



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2010 037 305.2**
(22) Anmeldetag: **03.09.2010**
(43) Offenlegungstag: **08.03.2012**

(51) Int Cl.: **G06T 7/20** (2006.01)
G06T 17/40 (2006.01)
G01B 11/24 (2006.01)
G01B 11/245 (2006.01)
G01C 11/02 (2006.01)
G01B 11/16 (2006.01)

(71) Anmelder:
**Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,
51147, Köln, DE**

(74) Vertreter:
Rehberg Hüppe + Partner, 37073, Göttingen, DE

(72) Erfinder:
**Kühn, Matthias, 37083, Göttingen, DE; Richard,
Hugues, Dr., 37083, Göttingen, DE; Ehrenfried,
Klaus, Dr., 10783, Berlin, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

US 6 750 873 B1

**Boden, Fritz und Politz, Christina: "ADVANCED
IN-FLIGHT MEASUREMENT TECHNIQUES",
2008, [http://aim.dlr.de/site/uploads/media/AIM_
Measurement_Techniques_Brochure.pdf](http://aim.dlr.de/site/uploads/media/AIM_Measurement_Techniques_Brochure.pdf)**

**Callum Atkinson and Julio Soria: "An efficient
simultaneous reconstruction technique for
tomographic particle image velocimetry";
Springer; Experiments in Fluids, Selected
papers from the 14th International Symposium
on Application of Laser Techniques to Fluid
Mechanics , 2009; Vol. 47, No. 4-5, pp. 553-568;
DOI: 10.1007/s00348-009-0728-0**

**Gering, D.T.; Wells, W.M. III: "Object modeling
using tomography and photography"; IEEE
Workshop on Multi-View Modeling and
Analysis of Visual Scenes, 1999. (MVIEW '99)
; Proceedings; 1999; page(s): 11 – 18; ISBN: 0-
7695-0110-9; DOI: 10.1109/MVIEW.1999.781078**

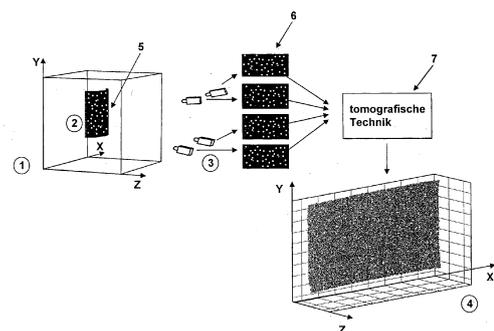
**J. Kitzhofer and C. Brücker: ,Tomographic
particle tracking velocimetry using telecentric
imaging'; Springer; Experiments in Fluids; 2010;
Volume 49, Number 6, 1307-1324, DOI: 10.1007/
s00348-010-0879-z**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Tomografisches Verfahren zur Erfassung des dreidimensionalen Verlaufs und von dreidimensionalen Verformungen von Oberflächen**

(57) Zusammenfassung: Zur Erfassung des dreidimensionalen Verlaufs einer ein Muster (5) aufweisenden Oberfläche (2), wobei der Verlauf der Oberfläche (2) aus mehreren Bildern (6) des Musters (5), die mit mehreren Kameras (3) aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen werden, ermittelt wird, wird eine dreidimensionale Rekonstruktion (4) des Musters (2) tomografisch aus den Bildern (6) berechnet.



Beschreibung

TECHNISCHES GEBIET DER ERFINDUNG

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Erfassung des Verlaufs einer ein Muster aufweisenden Oberfläche mit den Merkmalen des Oberbegriffs des unabhängigen Patentanspruchs 1.

[0002] Unter einem Muster ist hierbei eine Verteilung von optischen Kontrasten über der Oberfläche zu verstehen, die in optische Kontraste in Bildern resultiert, die von der Oberfläche aufgenommen werden. Die optischen Kontraste markieren Punkte und/oder Linien der Oberfläche, vorzugsweise markieren sie Punkte.

STAND DER TECHNIK

[0003] Durch photogrammetrische Techniken ist es möglich, die räumliche Lage von optischen Objekten zu bestimmen, die in Bildern, die mit verschiedenen Kameras aus unterschiedlichen aber bekannten Richtungen aufgenommen wurden, zu sehen sind. Dazu müssen die Objekte in den einzelnen Bildern zu identifizieren sein. Entsprechend ist die in üblichen photogrammetrischen Verfahren zulässige Dichte derartiger Objekte nur gering, und der Verlauf einer mit ihnen markierten Oberfläche muss zwischen den Objekten abgeschätzt werden, was nur bei einem kontinuierlichen Verlauf sinnvoll möglich ist. Die Genauigkeit herkömmlicher photogrammetrischer Verfahren bei der Rekonstruktion dreidimensionaler Oberflächen ist daher nur gering.

