



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 10 2004 013 441 A1 2005.10.13

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: 10 2004 013 441.3

(22) Anmeldetag: 18.03.2004

(43) Offenlegungstag: 13.10.2005

(51) Int Cl.7: G01B 11/275  
G06T 7/60

(71) Anmelder:  
Beissbarth GmbH, 80993 München, DE

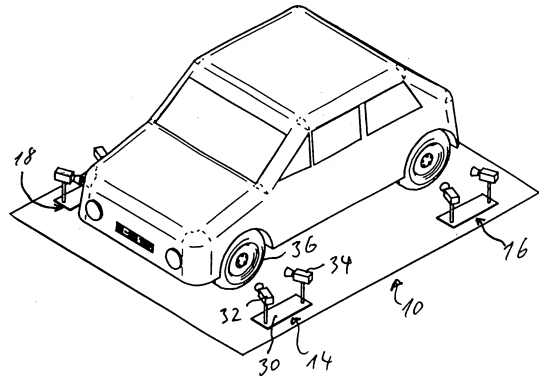
(74) Vertreter:  
Böck, Tappe, Kirschner Rechtsanwälte  
Patentanwälte, 81479 München

(72) Erfinder:  
Donner, Karin, 94121 Salzweg, DE; Bux, Hermann,  
80993 München, DE; Schommer, Stefan, 85716  
Unterschleißheim, DE; Engl, Rudolf, 84539  
Ampfing, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Meßverfahren und Meßgerät zur Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge sowie Fahrwerkvermessungseinrichtung**

(57) Zusammenfassung: Ein Verfahren und ein Gerät zur Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge zu einem Meßgerät, das wenigstens eine Kamera aufweist, wobei die Radfelge im Blickfeld der Kamera liegt, umfaßt das Bereitstellen eines Modells, das einen Modellkörper eines lokalisierbaren Radfelgen-Geometriedetails sowie die räumlich Lage des Modellkörpers zu dem Meßgerät durch Modellparameter beschreibt, das Erfassen eines Bildes des Radfelgen-Geometriedetails der Radfelge mit der Kamera, das Anpassen der aus den Modellparametern resultierenden Abbildung des Modellkörpers an das Bild des Radfelgen-Geometriedetails durch Verändern von Modellparametern des Modells und das Verfolgen der Veränderungen der Modellparameter des Modells beim Anpassen, wobei die Daten bezüglich der Lage des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails die räumliche Lage des Radfelgen-Geometriedetails und damit der Radfelge selbst wiedergeben, wenn die aus den Modellparametern resultierende Abbildung des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails mit dem erfassten Bild des Radfelgen-Geometriedetails innerhalb vorgegebener Toleranzgrenzen übereinstimmt. Ferner werden ein Verfahren zur Fahrwerkvermessung und eine Fahrwerkvermessungseinrichtung und Verwendung des genannten Verfahrens und des genannten Geräts angegeben.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Meßverfahren und Meßgerät zur Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge zu einem Meßgerät, das wenigstens eine Kamera aufweist, wobei die Radfelge im Blickfeld der Kamera liegt, sowie ein Fahrwerkvermessungsverfahren und eine Fahrwerkvermessungseinrichtung, bei der derartige Meßgeräte eingesetzt werden.

### Stand der Technik

**[0002]** Aus DE 100 43 354.5 ist eine Fahrwerkvermessungseinrichtung mit Meßköpfen zur Bestimmung der Radstellungen der Räder eines Kraftfahrzeuges auf einem Meßplatz, wobei jeder Meßkopf wenigstens eine Kamera aufweist, die auf ein im Blickfeld der Kamera angeordnetes, in einer festen Beziehung zu dem Rad des Kraftfahrzeuges positioniertes Meßtarget ausgerichtet ist, und wobei die Bilder der Kamera von einer Auswertungseinheit ausgewertet werden, um die räumliche Lage des Meßtargets und damit des Rades bezüglich der Position der Kamera beziehungsweise des Meßkopfes zu bestimmen. Die Einrichtung hat ein optisches, in den Meßköpfen integriertes Referenzsystem zur Kalibrierung der Meßköpfe der Fahrwerkvermessungseinrichtung bezüglich der Position der Meßköpfe zueinander.

**[0003]** Fahrwerkvermessungseinrichtungen mit Meßgeräten, die zwei Kameras aufweisen, die unter unterschiedlichen Winkeln auf Targets an den Rädern gerichtet sind, sind auch aus den DE 197 57 760, DE 197 57 763, DE 100 32 356 und DE 100 50 653 bekannt.

**[0004]** Bei diesen sogenannten berührungslosen Fahrwerkvermessungseinrichtungen müssen Meßtargets verwendet werden, da die räumliche Lage aus den Merkmalen des Rades oder der Radfelge selbst durch die direkte Bildauswertung der Bilder des Rades oder der Felge nicht hinreichend genau bestimmt werden kann.

**[0005]** Bei der DE 29 48 573 wird versucht, die räumliche Lage des Rades über eine Kreis- oder Ellipsenpassung an die Felgenhornkontur zu bewerkstelligen. Dies führt wegen der räumlichen Ausrundung des Felgenhorns zu systematischen Fehlern insbesondere beim Lenkradeinschlag. Diese Fehler rühren daher, dass irrtümlicherweise angenommen wird, die Felgenkontur sei das perspektivische Bild eines räumlichen Kreises, während in Wahrheit kein räumlicher Kreis perspektivisch beobachtet wird. Darüber hinaus sehen bei einem Zweikameraaufbau die beiden Kameras des Stereosystems nicht etwa die gleiche räumliche Kontur, sondern verschiedene Konturen.

### Aufgabenstellung

**[0006]** Erfindungsgemäß umfasst eine Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge zu einem Meßgerät, das wenigstens eine Kamera aufweist, wobei die Radfelge im Blickfeld der Kamera liegt, das Bereitstellen eines Modells, das einen Modellkörper eines lokalisierbares Radfelgen-Geometriedetail sowie die räumliche Lage des Modellkörpers zu dem Meßgerät durch Modellparameter beschreibt, das Erfassen eines Bildes des Radfelgen-Geometriedetails der Radfelge mit der Kamera, das Anpassen oder Anfitzen der aus den Modellparametern resultierenden Abbildung des Modellkörpers an das Bild des Radfelgen-Geometriedetails durch Verändern von Modellparametern des Modells, und das Verfolgen der Veränderungen der Modellparameter des Modells beim Anpassen, wobei die Daten bezüglich der Lage des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails die räumliche Lage des Radfelgen-Geometriedetails und damit der Radfelge selbst wiedergeben, wenn die aus den Modellparametern resultierende Abbildung des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails mit dem erfassten Bild des Radfelgen-Geometriedetails innerhalb vorgegebener Toleranzgrenzen übereinstimmt.

**[0007]** Durch dieses Verfahren werden den tatsächlichen Gegebenheiten bei der Fahrwerkvermessung, das heißt der tatsächlichen Radfelge, Rechnung getragen, um die durch das Felgenhorn aufgespannte Radebene genau zu bestimmen. Die oben erwähnten systematischen Fehler bei den herkömmlichen Verfahren können damit vermieden werden.

**[0008]** Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass der Modellkörper ein sogenannter Schmiegetorus oder eine 3D-CAD-Darstellung ist. Während der Schmiegetorus die einfachste Form eines 3D-Modells für die Felgenrandkontur darstellt, kann auch eine 3D-CAD-Darstellung der betreffenden Felge verwendet werden, wodurch sich ebenfalls gute Ergebnisse erzielen lassen.

**[0009]** Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass im Falle des Schmiegetorus Modellparameter des Modells ein Hauptradius  $R$  und ein Nebenradius  $r$  des Torus, eine Position  $c$  des Toruszentrum, ein Normalenvektor  $n$  der Rotationsebene des Torus und eine Position  $p$  des Projektionszentrums einer Lochkamera sind, mit der der Schmiegetorus betrachtet wird. Von diesen Modellparametern des Schmiegetorus sind einige aus den tatsächlichen Abmessungen der Radfelge und aus der Anordnung der Lochkamera bekannt, so dass die Zahl der Unbekannten in dem Gleichungssystem in vorteilhafter Weise reduziert wird, so dass das Anpassen der Abbildung des Schmiegetorus an das Bild der tatsächliche Felge erleichtert wird.

**[0010]** Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass das Radfelgen-Geometriedetail die Felgenrandkontur ist. Obwohl auch andere Radfelgen-Geometriedetails als Grundlage für die Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge in Frage kommen, ist die Felgenrandkontur ein bevorzugtes Merkmal, weil dort ein hinreichend guter Kontrast zwischen der Radfelge und dem Reifen zu erwarten ist.

**[0011]** Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass die Radfelgenkontur mit zwei Kameras erfasst wird, die unter unterschiedlichen Winkeln auf das Rad gerichtet sind. Wie noch gezeigt wird, wäre prinzipiell eine Kamera ausreichend als Grundlage für die Durchführung der Messungen gemäß der Erfindung. Zwei Kameras sind jedoch vorteilhaft in Bezug auf eine Fehlerkorrektur, um einen höheren Genauigkeitsgrad der Messung erhalten.

**[0012]** Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass das Bild der Radfelge durch Bestimmung eines Winkel-Ausgangspunktes an der Felge und eine Segmentierung des Felgenumfangs aufgenommen wird. Diese Vorgehensweise ist vorteilhaft, um zu einer Segmentierung des Felgenumfangs zu kommen, damit die Messungen an den einzelnen Segmentbereichen des Felgenumfangs miteinander verglichen und zur Fehlerkorrektur ausgewertet werden können.

**[0013]** Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass zur Bestimmung des Winkel-Ausgangspunktes an der Felge die Lage des Ventils verwendet wird. Das Ventil ist das herausragendste Merkmal eines Kraftfahrzeugrades, welches die Drehlage des Rades anzeigt. Es könnte auch ein Marker verwendet werden, um einen Winkel-Ausgangspunkt an der Felge zu markieren, wobei dazu wieder ein Kontakt mit dem Rad erforderlich wäre. In der Praxis hat sich gezeigt, dass die Lokalisierung des Ventils für die Zwecke der vorliegenden Messung ausreichend ist.

**[0014]** Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass zur Segmentierung des Felgenumfangs eine Vorsegmentierung und eine Feinsegmentierung durchgeführt wird. Diese Vorgehensweise ermöglicht in vorteilhafter Weise eine Vereinfachung der erforderlichen Rechenoperationen, um die Segmentierung mit ausreichender Genauigkeit durchführen zu können.

**[0015]** Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass zusätzlich zur Vorsegmentierung und Feinsegmentierung eine Subpixelsegmentierung durchgeführt wird. Dadurch wird die Segmentierung noch weiter erhöht, ohne unverhältnismäßig viel Rechenarbeit in Kauf nehmen zu müssen.

**[0016]** Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass bei der Bestimmung der realen Felgenkontur Typengrößen oder -parameter der Felge mit einbezogen werden, wodurch das zu lösende Gleichungssystem vereinfacht wird.

**[0017]** Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass das Anpassen der Abbildung des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails an das Bild des Radfelgen-Geometriedetails durch Verändern von Modellparametern des Modells dadurch erfolgt, dass zunächst eine Approximation einer Felgenrandebene, dann eine Winkelargumentberechnung und schließlich eine endgültige Torusmodell Anpassung an die finale Felgenrandebene durchgeführt wird, wodurch der Rechenaufwand beim Anpassen des Modellkörpers an die tatsächliche Felge verringert wird.

**[0018]** Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass das Verfolgen der Veränderungen der Modellparameter des Modells durch Fortschreiben der Modellparameter in einem Speicher erfolgt.

**[0019]** Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet,

net, dass die Daten bezüglich der Modellparameter des Modells, die die räumliche Lage der Radfelge definieren, wenn die Abbildung des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails mit dem erfassten Bild des Radfelgen-Geometriedetails übereinstimmt, ausgegeben oder angezeigt werden.

**[0020]** Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist gekennzeichnet durch folgende Schritte: Starten der Bildaufnahme; Segmentierung der Felge, wobei eine Segmentierung des Ventils des Kraftfahrzeugrades erfolgt; Segmentierung des Felgenrandes; um vorgegebene Winkelbereiche des Felgenrandes auszumessen; Umrechnen der bisherigen Meßergebnisse unter Berücksichtigung der inneren Kameraparameter; Rekonstruktion der 3D-Lage des Ventils unter Berücksichtigung der äußeren Kameraparameter; Rekonstruktion die Lage des Felgenrandes; Anzeigen des Ergebnisses der Berechnung, nämlich des Normalenvektors und des Zentrumspunkt der Felgenrandebene und/oder Speichern derselben für die weitere Verrechnung.

