



(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2015 211 954.8**
(22) Anmeldetag: **26.06.2015**
(43) Offenlegungstag: **29.12.2016**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **28.12.2017**

(51) Int Cl.: **G01B 11/25 (2006.01)**
G01B 11/24 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V., 80686 München, DE**

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

(72) Erfinder:
**Brahm, Anika, Dr., 07745 Jena, DE; Notni,
Gunther, Dr., 07749 Jena, DE; Kühmstedt, Peter,
Dr., 07751 Jena, DE**

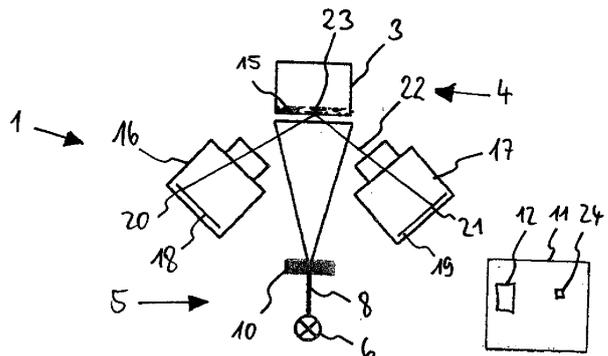
(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	199 28 341	A1
DE	10 2006 049 695	A1
DE	10 2008 064 104	A1
DE	10 2009 053 510	A1
DE	10 2011 010 265	A1
DE	10 2012 112 321	A1
WO	2003/ 016 819	A1

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

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum berührungslosen Vermessen einer Objektoberfläche (2) mit folgenden Schritten:
– Erzeugen einer zeitlich veränderlichen Temperaturverteilung (15) auf der Objektoberfläche (2) durch Aufprägen mindestens eines thermischen Musters (9) auf die Objektoberfläche (2),
– 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, 21) jeder der Wärmebildkameras (16, 17) jeweils eine Folge von Wärmebildwerten erfasst wird,
– Identifizieren korrespondierender Punkte (20, 21) in den Bildebenen (18, 21) 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),
wobei mindestens einer der Aufnahmezeitpunkte in einem Zeitintervall liegt, während dessen kein neues thermisches Muster (9) auf die Objektoberfläche (2) aufgeprägt wird, so dass sich die Temperaturverteilung (15) auf der Objektoberfläche (2) zwischen dem vorangegangenen Auf-

nahmezeitpunkt und diesem mindestens einen Aufnahmezeitpunkt durch thermische Diffusion verändert.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum berührungslosen geometrischen Vermessen einer Objektoberfläche. Ferner betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zum berührungslosen geometrischen Vermessen einer Objektoberfläche, mit der sich dieses Verfahren durchführen lässt.

[0002] Verfahren zum berührungslosen Vermessen von Objektoberflächen sind an sich 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 bekannte Verfahren dagegen keine brauchbaren oder nur sehr ungenauen 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] Die Druckschrift DE 10 2011 010 265 A1 zeigt eine Vorrichtung zur Projektion eines einzelnen oder einer Folge von Mustern als Musterbildsequenz auf eine Oberfläche eines Objekts zur dreidimensionalen Rekonstruktion des Objekts. Die Druckschrift DE 199 28 341 A1 offenbart ein Messverfahren, das mit mindestens zwei Matrixkamas und einem Musterprojektor arbeitet. Dieses Messverfahren dient einer dreidimensionalen optischen Vermessung von Objektoberflächen. In der Druckschrift DE 10 2008 064 104 A1 ist eine Vorrichtung zum dreidimensionalen Vermessen eines Objekts gezeigt. Die Vorrichtung umfasst eine Projektionseinrichtung mit einer infraroten Lichtquelle zum Projizieren eines bewegbaren ersten Musters auf das Objekt. Außer-

dem umfasst die Vorrichtung eine Bildaufnahmeeinrichtung zum Aufnehmen von Bildern des Objekts in einem infraroten Spektralbereich. In der Druckschrift DE 10 2012 112 321 A1 ist eine Vorrichtung zum optischen Abtasten und Vermessen einer Umgebung gezeigt. Die Vorrichtung umfasst einen Handscanner zum Erstellen eines 3D-Scans sowie eine Projektionsvorrichtung zur Erzeugung wenigstens eines Musters auf einem Objekt. In der Druckschrift DE 10 2009 053 510 A1 ist eine Vorrichtung zur Erzeugung eines räumlich und/oder eines zeitlich veränderbaren thermischen Strahlungsmusters beschrieben. Des Weiteren ist in der Druckschrift WO 03/016819 A1 ein Verfahren zur Erkennung von langwelligen Oberflächenstrukturen flächiger Prüflinge beschrieben, bei welchem ein Muster infraroten Lichtes auf den Prüfling gestrahlt wird. Ein von dem Prüfling reflektiertes infrarotes Lichtmuster wird bei diesem Verfahren mit einer Infrarotkamera aufgenommen.