[0004] Ein Verfahren mit den Merkmalen des Oberbegriffs des unabhängigen Patentanspruchs 1 ist die sogenannte IPCT (Image Pattern Correlation Technique, siehe: http://aim.dlr.de/site/uploads/media/AIM_Measurement_Techniques_Brochure.pdf). Bei der IPCT wird ein stochastisches Punktemuster auf die interessierende Oberfläche aufgebracht. Durch Kreuzkorrelationstechniken, die ursprünglich für die PIV (Particle Image Velocimetry) entwickelt wurden, können mit derselben Kamera, das heißt aus derselben Blickrichtung aufeinanderfolgend aufgenommene Bilder der Oberfläche ausgewertet werden, um Deformationen der Oberfläche aus Lageverschiebungen der Punkte zwischen den einzelnen Bildern zu ermitteln. Durch eine stereoskopische Anordnung von zwei oder mehr Kameras können die Deformationen der Oberfläche dreidimensional erfasst werden. Unter Anwendung photogrammetrischer Verfahren können im Rahmen der IPCT zudem dreidimensionale Verläufe von Oberflächen rekonstruiert werden. Als nachteilig erweist sich, dass die IPCT nur für kontinuierliche Oberflächen geeignet ist, da sie auf der Annahme kontinuierlicher Formfunktionen basiert, und dass das Auflösungsvermögen der IPCT bei den Rekonstruktionen aufgrund der Verwendung räumli-

cher Korrelationsfunktionen und der darin inhärenten räumlichen Mittelung nur gering ist.

[0005] Aus der EP 1 517 150 A2 ist ein Verfahren zur Bestimmung eines dreidimensionalen Geschwindigkeitsfelds in einem Volumen bekannt, wobei durch Beleuchtung des Volumens die in dem Volumen befindlichen Teilchen zur Strahlung angeregt werden, wobei durch mindestens zwei Kameras zu mindestens zwei unterschiedlichen Zeiten jeweils zeitgleich das Volumen aufgenommen wird, wobei das Beobachtungsvolumen in kleine Volumenelemente (Voxel) aufgeteilt wird, wobei jedes Voxel an der Stelle durch eine Abbildungsgleichung auf die Bildpunkte der mindestens zwei Kameras abgebildet wird, wobei die Intensität aller Voxels aus der gemessenen Intensität der jeweils zugehörigen Bildpunkte rekonstruiert wird, wobei mehrere Voxels zu einem Interrogationsvolumen zusammengefasst werden und wobei durch eine dreidimensionale Kreuzkorrelation der beiden Interrogationsvolumina zu den beiden unterschiedlichen Zeiten an derselben Stelle ein Verschiebungsvektor bestimmt wird.

[0006] Aus der DE 10 2006 055 746 A1 ist ein Verfahren zur Korrektur einer Volumenabbildungsgleichung zur Bestimmung eines Geschwindigkeitsfelds von Teilchen in einem Volumen bekannt, das eine Weiterentwicklung des aus der EP 1 517 150 A2 bekannten Verfahrens ist. Diese Weiterentwicklung betrifft die genauere Bestimmung des Geschwindigkeitsfelds.

AUFGABE DER ERFINDUNG

[0007] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Erfassung des dreidimensionalen Verlaufs einer Oberfläche mit den Merkmalen des Oberbegriffs des unabhängigen Patentanspruchs 1 aufzuzeigen, das eine hohe Genauigkeit aufweist und bei dem Diskontinuitäten der Oberfläche unproblematisch sind. Darüber hinaus sollen mit erhöhter Genauigkeit dreidimensionale Deformationen einer Oberfläche gegenüber einem Vergleichsverlauf der Oberfläche erfasst werden.

LÖSUNG

[0008] Die Aufgabe der Erfindung wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des unabhängigen Patentanspruchs 1 gelöst. Der Patentanspruch 3 zeigt eine Lösung für die Teilaufgabe der Erfassung von dreidimensionalen Deformationen der Oberfläche auf. Die unabhängigen Patentansprüche betreffen bevorzugte Detailausgestaltungen der neuen Verfahren.

BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0009] Bei dem neuen Verfahren zur Erfassung des dreidimensionalen Verlaufs einer ein Muster aufweisenden Oberfläche, wobei der Verlauf der Oberfläche aus mehreren Bildern des Musters, die mit mehreren Kameras aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen werden, ermittelt wird, wird eine dreidimensionale Rekonstruktion einer Intensitätsverteilung des Musters tomografisch aus den Bildern berechnet. Obwohl die Oberfläche einen dreidimensionalen Verlauf aufweist, handelt es sich bei ihr doch nur um ein zweidimensionales Objekt. Dennoch wird bei dem neuen Verfahren auf Techniken der tomografischen Rekonstruktion zurückgegriffen, die eigentlich für dreidimensionale Objekte entwickelt wurden. Hierbei handelt es sich aber nur um eine scheinbare Überdimensionierung, weil das Verfahren auf diese Weise unabhängig von etwaigen Diskontinuitäten der Oberfläche wird. Dennoch werden durch die Tatsache, dass die Oberfläche tatsächlich nur eine zweidimensionale Erstreckung aufweist, Randbedingungen für die Rekonstruktion des Punktemusters durch die tomografische Technik gesetzt werden, die den Berechnungsaufwand reduzieren. So gilt zum Beispiel dann, wenn das gesamte Muster in allen Bildern aller Kameras zu sehen ist, dass in keinem der Bilder ein weiter hinten liegender Teil des Musters verdeckt ist. Dies erlaubt es bei gleicher räumlicher Auflösung mit weniger Kameras, die Bilder aus unterschiedlichen Richtungen aufnehmen, auszukommen und damit den Rechenaufwand bei der Umsetzung der tomografischen Verfahren zu reduzieren.

