

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
26. Juni 2003 (26.06.2003)

PCT

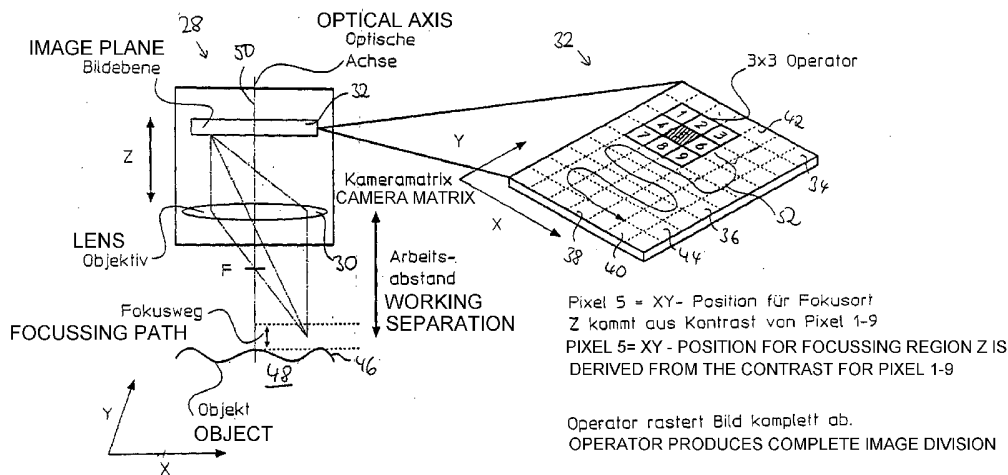
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 03/052347 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation⁷: **G01B 11/00** (72) Erfinder; und
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **CHRISTOPH, Ralf**
(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP02/14915 [DE/DE]; Siemensstrasse 19, 35394 Giessen (DE).
(22) Internationales Anmeldedatum: 19. Dezember 2002 (19.12.2002) (74) Anwalt: **STOFFREGEN, Hans-Herbert**; Friedrich-Ebert-Anlage 11b, 63450 Hanau (DE).
(25) Einreichungssprache: Deutsch (81) Bestimmungsstaaten (national): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.
(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
(30) Angaben zur Priorität:
101 62 663.0 19. Dezember 2001 (19.12.2001) DE
102 19 491.2 30. April 2002 (30.04.2002) DE
(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **WERTH MESSTECHNIK GMBH** [DE/DE]; Siemensstrasse 19, 35394 Giessen (DE).
(84) Bestimmungsstaaten (regional): ARIPO-Patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: METHOD FOR THE THREE-DIMENSIONAL MEASUREMENT OF A SURFACE

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR DREIDIMENSIONALEN MESSUNG EINER OBERFLÄCHE



(57) Abstract: The invention relates to a method for the three-dimensional measurement of a surface (46) of an object (48, 84) by the autofocus principle, using a co-ordinate measuring device (10). According to the invention, a high resolution description of three-dimensional surfaces can be achieved, whereby the measured region (32) is divided into partial regions (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) and the contrast for each partial region determined simultaneously or essentially simultaneously for each partial region during the progress of an optical sensor (28) along the optical axis thereof (50).

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur dreidimensionalen Messung einer Oberfläche (46) eines Objektes (48, 84) nach dem Autofokusprinzip mittels eines Koordinatenmessgerätes (10). Um eine hochauflösende Beschreibung von dreidimensionalen Oberflächen zu ermöglichen, wird vorgeschlagen, dass der Messbereich (32) in Teilbereiche (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) unterteilt wird und Kontrast jeden Teilbereichs während des Verfahrens eines optischen Sensors (28) entlang seiner optischen Achse (50) gleichzeitig oder im Wesentlichen gleichzeitig bestimmt wird.

WO 03/052347 A2



TM), europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, SI, SK, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

Veröffentlicht:

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts*

Verfahren zur dreidimensionalen Messung einer Oberfläche

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur dreidimensionalen Messung einer Oberfläche eines Objekts nach dem Autofokusprinzip mittels eines Koordinatenmessgerätes, wobei zur Messung ein Messbereich der Oberfläche erfassender optischer Sensor entlang dessen optischer Achse verfahren oder scheinbar verfahren und ein für die Oberfläche charakteristischer Parameter wie Kontrastwert gemessen wird und wobei aus Position des Sensors, die einem Fokusort entspricht, und Position zu messenden Messpunktes bzw. dessen Bildes in einer senkrecht zu der optischen Achse verlaufenden Ebene die Raumkoordinate des Messpunktes berechnet wird.