**[0021]** Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass nach dem Starten der Bildaufnahme zunächst überprüft wird, ob die Beleuchtung für die Messung ausreichend ist, und dass die Beleuchtung entsprechend nachgestellt wird.

**[0022]** Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass die Nachstellung eine größere oder geringere Helligkeit des Lichtes für die Beleuchtung umfasst.

**[0023]** Das erfindungsgemäße Meßgerät zur Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge zu dem Meßgerät, das wenigstens eine Kamera aufweist, wobei die Radfelge im Blickfeld der Kamera liegt, ist gekennzeichnet durch einen Rechner, der programmiert ist, um eines der vorstehend beschriebenen Verfahren durchzuführen.

**[0024]** Eine vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Meßgeräts ist dadurch gekennzeichnet, dass in dem vorstehenden Meßgerät zwei Kameras vorgesehen sind, die die Radfelgenkontur erfassen und unter unterschiedlichen Winkeln auf das Rad gerichtet sind.

**[0025]** Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Meßgeräts ist dadurch gekennzeichnet, dass es je Kamera einen optischen Sensor, eine Objektiv, eine Blendenstelleinrichtung und eine Fokusstelleinrichtung umfasst, und dass die Einbaulage des Sensors und des Objektivs, die Blendeneinstellung und Fokuseinstellung vorjustiert sind.

**[0026]** Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Meßgeräts ist dadurch gekennzeichnet, dass bei Zoom-Objektiven zudem die eingestellte Brennweite vorjustiert ist. Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Meßgeräts ist dadurch gekennzeichnet, dass eine Ausgabe- beziehungsweise Anzeigevorrichtung zum Ausgeben beziehungsweise Anzeigen der Daten bezüglich der Modellparameter des Modells, die die räumliche Lage der Radfelge definieren, wenn die Abbildung des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails mit dem erfassten Bild des Radfelgen-Geometriedetails übereinstimmt, vorgesehen ist. Dadurch wird das Aufstellen des Meßplatzes erleichtert, weil die Feinjustage des Bezugssystems jederzeit erneut durchgeführt werden kann.

**[0027]** Im wesentlichen entsprechen die Vorteile des erfindungsgemäßen Meßgeräts beziehungsweise seine Ausführungsbeispiele dem Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens beziehungsweise seiner Ausführungsbeispiele, wie oben beschrieben wurde.

**[0028]** Das erfindungsgemäße Verfahren zur Fahrwerkvermessung an Kraftfahrzeugen, ist dadurch gekennzeichnet, dass eines der oben genannten Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge zu einem Meßgerät an den Rädern des Kraftfahrzeugs durch geführt wird, dass die relativen Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen bestimmt werden, dass die Meßergebnisse der Messungen an den Rädern des Kraftfahrzeugs unter Berücksichtigung der relativen Positionen der Meßgeräte in Radstellungswerte umgerechnet werden, und dass die Radstellungswerte ausgegeben oder angezeigt werden.

**[0029]** Eine vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass die relativen Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen durch eine justierbare Montage der Meßgeräte an einem Meßplatz festgelegt werden.

**[0030]** Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, dass die relativen Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen durch ein Bezugssystem

bestimmt werden, das an den Meßgeräten angeordnet ist.

**[0031]** Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist gekennzeichnet durch folgende Schritte: Durchführung der Messungen der einzelnen Meßgeräte; Einlesen der Meßergebnisse in einen Rechner; Berechnen der Transformationsmatrix aus den Ergebnissen der Bezugssystemmessung; Transformieren der Ergebnisse der Meßgeräte parallel zu den Achsen des Rechenkoordinatensystems; Umrechnen der Vektoren in das Koordinatensystem des Rechners über Versatzwinkel und Abstände in dem Bezugsmeßsystem; Bestimmen der Radstellungswerte in dem Rechenkoordinatensystem durch Auswertung der Stellung der Ergebnisvektoren zueinander zur Berechnung der entsprechenden Fahrwerkmeßwerte; Übergeben der Ergebnisse zu den Radstellungs-Winkelwerten an eine Anzeigeeinrichtung und/oder Speichern derselben zur weiteren Verwendung.

**[0032]** Die Vorteile des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Fahrwerkvermessung an Kraftfahrzeugen und der vorteilhaften Ausgestaltungen liegen darin, dass die oben beschriebenen Meßgeräte und das entsprechende Verfahren in vorteilhafter Weise zur genauen Vermessung des gesamten Fahrwerks an Kraftfahrzeugen eingesetzt werden können.

**[0033]** Eine erfindungsgemäße Fahrwerkvermessungseinrichtung für Kraftfahrzeuge, ist gekennzeichnet durch Meßgeräte zur Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge zu einem Meßgerät an den Rädern des Kraftfahrzeugs, die auf einem Meßplatz derart positioniert sind, dass ein Meßgerät jeweils einem der Räder des Kraftfahrzeugs zugeordnet ist, wobei die relativen Positionen der Meßgeräte bei der Durchführung der Messungen bestimmt sind, einen Rechner, der die Meßergebnisse der Messungen an den Rädern des Kraftfahrzeugs unter Berücksichtigung der relativen Positionen der Meßgeräte in Radstellungswerte umrechnet, und durch eine Anzeige/Ausgabeeinrichtung, die die Radstellungswerte ausgibt oder anzeigt.

**[0034]** Eine vorteilhafte Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Fahrwerkvermessungseinrichtung ist dadurch gekennzeichnet, dass die relativen Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen durch eine justierbare Montage der Meßgeräte an einem Meßplatz festgelegt werden.

**[0035]** Eine vorteilhafte Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Fahrwerkvermessungseinrichtung ist dadurch gekennzeichnet, dass die relativen Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen durch ein Bezugssystem bestimmt werden, das an den Meßgeräten angeordnet ist.

**[0036]** Eine vorteilhafte Ausgestaltung der erfindungsgemäßen Fahrwerkvermessungseinrichtung ist dadurch gekennzeichnet, dass beim Zusammenbau zweier Kameras in einem Meßgerät zu einem Stereo-Meßsystem die Kameras bezogen auf das Koordinatensystem des Meßgeräts kalibriert sind.

**[0037]** Die Vorteile der erfindungsgemäßen Fahrwerkvermessungseinrichtung für Kraftfahrzeuge entsprechen denen, die im Zusammenhang mit dem Verfahren zur Fahrwerkvermessung an Kraftfahrzeugen beschrieben wurden.

#### Ausführungsbeispiel

**[0038]** Ausführungsbeispiele der Erfindung werden nun anhand der beiliegenden Zeichnungen beschrieben. Es zeigen:

**[0039]** **Fig. 1** eine schematische Darstellung eines rotierenden Körpers mit Normalvektor in einer ausgezeichneten Eben;

**[0040]** **Fig. 2** eine schematische Darstellung, wie sich am Beispiel einer Kugel mit einer Veränderung der Lichtquellen auch die Schattengrenzen verändern;

**[0041]** **Fig. 3** eine schematische Darstellung einer Randkontur beziehungsweise der Schattengrenze einer Ringfläche;

**[0042]** **Fig. 4** eine schematische Darstellung eines Querschnitts durch die Felgenhornzone eines Kfz-Rades mit eingezeichneter Lage des Querschnittskreises des Schmiegetorus;

**[0043]** **Fig. 5** eine schematische Darstellung der Fehlrekonstruktion durch klassisches Stereomatching bei einer ringförmigen Objektgeometrie im Schnittbild;

- [0044] [Fig. 6](#) eine schematische Darstellung von Torus, Radachse und Radmittelebene bei einem Kfz-Rad;
- [0045] [Fig. 7](#) eine schematische Darstellung des Torus zum Felgenhorn bei einem Kfz-Rad;
- [0046] [Fig. 8](#) eine schematische Darstellung einer Fahrwerkvermessungseinrichtung mit ortsfest angeordneten Meßgeräten;
- [0047] [Fig. 9](#) eine schematische Darstellung einer Fahrwerkvermessungseinrichtung mit ortsfest angeordneten Meßgeräten und Bezugssystem zue Justage der Meßgeräte untereinander;
- [0048] [Fig. 10](#) ein schematisches Gesamt-Ablaufdiagramm für die Fahrwerkvermessung eines Kraftfahrzeugs;
- [0049] [Fig. 11](#) ein detaillierteres Gesamt-Ablaufdiagramm für die Fahrwerkvermessung eines Kraftfahrzeugs;
- [0050] [Fig. 12](#) eine Ablaufdiagramm für die Felgenschlagkompensation beziehungsweise die Bestimmung der wahren Rotationsachse des Rades; und
- [0051] [Fig. 13](#) eine Ablaufdiagramm für die Bestimmung des aktuellen Spur- und Sturzwinkels des Rades.
- [0052] Bestimmung der räumlichen Lage eines rotationssymmetrischen Körpers Wenn zur Bestimmung der räumlichen Lage eines rotationssymmetrischen Körpers weder Targets noch Marken an dem Körper aufgebracht werden und der rotationssymmetrische Körper nicht von vornherein gut verfolgbare ausgezeichnete Punkte hat, können lokalisierte Geometriedetails in der folgenden Art und Weise erfasst werden. Man ermittelt ausgezeichnete Geometriedetails (etwa Punkte, Kanten, Flächen) des rotationssymmetrischen Körpers im Raum durch eine algorithmische Rekonstruktion aus vorzugsweise perspektivischen Bildern des Körpers. Man verfolgt diese ausgezeichneten Geometriedetails während der Drehung des Körpers. 3D-Punkte bewegen sich dann auf Kreisbahnen im Raum, Kanten und Flächennormalen beschreiben Rotationsflächen um die wahre Drehachse.
- [0053] Hierzu wird zunächst ein vorzugsweise parametrisches 3D-Modell eingesetzt, das einen gut lokalisierbaren Teil der realen Geometrie der rotierenden Körpers beschreibt. Solche 3D-Modelle können etwa Quader, Zylinder, Ringflächen oder sogar ganze 3D-CAD-Entwürfe sein. Abhängig von der Position im Raum und den Parametern des 3D-Modells kann man das perspektivische Bild des 3D-Modells berechnen. Hat man nun umgekehrt ein perspektivisches Bild des 3D-Modells, kann man die räumliche Lage und die Strukturparameter des 3D-Modells bestimmen. Da ein geeigneter Bildausschnitt des realen Körpers genau diesem perspektivischen Bild des 3D-Modells entsprechen muss, erhält man so ein in den gegebenen Körper algorithmisch eingepasstes 3D-Modell.
- [0054] Ist die wahre Rotationsachse des Originalkörpers nicht zugleich eine Rotationssymmetrieachse des eingepassten 3D-Modells, kann man die rotatorische Lage des Originalkörpers aus der Lage des eingepassten 3D-Modells berechnen. So beschreiben etwa die Normalenvektoren einer nicht senkrecht zur Rotationsachse stehenden Schmiegeebene während der Rotation des Originalkörpers einen Kreiskegel, dessen Zentrale die Rotationsachse ist, wie aus [Fig. 1](#) ersichtlich ist.
- [0055] Ist die Rotationsachse einmal bestimmt, kann man durch Anmessen der ausgezeichneten Ebene auch dann auf die Lage der Rotationsachse zurückschließen, wenn sich die Position des rotationssymmetrischen Körpers zwischenzeitlich verändert haben sollte. Diese Grundidee führt bei der Achsvermessung von Rädern zu der Frage, wie man ein für die unterschiedlichsten Felgengeometrien ausreichend allgemeines lokalisiertes 3D-Modell gewinnen kann.
- [0056] Dieses Vorgehen benötigt bei genügend reichhaltigen parametrisierten 3D-Modellen grundsätzlich nur eine perspektivische Sicht zur Geometrierekonstruktion. Mehrere Kameras können jedoch aus Gründen der Genauigkeitserhöhung bevorzugt sein.
- [0057] Anwendung auf die Bestimmung der räumlichen Lage einer Felge Die räumliche Lage eines Objektes kann auch dann aus perspektivischen Bildern wiedergewonnen werden, wenn man zwar keine verfolgbaren einheitlichen Raumkonturen oder markante Punkte zur Verfügung hat, wohl aber ausreichendes Nebenwissen über die prinzipiell mögliche Geometrie in Form eines parametrisierten 3D-Modells. Dies werde exemplarisch am Beispiel des 3D-Modells einer Ringfläche durchgeführt. Ähnliche Ansätze sind jedoch auch mit anderen

lokalen 3D-Modellen möglich. Insbesondere kommen für die Achsvermessung durch Felgenhornapproximation auch verallgemeinerte Ringgeometrien in Frage. Die Querschnittskurven solcher verallgemeinerter Ringflächen sind dann Kreisbogensplines, d.h. stückweise glatt aus Kreisbögen zusammengesetzte Kurven.