[0010] Grundsätzlich kann bei der tomografischen Berechnung der dreidimensionalen Rekonstruktion der Intensitätsverteilung des Musters aus den Bildern auf bekannte Techniken, beispielsweise diejenigen gemäß der EP 1 517 150 A2 und/oder der DE 10 2006 055 746 A1 zurückgegriffen werden.

[0011] Konkret kann die Lage der Intensitätsverteilung des Musters im Raum aus den Bildern, die mit den mehreren Kameras aus den unterschiedlichen Richtungen aufgenommen werden, nach einer SMART (Simultaneous Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique, Atkinson C, Soria J (2009) An efficient simultaneous reconstruction technique for tomographic particle image velocimetry. Experiments in Fluids 47:553–568) rekonstruiert werden. Diese Technik bedeutet zwar grundsätzlich einen hohen Rechenaufwand, der aber standardisiert ist und entsprechend vergleichsweise schnell bzw. mit einfachen Mitteln bewältigt werden kann.

[0012] Zur Erfassung von dreidimensionalen Deformationen der das Muster aufweisenden Oberfläche im Raum gegenüber einem Vergleichsverlauf der Oberfläche, wobei die Deformationen der Oberfläche aus mehreren Bildern des Musters, die mit mehre-

ren Kameras aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen werden, ermittelt werden, werden für die deformierte Oberfläche und für den Vergleichsverlauf dreidimensionale Rekonstruktionen einer Intensitätsverteilung des Musters aus den Bildern berechnet. Die Deformationen werden dann aus räumlichen Verschiebungen des Musters zwischen den beiden Rekonstruktionen der Intensitätsverteilung des Musters ermittelt. Bei dem neuen Verfahren werden keine Verschiebungen des Musters zwischen einzelnen zweidimensionalen Bildern des Musters ausgewertet, sondern zunächst werden für die deformierte Oberfläche und den Vergleichsverlauf die Lagen der Intensitätsverteilung des Musters im Raum bestimmt. Hierbei handelt es sich um dreidimensionale Intensitätsverteilungen, die den räumlichen Verlauf des Musters wie auf der realen Oberfläche wiedergeben. Verschiebungen des Musters zwischen diesen beiden dreidimensionalen Rekonstruktionen entsprechen damit unmittelbar Verschiebungen zwischen den entsprechenden Teilen der Oberfläche, das heißt ihren eigentlichen Deformationen.

[0013] Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Erfassung von dreidimensionalen Deformationen der das Muster aufweisenden Oberfläche können auch Relativverschiebungen und -verdrehungen der Oberfläche gegenüber einer Ausgangsposition als Vergleichsverlauf mit hoher Genauigkeit erfasst werden, bei denen die Oberfläche nicht in sich deformiert sondern nur als Ganzes verschoben bzw. verdreht ist.

[0014] Die dreidimensionalen Rekonstruktionen der Intensitätsverteilung des Musters aus den einzelnen Bildern können auch unter Anwendung photogrammetrischer Techniken und/oder Korrelationstechniken erfolgen. So können die Abbilder einzelner Details des Musters in jedem Bild individualisiert werden und dazu benutzt werden, die räumliche Lage der Details photogrammetrisch zu bestimmen. Bei der Individualisierung der Abbilder können Markierungen dieser Details ebenso verwendet werden wie Korrelationstechniken.

[0015] Besonders bevorzugt ist es jedoch, wenn auch bei dem neuen Verfahren zur Erfassung von Deformationen die Lagen der Intensitätsverteilung des Musters im Raum tomografisch aus den Bildern rekonstruiert werden. Auch hierbei kann eine SMART zur Anwendung kommen.

[0016] Vorzugsweise wird aus jeder dreidimensionalen Rekonstruktion der Intensitätsverteilung des Musters die Lage von Objekten des Musters im Raum bestimmt. Dabei kann auf Techniken zurückgegriffen werden, die aus der Tomographic Particle Tracking Velocimetry bekannt sind (Kitzhofer J, Brücker C (2010) Tomographic particle tracking velocimetry using telecentric imaging. Experiments in Fluids, DOI 10.1007/s00348-010-0879-z). Es ist aber

auch möglich, die Rekonstruktionen der Intensitätsverteilung des Musters direkt bezüglich des Verlaufs oder der Verformung der Oberfläche auszuwerten.

[0017] Besonders bevorzugt ist es, wenn das Muster auf der Oberfläche in Punktemuster ist, das heißt die optisch identifizierbaren Objekte des Musters möglichst punktförmig sind, das heißt eine möglichst geringe Ausdehnung aufweisen, die unter Beachtung üblicher Kriterien an die Pixeldichte der Kameras angepasst sein kann, um eine maximale Ortsauflösung zu erzielen, vgl. DE 10 2007 056 777 A1. Die einzelnen Objekte des Punktemusters sind zwar vorzugsweise kleine Kreisflächen, es kann sich aber auch z. B. um Vierecke, Ellipsen oder ähnliche Formen handeln. Zudem kann das Muster auf der Oberfläche auch ein Linienmuster, vorzugsweise aus sich kreuzenden Linien sein, wobei jeder Kreuzungspunkt der Linien wieder einen Punkt markiert.

