



(10) **DE 10 2017 127 401 A1** 2019.05.23

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2017 127 401.4**
(22) Anmeldetag: **21.11.2017**
(43) Offenlegungstag: **23.05.2019**

(51) Int Cl.: **G01B 21/32** (2006.01)
G01B 11/16 (2006.01)
G01B 11/24 (2006.01)
G01M 9/02 (2006.01)
G01M 17/007 (2006.01)

(71) Anmelder:
**Gesellschaft zur Förderung angewandter
Informatik e.V., 12489 Berlin, DE**

(72) Erfinder:
**Matern, Manuel, 12621 Berlin, DE; Brodkorb,
Stephan, 10553 Berlin, DE; Hohnhäuser,
Benjamin, 14129 Berlin, DE**

(74) Vertreter:
**Gulde & Partner Patent- und
Rechtsanwaltskanzlei mbB, 10179 Berlin, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

| | | |
|-----------|-------------------------|-----------|
| US | 7 997 130 | B1 |
| US | 2016 / 0 327 647 | A1 |

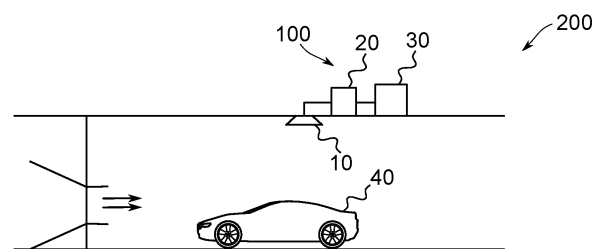
Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Berührungslose Deformationsmessung**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung einer Deformation eines Gegenstandes (40) in einem Windkanal, umfassend die Schritte:

- Bestimmen (S1) eines hinsichtlich der Deformation zu untersuchenden Untersuchungsbereichs (42) des Gegenstandes;
- Bestimmen (S2) einer Referenzpunktvolke (500) durch berührungsloses Vermessen des Untersuchungsbereichs des Gegenstandes im nicht deformierten Zustand;
- Bestimmen (S3) eines Referenzobjekts (510) zu der Referenzpunktvolke;
- Bestimmen (S4) einer Deformationspunktvolke (600) durch berührungsloses Vermessen des Untersuchungsbereichs des Gegenstandes im deformierten Zustand unter Luftanströmung;
- für einen vorgegebenen Anteil (42B) des Untersuchungsbereichs:
 - Bestimmen einer Deformation für den Anteil des Untersuchungsbereichs auf Basis eines Verhältnisses eines ersten Wertes (d1) zu einem zweiten Wert (d2),
 - wobei der erste Wert eine Lage einer dem Anteil des Untersuchungsbereichs entsprechenden Teilpunktvolke der Referenzpunktvolke zu dem Referenzobjekt beschreibt und wobei
 - der zweite Wert eine Lage einer dem Anteil des Untersuchungsbereichs entsprechenden Teilpunktvolke der Deformationspunktvolke zu dem Referenzobjekt beschreibt.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und ein System zur berührungslosen Deformationsmessung in einem Windkanal.

Technologischer Hintergrund

[0002] Ein Gegenstand kann sich unter Einwirkung einer Kraft auf den Gegenstand verformen, z. B. unter Luftanströmung. Die Außenhülle von Fahrzeugen beispielsweise kann sich bei hohen Luftströmungsgeschwindigkeiten verformen. Am deutlichsten sieht man dies alltäglich bei Verdecken von Cabriolets (=hohe Elastizität) auf Autobahnen (=hohe Geschwindigkeiten). Die Verformung beruht darauf, dass der Strömungsquerschnitt der Luft am Fahrzeug „verengt“ wird, die Strömungsgeschwindigkeit dort entsprechend (reziprok) höher ist und eine Kraft entsteht, die quer zur Strömung steht. Diese Verformungseigenschaft kann in einem Windkanal nachgestellt werden.

[0003] Eine Verformung oder Deformation eines Gegenstandes kann grundsätzlich auf verschiedene Weise gemessen werden, beispielsweise indem geeignete Messinstrumente, wie z.B. Sensoren oder Marker, an einer Oberfläche des Gegenstandes angebracht werden. Eine solche Vorgehensweise scheidet dann aus, wenn die Messinstrumente die Messung selbst beeinflussen oder stören könnten. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn eine zur Deformation des Gegenstandes führende Krafteinwirkung durch eine Luftanströmung des Gegenstandes erfolgt, wie z.B. in einem Windkanal. An der Oberfläche des Gegenstandes angebrachte Messinstrumente würden das Strömungsverhalten der Luft am Gegenstand verändern, und somit auch die Krafteinwirkung auf den Gegenstand und die daraus resultierende Deformation.

[0004] In solchen Fällen sollte die Deformationsmessung berührungslos erfolgen, vorzugsweise optisch. Bekannte berührungslose Messgeräte sind beispielweise Streifenlichtprojektoren oder Laserscanner, insbesondere terrestrische Laserscanner (TLS). Diese Messinstrumente weisen allerdings den Nachteil auf, dass eine Messungenauigkeit dieser Messinstrumente, z.B. ein Tiefenrauschen der Einzelpunkte eines TLS, in manchen Fällen deutlich größer ist als eine gewünschte Auflösung der Deformationsmessung.

[0005] Folglich ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, die angesprochenen Nachteile des Standes der Technik auszuräumen und ein Verfahren und System zur verbesserten berührungslosen Deformationsmessung in einem Windkanal vorzuschlagen.

Zusammenfassung der Erfindung

[0006] Das erfindungsgemäße Verfahren beruht auf dem Grundgedanken, eine Deformation des Gegenstandes im Windkanal zu bestimmen, indem ein erstes Messergebnis einer ersten Messung, während welcher der Gegenstand noch in unverformtem Zustand vorliegt, mit einem zweiten Messergebnis einer zweiten Messung, während welcher der Gegenstand deformiert ist (unter Luftanströmung), geeignet zu vergleichen, so dass sich eine Messungenauigkeit der ersten Messung und eine Messungenauigkeit der zweiten Messung im Wesentlichen gegenseitig aufheben.

[0007] Eine bevorzugte Ausführungsform eines Verfahrens zur Bestimmung einer Deformation eines Gegenstandes in Windkanal umfasst die folgenden Schritte:

[0008] Vorab wird ein hinsichtlich der Deformation zu untersuchenden Untersuchungsbereich des Gegenstandes bestimmt. In der Regel wird dieser Untersuchungsbereich auf einer Oberfläche des Gegenstandes angesiedelt sein. Folglich kann das Bestimmen des Untersuchungsbereichs z. B. durch Projektion eines vorgegebenen Ausschnitts auf eine Oberfläche des Gegenstandes erfolgen. Auch ein CAD-Modell, falls vorhanden, kann zum Bestimmen des Untersuchungsbereichs herangezogen werden.

[0009] Dann wird eine Referenzpunktwolke durch berührungsloses Vermessen des Untersuchungsbereichs des Gegenstandes bestimmt, während sich der Gegenstand in nicht deformiertem Zustand befindet. Die Referenzpunktwolke umfasst in an sich bekannter Weise Punkte im dreidimensionalen Raum und wird daher im Folgenden auch als 3D-Referenzpunktwolke bezeichnet.

[0010] Zu der Referenzpunktwolke wird nun ein Referenzobjekt bestimmt. Das Referenzobjekt, welches die Referenzpunktwolke in nachstehend noch genauer beschriebener Weise „charakterisiert“, also z. B. approximiert und vereinfacht repräsentiert, dient im Folgenden dazu, Messergebnisse der ersten Vermessung mit

Messergebnissen einer nachstehend beschriebenen zweiten Vermessung des Gegenstandes mit einander in ein Verhältnis zu setzen.