**[0058]** Liegt erweitertes Wissen über die Felgengeometrie vor (etwa ein CAD-Entwurf), kann auch ein wesentlich komplexeres 3D-Modell an die Felgengeometrie angepasst werden, wobei dann auch Bereiche abseits vom Felgenhorn zur Approximation in Frage kommen.

**[0059]** Da alle Felgen im Randbereich zum Reifen lokal eine ringförmige Geometrie aufweisen, wird hier eine lokale Ringfläche im Bereich des Felgenrands so angefügt, dass die von der Kamera gesehene Randkontur der Felge und der angefügteten, gedachten Ringfläche gleich werden. Eine solche Ringfläche entspricht einer Schmiegefläche im Bereich des Felgenhorns, genauer der sogenannten extremalen Schattengrenze aus der Sicht der Kamera.

**[0060]** Beleuchtet man einen gegebenen, räumlichen Körper mit einer punktförmigen Lichtquelle, erhält man als Grenzpunktmenge zwischen beleuchteten und unbeleuchteten Regionen auf dem räumlichen Körper eine Vereinigung von Kurven, den Schattengrenzen. Verbindet man jeden Punkt einer Schattengrenze mit dem Lichtquellpunkt durch eine Gerade, entsteht ein Randstrahlenkegel, wie in [Fig. 2](#) gezeigt ist.

**[0061]** Bei punktförmiger Beleuchtung einer typischen Felge von der Sichtseite aus gibt es genau eine Schattengrenze, deren Randstrahlenkegel alle anderen Randstrahlenkegel, die beispielsweise von Aussparungen in der Felge herkommen können, enthält. Diese Schattengrenze entspricht der Außenkontur der Felge und wird als extremale Schattengrenze bezeichnet. Ersetzt man die punktförmige Lichtquelle durch eine Lochkamera, deren Projektionszentrum mit dem vorherigen Lichtquellpunkt übereinstimmt, so tritt das perspektivische Bild der extremalen Schattengrenze als Randkontur gegen den Hintergrund, beispielsweise den Reifen auf.

**[0062]** Die extremale Schattengrenze einer Ringfläche oder einer Felge ist im Allgemeinen keine ebene räumliche Kurve, insbesondere kein Kreis, es sei denn, das Projektionszentrum liegt auf der Rotationsachse der Ringfläche oder Felge. Das perspektivische Bild ist in der Regel keine Ellipse. Für zwei Lochkameras mit verschiedenen Projektionszentren sind die extremalen Schattengrenzen verschieden ([Fig. 2](#)). Dies bedeutet, dass eine Interpretation der Randkontur als Bild einer einheitlichen Raumkurve und damit eine übliche Stereorekonstruktion über Epipolarbedingungen notwendigerweise zu Fehlrekonstruktionen führen muss.

**[0063]** Die extremale Schattengrenze einer Felge variiert zwar je nach Beobachterposition und Radeinschlag, liegt aber typischerweise im Bereich der stärksten Querschnittskrümmung des Felgenhorns. In diesem Bereich sind Felgen rotationssymmetrisch und lassen sich dort sehr gut durch eine Ringfläche annähern, die als Schmiegetorus bezeichnet wird. Die Schattengrenze dieser Ringfläche aus der Sicht der Lochkamera stimmt mit der Schattengrenze der Felge überein. Die zur Rotationssymmetrieachse des Schmiegetorus senkrecht stehende Symmetrieebene wird im Folgenden als Schmiegetorusebene oder Felgenrandebene bezeichnet.

**[0064]** [Fig. 3](#) zeigt die Randkonturen beziehungsweise perspektivische Bilder der Schattengrenzen einer Ringfläche. Die äußere Kontur a ist das Bild der extremalen Schattengrenze. Die Innenkontur b würde dem Ringloch entsprechen. [Fig. 4](#) zeigt einen Querschnitt durch die Felgenhornzone eines Kfz-Rades mit eingezeichneter Lage des Querschnittskreises des Schmiegetorus. Die extremale Schattengrenze verläuft in dem mit Pfeilen markieren Bereich, wobei sie die Querschnittsebene durchstößt.

**[0065]** Um die Schattengrenze einer Ringfläche geschlossen mathematisch zu beschreiben, wird ein Zylinderkoordinatensystem so orientiert, dass die Rotationsebene der Ringfläche die  $(r, \phi)$ -Ebene wird und die Rotationsachse die z-Achse. Zu jedem Polarwinkel  $\phi$  gehört dann ein Punkt  $s(\phi)$  der extremalen Schattengrenze mit diesem Polarwinkel. Sind  $(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  die kartesischen Koordinaten des Projektionszentrums, ist R der Radius des Zentralkreises und r der Radius des Schnittkreises in einer Ebene durch die Rotationsachse der Ringfläche, erhält man die Gleichung für diesen Schattengrenzpunkt in Abhängigkeit von  $\phi$  wie folgt:  
Setzt man

$$a(\phi) = (\cos(\phi), \sin(\phi), 0), \quad e_3 = (0, 0, 1), \quad (1)$$

$$\rho(\phi) = \xi_1 \cos(\phi) + \xi_2 \sin(\phi) - R, \quad (2)$$

$$\alpha(\varphi) = R + r \frac{\rho(\varphi)r + \xi_3 \sqrt{\xi_3^2 + \rho(\varphi)^2 - r^2}}{\xi_3^2 + \rho(\varphi)^2} \quad (3)$$

und

$$\chi(\varphi) = r \frac{r\xi_3 - \rho(\varphi)\sqrt{\xi_3^2 + \rho(\varphi)^2 - r^2}}{\xi_3^2 + \rho(\varphi)^2}, \quad (4)$$

so ist

$$s(\varphi) = \alpha(\varphi)a(\varphi) + \chi(\varphi)e_3 \quad (5)$$

in kartesischen Koordinaten des Schattenkonturpunkts.

**[0066]** Den zugehörigen Bildpunkt in der Retina- oder Bildebene der beobachtenden Kamera erhält man nach Festlegung des Normalenvektors der Retinaebene und des Fokusabstands des Projektionszentrums von der Retinaebene über die hierdurch festgelegte Zentralprojektion  $g$ . Der zu  $\phi$  gehörige Randkonturpunkt ist dann  $g(s(\phi))$ .

**[0067]** Es ist zu beachten, dass die inhärenten Parameter dieser Zentralprojektion, nämlich die Position  $p$  des Projektionszentrums, der Fokusabstand und der Normalenvektor der Retinaebene im Rahmen einer Kalibrierung der Kamera erhalten werden. Sie sind deshalb vor dem Meßprozeß bekannt.

**[0068]** Ziel der im Folgenden erläuterten Berechnung ist die Rekonstruktion der Schmiegetorusfläche aus der Randkontur, d.h. der perspektivischen Sicht der extremalen Schattengrenze am Felgenhorn. Dazu werden die Modellparameter Schmiegetorus solange verändert, bis die Außenkontur des Schmiegetorus mit der gemessenen extremalen Schattengrenze der Felge zur Deckung kommt. Der Normalenvektor der Rotationsebene des Schmiegetorus kann dann zu einer präzisen Rekonstruktion der Drehachse verwendet werden.

**[0069]** Die Rekonstruktion des Schmiegetorus aus der Randkontur läßt sich als nicht-lineares Optimierungsproblem formulieren. Die extremale Schattengrenze einer Ringfläche hängt von den folgenden Parametern ab: Hauptradius  $R$  und Nebenradius  $r$  des Torus, Position  $c$  des Toruszentrum, Normalenvektor  $n$  der Rotationsebene des Torus, Position  $p$  des Projektionszentrums der Lochkamera. Da  $p$  vorab durch Kalibrierung bestimmt wird, soll diese Abhängigkeit im Folgenden nicht mehr erwähnt werden. Bis auf eine Koordinatentransformation des Normalenvektors  $n$  auf die  $z$ -Achse und des Toruszentrum  $c$  in den Ursprung ist die Gleichung der extremalen Schattengrenze im vorherigen Abschnitt zu finden.

**[0070]** Um die Abhängigkeit dieser Darstellung von den Parametern  $R, r, c$  und  $n$  auszudrücken, wird dies in der Form  $s(\varphi) = f(R, r, c, n, \varphi)$  für eine Funktion  $f$  beschrieben, die sich aus den Gleichungen (1) bis (5) ergibt, wenn man diejenige Rotation und Translation vorschaltet, die  $c$  auf den Nullpunkt und  $n$  auf den Vektor  $(0, 0, 1)$  abbildet.

**[0071]** Hat man nun ausreichend viele Randkonturpunkte  $x_1, \dots, x_n$  aus dem zentralperspektivischen Bild der Lochkamera ermittelt und sind die Kameraparameter und damit die Figur  $g$  aus einer Vorabkalibrierung bekannt, sucht man Parametervektoren  $c$  und  $n$  sowie Radien  $r, R$  derart, dass für geeignete zu  $x_1, \dots, x_n$  gehörige Polarwinkel  $\phi_1, \dots, \phi_n$  das Fehlerquadrat  $\sum \|g(f(R, r, c, n, \phi_i)) - x_i\|^2$  minimal wird. Hierbei bezeichnet  $\|y-z\|$  den euklidischen Abstand zweier Punkte  $y, z$  in der Bildebene.

**[0072]** Bei bekanntem Schmiegetorusradius  $R$  kann dieser fest eingesetzt und damit als Unbekannte eliminiert werden. Die Ermittlung der zu den Randpunkten  $x_1, \dots, x_n$  gehörigen Winkelargumente  $\phi_1, \dots, \phi_n$  müsste im Idealfall seinerseits in die Gesamtminimierung mit einbezogen werden. Im hier vorliegenden Fall reicht jedoch eine gute Vorapproximationsheuristik aus, um diese Winkelargumente mit hoher Genauigkeit zur Verfügung zu stellen.

**[0073]** Aus Gründen der höheren Fehlerstabilität, insbesondere bei einer Beobachterposition in der Nähe der Rotationsachse der Felge, werden zwei Kameras in genau Vermessener räumlicher Position (Stereosystem) zu verwenden. Die obige Quadratsumme ist dann mit einem gleichartigen Fehlerterm für die zweite Lochkamera zu versehen.

**[0074]** Zur hinreichend genauen Ermittlung der Randkonturen der Felge gegen den Reifenhintergrund sind normale Konturextraktionsverfahren der Bildverarbeitung wegen des oft schwach ausgeprägten Kontrastes

der Felgenhornaußenseite gegen den Reifen nicht ausreichend. Daher werden verfeinerte Konturschätzer unter Einbeziehung des Nebenwissens über die torischen Randgeometrieverhältnisse eingesetzt.

**[0075]** Wird die Raddrehachse im Raum verändert, führt das Rad eine freie Bewegung im Raum aus (Translation und Rotation). Da die relative Lage der Drehachse im Verhältnis zum angepassten 3D-Modell bei einer Achsvermessung konstant bleibt, kann man auf die Lage der Drehachse aus der Lage des angepassten 3D-Modells zurückschließen. Hat das angepasste 3D-Modell zusätzlich Symmetrien, benötigt man lageidentifizierende Kenngrößen. Bei einem Schmiegetorus ist hierzu eine Polarwinkelangabe in der Schmiegetorusebene nötig.

**[0076]** Dieser Polarwinkel kann etwa durch Erfassung der rotatorischen Position des Radventils bestimmt werden. Prinzipiell sind jedoch auch viele andere Arten der Drehwinkelermittlung möglich. Wegen der in der Regel eher geringen Abweichung der Zentrale des Schmiegetorus gegenüber der Rotationsachse des Rades reicht zur Bestimmung der Drehachslage im Raum im Allgemeinen eine Genauigkeit dieses Drehwinkels etwas unter 1 Winkelgrad aus.