[0018] Noch weiter bevorzugt ist das Muster ein stochastisches Muster, um die Verschiebungen des Musters zwischen den beiden Rekonstruktionen auf einfache und bewährte Weise durch Kreuzkorrelationstechniken zu ermitteln. Es versteht sich, dass hierbei dreidimensionale Kreuzkorrelationstechniken zur Anwendung kommen.

[0019] Neben der Anwendung von Kreuzkorrelationstechniken zur Deformationserfassung, ist es auch möglich, einzelne rekonstruierte Punkte bzw. deren drei-dimensionale Koordinaten zu verfolgen und aus dem Abstand die drei-dimensionale Deformationen zu berechnen. Eine weitere sehr einfache Möglichkeit ist es, die lokale mittlere Verformung der Oberfläche über eine Schwerpunktsberechnung der rekonstruierten Intensitätsverteilungen des Musters in einem bestimmten Bereich abzuschätzen.

[0020] Die Auflösung tomografischer Verfahren steigt mit der Anzahl der unterschiedlichen Richtungen, aus denen die einzelnen Bilder hierfür aufgenommen werden. Entsprechend ist es bevorzugt, wenn die Bilder des Musters aus mehr als zwei unterschiedlichen Richtungen aufgenommen werden.

[0021] Es versteht sich auch, dass die zur Aufnahme der Bilder des Musters verwendeten Kameras bekannte dreidimensionale Abbildungsfunktionen aufweisen müssen. Um diese möglichst einfach zu ermitteln, können Bilder einer Kalibrierplatte in verschiedenen Stellungen innerhalb eines Messvolumens aufgenommen werden. Zumindest für dieses Messvolumen kann so eine Volumenkalibrierung der Kameras erfolgen, ohne dass ihre vollständigen Abbildungsfunktionen bekannt sein müssen.

[0022] Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den Patentansprüchen, der Beschreibung und den Zeichnungen. Die in der Be-

schreibungseinleitung genannten Vorteile von Merkmalen und von Kombinationen mehrerer Merkmale sind lediglich beispielhaft und können alternativ oder kumulativ zur Wirkung kommen, ohne dass die Vorteile zwingend von erfindungsgemäßen Ausführungsformen erzielt werden müssen. Weitere Merkmale sind den Zeichnungen – insbesondere den dargestellten Geometrien und den relativen Abmessungen mehrerer Bauteile zueinander sowie deren relativer Anordnung und Wirkverbindung – zu entnehmen. Die Kombination von Merkmalen unterschiedlicher Ausführungsformen der Erfindung oder von Merkmalen unterschiedlicher Patentansprüche ist ebenfalls abweichend von den gewählten Rückbeziehungen der Patentansprüche möglich und wird hiermit ange-regt. Dies betrifft auch solche Merkmale, die in separaten Zeichnungen dargestellt sind oder bei deren Beschreibung genannt werden. Diese Merkmale können auch mit Merkmalen unterschiedlicher Patentansprüche kombiniert werden. Ebenso können in den Patentansprüchen aufgeführte Merkmale für weitere Ausführungsformen der Erfindung entfallen.

KURZBESCHREIBUNG DER FIGUREN

[0023] Im Folgenden wird die Erfindung anhand in den Figuren dargestellter bevorzugter Ausführungsbeispiele weiter erläutert und beschrieben.

[0024] [Fig. 1](#) skizziert das erfindungsgemäße Erfassen des Verlaufs einer ein zufälliges Punktemuster aufweisenden Oberfläche im Raum.

[0025] [Fig. 2](#) skizziert das erfindungsgemäße Erfassen von Deformationen der das zufällige Punktemuster aufweisenden Oberfläche im Raum; und

[0026] [Fig. 3](#) zeigt die rekonstruierte Oberfläche einer nicht stetig verformten bzw. nicht kontinuierlichen Oberfläche links in Form der detektierten Positionen der einzelnen Punkte des Punktemusters und rechts in Form einer interpolierten Oberfläche.

FIGURENBESCHREIBUNG

[0027] In [Fig. 1](#) ist ein Messvolumen **1** angedeutet, für das die Abbildungsfunktionen von mehreren Kameras **3**, die auf das Messvolumen **1** gerichtet sind, bekannt sind. Konkret können diese Abbildungsfunktionen durch eine Volumenkalibrierung mittels einer Kalibrierplatte in den für eine tomografische Rekonstruktion von Objekten in dem Messvolumen **1** erforderlichen Maß erfasst werden. Wenn von einer Oberfläche **2** in dem Messvolumen, die mit einem Muster, hier einem stochastischen Punktemuster **5**, versehen ist, Bilder **6** mit den Kameras **3** aus verschiedenen bekannten Richtungen aufgenommen werden, so ist eine Grundlage dafür geschaffen, mit einer tomografischen Technik **7** eine dreidimensionale Rekonstruktio-

on **4** einer räumlichen Intensitätsverteilung des Punktemusters **5** zu berechnen.