[0011] Wie bereits angedeutet wird nun im Rahmen eines zweiten berührungslosen Vermessens des Gegenstandes, während sich der Gegenstand in deformiertem Zustand befindet, eine Deformationspunkt看ke (im Folgenden auch als 3D-Deformationspunkt看ke bezeichnet) bestimmt. Die Deformation des Gegenstandes resultiert dabei aus einer Luftanströmung des Gegenstandes in dem Windkanal.

[0012] Für einen vorgegebenen Anteil des Untersuchungsbereichs wird nun eine Deformation des Gegenstandes in diesen Anteil wie folgt bestimmt: Es wird ein Ausmaß einer Deformation des Gegenstandes für den Anteil des Untersuchungsbereichs auf Basis eines Verhältnisses eines ersten Wertes zu einem zweiten Wert bestimmt. Der erste Wert beschreibt dabei eine Lage einer dem Anteil des Untersuchungsbereichs entsprechenden Teilpunkt看ke der Referenzpunkt看ke zu dem Referenzobjekt. Der zweite Wert beschreibt in analoger Weise eine Lage einer dem Anteil des Untersuchungsbereichs entsprechenden Teilpunkt看ke der Deformationspunkt看ke zu dem Referenzobjekt.

[0013] Es versteht sich, dass der Schritt des Bestimmens der Deformation für eine Mehrzahl verschiedener Anteile des Untersuchungsbereichs durchgeführt wird, nacheinander oder auch parallel. Die Mehrzahl der verschiedenen Anteile des Untersuchungsbereichs kann dabei auf Basis einer gleichmäßigen oder adaptiven Rasterung des Untersuchungsbereichs gebildet werden.

[0014] Eine bevorzugte Ausführungsform eines Systems zur Bestimmung einer Deformation eines Gegenstandes in einem Windkanal umfasst folgende Komponenten:

- Eine Vermessungsvorrichtung zum berührungslosen Vermessen eines Untersuchungsbereichs, welche eingerichtet ist, in dem Windkanal derart angeordnet zu werden, dass mittels der Vermessungsvorrichtung eine Deformation des Gegenstandes bestimmt werden kann, welche aus einer Luftanströmung des Gegenstandes in dem Windkanal resultiert, und eingerichtet ist, eine 3D-Referenzpunkt看ke des Untersuchungsbereichs des Gegenstandes, im nicht deformierten Zustand, zu bestimmen sowie eine 3D-Deformationspunkt看ke des Untersuchungsbereichs des Gegenstandes, im deformierten Zustand, unter Luftanströmung im Windkanal, zu bestimmen.

- Eine Auswertungseinrichtung, welche eingerichtet ist, ein die Referenzpunkt看ke charakterisierendes Referenzobjekt zu der Referenzpunkt看ke zu bestimmen, und für einen vorgegebenen Anteil des Untersuchungsbereichs eine Deformation für den Anteil des Untersuchungsbereichs auf Basis eines Verhältnisses eines ersten Wertes zu einem zweiten Wert zu bestimmen, wobei der erste Wert eine Lage einer dem Anteil des Untersuchungsbereichs entsprechenden Teilpunkt看ke der Referenzpunkt看ke zu dem Referenzobjekt beschreibt und der zweite Wert eine Lage einer dem Ausschnitt des Untersuchungsbereichs entsprechenden Teilpunkt看ke der Deformationspunkt看ke zu dem Referenzobjekt beschreibt.

[0015] Die Vermessungsvorrichtung kann einen Laserscanner, vorzugsweise einen terrestrischen Laserscanner umfassen, oder einen Streifenlichtprojektor. Als Auswertungseinrichtung kann jede geeignete Recheneinrichtung, z. B. ein Personal Computer, ein Notebook, etc. dienen, welche programmiert ist, die entsprechende Verfahrensschritte auf Basis der seitens der Vermessungseinrichtung ermittelten Daten durchzuführen.

[0016] Als Referenzobjekt zu der Referenzpunkt看ke kann eine auf Basis von Punkten der Referenzpunkt看ke berechnete, die Referenzpunkt看ke gleichsam approximierende Fläche im dreidimensionalen Raum bestimmt wird. Vorzugsweise wird als Referenzobjekt eine Ebene, besonders bevorzugt eine Regressions-ebene, bestimmt. Verfahren zum Bestimmen solcher Flächen oder Ebenen auf Basis der Referenzpunkt看ke sind im Stand der Technik bekannt. Eine Ausgleichsebene bzw. Regressionsebene kann beispielsweise durch mathematische Verfahren wie Total-Least-Square (TLS) oder durch Auswertung nach dem Gauß-Helmert-Modell berechnet werden, wobei letztgenannte Methode eine etwas robustere Parameterschätzung gegenüber Ausreißern erlaubt.

[0017] Zusätzlich zu einem Ausmaß der Deformation in dem Anteil kann auch eine Deformationsrichtung bestimmt werden, beispielsweise auf Basis eines Normalenvektors der Fläche in einem vorgegebenen Punkt der Fläche in dem Anteil des Untersuchungsbereichs. Die Angabe der Deformationsrichtung liefert zusätzliche wertvolle Information bei der Bewertung der Verformung. Überdies kann in Kenntnis der Deformationsrichtung eine noch anschaulichere Visualisierung der Deformation erfolgen.

[0018] Wie bereits angedeutet, erfolgt das Vermessen des Untersuchungsbereichs gemäß einer ersten Variante des Verfahrens mittels Laserscannens, vorzugsweise mittels terrestrischen Laserscannens.

[0019] Gemäß einer alternativen zweiten Variante kann das Vermessen des Untersuchungsbereichs auch mittels Streifenlichtprojektion erfolgen.

[0020] Grundsätzlich kann jedes berührungslose Vermessungsverfahren eingesetzt werden, welches geeignet ist, die Referenzpunkt Wolke und die Deformationspunkt Wolke mit hinreichender Genauigkeit unter den jeweils gegebenen Umständen im Windkanal zu bestimmen, z. B. ein Triangulationssystem oder ein Laserdistanzmesser.

[0021] Wie bereits angegeben, wird ein Ausmaß einer Deformation des Gegenstandes auf Basis eines Verhältnisses eines ersten Wertes zu einem zweiten Wert bestimmt. Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform wird der erste Wert als mittlerer Abstand von Punkten der Referenzpunkt Wolke zu dem Referenzobjekt bestimmt, also beispielsweise als mittlerer Abstand der Punkte der Referenzpunkt Wolke zu einer Ebene, welche als Referenzobjekt in vorstehend angegebener Weise zu der Referenzpunkt Wolke gebildet worden ist. In analoger Weise wird dann der zweite Wert als mittlerer Abstand von Punkten der Deformationspunkt Wolke zu dem Referenzobjekt bestimmt. Anstelle eines mittleren Abstandes (arithmetisches Mittel) von Punkten der Referenzpunkt Wolke bzw. Deformationspunkt Wolke zu dem Referenzobjekt kann zum Bestimmen des ersten Wertes bzw. des zweiten Wertes z. B. auch ein Median oder ein gewichteter oder getrimmter Mittelwert verwendet werden. Letztgenannte Varianten erweisen sich als robuster gegenüber Ausreißern in den Messdaten, erfordern aber einen höheren Rechenaufwand.

[0022] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform wird das Verhältnis des ersten Wertes zu dem zweiten Wert als Differenz zwischen dem ersten Wert und dem zweiten Wert gebildet.