[0005] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren vorzuschlagen, das auch transparente, transluzente oder stark reflektierende oder absorbierenden Objektoberflächen möglichst einfach und genau berührungslos zu vermessen erlaubt. Außerdem liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, eine entsprechende Vorrichtung vorzuschlagen, mit der sich auch derartige Oberflächen berührungslos vermessen lassen.

[0006] 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.

[0007] Bei dem vorgeschlagenen Verfahren zum berührungslosen Vermessen einer Objektoberfläche wird durch Aufprägen mindestens eines thermischen Musters auf die Objektoberfläche eine zeitlich veränderliche Temperaturverteilung auf der Objektoberfläche erzeugt. Dabei wird zu mehreren aufeinanderfolgenden Aufnahmezeitpunkten durch jede von mindestens zwei voneinander beabstandeten Wärmebildkamas simultan jeweils ein Wärmebild der Objektoberfläche erfasst, so dass für Punkte in einer Bildebene jeder der Wärmebildkamas jeweils eine Folge von Wärmebildwerten erfasst wird. Daraufhin werden korrespondierende Punkte in den Bildebenen der Wärmebildkamas identifiziert, 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. Dann werden Raumkoordinaten der Objektoberfläche durch Triangulation auf

Basis der als korrespondierend identifizierten Punkte bestimmt. Als korrespondierend werden in der vorliegenden Schrift jeweils Punkte in den Bildebenen der verschiedenen Wärmebildkameras bezeichnet, die in dem Sinne homolog sind, dass jeweils der gleiche Punkt auf der Objektoberfläche durch die Wärmebildkameras auf diese Punkte abgebildet wird.

[0008] 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.

[0009] 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.

[0010] 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 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 erfindungsgemäßen Verfahren dadurch gelöst, dass statt Lichtmustern Temperaturverteilungen verwendet werden. Diese lassen sich nämlich einerseits auch bei transparenten oder translu-

zenten 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.

[0011] Darüber hinaus bringt die vorgeschlagene Art der Vermessung den Vorteil mit sich, dass die aufprojizierten Muster nicht bekannt sein müssen. Vielmehr können die Muster völlig zufällig gewählt und insbesondere statistischer oder quasistatistischer Natur sein, sofern sie nur hinreichend strukturiert und verschieden sind. Daher muss vorteilhafter Weise auch die innere Geometrie einer zur Durchführung des Verfahrens verwendeten Vorrichtung 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 Robust und insbesondere unempfindlich gegenüber Toleranzen im Aufbau der verwendeten Vorrichtung. Bei alledem basiert die Triangulation auf einer ausgesprochen unkomplizierten Auswertung der Wärmebilder.

[0012] Dementsprechend vorteilhaft ist die vorgeschlagene Vorrichtung zum berührungslosen Vermessen von Oberflächen. Die Vorrichtung umfasst eine Einrichtung zum Aufprägen thermischer Muster auf eine zum Vermessen in einem Objektraum anzuordnende Objektoberfläche, zwei voneinander beabstandete Wärmebildkameras zum Aufnehmen von Wärmebildern der Objektoberfläche im Objektraum sowie eine Steuer- und Auswerteeinheit zum Ansteuern der Wärmebildkameras und zum Auswerten der damit aufgenommenen Wärmebilder. Dabei ist die Steuer- und Auswerteeinheit eingerichtet, die Wärmebildkameras zu mehreren aufeinanderfolgenden Aufnahmezeitpunkten zum simultanen Erfassen jeweils eines Wärmebildes durch jede der Wärmebildkameras anzusteuern, so dass für Punkte in einer Bildebene jeder der Wärmebildkameras jeweils eine Folge von Wärmebildwerten erfasst wird. Außerdem ist die Steuer- und Auswerteeinheit eingerichtet, korrespondierende Punkte in den Bildebenen der Wärmebildkameras zu identifizieren, 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. Schließlich ist die Steuer- und Auswerteeinheit zum Bestimmen von Raumkoordinaten der Objektoberfläche durch Triangulation auf Basis

der als korrespondierend identifizierten Punkte eingerichtet. Damit eignet sich die Vorrichtung in vorteilhafter Weise zur Durchführung des zuvor beschriebenen Verfahrens.