Zur Oberflächenanalyse von Materialoberflächen werden optisch abtastende Messsysteme eingesetzt, die nach dem Autofokusprinzip arbeiten. Es werden beispielsweise einzelne Autofokuspunkte nach dem Kontrastverfahren bei der Abtastung gemessen. Um vollständige Konturen aufzunehmen, benötigt dieses Verfahren lange Messzeiten. Pro Messpunkt sind einige Sekunden erforderlich.

Aus P. Profos, T. Pfeifer (Hrsg.): Handbuch der industriellen Messtechnik, 5. Aufl., Oldenbourg Verlag, München-Wien 1992, S. 455, 456 ist ein Verfahren der eingangs genannten Art bekannt. Dabei werden Laserabstandssensoren für die Erfassung von Oberflächen-

Topographien verwendet. Bei dem bekannten Verfahren wird Licht einer Laserdiode über einen Kollimator und ein bewegliches Objektiv auf die Materialoberfläche geworfen. Das von der Oberfläche reflektierte Licht gelangt über die Objektivlinse, den Kollimator und einem Strahlteiler zu einem optoelektronischen Fokusedetektor in Form einer Modemzeile. Die Objektivlinse wird oberflächentopographieabhängig nachgeführt. Aus ihrer Bewegung wird das Höhenprofil ermittelt. Ein Nachteil dieses Verfahrens besteht in der starken Empfindlichkeit gegenüber Eigenschaftsänderungen der Materialoberfläche.

Aus H. Naumann, G. Schröder: Bauelemente der Optik, Taschenbuch der technischen Optik, 6. Aufl., C. Hanser Verlag, München-Wien 1992, S. 348, 349, ist eine Autofokussierung durch Kontrastmessung bekannt, wobei drei unterschiedlich lange optische Wege zur photometrischen Kontrastmessung benutzt und eine Scharfstellposition an einem Kontrastunterschied erkannt wird.

Aus der DE-Z: VDI-Z 131 (1989) Nr. 11, S. 12 - 16 R.-J. Ahlers, W. Rauh: "Koordinatenmesstechnik mit Bildverarbeitung" ist eine Koordinatenmessung nach dem Autofokusprinzip bekannt, bei der durch Kontrastanalyse mit Ortsfrequenzmessung der von einem bilderfassenden Sensor gelieferten Daten eine dreidimensionale Objektvermessung erfolgen kann.

In der WO 99/53271 wird ein Verfahren zur punktweise scannenden Profilbestimmung einer Materialoberfläche mit einem Koordinatenmessgerät nach dem Autofokusprinzip beschrieben.

Bei den bekannten Verfahren werden ein Bildverarbeitungssensor entlang einer optischen Achse bewegt und gleichzeitig über ein Auswertesystem die Kontrastwerte ermittelt. Aus der so entstehenden Kontrastkurve wird auf den Abstand zwischen Objektoberfläche und Sensor geschlossen. Gemeinsam ist den bekannten Verfahren des Weiteren, dass jeweils pro Bildfeld nur ein Messpunkt entlang der optischen Achse gewonnen wird. Hierdurch bedingt ist der Nachteil gegeben, dass eine schnelle Messung von Oberflächen nicht möglich ist.

Zwar wurde bereits in Betracht gezogen, mehrere Fenster gleichzeitig im Bildfeld eines Fokussensors zu setzen. Allerdings ist die Zahl der Fokuswerte durch die Größe der nebeneinander angeordneten Fenster beschränkt, so dass nur wenige Fenster bzw. Fokuspunkte mit ausreichend Pixelinformationen zur Kontrastbestimmung herangezogen werden.

Der vorliegenden Erfindung liegt das Problem zu Grunde, ein Verfahren der eingangs genannten Art so weiterzubilden, dass eine hochauflösende Beschreibung von dreidimensionalen Oberflächen ermöglicht wird.