[0023] Hier zeigt sich der Effekt der vorliegenden Erfindung exemplarisch: Unter der Annahme, dass die Referenzpunkt Wolke im Vergleich zu dem nicht deformierten Gegenstand in dem vorgegebenen Anteil eine Messungengenauigkeit aufweist, welche in Art und Umfang im Wesentlichen einer Messungengenauigkeit entspricht, welche die Deformationspunkt Wolke im Vergleich zu dem deformierten Gegenstand in dem entsprechenden Anteil aufweist, heben sich diese beiden Messungengenauigkeiten gemäß dem vorstehend beschriebenen Verfahren beim Bestimmen der Deformation im Wesentlichen auf.

[0024] Wird als Referenzobjekt beispielsweise eine Ebene durch die Referenzpunkt Wolke gebildet, und werden der erste Wert und der zweite Wert jeweils als mittlerer Abstand der Punkte der Referenzpunkt Wolke zu der Ebene und als mittlerer Abstand der Punkte der Deformationspunkt Wolke zu der Ebene bestimmt, so „verschwindet“ die Messungengenauigkeit quasi bei der Bestimmung der Deformation als Differenz zwischen dem ersten Wert und dem zweiten Wert.

[0025] Auf diese Weise kann die Auflösung, die im Rahmen der Deformationsbestimmung gemäß dem beschriebenen Verfahren erreicht werden kann, tatsächlich beträchtlich höher sein als die Messungengenauigkeit der verwendeten Messinstrumente, was zunächst paradox klingt.

[0026] Die oben angegebene Annahme hinsichtlich der in Art und Umfang vergleichbaren Messungengenauigkeiten, z. B. einer im Wesentlichen gleichen Verteilung der Punkte der entsprechenden Anteile der Referenzpunkt Wolke und der Deformationspunkt Wolke in Bezug zu dem Gegenstand, sind in bevorzugten Anwendungsgebieten, beispielsweise bei einer Deformationsmessung im Windkanal, gegeben und experimentell nachgeprüft worden.

[0027] Gleiches gilt für den tatsächlich erzielbaren Effekt einer Auflösung der Deformationsmessung. Die Messungengenauigkeit verwendeter Messinstrumente war bis zu einem Faktor **10** höher als die erreichte Auflösung. Experimentelle Ergebnisse werden nachstehend mit Bezug zu **Fig. 7** angegeben.

[0028] Unter den obigen Annahmen, lässt sich bei einer Messungengenauigkeit von ca. 2 mm mittels des vorstehend beschriebenen Verfahrens eine Deformation mit einer Auflösung von ca. 0,2 mm bestimmen.

[0029] Das Verfahren kann weiterhin einen Schritt des Visualisierens der Deformation des Untersuchungsbereichs des Gegenstandes auf Basis der bestimmten Deformation des Anteils des Gegenstandes, und gegebenenfalls der bestimmten Deformationsrichtung, umfassen. Dazu kann das System eine entsprechend einggerichtete Visualisierungseinrichtung umfassen.

[0030] Demzufolge umfasst ein Windkanal gemäß der Erfindung ein vorstehend beschriebenes System, welches in dem Windkanal derart angeordnet und eingerichtet ist, dass mittels des Systems gemäß einem vorstehend beschriebenen Verfahren eine Deformation eines Gegenstandes bestimmt werden kann, welche aus einer Luftanströmung des Gegenstandes in dem Windkanal resultiert.

Figurenliste

[0031] Die Erfindung wird nachfolgend anhand eines Ausführungsbeispiels und dazugehöriger Zeichnungen exemplarisch näher erläutert. Die Figuren zeigen:

Fig. 1 schematisch einen Windkanal mit einer bevorzugten Ausführungsform eines Systems zur berührungslosen Deformationsmessung;

Fig. 2 schematisch einen Schritt des Bestimmens eines Untersuchungsbereichs eines Gegenstandes;

Fig. 3 schematisch eine 3D-Referenzpunkt看ke und eine 3D-Deformationspunkt看ke;

Fig. 4 schematisch ein Referenzobjekt zu der 3D-Referenzpunkt看ke mit Normalenvektor sowie Abstandsangaben von Punkten der 3D-Referenzpunkt看ke und der 3D-Deformationspunkt看ke zu dem Referenzobjekt;

Fig. 5 Schritte einer bevorzugten Ausführungsform eines Verfahrens zur berührungslosen Deformationsmessung;

Fig. 6A, Fig. 6B Illustrationen resultierend aus einer konkreten technischen Umsetzung des Verfahrens nach **Fig. 5**, und

Fig. 7 Messergebnisse einer Testmessung zur Überprüfung des Verfahrens gemäß **Fig. 5**.

Detaillierte Beschreibung der Erfindung

[0032] **Fig. 1** zeigt schematisch einen Windkanal **200** mit einem System **100** zur Deformationsmessung. Ein in dem Windkanal **200** angeordneter Gegenstand **40**, wie z. B. ein Kraftfahrzeug, kann mittels des Systems **100** dahingehend untersucht werden, wie eine auf den Gegenstand **40** einwirkende Kraft, die von einer Luftanströmung des Gegenstandes **40** resultiert, zu einer Deformation zumindest eines Teils des Gegenstandes **40** führt.

[0033] Das System **100** und ein mittels des Systems **100** durchführbares Verfahren werden nachfolgend mit Bezug auf die **Fig. 1** bis **Fig. 5** genauer beschrieben. Schritte des Verfahrens sind in **Fig. 5** schematisch angegeben.

[0034] Das System **100** umfasst eine Vermessungsvorrichtung **10** zum berührungslosen Vermessen eines Untersuchungsbereichs **42** des Gegenstandes **40**. Das System **100** umfasst weiterhin eine Auswertungseinrichtung **20**, welche eingerichtet ist, seitens der Vermessungsvorrichtung **10** erfasste Daten in der nachfolgend beschriebenen Weise zu verarbeiten und daraus eine Deformation des Gegenstandes **40** zu bestimmen. Entsprechende Ergebnisse können mittels der Visualisierungsvorrichtung **30** des Systems **100** dargestellt werden.

[0035] Der Untersuchungsbereich **42** wird in der Regel ein Teil einer Oberfläche des Gegenstandes **40** sein, welcher z. B. durch eine Projektion eines vorgegebenen Ausschnitts auf den Gegenstand **40** bestimmt werden kann. Ein entsprechender Schritt **S1** (vgl. **Fig. 5**) des Bestimmens des Untersuchungsbereichs **42** ist in **Fig. 2** illustriert.

[0036] Wie in **Fig. 2** ebenfalls angedeutet, kann der Untersuchungsbereich **42** in mehrere Anteile **42A**, **42B** unterteilt werden. Eine solche Unterteilung kann mittels Rasterung erfolgen. Die Anteile können dabei gleichmäßig sein, oder aber verschiedene Form oder Größe besitzen, je nach Anwendungszusammenhang. Gemäß dem nachstehend noch genauer beschriebenen Verfahren wird für jeden der Anteile **42A**, **42B** des Untersuchungsbereichs **42** ein Ausmaß und gegebenenfalls eine Richtung einer Deformation bestimmt. In dem in **Fig. 2** illustrierten Beispiel bildet ein Teil des Daches eines Kraftfahrzeugs den Untersuchungsbereich **42** (vgl. auch **Fig. 6A**, **Fig. 6B**, welche konkrete Experimente illustrieren). Ein solches Dach kann sich unter Luftanströmung merklich verformen.

[0037] Als Vermessungsvorrichtung **10** wird in dem gezeigten Beispiel ein terrestrischer Laserscanner verwendet. Alternativ können andere, vorstehend erwähnte Vermessungsvorrichtungen verwendet werden. Wichtig ist, dass die Vermessungsvorrichtung **10** in dem Windkanal **200** zur Vermessung des Gegenstandes **40**

derart angeordnet werden kann, dass eine Luftanströmung des Gegenstandes **40** durch die Anwesenheit der Vermessungsvorrichtung **10** praktisch nicht beeinträchtigt wird.