[0013] Die Steuer- und Auswerteeinheit kann z. B. eingerichtet sein, die Ähnlichkeit zwischen den Folgen von Wärmebildwerten durch Auswerten einer für Paare von Wertefolgen definierte Korrelationsfunktion zu bestimmen und die korrespondierenden Punkte jeweils durch Maximieren oder Minimieren eines Wertes einer so gebildeten Korrelation zu identifizieren.

[0014] 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.

[0015] Typischerweise ist das mindestens eine aufgeprägte thermische Muster unregelmäßig, so dass die zeitlich veränderliche Temperaturverteilung eine unregelmäßige Ortsabhängigkeit zeigt. Eine unregelmäßige Ortsabhängigkeit stellt geringere Anforderungen beim Aufprägen des Musters als eine regelmäßige Struktur. Vorteilhaft ist, wenn die Temperaturverteilung sowohl zeitlich als auch räumlich in hinreichendem Maß nichtkonstant ist, so dass sich einerseits die Wärmebildwerte für einen Punkt hinrei-

chend stark zeitlich ändern und andererseits die Folgen von Wärmebildwerten von Punkt zu Punkt hinreichend stark unterscheiden. Dadurch kann eine hohe Messgenauigkeit erreicht werden, weil die korrespondierenden Punkte zuverlässig in beschriebener Weise identifiziert werden können. Daher ist die Einrichtung zum Aufprägen thermischer Muster bei zweckmäßigen Ausführungen der vorgeschlagenen Vorrichtung zum Erzeugen mindestens eines unregelmäßigen thermischen Musters eingerichtet, so dass eine durch das thermische Muster erzeugbare Temperaturverteilung auf der Objektoberfläche eine unregelmäßige Ortsabhängigkeit zeigt.

[0016] 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.

[0017] 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 aufgebracht wird.

[0018] Die Steuer- und Auswerteeinheit der vorgeschlagenen Vorrichtung kann zusätzlich auch zum Ansteuern der Einrichtung zum Aufprägen thermischer Muster eingerichtet sein. In diesem Fall ist es im Hinblick auf die erläuterte Möglichkeit der Ausnutzung thermischer Diffusion zweckmäßig, wenn die Steuer- und Auswerteeinheit eingerichtet ist, die Einrichtung zum Aufprägen thermischer Muster und die Wärmebildkameras so anzusteuern, dass mindestens einer der Aufnahmezeitpunkte in einem Zeitintervall liegt, während dessen die Einrichtung zum Aufprägen thermischer Muster kein neues thermisches Muster aufbringt. Das jüngste Aufprägen eines thermischen Musters kann zu diesem mindestens einen Aufnahmezeitpunkt dagegen schon beendet sein.

[0019] Das mindestens eine thermische Muster kann z. B. durch eine Projektionsvorrichtung aufgebracht werden. Die genannte Einrichtung zum Aufprägen thermischer Muster kann also insbesondere eine Projektionsvorrichtung sein. Das Aufprägen der thermischen Muster und mithin das Erzeugen der zeitabhängigen Temperaturverteilung mit einer Projektionsvorrichtung passt nicht nur gut zum berührungslosen Charakter der Vermessung. Es erlaubt auch, die der Vermessung zugrundeliegende zeitabhängige Temperaturverteilung lokal begrenzt in einem Oberflächenbereich zu erzeugen und damit zumindest in gewisser Näherung auf die Objektoberfläche zu begrenzen. Das dient wiederum der Genauigkeit der Vermessung, insbesondere in Fällen, in denen das Material nicht vollständig intransparent ist für die von den Wärmebildkameras erfasste Wärmestrahlung.

[0020] Typischerweise weist die Projektionsvorrichtung eine Strahlungsquelle zum Erwärmen der Objektoberfläche mittels elektromagnetischer Strahlung auf. Diese kann breitbandig oder monochromatisch sein, wobei eine Eignung einer Strahlungsquelle 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. In vielen Fällen wird die Strahlungsquelle ein Laser sein können.

[0021] Alternativ kann das Aufprägen des thermischen Musters auch mit nicht-optischen Methoden erfolgen. Es ist beispielsweise denkbar, dass die Objektoberfläche durch ein Aufsprühen von Wassertropfen bereichsweise gekühlt wird. Alternativ kann das Objekt auch in eine Wanne mit kleinen, erwärmten und gekörnten Gegenständen getaucht werden, so dass die gekörnten Gegenstände Wärme in Kontaktbereichen an die Objektoberfläche abgeben und somit ein thermisches Muster auf diese Aufprägen.