Erfindungsgemäß wird das Problem im Wesentlichen dadurch gelöst, dass der Messbereich in Teilbereiche unterteilt wird und der charakteristische Parameter jeden Teilbereichs während des Verfahrens des Sensors entlang seiner optischen Achse bestimmt wird. Mit anderen Worten werden während der Bewegung des Sensors entlang seiner optischen Achse mehrere Messpunkte gleichzeitig bestimmt. Insbesondere handelt es sich bei dem optischen Sensor um einen CCD-Chip bzw. eine CCD-Kamera, wobei für jeden Bildverarbeitungspixel ein Fokusort ermittelt wird.

Den Messpunkten ist ein Fokusort zugeordnet. Unter Fokusort wird die Position relativ zum Sensor (in Sensorkoordinaten) verstanden, in der ein Bildabschnitt die optimale Schärfe aufweist (z.B. maximaler Kontrast).

Insbesondere sieht die Erfindung vor, dass sich die Teilbereiche, also die Fenster des Bildfeldes des CCD-Sensors, für die Bestimmung des charakteristischen Parameters überlappen, wobei Messpunkte aus sich überlappenden Teil- bzw. Auswertebereichen gleichzeitig oder nahezu gleichzeitig bestimmt werden.

Erfindungsgemäß ist die Dichte der gemessenen Fokusorte und damit Messpunkte durch die Zahl der Bildpunkte des Bildverarbeitungssensors begrenzt. Es wird zu jedem Messpunkt in einem als Operatorfenster zu bezeichnenden Teilbereich der Fokusort bestimmt. Die Größe des Messbereich ist durch das Bildfeld insgesamt begrenzt. Mit anderen Worten

ist der Messbereich der durch das Bildverarbeitungsfenster festgelegte Auswertebereich, in dem Messpunkte durch das erfindungsgemäße Verfahren erzeugt werden.

Unter Teilbereich ist der lokale Bereich zu verstehen, in dem durch z. B. einen Bildverarbeitungsoperator das Fokuskriterium ermittelt wird, um einen Messpunkt zu erzeugen.

Auch ist der Begriff Sehfeld des Bildverarbeitungssensors einzuführen. Dieser beschreibt die physikalische Begrenzung des gesamten Sehfeldes durch den Kamerachip bzw. die Chipgröße.

Zur Bestimmung des charakteristischen Parameters in Form des Kontrastwertes werden in bekannter Weise zur Umwandlung des Grauwertes in ein Binärbild ein Bildverarbeitungsoperator benutzt, um aus jeweiligem Operatorfenster den Kontrastwert für ausgewählten Bildverarbeitungspixel zu bestimmen.

Erfindungsgemäß wird während des Verfahrens des optischen Sensors entlang dessen optischer Achse ein Stapel von Bildern gemessen, wobei pro Bild für jeden Teilbereich der charakteristische Parameter ermittelt und sodann aus dem Stapel der Bilder der Fokusort pro Teilbereich ermittelt wird. Unter Berücksichtigung der in der senkrecht zu der optischen Achse verlaufenden Ebene bekannten Position des Bildverarbeitungspixels im Koordinatenmessgerät lässt sich sodann die Raumkoordinate für jedes Pixel und damit jeden Messpunkt berechnen.

In Weiterbildung der Erfindung ist vorgesehen, dass aus wenigen Bildebenen die jeweiligen Fokusorte der gewünschten Messpunkte bestimmt werden, wobei aus z. B. zwei oder drei Ebenen Kontrastwerte errechnet werden, die nach vorheriger Ermittlung einer eingemessenen Fokusfunktion zur Berechnung des Fokusortes in diese eingesetzt werden. Insoweit wird auf ein Verfahren Bezug genommen, das in der WO 01/33166 A1 beschrieben ist, auf dessen Offenbarung ausdrücklich Bezug genommen wird.

Entsprechend kann für jeden Bildpunkt (Pixel) der Fokusort durch Anordnung von zwei oder drei oder mehr Sensorchips gleichzeitig berechnet und hieraus die Koordinate auf der optischen Achse ermittelt werden, wie dies durch die WO 01/33166 A1 offenbart ist.