[0038] Die Vermessungsvorrichtung **10** ist eingerichtet, den Gegenstand **40** zu vermessen und als Ergebnis einer Vermessung eine 3D-Punktwolke auszugeben, welche den vermessenen Untersuchungsbereich **42** beschreibt.

[0039] Um eine Deformation des Gegenstandes **40** zu bestimmen, wird der Untersuchungsbereich **42** des Gegenstandes **40** mittels der Vermessungsvorrichtung **10** zweimal vermessen. In einem Schritt **S2** erfolgt eine Vermessung des Gegenstands **40** in nicht deformiertem Zustand, im oben angegebenen Beispiel also ohne Luftanströmung. Ergebnis dieser ersten Vermessung ist eine erste 3D-Punktwolke, die im Folgenden als 3D-Referenzpunktwolke **500** bezeichnet wird, und welche in **Fig. 3** schematisch durch die runden Punkte **501**, **502** dargestellt ist.

[0040] In einem zweiten Vermessungsschritt **S4** wird der Gegenstand **40** erneut vermessen, nun unter Luftanströmung, d.h. im deformierten Zustand. Ergebnis dieser zweiten Vermessung ist eine zweite 3D-Punktwolke, die im Folgenden als 3D-Deformationspunktwolke **600** bezeichnet wird, und welche in **Fig. 3** schematisch durch die kreuzförmigen Punkte **601**, **602** dargestellt ist.

[0041] **Fig. 3** soll andeuten und illustrieren, dass aus den beiden Punktwolken **500**, **600** allein, auch wegen der Messungenauigkeit der Vermessungsvorrichtung **10**, die Deformation nicht verlässlich bestimmt werden kann. Dies gilt auch, da eine solche Messungenauigkeit in der Regel größer ist als eine Auflösung, mit der die Deformation bestimmt werden soll. Die Messungenauigkeit liegt im Bereich weniger Millimeter, etwa im Bereich von 2 mm bis 5 mm. Die Auflösung, mit der die Deformation gemessen werden soll, liegt eine Größenordnung darunter, also etwa im Bereich vom 0,5 mm bis 0,2 mm.

[0042] Daher wird in einem weiteren Schritt **S3**, welcher auch nach dem Schritt **S4** durchgeführt werden kann, ein Referenzobjekt **510** zu der 3D-Referenzpunktwolke **500** bestimmt. Das Referenzobjekt **510** wird für die gesamte 3D-Referenzpunktwolke **500** bestimmt und soll diese quasi charakterisieren. Wie in **Fig. 4**, linke Seite, dargestellt wird in dem gezeigten Beispiel als Referenzobjekt **510** eine Ebene, beispielsweise eine durch die Punkte der 3D-Referenzpunktwolke **500** definierte Regressionsebene, bestimmt. Alternativ kann als Referenzobjekt **510** eine beliebige parametrisierte Fläche oder dergleichen bestimmt werden.

[0043] In dem Fall, dass eine Fläche oder Ebene als Referenzobjekt **510** bestimmt wird, kann zusätzlich eine Deformationsrichtung mit Bezug auf das Referenzobjekt **510** in einfacher Weise angegeben werden, nämlich entlang eines Normalenvektors N (vgl. **Fig. 4**). Im Falle einer Ebene ergibt sich somit eine einheitliche Deformationsrichtung. Im Falle einer gekrümmten Fläche als Referenzobjekt **510** ändert sich eine derart definierte Deformationsrichtung, abhängig von dem jeweiligen Normalenvektor in einem Punkt der Fläche.

[0044] Um eine Deformation des Gegenstandes **40** in einem vorgegebenen Anteil **42B** des Untersuchungsbereichs **42** zu bestimmen, wird nun in einem ersten Teilschritt **S5.1** eines Schritts **S5** die Lage von Punkten der 3D-Referenzpunktwolke **500** relativ zu dem Referenzobjekt **510** bestimmt, wobei die Punkte dem Anteil **42B** entsprechen (vgl. **Fig. 3**), also diejenige Teilpunktwolke der 3D-Referenzpunktwolke bilden, die dem Anteil **42B** zugeordnet ist bzw. in dem Anteil **42B** angeordnet ist. Eine ermittelte Lagebeziehung wird in einem ersten Wert festgehalten. Dieser erste Wert kann ein oder mehrere Komponenten enthalten, kann also beispielsweise auch als Vektor oder Matrix bestimmt werden.

[0045] In analoger Weise wird in einem zweiten Teilschritt **S5.2** die Lage von Punkten der 3D-Deformationspunktwolke **600** relativ zu dem Referenzobjekt **510** bestimmt, wobei die Punkte (als Teilpunktwolke der 3D-Deformationspunktwolke) ebenfalls dem Anteil **42B** entsprechen (vgl. **Fig. 3**). Eine ermittelte Lagebeziehung wird in einem zweiten Wert festgehalten. Auch dieser zweite Wert kann ein oder mehrere Komponenten enthalten.

[0046] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform, welche in **Fig. 4**, rechte Seite, angedeutet ist, wird als erster Wert **d1** ein mittlerer Abstand der dem Anteil **42B** entsprechenden Punkte der 3D-Referenzpunktwolke zu dem Referenzobjekt **510**, d.h. der Ebene, bestimmt.

[0047] In analoger Weise wird als zweiter Wert **d2** ein mittlerer Abstand der dem Anteil **42B** entsprechenden Punkte der 3D-Deformationspunktwolke zu dem Referenzobjekt **510**, d.h. der Ebene, bestimmt.

[0048] In einem dritten Teilschritt **S5.3** werden nun der erste Wert **d1** und der zweite Wert **d2** zueinander ins Verhältnis gesetzt, wodurch sich ein Ausmaß der Deformation des Gegenstandes **40** in dem Anteil **42B** des Untersuchungsbereichs **42** ableiten lässt. Konkret wird in der beschriebenen Ausführungsform eine Differenz **D** zwischen erstem Wert **D1** und zweitem Wert **d2** bestimmt, welche dann das Ausmaß der Deformation angibt. Auf diese Weise kann ein Messungenauigkeit, welche sich bei der Bestimmung der 3D-Referenzpunkt wolke und der 3D-Deformationspunkt wolke jeweils ergibt, und welche zumindest mit Bezug auf einen entsprechenden Anteil **42B** des Untersuchungsbereichs **42** als im Wesentlichen gleichartig (gleiche Verteilung der Punkte) angesehen werden darf, bei der Bestimmung der Deformation im Wesentlichen eliminiert werden (vgl. **Fig. 4**, rechte Seite).

[0049] Eine Deformation des Gegenstandes **40** in dem Anteil **42B** ist in **Fig. 4**, linke Seite, mittels des Vektors angedeutet. Die Deformationsrichtung entspricht der Normalen **N** auf die Ebene **510**, die Länge **D** des Vektors quantifiziert die Deformation in dem Anteil **42B**.

[0050] In **Fig. 6B** ist eine entsprechende Deformationsmessung nochmals anschaulich gemacht. Die berechneten Deformationswerte werden mit Hilfe der Normalen der Referenzebene als Vektorenfeld direkt auf ein CAD-Modell bzw. die Punkt wolke des Fahrzeugs projiziert. Jeder der dort gezeigten Vektoren veranschaulicht die bestimmte Deformation in einen entsprechenden Anteil eines der Untersuchungsbereiche **42** (vgl. **Fig. 6A**). Auf diese Weise können die Ergebnisse eines vorstehend exemplarisch beschriebenen Verfahrens leicht fassbar anschaulich gemacht werden. Weiterhin ist eine schnelle und einfache Bewertung der Messergebnisse möglich. Alle Daten können zudem als Messreport in Form einer PDF-Datei abgelegt werden, zudem ist ein Export als CSV-Datei zur weiteren Verarbeitung möglich.