[0022] Im Fall der Verwendung einer Projektionsvorrichtung kann es zweckmäßig sein, wenn diese das mindestens eine optische Muster durch Infrarotstrahlung auf die Objektoberfläche aufbringt. 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 einem Kohlenstoffdioxidlaser besonders effizient erwärmen lassen.

[0023] 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.

[0024] Die erfassten Wärmebildwerte können in Form von Temperaturen vorliegen.

[0025] Alternativ können die Wärmebildwerte in Form von Strahlungsintensitäten oder Wellenlängen oder anderen sich aus den Strahlungsintensitäten und/oder Wellenlängen ergebenden Parametern der gemessenen elektromagnetischen Strahlung vorliegen.

[0026] Es kann vorgesehen sein, dass die Projektionsvorrichtung ein optisches Element zur räumlichen und/oder zeitlichen Modulation einer von der Projektionsvorrichtung in den Objektraum abgestrahlten elektromagnetischen Strahlung aufweist. Beispielsweise kann das optische Element als Streuscheibe ausgeführt sein, durch die die elektromagnetische Strahlung transmittiert und/oder reflektiert wird. Eine Streuscheibe ist geeignet, die elektromagnetische Strahlung derart zu verteilen, dass die infolge einer Erwärmung auftretende Temperaturverteilung auf der Objektoberfläche eine unregelmäßige Ortsabhängigkeit zeigt. Alternativ kann auch eine Reflexion und/oder Transmission der elektromagnetischen Strahlung an einem Gitter oder einer anders gestalteten Maske oder auch an einem Freiformelement, z. B. einem Freiformspiegel, erfolgen. Eine zeitliche Modulation des thermischen Musters kann beispielsweise durch eine Drehung oder Verschiebung des optischen Elements und/oder durch ein Bewegen der Strahlungsquelle erreicht werden. Die zeitliche Modulation kann in weiten Grenzen beliebig erfolgen und muss bei dem vorgeschlagenen Verfahren auch nicht einem bekannten Muster folgen. Vielmehr eignen sich auch statistische oder quasi-statistische Modulationen der thermischen Muster um hinreichend diverse Temperaturverteilungen auf der Objektoberfläche zu erzeugen.

[0027] Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nachfolgend anhand der Abbildungen beschrieben. Es zeigen

[0028] Fig. 1 eine schematische Aufsicht auf eine Vorrichtung zum berührungslosen Vermessen einer Objektoberfläche sowie ein Objekt,

[0029] Fig. 2 eine schematische Aufsicht auf eine weitere Vorrichtung zum berührungslosen Vermessen einer Objektoberfläche sowie ein Objekt,

[0030] Fig. 3 eine schematische Darstellung eines auf eine Objektoberfläche aufgeprägten thermischen Musters sowie

[0031] Fig. 4 eine Temperaturverteilung auf der Objektoberfläche nach einer zeitlichen Entwicklung.

[0032] Fig. 1 zeigt eine Ausführung einer Vorrichtung 1 zum berührungslosen Vermessen einer Objektoberfläche 2 eines Objekts 3 in einem Objektraum 4. Die Vorrichtung 1 umfasst eine Einrichtung 5 zum Aufprägen thermischer Muster 9 auf die Objektober-

fläche 2 des Objekts 3. Die Einrichtung 5 ist eine Projektionsvorrichtung und umfasst eine Strahlungsquelle 6, beispielsweise einen Kohlenstoffdioxidlaser, sowie ein optisches Element 7 in Form eines reflektierenden Elements, das zu einer Intensitätsmodulation der Strahlung führt und durch ein Gitter, eine Streuscheibe oder ein Freiformelement gegeben sein kann. Der Kohlenstoffdioxidlaser emittiert Infrarotstrahlung 8, die an dem optischen Element 7 reflektiert oder gebeugt wird und anschließend auf die Objektoberfläche 2 trifft und diese erwärmt.

[0033] Das zu vermessende Objekt 3 ist aus Silikatglas, und die Oberfläche des Objekts 3 wird durch die am optischen Element 7 reflektierte oder gebeugte Infrarotstrahlung 8 erwärmt, so dass ein räumlich unregelmäßiges thermisches Muster 9 auf die Objektoberfläche 2 aufgeprägt wird. Das unregelmäßige thermische Muster 9 kann beispielsweise ein Speckle-Muster sein.