**[0077]** Wie bereits erwähnt, unterscheiden sich die Schattenkonturen der Felge je nach perspektivischer Beobachtungsposition, wie anhand von [Fig. 5](#) erläutert wird, die eine Fehlrekonstruktion durch klassisches Stereomatching bei einer ringförmigen Objektgeometrie im Schnittbild zeigt. Die Schnittpunkte der Sichtstrahlen von Randkonturen liegen nicht auf einer Parallelen zur Torusebene. Ersichtlich sind die gesehenen Randkonturen nur scheinbar sehr ähnlich. In Wahrheit stammen sie für verschiedene Sichtpositionen von verschiedenen Raumkurven. Führt man deshalb in der irrigen Annahme, es handle sich um ein und dieselbe Raumkurve, eine klassische Stereorekonstruktion (durch Schnitt der vermeintlichen Sichtstrahlen) durch, gelangt man zu Fehlrekonstruktionen von nicht auf der Felge liegenden Raumkurven, die man für den realen Felgenrand hält. Die Passebene einer solchen scheinbaren Felgenrandkurve stimmt im Allgemeinen nicht mit der oben beschriebenen Schmiegetorusebene überein. Insbesondere bei stärkerem Lenkradeinschlag sind die Abweichungen der jeweiligen Normalenvektoren nicht mehr zu vernachlässigen.

#### Die Fahrwerkvermessungseinrichtung

**[0078]** [Fig. 6](#) zeigt die geometrischen Verhältnisse, die allgemein anhand von [Fig. 1](#) dargestellt wurden in Bezug auf die Verhältnisse bei einer Felge beziehungsweise einem Rad für ein Kraftfahrzeug. Wenn der Torus auf den Felgenrand gefittet ist, ist die Torusebene die Felgenrandebene und die Senkrechte auf der Felgenrandebene in dem Zentrum derselben hängt mit der Radachse zusammen. Unter der Voraussetzung, dass an allen Meßgeräten dieselben Strukturen der Felgenränder Vermessen werden, ist der Normalenvektor der Rotationsebene des im vorherigen Schritt bestimmten Torus als für die Fahrwerkvermessung repräsentative Felgenebene anzusehen.

**[0079]** Die Position des Toruszentrum ist bei idealen Felgen als Durchstoßpunkt der Raddrehachse durch die repräsentative Felgenebene anzusehen und ergibt zusammen mit dem Normalenvektor das Meßergebnis des Stereomeßsystems. Zur Erhöhung der Genauigkeit wird eine Felgenschlagkompensation durch komplettes oder teilweises Drehen des Rades durchgeführt. Dadurch werden die Fehler der Felge eliminiert, die durch die Annahme einer idealen Felge entstanden sind.

**[0080]** [Fig. 7](#) zeigt schematisch das Felgenhorn **2** einer Felge **4**. Wie ersichtlich ist, wird der Felgenhornradius in dem Bereich, der von einer seitlich von dem Felgenrand angeordneten Kamera erfaßt wird, in guter Näherung durch den Torus dargestellt.

**[0081]** [Fig. 8](#) zeigt einen Meßplatz **10**, auf dem ein Kraftfahrzeug **12** steht, dessen Fahrwerk Vermessen werden soll. Auf dem Meßplatz **10** sind vier Meßgeräte, ortsfest angeordnet, von den drei Meßgeräten **14**, **16**, **18** gezeigt sind, während das vierte Meßgerät durch das Kraftfahrzeug verdeckt ist. [Fig. 9](#) zeigt einen Meßplatz **20**, mit dem Kraftfahrzeug **12**, wobei wiederum drei Meßgeräte **24**, **26**, **28** gezeigt sind, während das vierte Meßgerät durch das Kraftfahrzeug verdeckt ist.

**[0082]** Die Meßgeräte **14**, **16**, **18** umfassen jeweils eine Bodenplatte **30** und zwei Kameras **32**, **34**, die unter unterschiedlichen Winkeln zu dem zugehörigen Rad **36** des Kraftfahrzeugs **12** gerichtet sind. Bei dem Ausführungsbeispiel von [Fig. 8](#) sind die Meßgeräte **14**, **16**, **18** fest auf dem Meßplatz **10** montiert, wobei die relativen Winkellagen der Meßgeräte untereinander sowie deren Abstände bei der Montage festgestellt werden und dann unverändert bleiben.

**[0083]** Bei dem Ausführungsbeispiel von [Fig. 9](#) weisen die Meßgeräte **24, 26, 28** wiederum eine Bodenplatte **40** und zwei Kameras **42, 44** auf, die unter unterschiedlichen Winkeln auf das zugehörige Rad **36** gerichtet sind. Auf den Grundplatten **40, 46, 48** der Meßgeräte **24, 26, 28** sind Bezugssystem-Meßköpfe **50, 52, 54** vorgesehen, die eine optische Vermessung der relativen Winkellagen und der Abstände der Meßgeräte **24, 26, 28** (und des durch das Kraftfahrzeug **12** verdeckten Meßgeräts) gestatten. Dazu hat jeder Meßkopf, wie beispielsweise der Meßkopf **50** zwei Sende/Empfangseinheiten **56, 58**, die zu dem in Längsrichtung des Fahrzeuges gegenüberliegenden Meßkopf beziehungsweise zu den quer zu dem Fahrzeug gegenüberliegenden Meßkopf gerichtet sind. Mit einem derartigen Bezugsmeßsystem genügt eine grob justierte Aufstellung der Meßgeräte **24, 26, 28**, und die genaue Bestimmung der relativen Lagen und der Abstände der Meßgeräte zueinander kann laufend gemessen und auch nachjustiert werden.

**[0084]** Die Kalibrierung des Stereo-Meßsystems umfaßt die Kalibrierung der „Inneren Kameraparameter“ und die Kalibrierung der Einbausituation der Meßgeräte. Als „innere Parameter“ werden alle Parameter bezeichnet, die kameraspezifisch sind, d.h. durch den Zusammenbau der Kamera festgelegt sind. Innere Parameter werden festgelegt durch die Einbaulage des optischen Sensors, das Objektiv und dessen Einbaulage, die Blendeneinstellung und Fokuseinstellung. Bei Zoom-Objektiven ist zudem die eingestellte Brennweite entscheidend. Die inneren Parameter können so lange als konstant angesehen werden, wie keine mechanische Veränderung an der Kamera oder Änderung der Objektiveneinstellung vorgenommen wird. Die Parameter werden mit Hilfe von vollständig bekannten Objekten bestimmt. Vorzugsweise derzeit die Kalibrierung mit einem 3D-Objekt, wie z.B. einem Würfel.

**[0085]** Die Kalibrierung der Einbausituation beim Zusammenbau zweier Kameras in einem Meßgerät zu einem Stereo-Meßsystem muss bezogen auf das Koordinatensystem des Meßgeräts erfolgen. Dazu werden an dem Meßgerät entsprechende Steckachsen, Anlageflächen und/oder Indexstifte vorgesehen, bezüglich denen sowohl das eingebaute Bezugsmeßsystem als auch das Stereomeßsystem kalibriert werden können. Alternativ kann eine optische Kalibrierung vorgenommen werden.

**[0086]** Die Qualität der Beleuchtung wird anhand der vorhandenen Meßbilder überprüft. Dabei wird auf ausreichende Segmentierbarkeit, d.h. die Qualität der Schattengrenze, geprüft. Ist keine ausreichende Segmentierbarkeit gegeben, wird die Beleuchtung nachgestellt.

**[0087]** Die Messung der Bezugssystem -/Referenzsystem-Daten ist mit Ausnahme der Abstandsmessung identisch mit dem Verfahren bei den sich bekannten Fahrwerkvermessungssystemen. Ergebnisse der Messung des Bezugssystems sind die Lage der einzelner Meßgeräte zueinander, einschließlich Abstand, und die Lage der einzelner Meßgeräte zur Senkrechten. Die Abstandsmessung wird über die Winkelmessung zweier lichtemittierenden Dioden (LED's) mit bekanntem Abstand vorgenommen.

#### Ablauf der Messungen

**[0088]** [Fig. 10](#) zeigt ein schematisches Ablaufdiagramm der Messung, wobei davon ausgegangen wird, dass die oben genannten Messungen des Bezugssystems und die Kalibrierung der Meßgeräte abgeschlossen ist. Im Schritt **60** wird die Messung gestartet. Neben Schritt **62** werden die Messungen der einzelnen Meßgeräte **14, 16, 18** beziehungsweise **24, 26, 28** durchgeführt, wobei die Meßergebnisse in den Schritten **64, 66** in einem Rechner (nicht gezeigt) eingelesen werden. Der Rechner bestimmt in dem Schritt **68** die Transformationsmatrix aus den Ergebnissen der Bezugssystemmessung (BM-Ergebnisse), das heißt aus den Ergebnissen der Bezugssystemmessung. In dem Schritt **70** werden die Ergebnisse der Meßgeräte (MK) parallel zu den Achsen des Rechenkoordinatensystems (RKS-Achsen) transformiert, wobei ein Koordinatensystem der Meßgeräte als Rechenkoordinatensystem willkürlich festgelegt wird. Sodann werden in dem Schritt **72** die Vektoren in das Koordinatensystem des Rechners über Versatzwinkel und Abstände verschoben beziehungsweise umgerechnet, wobei die einzelnen transformierten Ergebnisvektoren der Stereomessung in ein gemeinsames Rechenkoordinatensystem verschoben werden. In dem Schritt **74** bestimmt dann der Rechner die Radstellungswerte im Raum, das heißt insbesondere die einzelnen Spurwinkel der Vorderräder, der Gesamtspurwinkel der Vorderräder, die sogenannte geometrische Fahrachse und dergleichen, wie es bei herkömmlichen Fahrwerkvermessungseinrichtungen üblich ist. Dabei wird die Stellung der Ergebnisvektoren zueinander in dem Rechenkoordinatensystem ausgewertet, und daraus werden die entsprechenden Fahrwerkmeßwerte berechnet. In dem Schritt **76** werden schließlich die Ergebnisse zu den Radstellungswerten, nämlich Sturz, Spur und von der Spur abgeleitete Winkelwerte an eine Anzeigeeinrichtung übergeben und/oder zur weiteren Verwendung gespeichert.

**[0089]** [Fig. 11](#) zeigt ein Ablaufdiagramm der Messungen in einem Meßgerät in etwas größerem Detail. In dem

Schritt **80** wird ein Startsignal für die Messung gegeben. Darauf wird im Schritt **82** die Bildaufnahme gestartet, wobei zunächst in Schritt **84** überprüft wird, ob die Beleuchtung für die Messung ausreichend ist, und gegebenenfalls wird die Beleuchtung nachgestellt. Die Nachstellung kann eine größere oder geringere Helligkeit des Lichtes für die Beleuchtung umfassen, wobei jedenfalls das Ziel darin besteht, einen möglichst guten Kontrast des von den Kameras beobachteten Teils der Felge beziehungsweise des Felgenhorns zu erhalten. In dem Schritt **86** sind die Kameras, die rechts beziehungsweise links im Bezug auf die Radachse angeordnet sind, aktiv und dienen sowohl zur Überprüfung der Beleuchtungssituation als auch, nach abgeschlossener Einstellung der Beleuchtung, zur Aufnahme der Stereobilder der Radfelge. Im Schritt **88** erfolgt eine Segmentierung der Felge, wobei im Schritt **90** eine Segmentierung des Ventils des Kraftfahrzeugrades erfolgt, das heißt die Winkellage des Ventils wird festgestellt. Die Schritte **92** bis **98** dienen der Segmentierung des Felgenrandes, wobei im Schritt **92** eine Vorsegmentierung, im Schritt **94** eine Feinsegmentierung, im Schritt **96** eine Subpixelsegmentierung und im Schritt **98** eine Bestimmung der realen Felgenrandkontur unter Berücksichtigung von Modelannahmen stattfindet. Diese Segmentierung wird vorgenommen, um bestimmte Winkelbereiche des Felgenrandes auszumessen und die gemessenen Werte bei der Ermittlung der Felgenrandebene berücksichtigen zu können.

**[0090]** Im Schritt **100** werden die bisherigen Meßergebnisse unter Berücksichtigung der inneren Kameraparameter umgerechnet, um in dem Schritt **102** optische Verzerrungen bei der Bestimmung der Ventillage und in dem Schritt **104** optische Verzerrungen im Bezug auf die Bilder des Felgenrandes zu eliminieren. Im Schritt **106** werden unter Berücksichtigung der äußeren Kameraparameter im Schritt **108** die 3D-Lage des Ventils rekonstruiert und in dem Schritt **110** die Lage des Felgenrandes rekonstruiert. Das Resultat des Schritts 108 ist die Information über die 3D-Position des Ventils (Schritt **112**). Zur Felgenrandrekonstruktion wird zunächst im Schritt **114** eine erste Approximation der Felgenrandebene durchgeführt. Sodann wird in dem Schritt **116** das Winkelargument berechnet, und in dem Schritt **118** erfolgt eine Torusmodelladaptation beziehungsweise die endgültige Bestimmung der Felgenrandebene. Im Schritt **120** wird das Ergebnis der Berechnung, nämlich der Normalenvektor und der Mittelpunkt der Felgenrandebene, angezeigt und/oder für die weitere Verrechnung gespeichert. Die in den Schritten **112** und **120** festgehaltenen Ergebnisse werden dann zur Berechnung der Radstellungswinkelwerte weiter verarbeitet, wie unter Bezugnahme auf [Fig. 10](#) in den Schritten **68** bis **76** beschrieben wurde.

