerteeinheit (12) derart eingerichtet sind, dass die in den verschiedenen Bestrahlungsimpulsen bestrahlten Oberflächenelemente zumindest im Fall einiger der unmittelbar aufeinander folgenden Bestrahlungsimpulse verschieden und voneinander beabstandet sind und/oder dass die mit den einzelnen Bestrahlungsimpulsen bestrahlten Oberflächenelemente punkt- oder linienförmig und jeweils so klein bzw. schmal sind, dass im Fall eines punktförmigen Oberflächenelements ein Durchmesser und im Fall eines linienförmigen Oberflächenelements eine Linienbreite eines Bildes des jeweiligen punkt- oder linienförmigen Oberflächenelements in der Bildebene (18, 19) der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras (16, 17) kleiner ist als 1/50 eines größten Durchmessers dieser Bildebene (18, 19).

12. Vorrichtung (1) nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Einrichtung (5) zum Aufprägen thermischer Muster (9, 9') ein optisches Aufweitelement aufweist, das einen auf einen Punkt auf der Objektoberfläche (2) gerichteten Strahl (8) der Strahlungsquelle (6) zu einer Linie aufweitet.

13. Vorrichtung (1) nach Anspruch 11 oder 12, **gekennzeichnet durch** eine steuerbare optische Ablenkvorrichtung (7, 26) für die durch die Strahlungsquelle (6) ausgesandte Strahlung zur sprunghaften Verschiebung von durch die Strahlungsquelle (6) bestrahlten punkt- und/oder linienförmigen Oberflächenelementen.

14. Vorrichtung nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass der durch die Verschiebung geschaffene Abstand zwischen den unmittelbar nacheinander beleuchteten Oberflächenelementen so groß ist, dass ein Bild dieses Abstandes in der Bildebene (18, 19) der Wärmebildkamera oder jeder der Wärmebildkameras (16, 17) größer ist als 1/100 des größten Durchmessers dieser Bildebene (18, 19).