[0051] Zum Überprüfen des vorstehend beschriebenen Verfahrens wurden zwei Messsysteme verwendet: ein Lasertracker (Faro Vantage) und ein TLS (Faro Focus 3D). Der Lasertracker bildet die Referenz, gegen welche die Messung des TLS ausgewertet wird.

[0052] Es wurde jeweils der mittlere Abstand der ermittelten Punkt wolke zur Referenzebene berechnet. Der erste Scan bildet die Referenzmessung zur Bestimmung der Differenz zwischen den Messungen. Zur Erzeugung einer Differenz wurde der Gegenstand, ein Kraftfahrzeug, mittels eines Wagenhebers auf einer Seite angekippt. Die y-Richtung des Lasertracker-Koordinatensystems zeigt senkrecht zur Referenzebene, deswegen wird nur diese Komponente zum Bilden der Referenzdifferenzen genutzt. Es ist in der nachstehend angegebenen Tabelle zu erkennen, dass die Abweichung der Differenzen jeweils unter 0,1 mm liegen. **Fig. 7** illustriert die Messergebnisse.

| Lasertracker Positions-messung | | Komponenten Differenz | TLS Messung | Mittlerer Abstand zur Ebene | Differenz der Anstände | Abweichung zum Lasertracker |
|--------------------------------|---------|-----------------------|-------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Point 2 - Center.x | 1356,18 | | | | | |
| Point 2 - Center.y | 8604,90 | | 18 | 11,67 | | |
| Point 2 - Center.z | -450,61 | | | | | |
| Point 3 - Center.x | 1356,69 | -0,51 | | | | |
| Point 3 - Center.y | 8604,25 | 0,65 | 19 | 12,26 | 0,59 | 0,06 |
| Point 3 - Center.z | -450,01 | -0,60 | | | | |
| Point 4 - Center.x | 1357,28 | -0,60 | | | | |
| Point 4 - Center.y | 8603,55 | 0,70 | 20 | 12,98 | 0,72 | -0,02 |
| Point 4 - Center.z | -449,14 | -0,87 | | | | |
| Point 5 - Center.x | 1357,78 | -0,49 | | | | |
| Point 5 - Center.y | 8603,06 | 0,50 | 21 | 13,53 | 0,55 | -0,05 |
| Point 5 - Center.z | -448,46 | -0,69 | | | | |
| Point 6 - Center.x | 1358,28 | -0,50 | | | | |
| Point 6 - Center.y | 8602,49 | 0,57 | 22 | 14,11 | 0,58 | -0,02 |
| Point 6 - Center.z | -447,74 | -0,72 | | | | |

| Lasertracker Positionsmessung | | Komponenten Differenz | TLS Messung | Mittlerer Abstand zur Ebene | Differenz der Anstände | Abweichung zum Lasertracker |
|-------------------------------|---------|-----------------------|-------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Point 7 - Center.x | 1358,78 | -0,50 | | | | |
| Point 7 - Center.y | 8602,07 | 0,42 | 23 | 14,55 | 0,44 | -0,02 |
| Point 7 - Center.z | -447,11 | -0,62 | | | | |

[0053] Im Folgenden werden bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung nochmals in nummerierten Absätzen angegeben (nicht zu verwechseln mit den nachfolgend angegebenen Patentansprüchen).

1. Verfahren zur Bestimmung einer Deformation eines Gegenstandes in einem Windkanal, wobei die Deformation aus einer Luftanströmung des Gegenstandes resultiert, umfassend die Schritte:

- Bestimmen eines hinsichtlich der Deformation zu untersuchenden Untersuchungsbereichs des Gegenstandes;
- Bestimmen einer 3D-Referenzpunktvolke durch berührungsloses Vermessen des Untersuchungsbereichs des Gegenstandes im nicht deformierten Zustand;
- Bestimmen eines die Referenzpunktvolke charakterisierenden Referenzobjekts zu der Referenzpunktvolke;
- Bestimmen einer 3D-Deformationspunktvolke durch berührungsloses Vermessen des Untersuchungsbereichs des Gegenstandes im deformierten Zustand unter Luftanströmung;
- für einen vorgegebenen Anteil des Untersuchungsbereichs:
 - Bestimmen (eines Ausmaßes) einer Deformation für den Anteil des Untersuchungsbereichs auf Basis eines Verhältnisses eines ersten Wertes zu einem zweiten Wert,
 - wobei der erste Wert eine Lage einer dem Anteil des Untersuchungsbereichs entsprechenden Teilpunktvolke der Referenzpunktvolke zu dem Referenzobjekt beschreibt und wobei
 - der zweite Wert eine Lage einer dem Anteil des Untersuchungsbereichs entsprechenden Teilpunktvolke der Deformationspunktvolke zu dem Referenzobjekt beschreibt.

2. Verfahren nach Absatz 1, wobei das Bestimmen des Untersuchungsbereichs durch Projektion eines vorgegebenen Ausschnitts auf eine Oberfläche des Gegenstandes erfolgt.

3. Verfahren nach Absatz 1 oder 2, wobei als Referenzobjekt zu der Referenzpunktvolke eine auf Basis von Punkten der Referenzpunktvolke berechnete, die Referenzpunktvolke approximierende oder charakterisierende Fläche im dreidimensionalen Raum bestimmt wird.

4. Verfahren nach Absatz 3, wobei als Referenzobjekt eine Ebene, vorzugsweise eine Regressionsebene, bestimmt wird.

5. Verfahren nach einem der Absätze 3 oder 4, wobei eine Deformationsrichtung bestimmt wird auf Basis eines Normalenvektors der Fläche in einem vorgegebenen Punkt der Fläche in dem Anteil des Untersuchungsbereichs.

6. Verfahren nach einem der Absätze 1 bis 5, wobei das Vermessen des Untersuchungsbereichs mittels Laserscannens, vorzugsweise terrestrischen Laserscannens, erfolgt.

7. Verfahren nach einem der Absätze 1 bis 6, wobei das Vermessen des Untersuchungsbereichs mittels Streifenlichtprojektion erfolgt.

8. Verfahren nach einem der Absätze 1 bis 7, wobei das Verhältnis des ersten Wertes zu dem zweiten Wert als Differenz zwischen dem ersten Wert und dem zweiten Wert gebildet wird.

9. Verfahren nach einem der Absätze 1 bis 8, wobei der erste Wert als mittlerer Abstand von Punkten der Referenzpunktvolke zu dem Referenzobjekt bestimmt wird.

10. Verfahren nach einem der Absätze 1 bis 8, wobei der erste Wert als Median oder gewichteter Mittelwert oder getrimmter Mittelwert von Abständen von Punkten der Referenzpunktvolke zu dem Referenzobjekt bestimmt wird.