[0028] **Fig. 2** skizziert verschiedene Möglichkeiten, Rekonstruktionen **4**, die beispielsweise verschiedenen Deformationszuständen der Oberfläche **2** gemäß **Fig. 1** zugeordnet sind, weiter auszuwerten. So kann aus jeder der Rekonstruktionen **4** nach Durchführung einer dreidimensionalen Punkterkennung, wie Sie grundsätzlich aus der Tomographic Particle Tracking Velocimetry bekannt ist, der Verlauf **8** der Oberfläche berechnet und direkt oder in Schnitten **9** visualisiert werden. Darüber hinaus ist es durch dreidimensionale Kreuzkorrelation möglich, Deformationen **10** der Oberfläche **2** durch Berechnung dreidimensionaler Kreuzkorrelationen unmittelbar zwischen den Rekonstruktionen **4** oder nach Durchführung dreidimensionaler Punkterkennungen zu bestimmen. Diese Deformationen **10** können anschließend unter Verwendung des Verlaufs **8** bzw. der Schnitte **9** der Oberfläche in Darstellungen **11** und **12** visualisiert werden, die die Verschiebungsvektoren zusammen mit dem Verlauf der Oberfläche wiedergeben.

[0029] **Fig. 3** zeigt einmal eine dreidimensionale Rekonstruktion **4** (**Fig. 3a**) und einen daraus ermittelten Verlauf **8** der zugehörigen Oberfläche (**Fig. 3b**), die in einem Prinzipversuch berechnet wurden. In diesem Prinzipversuch war die Oberfläche **2** diejenige eines mit einem zufälligen Punktemuster beklebten Kartons, die nicht stetig deformiert war, das heißt hier konkret Knicke aufwies. Vorspringende Knicke **13** und rückspringende Knicke **14** sind bei dem Verlauf **18** gut zu erkennen.

Bezugszeichenliste

| | |
|-----------|-----------------------|
| 1 | Messvolumen |
| 2 | Oberfläche |
| 3 | Kamera |
| 4 | Rekonstruktion |
| 5 | Punktemuster |
| 6 | Bild |
| 7 | tomografische Technik |
| 8 | Verlauf |
| 9 | Schnitt |
| 10 | Deformation |
| 11 | Darstellung |
| 12 | Darstellung |
| 13 | Knick |
| 14 | Knick |

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

- EP 1517150 A2 [0005, 0006, 0010]
- DE 102006055746 A1 [0006, 0010]
- DE 102007056777 A1 [0017]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- http://aim.dlr.de/site/uploads/media/AIM_Measurement_Techniques_Brochure.pdf [0004]
- Simultaneous Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique, Atkinson C, Soria J (2009) An efficient simultaneous reconstruction technique for tomographic particle image velocimetry. Experiments in Fluids 47:553–568 [0011]
- Kitzhofer J, Brücker C (2010) Tomographic particle tracking velocimetry using telecentric imaging. Experiments in Fluids, DOI 10.1007/s00348-010-0879-z [0016]

Patentansprüche

1. Verfahren zur Erfassung des dreidimensionalen Verlaufs (8) einer ein Muster aufweisenden Oberfläche, wobei der Verlauf (8) der Oberfläche aus mehreren Bildern (6) des Musters, die mit mehreren Kameras (3) aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen werden, ermittelt wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass aus den Bildern (6) eine dreidimensionale Rekonstruktion (4) einer Intensitätsverteilung des Musters tomografisch berechnet wird.

2. Verfahren zur Erfassung von dreidimensionalen Deformationen (10) einer ein Muster aufweisenden Oberfläche (2) gegenüber einem Vergleichsverlauf der Oberfläche (2), wobei die Deformationen der Oberfläche (2) aus mehreren Bildern (6) des Musters, die mit mehreren Kameras (3) aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen werden, ermittelt werden, dadurch gekennzeichnet, dass für die deformierte Oberfläche (2) und für den Vergleichsverlauf dreidimensionale Rekonstruktionen (4) einer Intensitätsverteilung des Musters aus den Bildern (6) berechnet werden und dass die Deformationen (10) aus räumlichen Verschiebungen des Musters zwischen den beiden Rekonstruktionen (4) ermittelt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die dreidimensionalen Rekonstruktionen (4) des Musters tomografisch aus den Bildern (6) berechnet werden.

4. Verfahren nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass jede dreidimensionale Rekonstruktion (4) der Intensitätsverteilung des Musters mit einer SMART aus den Bildern (6) berechnet wird.

5. Verfahren nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass aus jeder dreidimensionalen Rekonstruktion (4) der Intensitätsverteilung des Musters die Lage von Objekten des Musters im Raum bestimmt wird.

6. Verfahren nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Muster ein Punktemuster (5) ist.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass das Muster ein stochastisches Muster ist.

8. Verfahren nach Anspruch 3 und 7, dadurch gekennzeichnet, dass die räumlichen Verschiebungen des Musters zwischen den beiden Rekonstruktionen (4) des Musters durch dreidimensionale Kreuzkorrelationstechniken ermittelt werden.

9. Verfahren nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass

die Bilder (6) des Musters aus mehr als zwei unterschiedlichen Richtungen aufgenommen werden.