**[0091]** [Fig. 12](#) zeigt ein schematisches Ablaufdiagramm für die Felgenschlagkompensation. Zur Felgenschlagkompensation im Schritt **122** werden die in den Schritten **112** und **120** ([Fig. 11](#)) erhaltenen Ergebnisse über die 3D-Position des Ventils beziehungsweise den normalen Vektor und den Mittelpunkt der Felgenrandebene berücksichtigt, um einen Parametersatz „Rotationsachse“, das heißt die wahre Rotationsachse in Bezug auf den normalen Vektor und die Ventilstellung in Kugelkoordinaten zu erhalten. Die Messung der Raddrehung wird bei der Durchführung und Überwachung der Felgenschlagkompensation, bei der Bestimmung der Spreizung im Rahmen einer Einschlagvermessung und bei der Bestimmung der Nachlaufänderung bei der NachlaufEinstellung benötigt. Für die Durchführung und Überwachung der Felgenschlagkompensation ist eine geringere Meßgenauigkeit erforderlich. Eine Auflösung der Raddrehung auf ca. 10 Winkelminuten ist ausreichend. Zudem sollte eine beliebige Drehung des Rades erkannt werden können, wozu die Verfolgung und Vermessung des Ventils ausreicht. Das Ventil ist einzigartig am Umfang und kann mit entsprechender Genauigkeit lokalisiert werden.

**[0092]** Zur Bestimmung der Spreizung im Rahmen einer Einschlagvermessung und der Bestimmung der Nachlaufänderung bei der NachlaufEinstellung ist die Raddrehung mit einer Genauigkeit von mindestens 2 Winkelminuten zu bestimmen. Allerdings muss keine beliebige Drehung des Rades gemessen werden können. Dazu kann die Bestimmung der 3D-Position des Ventils durchgeführt werden. Alternative kann die Vermessung und Verfolgung von nicht rotationssymmetrischen Kanten beziehungsweise Strukturen in der Felge durchgeführt werden, wobei entsprechende Algorithmen wie zur Felgenrandbestimmung zur Anwendung kommen.

**[0093]** [Fig. 13](#) zeigt ein schematisches Ablaufdiagramm zur Berechnung der Spur- und Sturzwinkel aus den Ergebnissen der Schritte **112** und **120** der [Fig. 11](#) und dem Schritt **124** von [Fig. 12](#). Mit anderen Worten wird die Information über die 3D-Position des Ventils und die Information über den normalen Vektor und den Mittelpunkt der Felgenrandebene sowie der Parametersatz „Rotationsachse“ im Schritt **126** zur Lagebestimmung der Rotationsachse verwendet. Das Ergebnis des Schritts 126 wird in dem Schritt **128** in das Referenzkoordinatensystem des Rechners transformiert, der daraufhin im Schritt **130** die Spur- und Sturzwinkel berechnet.

**[0094]** Im Folgenden werden die Berechnungsgrundlagen für die Berechnung der Fahrwerkparameter be-

schrieben.

Begriffe:

BM	Bezugsmesssystem	Derzeit vorhandenes Standard-Winkelmesssystem mit eigenem Koordinatensystem.
BM <sub>i</sub>		Mehrere an entsprechenden Rädern positionierte Bezugsmesssysteme.
KMK	Koordinatensystem MK	Rechtwinkliges Rechtssystem. Ursprung in Spur-LED der Kamera 2 des BM. x-Richtg.: längs BM (nicht Fahrtrichtung) y-Richtg.: Steckachsenaufnahme BM – Rad z-Richtg.: entgegen Erdschwerkraft Gekennzeichnet durch Apostroph.
KMK <sub>i</sub>		Koordinatensysteme der entsprechenden Messköpfe MK <sub>i</sub> .
RKS	Rechen Koordinatensystem	Willkürlich aber sinnvoll festgelegtes Koordinatensystem zur Verrechnung aller MK zu einer Fahrwerkvermessung.
i = 1...x		Die Nummerierung 1...x der einzelnen System erfolgt entsprechend der derzeitigen Konvention für Messwertaufnehmer.

Meß- und Rechengrößen:

d <sub>v</sub>	Abstand MK's Querspur vorne
d <sub>h</sub>	Abstand MK's hinten
d <sub>l</sub>	Abstand MK's links
d <sub>r</sub>	Abstand MK's rechts
A, B, C, D, E, F, G, H	Spurwinkel des Bezugssystems
I, K, L, M, N, O, P, Q	Neigungswinkel des Bezugssystems
(x', y', z')	Vektor im KMK (Koordinatensystem Meßgerät)
(x'', y'', z'')	Vektor parallel zum RKS (Rechen-Koordinatensystem)
(x, y, z)	Vektor im RKS (Rechen-Koordinatensystem)
(x <sub>n</sub> , y <sub>n</sub> , z <sub>n</sub> )	Richtungsvektor der Radachse radauswärts

Ergebnisvektor

**[0095]** Das Einzel-Stereo-Messsystem i hat folgenden Ergebnisvektor im Koordinatensystem des Meßgerät (Meßsskopf) i (KMK<sub>i</sub>).

$$\vec{e}'_i = \begin{pmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{pmatrix} * \lambda_i \begin{pmatrix} x'_{in} \\ y'_{in} \\ z'_{in} \end{pmatrix};$$

Transformation in das RKS

**[0096]** Die Ergebnisvektoren werden mit Hilfe der Ergebnisse aus dem Bezugssystem in das Rechenkoordinatensystem transformiert.

Schritt 1:

**[0097]** Transformation der Ergebnisvektoren in ein horizontiertes Koordinatensystem und in ein Koordinaten-

system, das in allen Richtungen parallel zum RKS liegt.

**[0098]** Zusammengesetzte Rotation vom Typ Cardan:

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{pmatrix} = R_z(\tau) R_y(\kappa) R_x(\gamma) \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix};$$

Schritt 2:

**[0099]** Verschiebung der Anfangspunkte der Vektoren in das RKS. Dabei werden folgende Versatzwinkel definiert:

Festlegung  $KMK_4 = RKS$

Versatzwinkel  $KMK_2$  zu  $KMK_4$ :

$$f_{24} = (F+D)/2;$$

Versatzwinkel  $KMK_3$  zu  $KMK_4$ :

$$f_{34} = (H+G)/2;$$

Versatzwinkel  $KMK_1$  zu  $KMK_3$ :

$$f_{13} = (E+C)/2;$$

wobei.

C,E: gegenüberliegende Spursensoren links

D,F: gegenüberliegende Spursensoren rechts

G,H: gegenüberliegende Spursensoren hinten

Verschiebung  $KMK_2$  in RKS

$$\begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2'' \\ y_2'' \\ z_2'' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_r * \cos(\varphi_{24}) \\ d_r * \sin(\varphi_{24}) \\ 0 \end{pmatrix};$$

Verschiebung  $KMK_3$  in RKS

$$\begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_3'' \\ y_3'' \\ z_3'' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -d_h * \sin(\varphi_{34}) \\ d_h * \cos(\varphi_{34}) \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w * (\cos(\tau_3) - 1) \\ w * \sin(\tau_3) \\ 0 \end{pmatrix};$$

Verschiebung  $KMK_1$  in RKS

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1'' \\ y_1'' \\ z_1'' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d_l * \cos(\varphi_{13}) \\ d_l * \sin(\varphi_{13}) \\ 0 \end{pmatrix};$$

**[0100]** Die vorstehende Beschreibung der bevorzugten Ausführungsbeispiele der Erfindung wurde zum Zweck der Erläuterung gegeben. Die Erfindung ist nicht auf die offenbarten Ausführungsbeispiele beschränkt. Viele Möglichkeiten und Veränderungen der Ausführungsbeispiele sind für einen Fachmann in Bezug der vorstehende Offenbarung ersichtlich, und der Schutzzumfang der Erfindung wird nur durch die beigefügten Ansprüche definiert.

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge zu einem Meßgerät, das wenigstens eine Kamera aufweist, wobei die Radfelge im Blickfeld der Kamera liegt, umfassend:  
Bereitstellen eines Modells, das einen Modellkörper eines lokalisierbares Radfelgen-Geometriedetail sowie die räumliche Lage des Modellkörpers zu dem Meßgerät durch Modellparameter beschreibt,  
Erfassen eines Bildes des Radfelgen-Geometriedetails der Radfelge mit der Kamera,  
Anpassen der aus den Modellparametern resultierenden Abbildung des Modellkörpers an das Bild des Radfelgen-Geometriedetails durch Verändern von Modellparametern des Modells, und

Verfolgen der Veränderungen der Modellparameter des Modells beim Anpassen, wobei die Daten bezüglich der Lage des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails die räumliche Lage des Radfelgen-Geometriedetails und damit der Radfelge selbst wiedergeben, wenn die aus den Modellparametern resultierende Abbildung des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails mit dem erfassten Bild des Radfelgen-Geometriedetails innerhalb vorgegebener Toleranzgrenzen übereinstimmt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Modellkörper ein sogenannter Schmiegetorus oder eine 3D-CAD-Darstellung ist.

3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass im Falle des Schmiegetorus Modellparameter des Modells ein Hauptradius  $R$  und ein Nebenradius  $r$  des Torus, eine Position  $c$  des Toruszentrum, ein Normalenvektor  $n$  der Rotationsebene des Torus und eine Position  $p$  des Projektionszentrums einer Lochkamera sind, mit der der Schmiegetorus betrachtet wird.

4. Verfahren nach einer der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass das Radfelgen-Geometriedetail die Felgenreandkontur ist.

5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Radfelgenkontur mit zwei Kameras erfasst wird, die unter unterschiedlichen Winkeln auf das Rad gerichtet sind.

6. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Bild der Radfelge durch Bestimmung eines Winkel-Ausgangspunktes an der Felge und eine Segmentierung des Felgenumfangs aufgenommen wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass zur Bestimmung des Winkel-Ausgangspunktes an der Felge die Lage des Ventils verwendet wird.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, dass zur Segmentierung des Felgenumfangs eine Vorsegmentierung und eine Feinsegmentierung durch geführt wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass zusätzlich zur Vorsegmentierung und Feinsegmentierung eine Subpixelsegmentierung durch geführt wird.

10. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Bestimmung der realen Felgenkontur Typengrößen oder -parameter der Felge mit einbezogen werden.

11. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Anpassen der Abbildung des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails an das Bild des Radfelgen-Geometriedetails durch Verändern von Modellparametern des Modells dadurch erfolgt, dass zunächst eine Approximation einer Felgenreandebene, dann eine Winkelargumentberechnung und schließlich eine endgültige Torusmodell Anpassung an die finale Felgenreandebene durchgeführt wird.

12. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Verfolgen der Veränderungen der Modellparameter des Modells durch Fortschreiben der Modellparameter in einem Speicher erfolgt.

13. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Daten bezüglich der Modellparameter des Modells, die die räumliche Lage der Radfelge definieren, wenn die Abbildung des Modellkörpers des Radfelgen-Geometriedetails mit dem erfassten Bild des Radfelgen-Geometriedetails übereinstimmt, ausgegeben oder angezeigt werden.

14. Verfahren nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch folgende Schritte: Starten der Bildaufnahme; Segmentierung der Felge, wobei eine Segmentierung des Ventils des Kraftfahrzeugrades erfolgt; Segmentierung des Felgenreandes; um vorgegebene Winkelbereiche des Felgenreandes auszumessen; Umrechnen der bisherigen Meßergebnisse unter Berücksichtigung der inneren Kameraparameter; Rekonstruktion der 3D-Lage des Ventils unter Berücksichtigung der äußeren Kameraparameter; Rekonstruktion die Lage des Felgenreandes; Anzeigen des Ergebnisses der Berechnung, nämlich des Normalenvektors und des Zentrumspunkt der Felgenreandebene und/oder Speichern derselben für die weitere Verrechnung.

15. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass nach dem Starten der Bildaufnahme zunächst überprüft wird, ob die Beleuchtung für die Messung ausreichend ist, und dass die Beleuchtung entspre-

chend nachgestellt wird.

16. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Nachstellung eine größere oder geringere Helligkeit des Lichtes für die Beleuchtung umfasst

17. Meßgerät zur Bestimmung der räumlichen Lage einer Radfelge zu dem Meßgerät, das wenigstens eine Kamera aufweist, wobei die Radfelge im Blickfeld der Kamera liegt, gekennzeichnet durch einen Rechner, der programmiert ist, um das Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16 durchzuführen.

18. Meßgerät nach Anspruch 17 zur Durchführung des Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass zwei Kameras vorgesehen sind, die das perspektivische Bild der Radfelgenkontur erfassen und unter unterschiedlichen Winkeln auf das Rad gerichtet sind.

19. Meßgerät nach Anspruch 17 dadurch gekennzeichnet, dass es je Kamera einen optischen Sensor, eine Objektiv, eine Blendenstelleinrichtung und eine Fokusstelleinrichtung umfasst, und dass die Einbaulage des Sensors und des Objektivs, die Blendeneinstellung und Fokuseinstellung vorjustiert sind.

20. Meßgerät nach Anspruch 19 dadurch gekennzeichnet, dass bei Zoom-Objektiven zudem die eingestellte Brennweite vorjustiert ist.

21. Meßgerät nach Anspruch 17 zur Durchführung des Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass eine Ausgabe- beziehungsweise Anzeigevorrichtung zum Ausgeben beziehungsweise Anzeigen der Daten bezüglich der Modellparameter des Modells des Radfelgen-Geometriedetail, die die räumliche Lage der Radfelge definieren, wenn der Modellkörper des Radfelgen-Geometriedetails mit dem erfassten Bild des Radfelgen-Geometriedetails übereinstimmt, vorgesehen ist.

22. Verfahren zur Fahrwerkvermessung an Kraftfahrzeugen, dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche an den Rädern des Kraftfahrzeugs durchgeführt wird, dass die relativen Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen bestimmt werden, dass die Meßergebnisse der Messungen an den Rädern des Kraftfahrzeugs unter Berücksichtigung der relativen Positionen der Meßgeräte in Radstellungswerte umgerechnet werden, und dass die Radstellungswerte ausgegeben oder angezeigt werden.

23. Verfahren nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, dass die relativen Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen durch eine justierbare Montage der Meßgeräte an einem Meßplatz festgelegt werden.

24. Verfahren nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass die relativen Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen durch ein Bezugssystem bestimmt werden, das zwischen den Meßgeräten angeordnet ist.

25. Verfahren nach Anspruch 22, gekennzeichnet durch folgende Schritte:  
Durchführung der Messungen der einzelnen Meßgeräte;  
Einlesen der Meßergebnisse in einen Rechner;  
Berechnen der Transformationsmatrix aus den Ergebnissen der Bezugssystemmessung;  
Transformieren der Ergebnisse der Meßgeräte parallel zu den Achsen des Rechenkoordinatensystems;  
Umrechnen der Vektoren in das Koordinatensystem des Rechners über Versatzwinkel und Abstände in dem Bezugsmesssystem;  
Bestimmen der Radstellungswerte in dem Rechenkoordinatensystem durch Auswertung der Stellung der Ergebnisvektoren zueinander zur Berechnung der entsprechenden Fahrwerkmeßwerte;  
Übergeben der Ergebnisse zu den Radstellungswerten an eine Anzeigeeinrichtung und/oder Speichern derselben zur weiteren Verwendung.

26. Fahrwerkvermessungseinrichtung für Kraftfahrzeuge, gekennzeichnet durch Meßgeräte nach einem der Ansprüche, die auf einem Meßplatz derart positioniert sind, dass ein Meßgerät jeweils einem der Räder des Kraftfahrzeugs zugeordnet ist, wobei die relativen Positionen der Meßgeräte bei der Durchführung der Messungen bestimmt sind, einen Rechner, der die Meßergebnisse der Messungen an den Rädern des Kraftfahrzeugs unter Berücksichtigung der relativen Positionen der Meßgeräte in Radstellungswerte umrechnet, und durch eine Anzeige/Ausgabeeinrichtung, die die Radstellungswerte ausgibt oder anzeigt.

27. Fahrwerkvermessungseinrichtung nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, dass die relativen Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen durch eine justierbare Montage der Meßgeräte an einem Meßplatz festgelegt werden.

28. Fahrwerkvermessungseinrichtung nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, dass die relativen Positionen der Meßgeräte zur Durchführung der Messungen durch ein Bezugssystem bestimmt werden, das zwischen den Meßgeräten angeordnet ist.

29. Fahrwerkvermessungseinrichtung nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, dass beim Zusammenbau zweier Kameras in einem Meßgerät zu einem Stereo-Meßsystem die Kameras bezogen auf das Koordinatensystem des Meßgeräts kalibriert sind.