[0034] 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 transmittierendes optisches Element 10 auf, das wieder ein Gitter, eine Streuscheibe oder ein Freiformelement 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 moduliert wird. Die durch die Strahlungsquelle 6 erzeugte Infrarotstrahlung 8 trifft nach Durchgang durch das optische Element 10 auf die Objektoberfläche 2 und erwärmt diese in Form eines räumlich unregelmäßigen thermischen Musters 9.

[0035] Außerdem weist die Vorrichtung 1 einen Computer 11 mit einer Steuer- und Auswerteeinheit 12 auf. Die Projektionsvorrichtung 5 wird durch die Steuer- und Auswerteeinheit 12 angesteuert. Diese legt damit fest, zu welchen Zeitpunkten thermische Muster 9 auf die Objektoberfläche 2 aufgeprägt werden. Außerdem ist die Steuer- und Auswerteeinheit 12 eingerichtet zum Verfahren des optischen Elements 7, 10, so dass das thermische Muster 9 durch die Steuer- und Auswerteeinheit 12 räumlich und zeitlich moduliert wird.

[0036] Ein aufgeprägtes thermisches Muster 9 ist in Fig. 3 beispielhaft schematisch dargestellt. Das thermische Muster 9 besteht aus räumlich unregelmäßig angeordneten Bereichen 13 der Objektoberfläche 2 mit hoher Temperatur und Bereichen 14 der Objektoberfläche mit niedriger Temperatur. Nach Abschalten der Strahlungsquelle 6 entwickelt sich eine durch das thermische Muster 9 aufgeprägte Tem-

peraturverteilung zeitlich durch eine Wärmeleitung in dem Objekt **3**. **Fig. 4** zeigt schematisch eine resultierende Temperaturverteilung **15** auf der Objektoberfläche **2** nach Ablauf einer Zeit von beispielsweise einer Sekunde oder einigen Sekunden.

[0037] Die Vorrichtung **1** umfasst außerdem eine erste Wärmebildkamera **16** und eine zweite Wärmebildkamera **17**. Die Wärmebildkameras **16, 17** sind für elektromagnetische Strahlung im IR-Bereich empfindlich, beispielsweise für Wärmestrahlung in einem Wellenlängenbereich zwischen $7,5\ \mu\text{m}$ und $14\ \mu\text{m}$. 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 Aufnahme jeweils eines Wärmebildes, erfassen können. Dafür wird die in Punkten **20, 21** in den jeweiligen Bildebenen **18, 19** gemessene Intensität einer Wärmestrahlung **22** ausgewertet.

[0038] 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.

[0039] Nach dem Aufprägen des thermischen Musters **9** regelt die Steuer- und Auswerteeinheit **12** ein Abschalten der Strahlungsquelle **6** durch ein Schließen eines Shutters und löst ein simultanes Erfassen von Wärmebildern durch die Wärmebildkameras **16, 17** aus. Anschließend entwickelt sich die Temperaturverteilung **15** auf der Objektoberfläche **2** durch Wärmeleitung zu der in **Fig. 4** gezeigten Temperaturverteilung **15**, und die Steuer- und Auswerteeinheit **12** löst ein mehrmaliges erneutes simultanes Erfassen von Wärmebildern bei abgeschalteter Strahlungsquelle **6** aus. Die beschriebenen Schritte des Aufprägens eines thermischen Musters **9** und Erfassens von Wärmebildern können einmal oder mehrmals mit unterschiedlichen thermischen Mustern **9** wiederholt werden. Die durch das aufgeprägte oder die aufgeprägten thermischen Muster **9** erzeugte zeitabhängige Temperaturverteilung **15** kann auch während des Aufprägens des mindestens einen thermischen Musters **9** erfasst werden, also ohne vorheriges Schließen eines Shutters. 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** sicherzu-

stellen, 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 des thermischen Musters **9** oder 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 Temperaturwerten gespeichert wird.

[0040] In einem nächsten Schritt vergleicht die Steuer- und Auswerteeinheit **12** die erfasste Folge von Temperaturwerten für jeden Punkt **20** in der Bildebene **18** der ersten Wärmebildkamera **16** mit den Folgen von Temperaturwerten 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.

[0041] Die Paare von Folgen von Temperaturwerten 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 die 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.

[0042] 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.