Bei der Bestimmung des Fokusortes unter Zugrundelegung von in wenigen Ebenen ermittelten Kontrastwerten bzw. aufgrund der Ermittlung der Kontrastwerte pro Bildpunkt mittels zwei oder drei oder mehreren Sensorchips, durch die quasi ein Verfahren eines optischen Sensors entlang dessen optischer Achse zur Erzeugung eines Stapels von Bildern simuliert wird, nutzt man die Kenntnis, dass die in unterschiedlichen Abständen zwischen Messpunkt und Arbeits- bzw. Bildebene eines Sensors gemessenen Kontrastwerte auf in etwa einer Parabel liegen, wobei der Kontrastwert im Scheitelpunkt dem optischen Abstand zwischen Arbeits- bzw. Bildebene des Sensors und dem Punkt bei dessen Scharfabbildung entspricht, also den Fokusort angibt. Benutzt man mehrere Sensoren, die einen unterschiedlichen Abstand zu dem abzubildenden Punkt aufweisen und ermittelt die Kontrastwertkurven und normiert diese aufgrund der geometrischen Relation der Sensoren bzw. optischen Wege zueinander, so kann durch die Ermittlung der in einem jeden Sensor gemessenen Kontrastwerte in einem vorgegebenen Abstand aufgrund der zuvor bekannten Relation der Kontrastwertkurven bzw. -parabeln zueinander die Kontrastwertkurve des Sensors errechnet werden, auf dessen Arbeitsebene der Punkt scharf abgebildet werden soll. Der zu messende Punkt liegt in der Fokusebene der dem Sensor zugeordneten Optik. Nach Berechnung der entsprechenden Kontrastwertkurve bedarf es allein der Bestimmung des Scheitelpunktes, um den Fokusort zu erhalten.

Die Erfindung zeichnet sich auch dadurch aus, dass der Fokusort für den jeweiligen Bildpunkt (Pixel) aus dem Nachbarfokusort unter Hinzuziehung weiterer im Auswertefenster liegender Bildpunkte errechnet wird.

Die Errechnung des Fokusortes für jedes Bildverarbeitungspixel kann ebenfalls dadurch erfolgen, dass jeweils von einem berechneten Fokusort für ein Pixel ausgegangen wird und dann differentiell zu diesem die Nachbarfokusorte berechnet werden. Hierbei wird die Nebeninformation genutzt, dass nebeneinanderliegende Pixel nahe beieinanderliegende Fo-

kuswerte erwarten lassen. Durch diese Nebenbedingung kann der Berechnungsalgorithmus auf den Nahbereich um das Fokusmaximum beschränkt werden.

Auch sieht ein selbständiger Vorschlag der Erfindung vor, die Berechnung des funktionalen Verlaufes der Kontrastfunktion prinzipiell von der Berechnung der Fokusorte loszulösen. Hierdurch ist es möglich, alle Amplituden für eine möglichst exakte Berechnung des funktionalen Verlaufes der Kontrastfunktion heranzuziehen und somit hierbei ein rauscharmes Ergebnis zu erzielen. Die Kontrastfunktion kann im Prinzip sowohl aus einzelnen Verläufen für einzelne Pixel durch Mittelung generiert als auch durch Zusammenfassung aller Kontrastverläufe aller Pixel bestimmt werden. Diese so ermittelte Kontrastfunktion wird anschließend dazu benutzt, bei der Bestimmung des jeweiligen lokalen Fokusortes für jedes Pixel aus wenigen Stützpunkten die Lage des Maximums der Kontrastfunktion zu ermitteln. Im Normalfall reichen hierfür drei Stützpunkte aus. Das Rauschen der entsprechenden Kontrastwerte geht nicht mehr über Verfälschung der Kontrastfunktion, sondern lediglich über die direkte Verfälschung der Amplitudenwerte ein. Es wird somit eine höhere Genauigkeit erzielt. Der Vorteil liegt insbesondere hierin, dass weniger Messpunkte aufgenommen werden müssen, um einen exakten Fokusort zu ermitteln, wodurch die Messgeschwindigkeit erhöht wird oder bei einer hohen Messpunkteanzahl ein sicheres Messergebnis erzielt wird (reproduzierbarer).

Des Weiteren zeichnet sich die Erfindung dadurch aus, dass ein virtuelles 2D-Bild aus den ermittelten maximalen Werten die Kontrastwerte in den einzelnen Bildpunkten (Pixel) derart erzeugt wird, dass jedem Pixel die Amplitude zugeordnet wird, die dem Bild des maximalen Kontrastes entspricht. Jeweils werden während der Autofokusmessung aufgenommene Bilder auf kontrastreiche Pixel durchsucht. Sodann wird ein Bild aus allen kontrastreichen Bereichen (Pixel) der Einzelbilder zusammengesetzt, wodurch eine Verbesserung der Schärfentiefe erzielt wird.