Es folgen 8 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

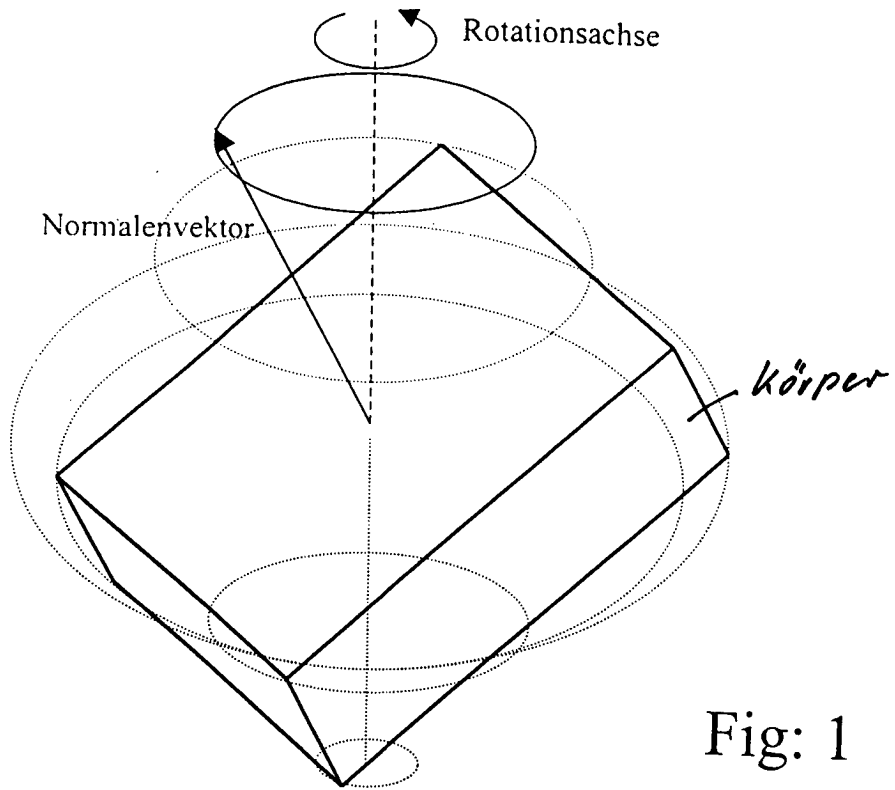


Fig: 1

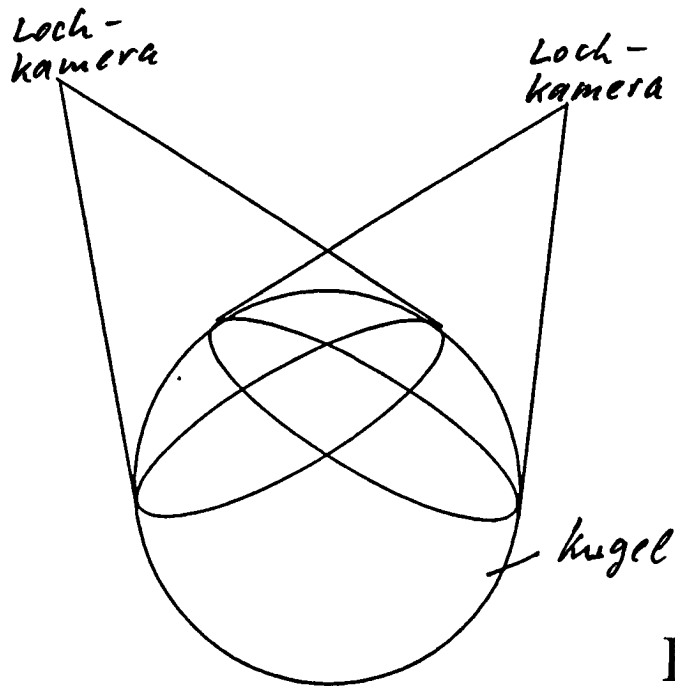


Fig: 2

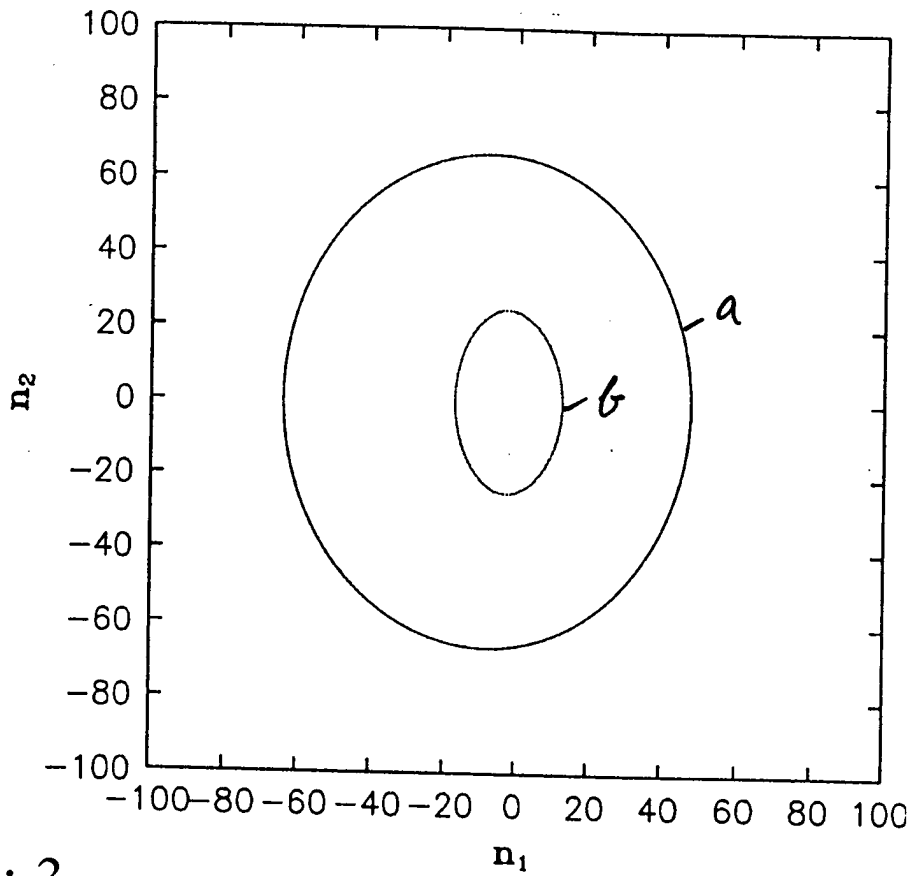


Fig: 3

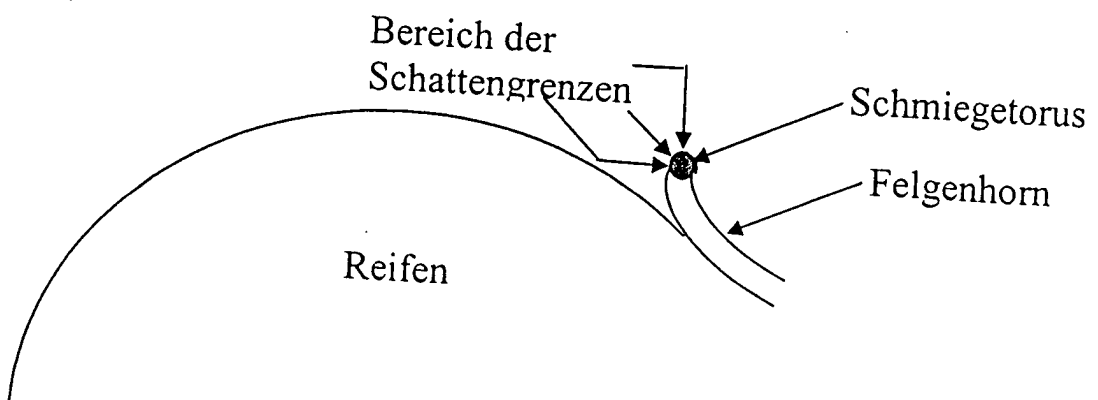


Fig: 4

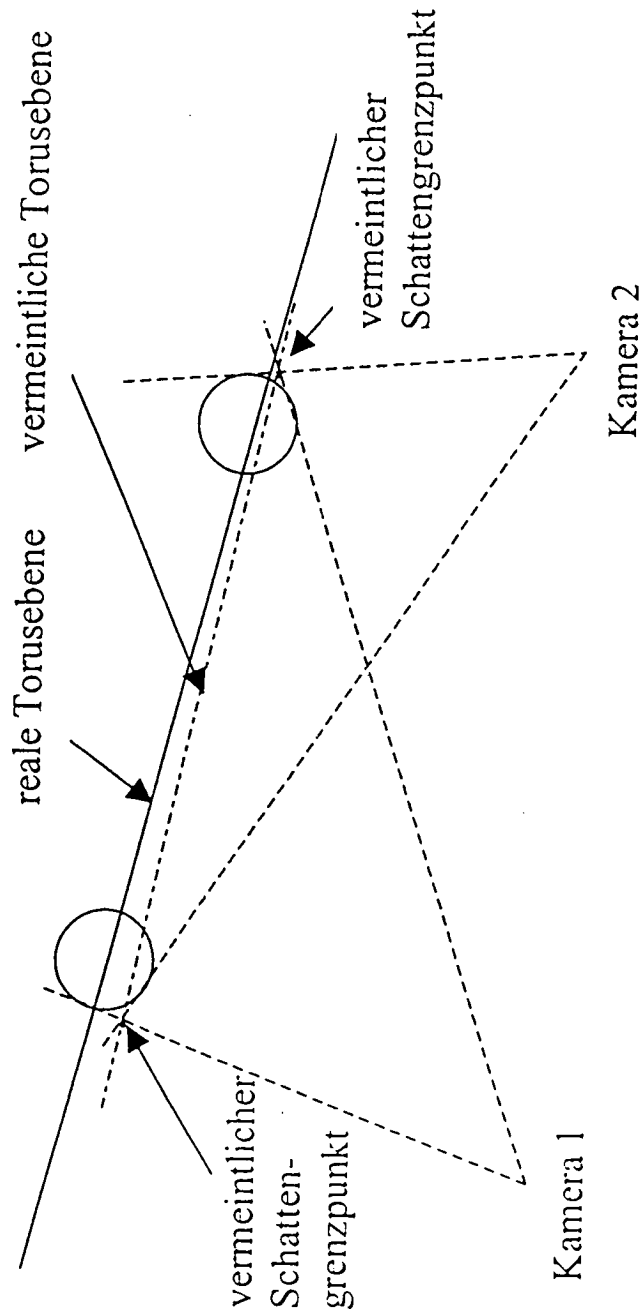


Fig: 5

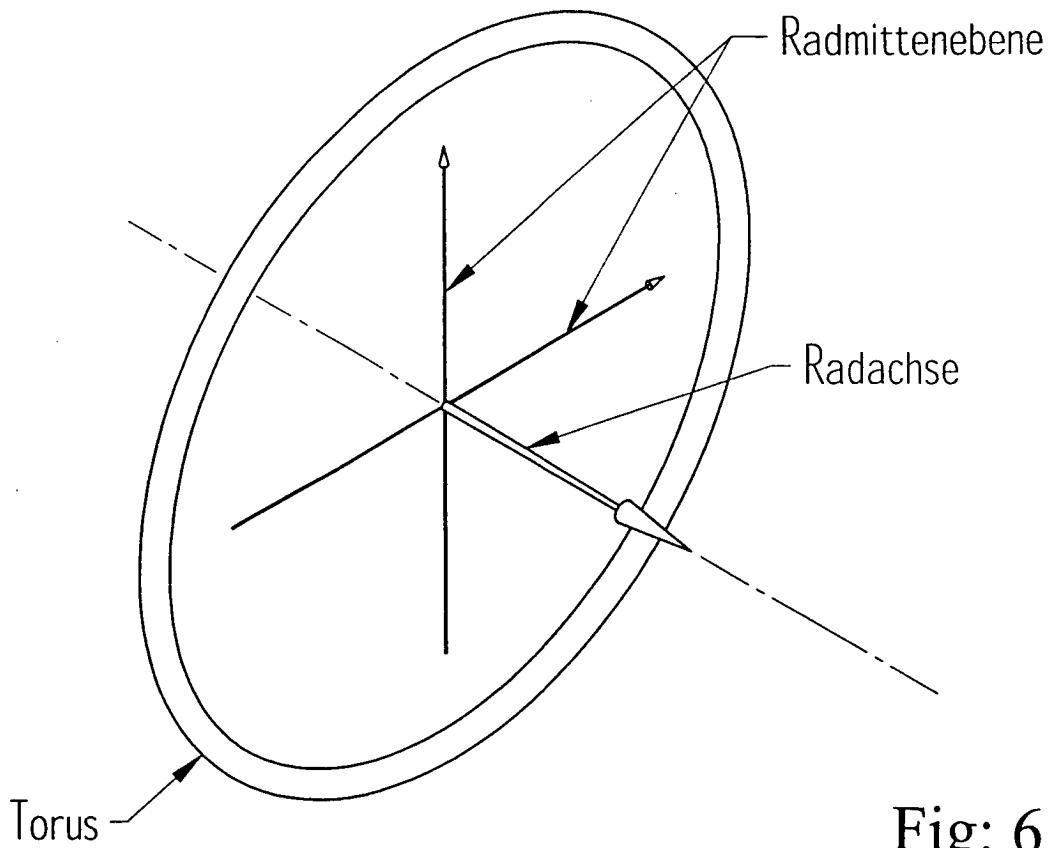