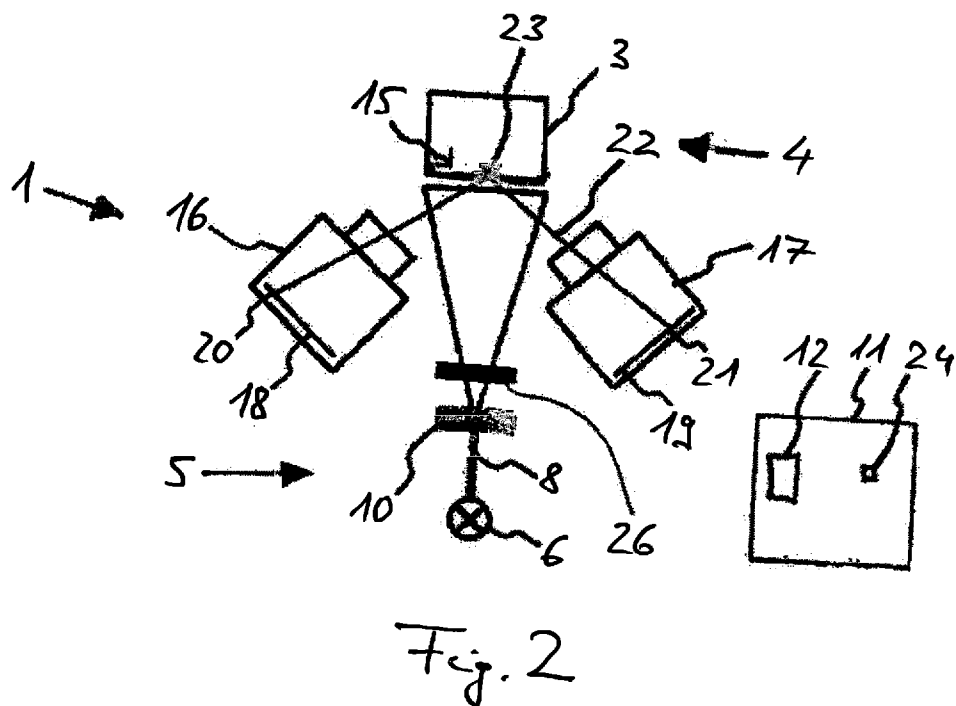
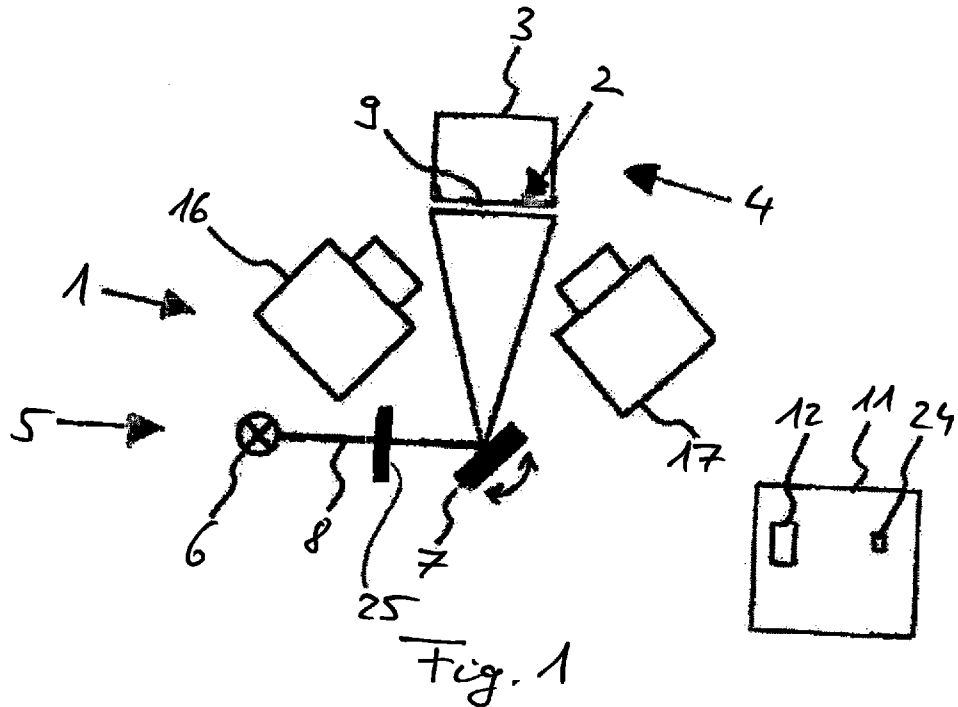
15. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 11 bis 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuer- und Auswerteeinheit (12) dazu eingerichtet ist, die Einrichtung (5) zum Aufprägen thermischer Muster (9, 9') und die Wärmebildkameras (16, 17) so anzusteuern, dass mindestens einer der Aufnahmezeitpunkte in einem Zeitintervall liegt, während dessen die Einrichtung (5) zum Aufprägen thermischer Muster (9, 9') kein neues thermisches Muster (9, 9') aufprägt.

16. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 11 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuer- und Auswerteeinheit (12) dazu eingerichtet ist, die Einrichtung (5) zum Aufprägen thermischer Muster (9, 9') und die Wärmebildkameras (16, 17) so anzusteuern, dass mindestens einer der Aufnahmezeitpunkte zu einem Zeitpunkt nach dem Aufprägen eines weiteren thermischen Musters (9, 9') auf die Objekttoberfläche (2) liegt, so dass sich die Temperaturverteilung (15) auf der Objektoberfläche (2) zwischen dem vorangegangenen Aufnahmezeitpunkt und diesem mindestens einen Aufnahmezeitpunkt einerseits durch thermische Diffusion und zudem durch einen weiteren Energieeintrag durch einen weiteren Bestrahlungsimpuls verändert.

17. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 11 bis 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuer- und Auswerteeinheit (12) dazu eingerichtet ist, die Ähnlichkeit zwischen den Folgen von Wärmebildwerten durch Auswerten einer für Paare von Wertefolgen definierten Korrelationsfunktion zu bestimmen und die korrespondierenden Punkte (20, 21) jeweils durch Maximieren oder Minimieren eines Wertes einer so gebildeten Korrelation zu identifizieren.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen



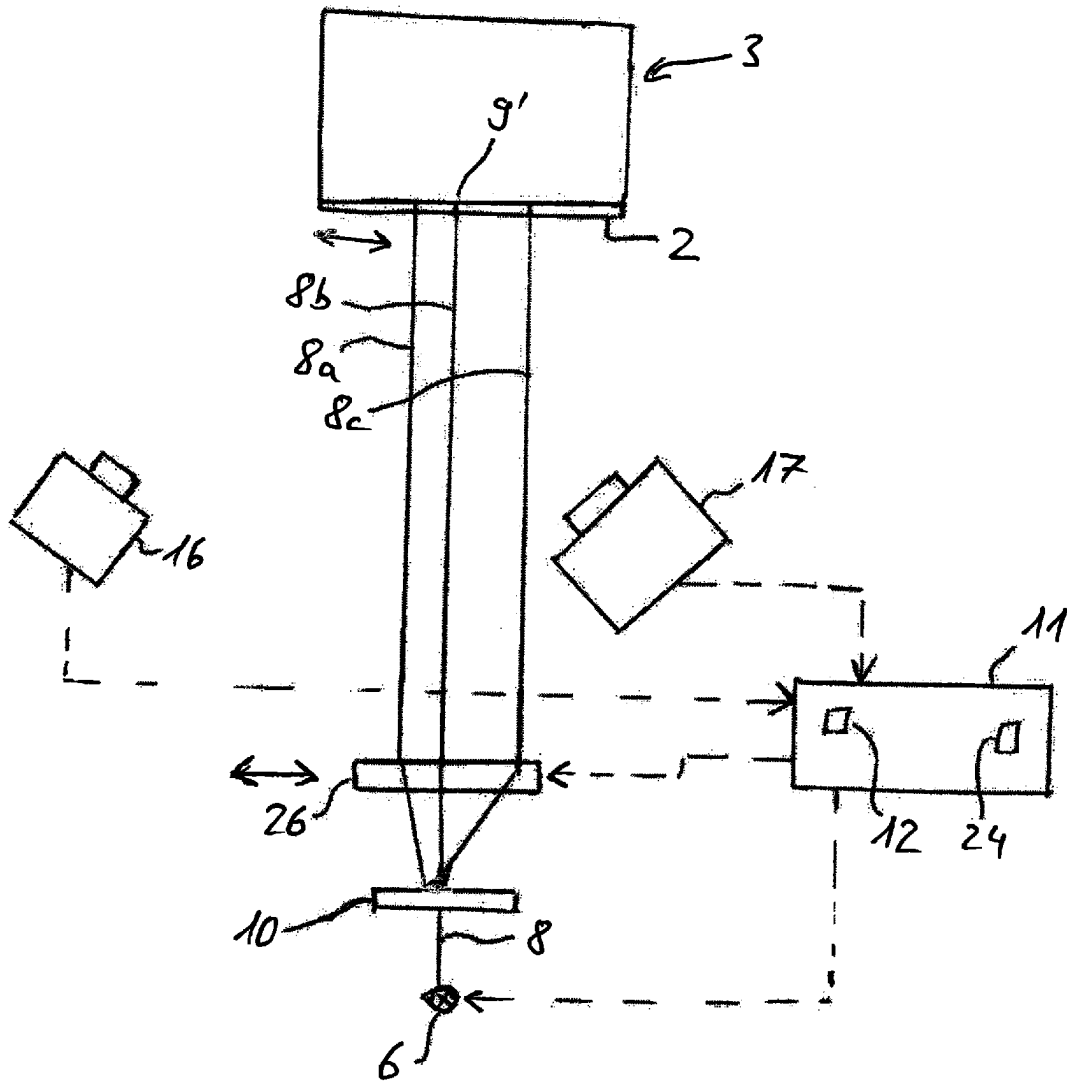


Fig. 3