10. Verfahren nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zur Volumenkalibrierung der Kameras (3) Bilder einer Kalibrierplatte in verschiedenen Stellungen innerhalb eines Messvolumens (1) aufgenommen werden.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

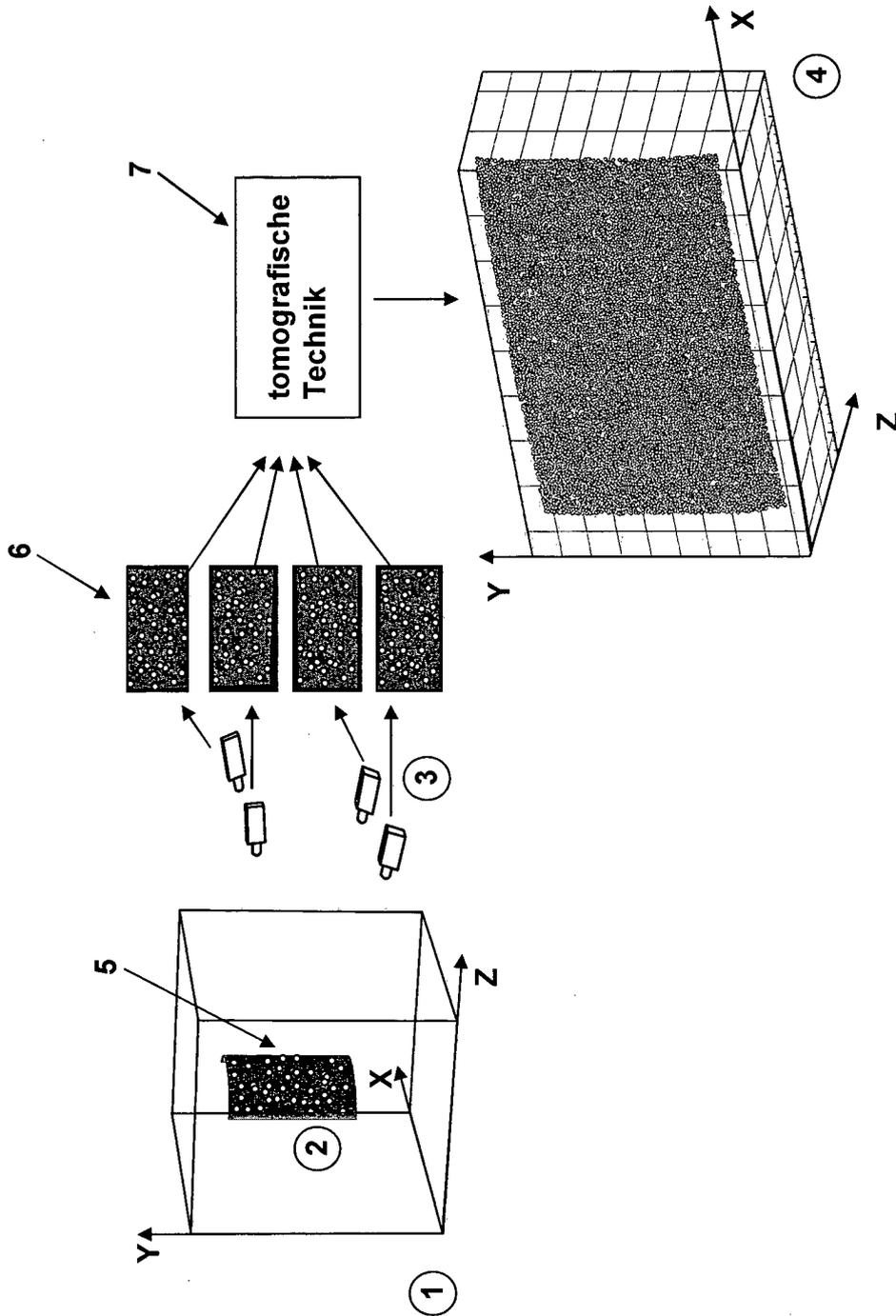


Fig. 1