11. Verfahren nach einem der Absätze 1 bis 10, wobei der zweite Wert als mittlerer Abstand von Punkten der Deformationspunktwolke zu dem Referenzobjekt bestimmt wird.
12. Verfahren nach einem der Absätze 1 bis 10, wobei der zweite Wert als Median oder gewichteter Mittelwert oder getrimmter Mittelwert von Abständen von Punkten der Deformationspunktwolke zu dem Referenzobjekt bestimmt wird.
13. Verfahren nach einem der Absätze 1 bis 12, wobei der Schritt des Bestimmens der Deformation für eine Mehrzahl verschiedener Anteile des Untersuchungsbereichs durchgeführt wird.
14. Verfahren nach Absatz 13, wobei die Mehrzahl der verschiedenen Anteile des Untersuchungsbereichs auf Basis einer gleichmäßigen oder adaptiven Rasterung des Untersuchungsbereichs gebildet wird.
15. Verfahren nach einem der Absätze 1 bis 14, umfassend einen Schritt des Visualisierens einer Deformation des Untersuchungsbereichs des Gegenstandes auf Basis der bestimmten Deformation des Anteils des Gegenstandes und gegebenenfalls der bestimmten Deformationsrichtung.
16. System, umfassend eine Vermessungsvorrichtung zum berührungslosen Vermessen eines Untersuchungsbereichs eines Gegenstandes und eine Auswertungseinrichtung, wobei die Vermessungsvorrichtung eingerichtet ist, in einem Windkanal derart angeordnet zu werden, dass mittels der Vermessungsvorrichtung eine Deformation eines Gegenstandes bestimmt werden kann, welche aus einer Luftanströmung des Gegenstandes in dem Windkanal resultiert, und eingerichtet ist, eine 3D-Referenzpunktwolke des Untersuchungsbereichs des Gegenstandes im nicht deformierten Zustand zu bestimmen sowie eine 3D-Deformationspunktwolke des Untersuchungsbereichs des Gegenstandes im deformierten Zustand zu bestimmen; und wobei die Auswertungseinrichtung eingerichtet ist,
- ein die Referenzpunktwolke charakterisierendes Referenzobjekt zu der Referenzpunktwolke zu bestimmen; und
 - für einen vorgegebenen Anteil des Untersuchungsbereichs eine Deformation für den Anteil des Untersuchungsbereichs auf Basis eines Verhältnisses eines ersten Wertes zu einem zweiten Wert zu bestimmen, wobei der erste Wert eine Lage einer dem Anteil des Untersuchungsbereichs entsprechenden Teilpunkt- wolke der Referenzpunktwolke zu dem Referenzobjekt beschreibt und wobei der zweite Wert eine Lage einer dem Ausschnitt des Untersuchungsbereichs entsprechenden Teilpunkt- wolke der Deformationspunktwolke zu dem Referenzobjekt beschreibt.
17. System nach Absatz 16, eingerichtet zum Durchführen eines Verfahrens nach einem der Absätze 1 bis 15.
18. System nach Absatz 16 oder 17, wobei die Vermessungsvorrichtung einen Laserscanner umfasst, vorzugsweise einen terrestrischen Laserscanner.
19. System nach Absatz 16 oder 17, wobei die Vermessungsvorrichtung einen Streifenlichtprojektor umfasst.
20. System nach einem der Absätze 16 bis 19, weiter umfassend eine Visualisierungseinrichtung, die eingerichtet ist, eine Deformation des Untersuchungsbereichs des Gegenstandes auf Basis der bestimmten Deformation des Anteils des Gegenstandes und gegebenenfalls der bestimmten Deformationsrichtung zu visualisieren.
21. Windkanal mit einem System nach einem der Absätze 16 bis 20, wobei das System in dem Windkanal derart angeordnet und eingerichtet ist, dass mittels des Systems eine Deformation eines Gegenstandes bestimmt werden kann, welche aus einer Luftanströmung des Gegenstandes in dem Windkanal resultiert.
22. Verwendung eines Systems nach einem der Absätze 16 bis 20 zur Bestimmung einer Deformation eines Gegenstandes in einem Windkanal, welche aus einer Luftanströmung des Gegenstandes in dem Windkanal resultiert.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung einer Deformation eines Gegenstandes (40) in einem Windkanal, wobei die Deformation des Gegenstandes (40) aus einer Luftanströmung des Gegenstandes (40) in dem Windkanal (200) resultiert, umfassend die Schritte:
- Bestimmen (S1) eines hinsichtlich der Deformation zu untersuchenden Untersuchungsbereichs (42) des Gegenstandes (40);

- Bestimmen (S2) einer Referenzpunktwolke (500) durch berührungsloses Vermessen des Untersuchungsbereichs (42) des Gegenstandes (40) in nicht deformiertem Zustand;
 - Bestimmen (S3) eines Referenzobjekts (510) zu der Referenzpunktwolke (500);
 - Bestimmen (S4) einer Deformationspunktwolke (600) durch berührungsloses Vermessen des Untersuchungsbereichs (42) des Gegenstandes (40) in deformiertem Zustand unter Luftanströmung;
 - für einen vorgegebenen Anteil (42B) des Untersuchungsbereichs (42):
Bestimmen (S5) einer Deformation für den Anteil (42B) des Untersuchungsbereichs (42) auf Basis eines Verhältnisses eines ersten Wertes (d1) zu einem zweiten Wert (d2),
wobei der erste Wert (d1) eine Lage einer dem Anteil des Untersuchungsbereichs (42) entsprechenden Teilpunktwolke der Referenzpunktwolke (500) zu dem Referenzobjekt (510) beschreibt und
der zweite Wert (d2) eine Lage einer dem Anteil des Untersuchungsbereichs (42) entsprechenden Teilpunktwolke der Deformationspunktwolke (600) zu dem Referenzobjekt (510) beschreibt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei als Referenzobjekt (510) zu der Referenzpunktwolke (500) eine auf Basis von Punkten (510; 502) der Referenzpunktwolke (500) berechnete Fläche im dreidimensionalen Raum bestimmt wird, vorzugsweise eine Ebene.
 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei das Vermessen des Untersuchungsbereichs (42) mittels Laserscannens, vorzugsweise terrestrischen Laserscannens erfolgt.
 4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei das Verhältnis des ersten Wertes (d1) zu dem zweiten Wert (d2)
 - als Differenz (D) zwischen dem ersten Wert (d1) und dem zweiten Wert (d2) gebildet wird, oder wobei das Verhältnis des ersten Wertes (d1) zu dem zweiten Wert (d2) als
 - Quotient des ersten Wertes (d1) durch den zweiten Wert (d2), oder umgekehrt, gebildet wird.
 5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei
 - der erste Wert (d1) als mittlerer Abstand von Punkten der Referenzpunktwolke (500) zu dem Referenzobjekt (510) bestimmt wird, und wobei
 - der zweite (d2) Wert als mittlerer Abstand von Punkten der Deformationspunktwolke (600) zu dem Referenzobjekt bestimmt wird.
 6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei der Schritt (S5) des Bestimmens der Deformation für eine Mehrzahl verschiedener Anteile (42A, 42B) des Untersuchungsbereichs (42) durchgeführt wird, wobei die Mehrzahl der verschiedenen Anteile (42A, 42B) des Untersuchungsbereichs (42) auf Basis einer gleichmäßigen oder adaptiven Rasterung des Untersuchungsbereichs (42) gebildet werden kann.
 7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, umfassend einen Schritt (S6) des Visualisierens einer Deformation des Untersuchungsbereichs (42) des Gegenstandes (40) auf Basis der bestimmten Deformation des Anteils (42B) des Gegenstandes (40).
 8. System (100), umfassend eine Vermessungsvorrichtung (10) zum berührungslosen Vermessen eines Untersuchungsbereichs (42) eines Gegenstandes (40) und eine Auswertungseinrichtung (20), wobei die Vermessungsvorrichtung (10) eingerichtet ist, in einem Windkanal (200) derart angeordnet zu werden, dass mittels der Vermessungsvorrichtung (10) eine Deformation eines Gegenstandes (40) bestimmt werden kann, welche aus einer Luftanströmung des Gegenstandes (40) in dem Windkanal (200) resultiert, wobei die Vermessungsvorrichtung (10) weiter eingerichtet ist, eine Referenzpunktwolke (500) des Untersuchungsbereichs (42) des Gegenstandes (40) zu bestimmen sowie eine Deformationspunktwolke (600) des Untersuchungsbereichs (42) des Gegenstandes (40) im deformierten Zustand zu bestimmen; und wobei die Auswertungseinrichtung (20) eingerichtet ist,
 - ein Referenzobjekt (510) zu der Referenzpunktwolke (500) zu bestimmen; und
 - für einen vorgegebenen Anteil (42B) des Untersuchungsbereichs (42) eine Deformation für den Anteil (42B) des Untersuchungsbereichs (42) auf Basis eines Verhältnisses eines ersten Wertes (d1) zu einem zweiten Wert (d2) zu bestimmen, wobei der erste Wert (d1) eine Lage einer dem Anteil (42B) des Untersuchungsbereichs (42) entsprechenden Teilpunktwolke der Referenzpunktwolke (500) zu dem Referenzobjekt (510) beschreibt und wobei der zweite Wert (d2) eine Lage einer dem Ausschnitt (42B) des Untersuchungsbereichs (42) entsprechenden Teilpunktwolke der Deformationspunktwolke (600) zu dem Referenzobjekt (510) beschreibt.
 9. System (100) nach Anspruch 8, eingerichtet zum Durchführen eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 7.