Fig: 6

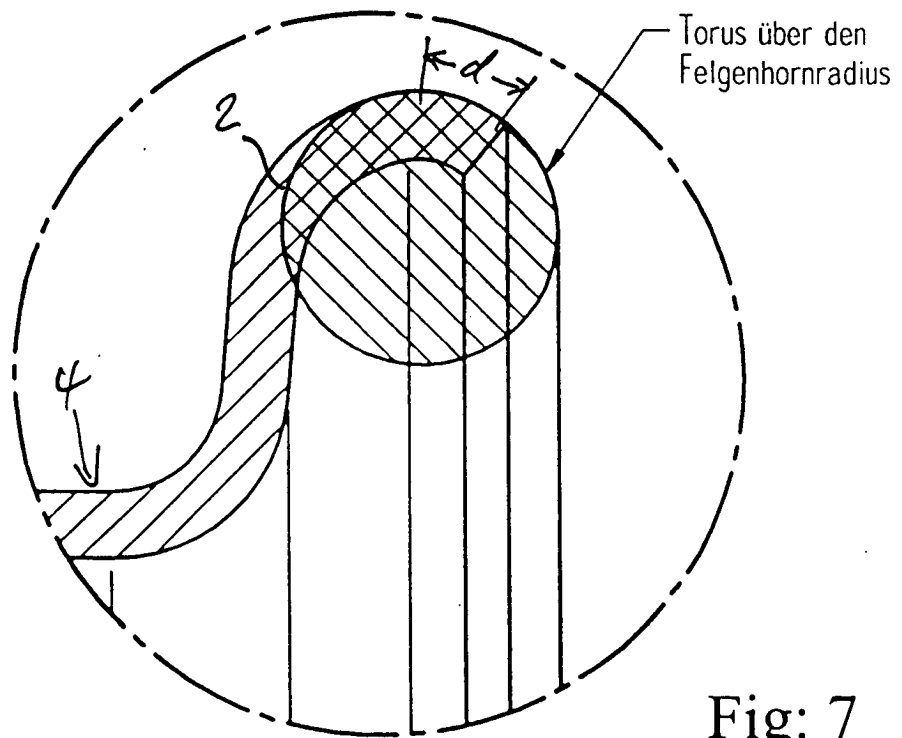


Fig: 7

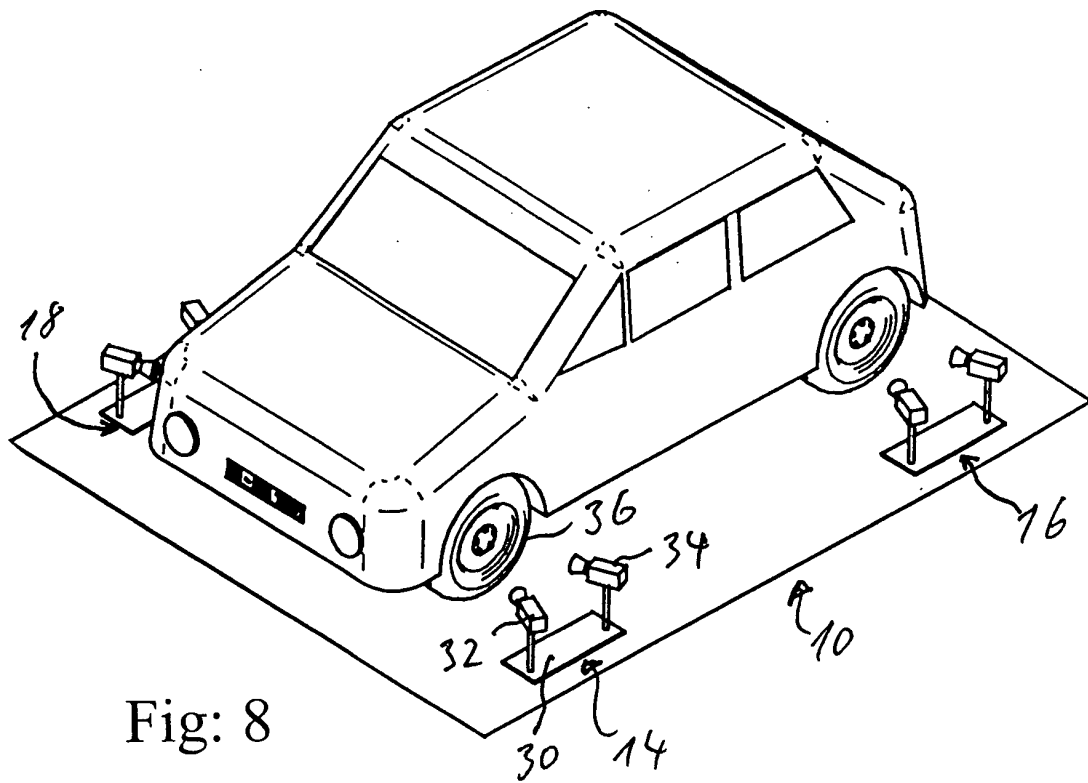


Fig: 8

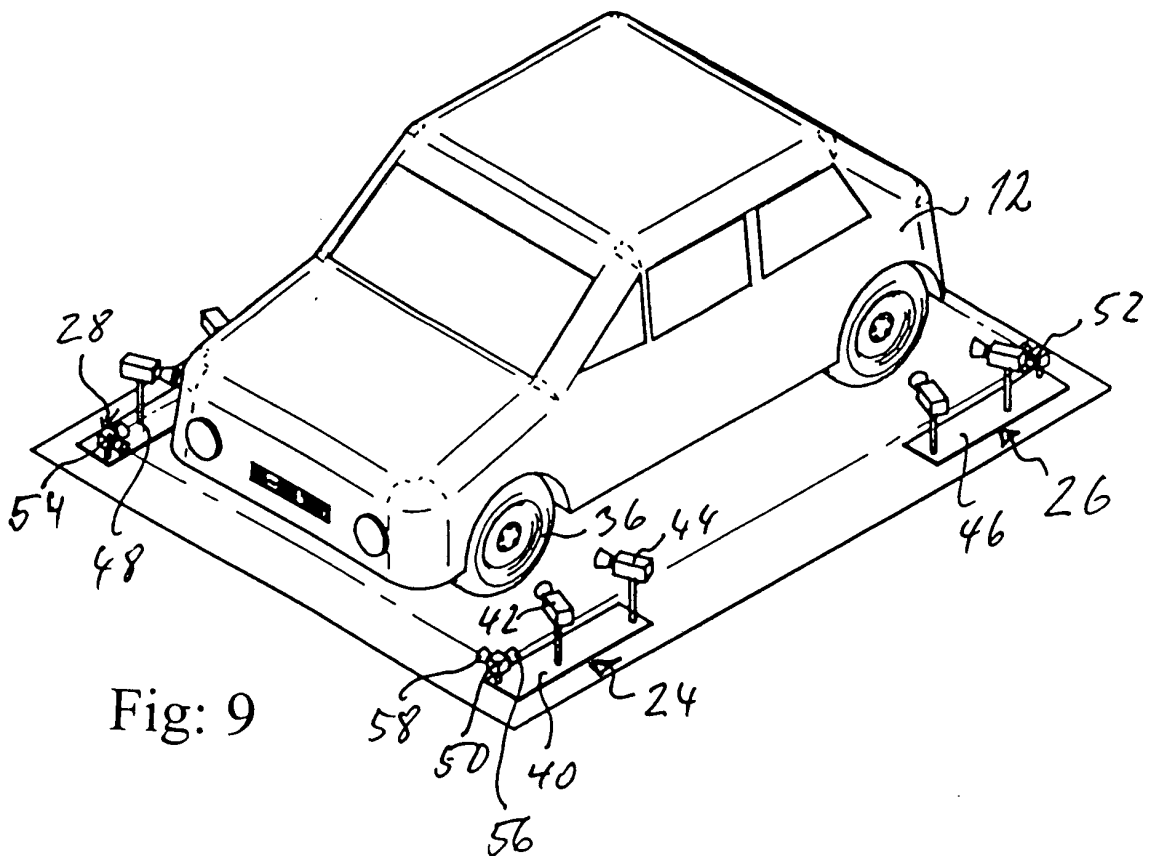


Fig: 9

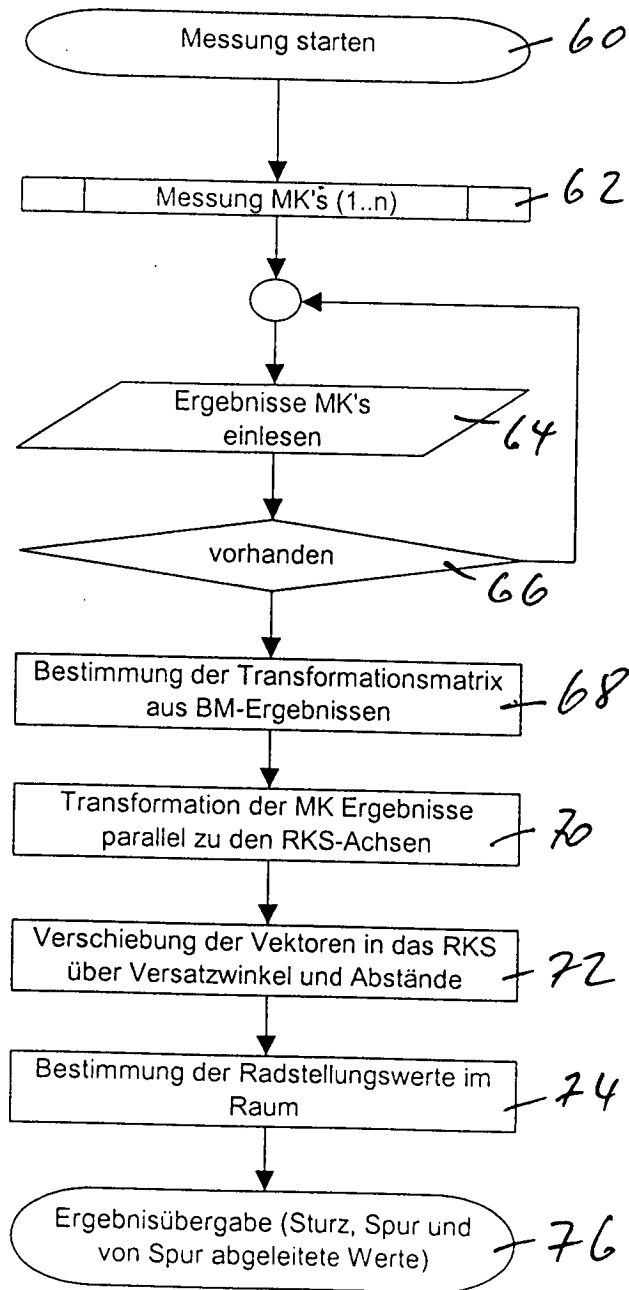


Fig: 10

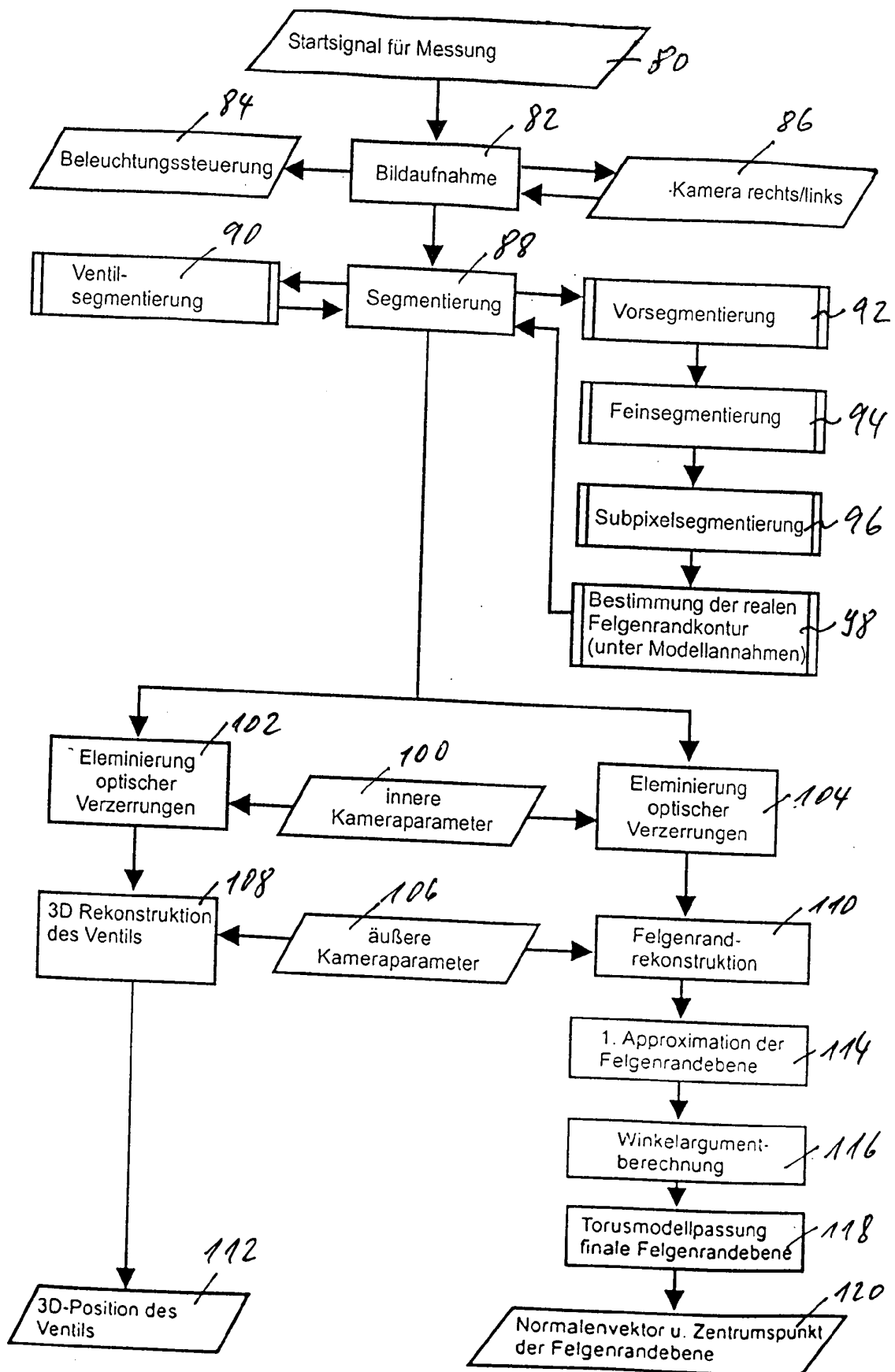


Fig: 11

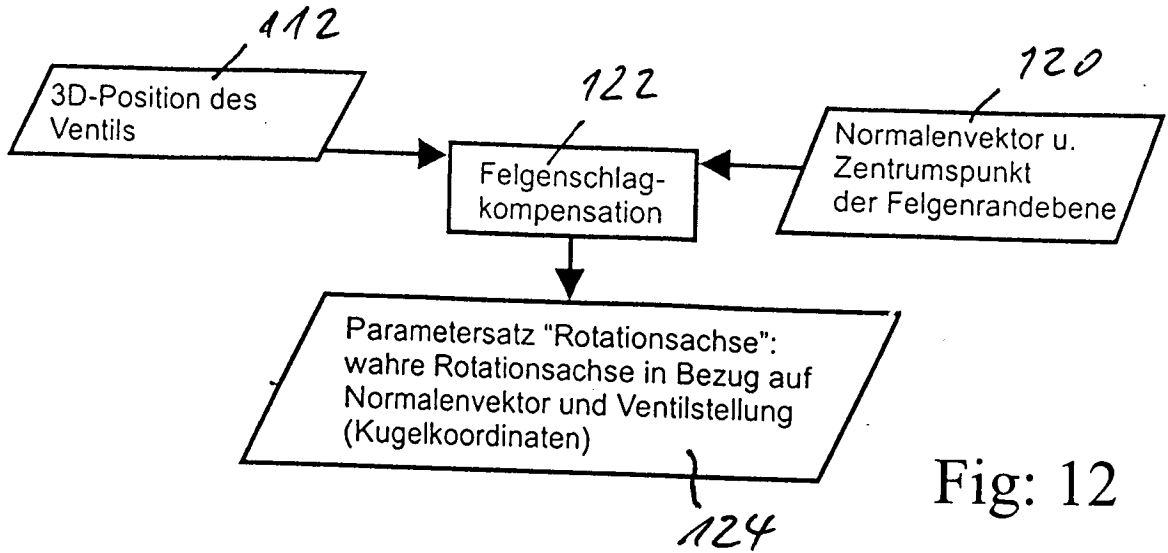


Fig: 12

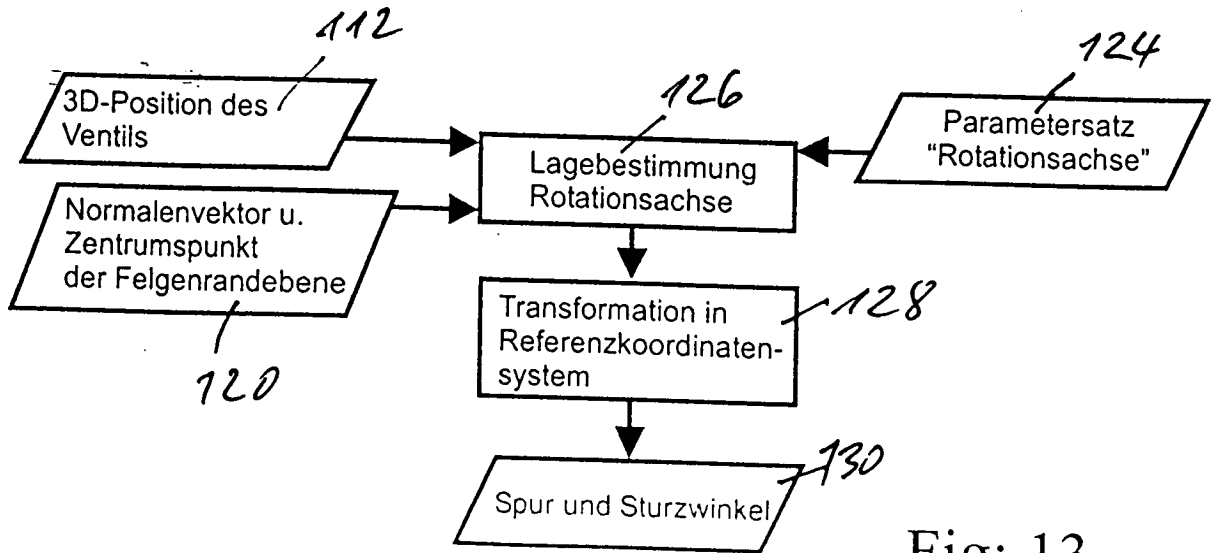


Fig: 13