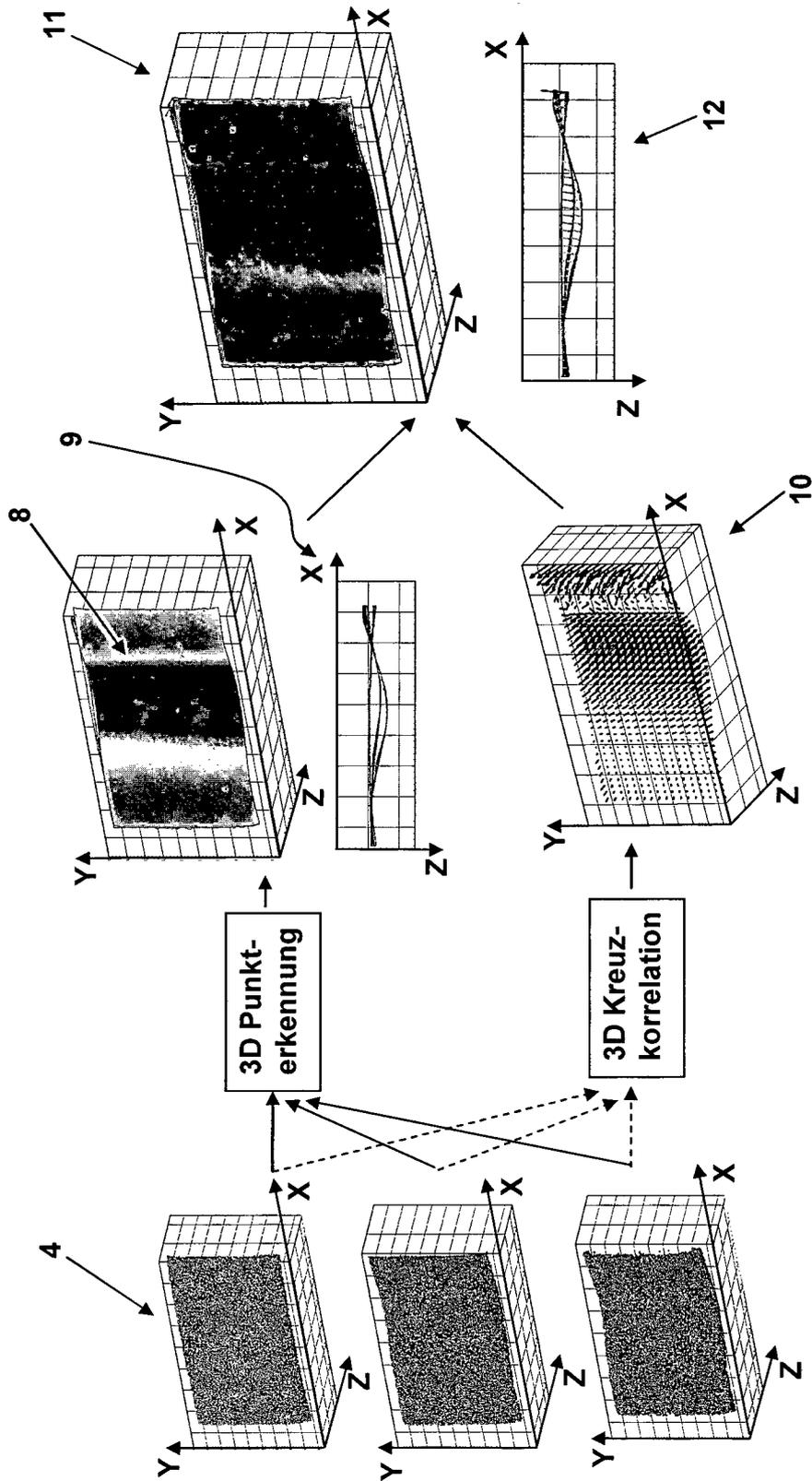


Fig. 2

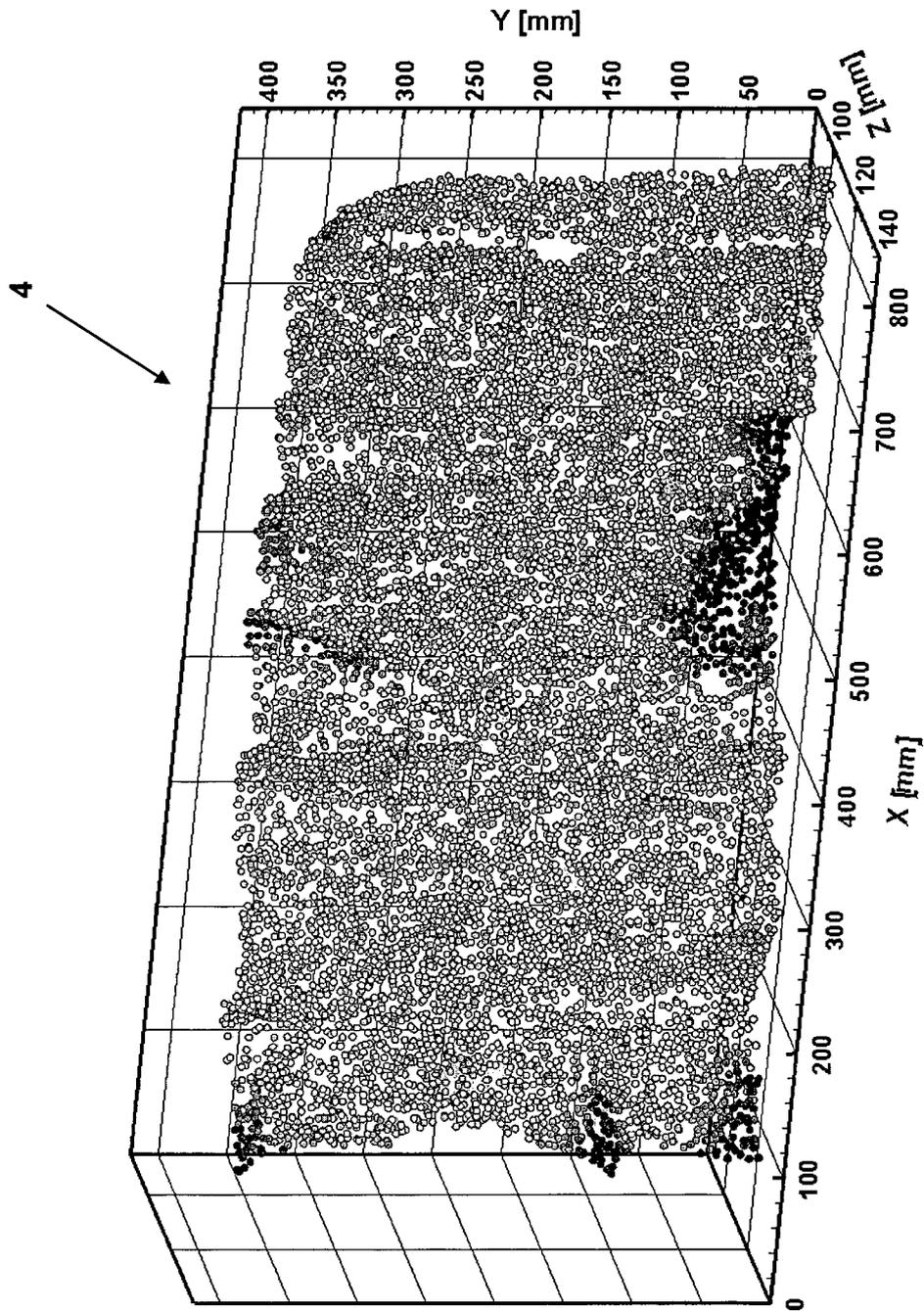


Fig. 3 (a)

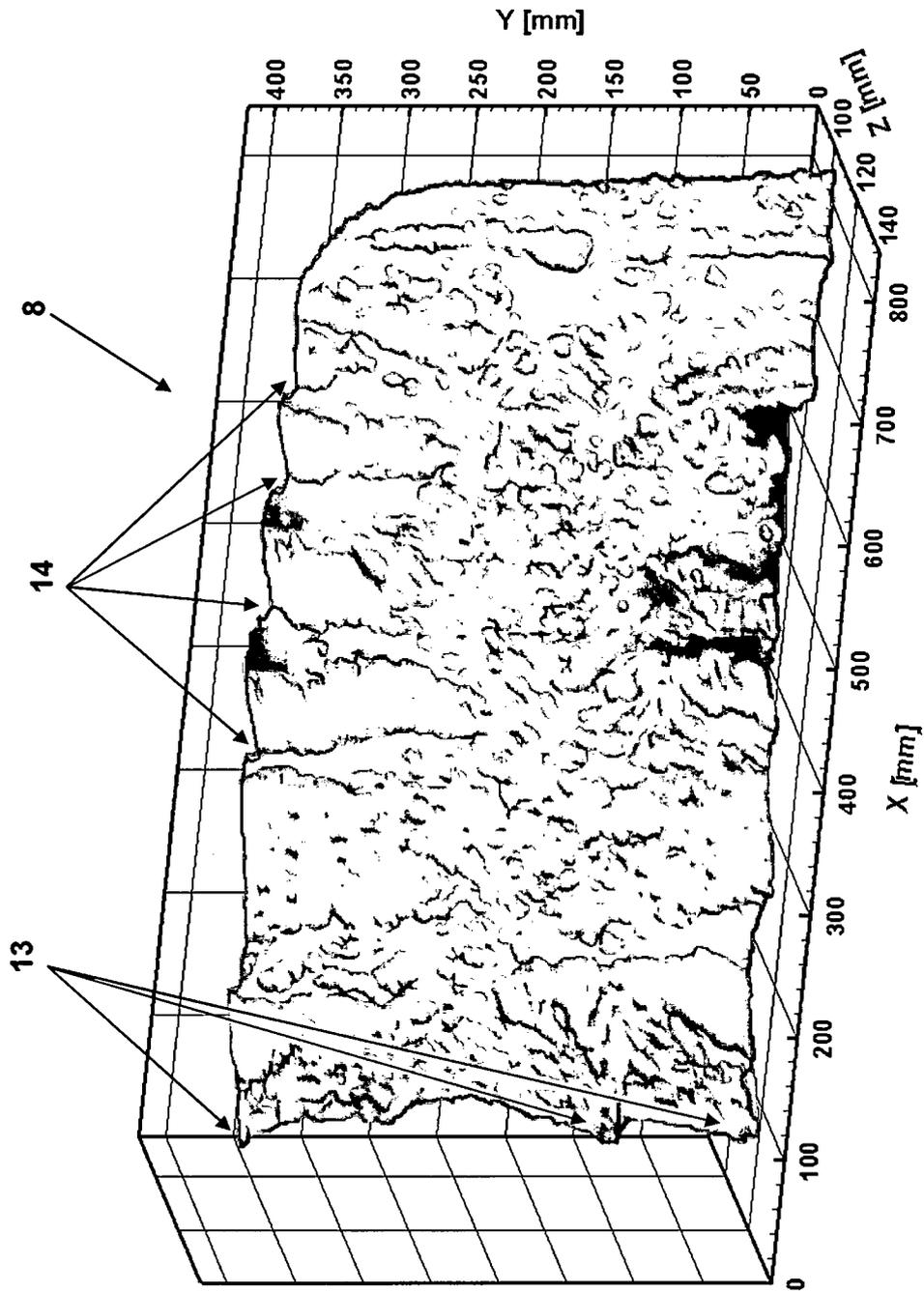


Fig. 3 (b)