Patentansprüche

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

– Erzeugen einer zeitlich veränderlichen Temperaturverteilung (**15**) auf der Objektoberfläche (**2**) durch Aufprägen mindestens eines thermischen Musters (**9**) auf die Objektoberfläche (**2**),

– 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, 21**) jeder der Wärmebildkameras (**16, 17**) jeweils eine Folge von Wärmebildwerten erfasst wird,

– Identifizieren korrespondierender Punkte (**20, 21**) in den Bildebenen (**18, 21**) 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**),

wobei mindestens einer der Aufnahmezeitpunkte in einem Zeitintervall liegt, während dessen kein neues thermisches Muster (**9**) auf die Objektoberfläche (**2**) aufgeprägt wird, so dass sich die Temperaturverteilung (**15**) auf der Objektoberfläche (**2**) zwischen dem vorangegangenen Aufnahmezeitpunkt und diesem mindestens einen Aufnahmezeitpunkt durch thermische Diffusion verändert.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das mindestens eine aufgeprägte thermische Muster (**9**) unregelmäßig ist, so dass die zeitlich veränderliche Temperaturverteilung (**15**) eine unregelmäßige Ortsabhängigkeit zeigt.

3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Ähnlichkeit zwischen den Folgen von Wärmebildwerten durch Auswerten einer für Paare von Wertefolgen definierte Korrelationsfunktion bestimmt wird und die korrespondierenden Punkte (**20, 21**) jeweils durch Maximieren oder Minimieren eines Wertes einer so gebildeten Korrelation identifiziert werden.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass das mindestens ei-

ne thermische Muster (**9**) durch eine Projektionsvorrichtung (**5**) aufgeprägt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Projektionsvorrichtung (**5**) das mindestens eine thermische Muster (**9**) durch Infrarotstrahlung (**8**) auf die Objektoberfläche (**2**) aufprägt.

6. Vorrichtung (**1**) zum berührungslosen Vermessen von Oberflächen (**2**), umfassend eine Einrichtung (**5**) zum Aufprägen thermischer Muster (**9**) auf eine zum Vermessen in einem Objektraum (**4**) anzuordnende Objektoberfläche (**2**), zwei voneinander beabstandete Wärmebildkameras (**16, 17**) zum Aufnehmen von Wärmebildern der Objektoberfläche (**2**) im Objektraum (**4**) sowie eine Steuer- und Auswerteeinheit (**12**) zum Ansteuern der Wärmebildkameras (**16, 17**) und zum Auswerten der damit aufgenommenen Wärmebilder,

wobei die Steuer- und Auswerteeinheit (**12**) eingerichtet ist, folgende Schritte auszuführen:

– Ansteuern der Wärmebildkameras (**16, 17**) zum simultanen Erfassen jeweils eines Wärmebildes durch jede der 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 durch Triangulation auf Basis der als korrespondierend identifizierten Punkte (**20, 21**),

wobei die Steuer- und Auswerteeinheit (**12**) auch zum Ansteuern der Einrichtung (**5**) zum Aufprägen thermischer Muster (**9**) eingerichtet ist und ferner eingerichtet ist, die Einrichtung (**5**) zum Aufprägen thermischer Muster (**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**) kein neues thermisches Muster (**9**) aufprägt.

7. Vorrichtung (**1**) nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Einrichtung (**5**) zum Aufprägen thermischer Muster (**9**) eine Projektionsvorrichtung (**5**) ist.

8. Vorrichtung (**1**) nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Projektionsvorrichtung (**5**) eine Strahlungsquelle (**6**) zur Erzeugung von Infrarotstrahlung (**8**) aufweist.

9. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 7 oder 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Projektionsvorrichtung (5) ein optisches Element (7; 10) zur räumlichen und/oder zeitlichen Modulation einer von der Projektionsvorrichtung (5) in den Objektraum (4) abgestrahlten elektromagnetischen Strahlung (8) aufweist.

10. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 6 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Einrichtung (5) zum Aufprägen thermischer Muster (9) zum Erzeugen mindestens eines unregelmäßigen thermischen Musters (9) eingerichtet ist, so dass eine durch das thermische Muster (9) erzeugbare Temperaturverteilung (15) auf der Objektoberfläche eine unregelmäßige Ortsabhängigkeit zeigt.

11. Vorrichtung (1) nach einem der Ansprüche 6 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuer- und Auswerteeinheit (12) eingerichtet ist, die Ähnlichkeit zwischen den Folgen von Wärmebildwerten durch Auswerten einer für Paare von Wertefolgen definierte 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