10. System nach Anspruch 8 oder 9, wobei die Vermessungsvorrichtung (10) einen terrestrischen Laser-scanner umfasst.

11. Windkanal (200) mit einem System (100) nach einem der Ansprüche 8 bis 10, wobei das System (100) in dem Windkanal (200) derart angeordnet und eingerichtet ist, dass mittels des Systems (100) eine Deformation eines Gegenstandes (40) bestimmt werden kann, welche aus einer Luftanströmung des Gegenstandes (40) in dem Windkanal (200) resultiert.

12. Verwendung eines Systems (100) nach einem der Ansprüche 8 bis 10 zur Bestimmung einer Deformation eines Gegenstandes (40) in einem Windkanal, welche aus einer Luftanströmung des Gegenstandes (40) in dem Windkanal resultiert.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

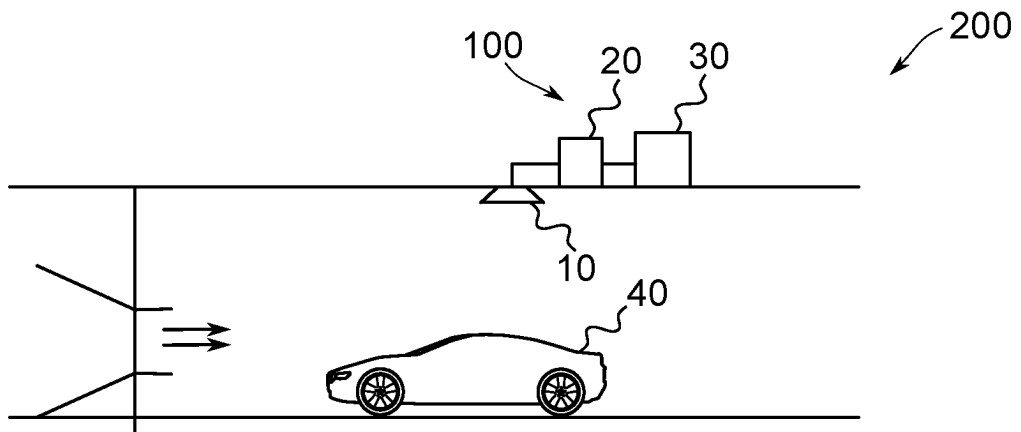


Fig. 1

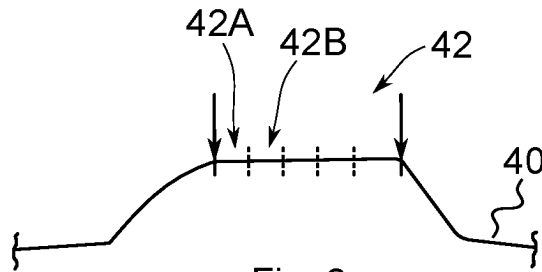


Fig. 2

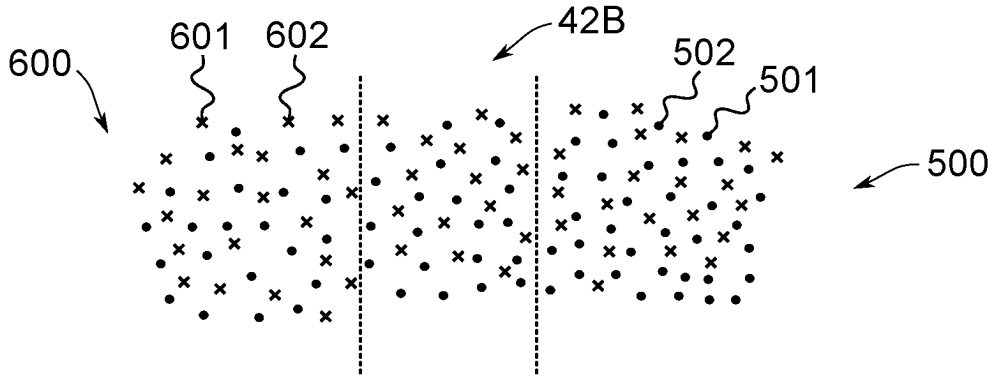


Fig. 3

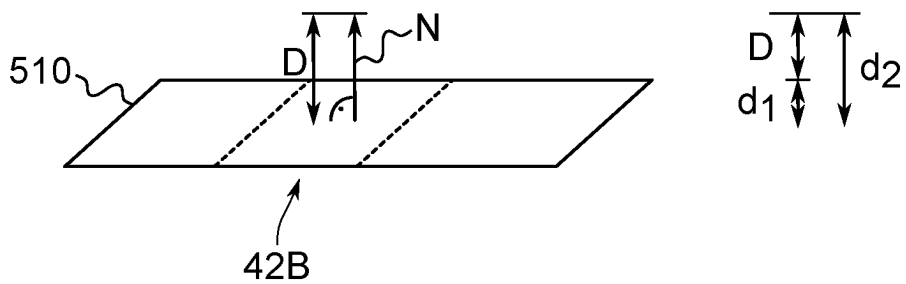


Fig. 4

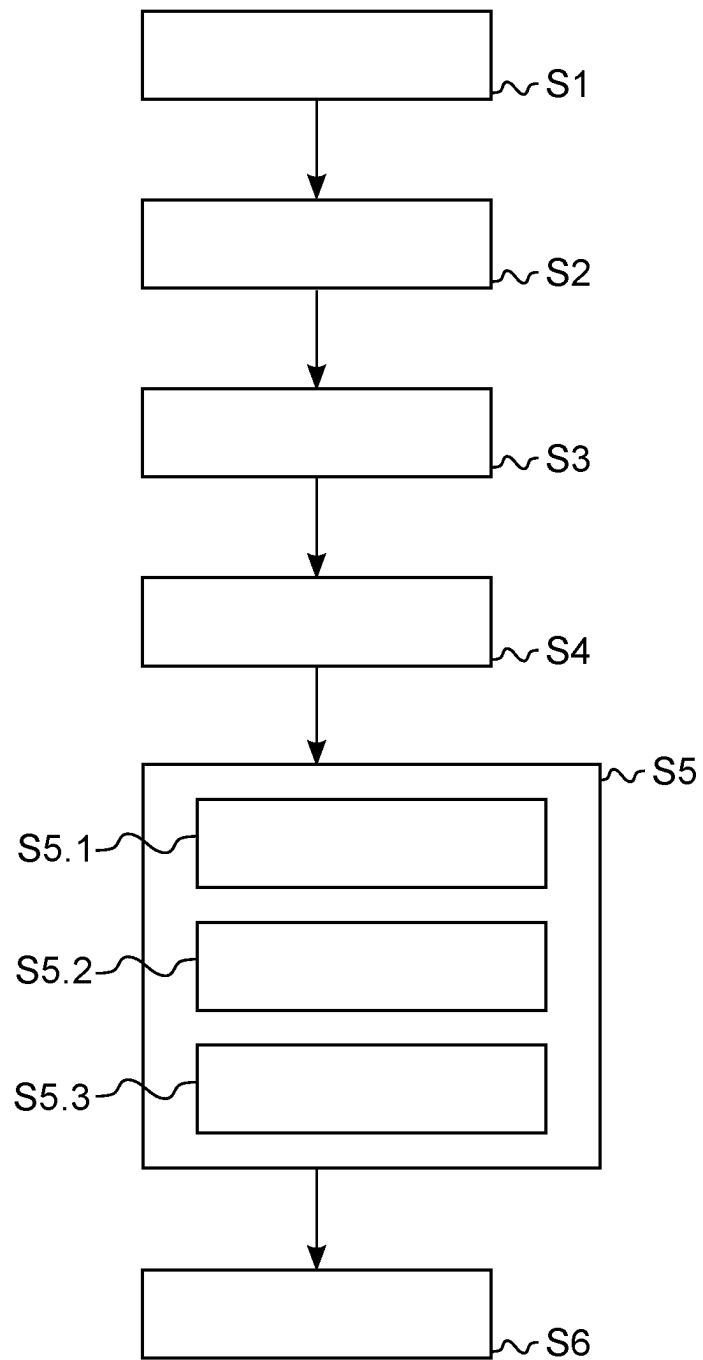


Fig. 5

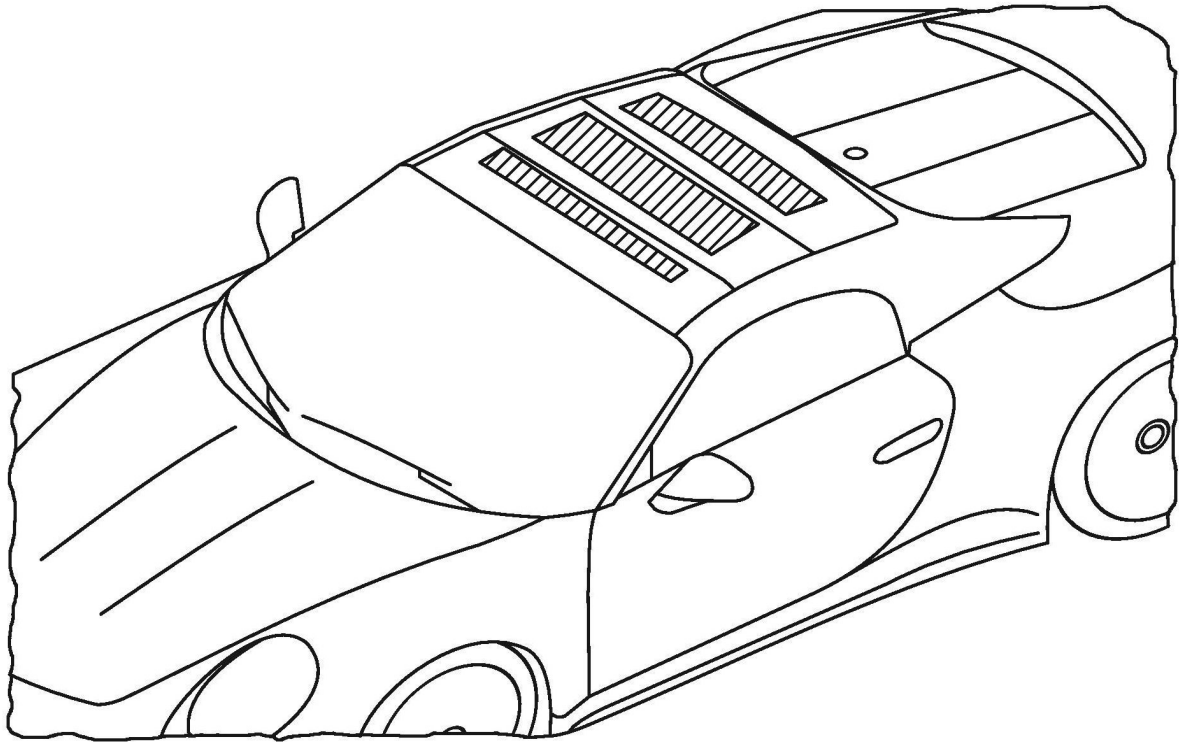


Fig. 6A

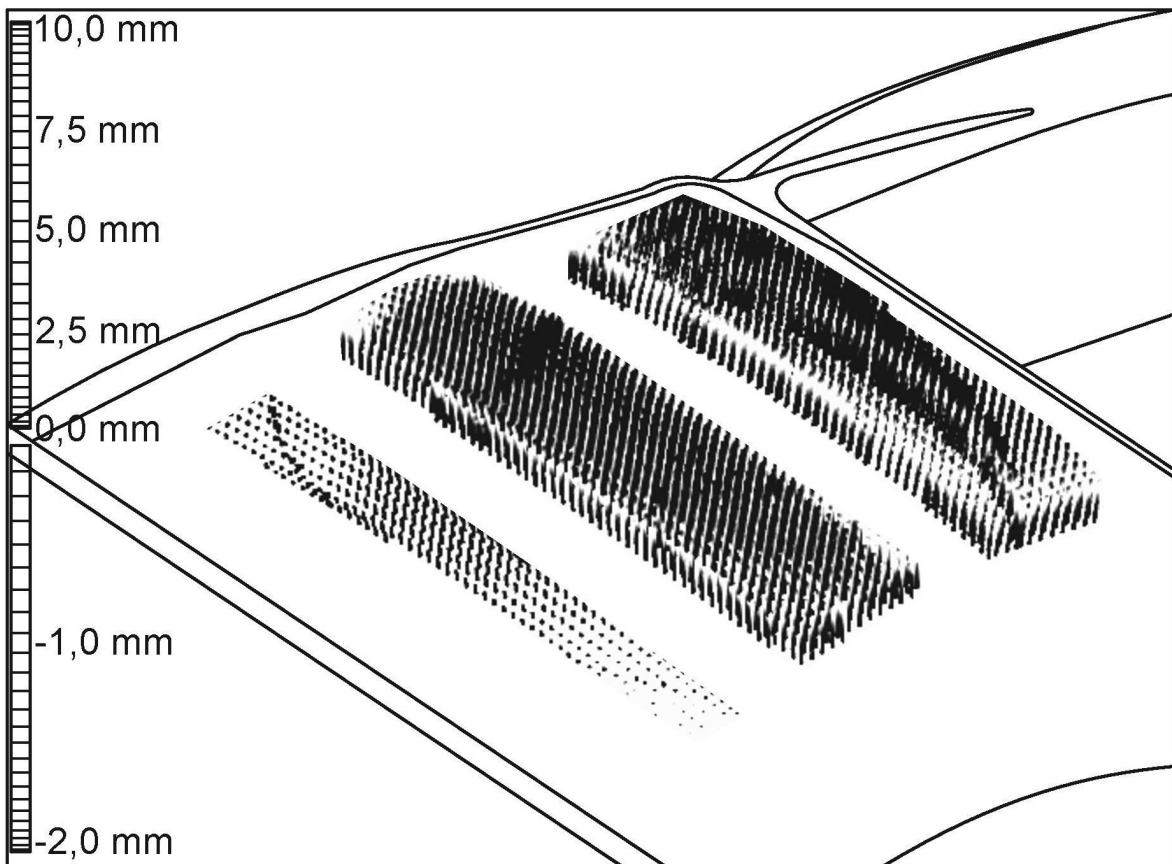


Fig. 6B