Der nach dem erfindungsgemäßen Verfahren ermittelte dreidimensionale Flächenverlauf kann zur weiteren Auswertung mit dem erfindungsgemäß ermittelten 2D-Bild mit großer Schärfentiefe so überlagert werden, dass eine gemeinsame Auswertung des im Raum gekrümmten 2D-Bilds mit Bildverarbeitungsmethoden möglich wird.

Weitere Einzelheiten Vorteile und Merkmale der Erfindung ergeben sich nicht nur aus den Ansprüchen, den diesen zu entnehmenden Merkmalen -für sich und/oder in Kombination-, sondern auch aus der nachfolgenden Beschreibung von der Zeichnung zu entnehmenden bevorzugten Ausführungsbeispielen.

Es zeigen:

- Fig. 1 eine Prinzipdarstellung zur Erläuterung des erfindungsgemäßen Verfahrens,
- Fig. 2 Fokusortbestimmungen nach dem erfindungsgemäßen Verfahren,
- Fig. 3 eine Kontrastwertkurve,
- Fig. 4 Bestimmung eines Fokusortes unter Zugrundelegung einer eingemessenen Kurve,
- Fig. 5 eine Prinzipdarstellung einer Sensoranordnung zur Bestimmung eines Fokusortes,
- Fig. 6 prinzipielle Verläufe von Kontrastwertkurven ermittelt mit Sensoren der Fig. 5 und
- Fig. 7 eine Prinzipdarstellung eines Koordinatenmessgerätes.

In Fig. 7 ist rein prinzipiell ein Koordinatenmessgerät 10 dargestellt, mit dem hochauflösend die Oberflächengeometrie eines Objektes bestimmt werden soll. Das Koordinatenmessgerät 10 kann einen z. B. aus Granit bestehenden Grundrahmen 12 mit Messtisch 14 aufweisen, auf dem ein nicht dargestelltes Objekt anordbar ist, dessen Oberfläche zu messen ist. Entlang dem Grundrahmen 12 ist ein Portal 16 in Y-Richtung verstellbar. Hierzu sind Säulen oder Ständer 18, 20 gleitend auf dem Grundrahmen 12 abgestützt. Von den Säulen 18, 20 geht eine Traverse aus, entlang der - also in X-Richtung - ein Schlitten 24 verstellbar ist, der seinerseits eine Pinole oder Säule 26 aufnimmt, die in Z-Richtung ver-

stellbar ist. Von der Pinole oder Säule 26 geht ein optischer Sensor 28 wie Laserabstandssensor aus, der zur Ermittlung der Oberflächengeometrie einerseits in X- und Y-Ebene verstellbar und andererseits entlang seiner optischen Achse, also im Ausführungsbeispiel entlang der Z-Achse, verfahrbar ist.

Der Fig. 1 ist rein prinzipiell der optische Sensor 28 zu entnehmen, der ein Objektiv 30 sowie diesem zugeordneten CCD-Chip 32 in der Bildebene des Objektivs 30 angeordnet umfasst. Der CCD-Chip 32 oder auch Kameramatrix genannt weist in Zeilen 34, 36 und Spalten 38, 40 angeordnete lichtempfindliche Pixel 42, 44 auf, um aus den diesen zu entnehmenden Bildinformationen in Form von Grauwertbildern in nachstehend beschriebener Weise die Oberfläche 46 eines Objektes 48 zu messen.

Erfindungsgemäß ist vorgesehen, dass der bei vorgegebener X-Y-Koordinate mittels des optischen Sensors 28 erfasste Messbereich bzw. dessen auf der Kameramatrix 32 abgebildetes Bild in Teilbereiche, sogenannte Fenster unterteilt wird, die durch einen $m \times n$ - Operator - im Ausführungsbeispiel durch einen 3×3 -Operator - vorgegeben ist, der die gesamte Kameramatrix 32 abrastert, wie rein prinzipiell durch die Pfeildarstellungen 52, 54 in den Fig. 1 und 2a symbolisiert wird. Dabei wird für jedes Pixel 42, 44 aus dem 3×3 -Operator der Fokusort ermittelt, und zwar dadurch, dass bei vorgegebener X-Y-Position der optische Sensor 28 bzw. die CCD-Kamera entlang dessen bzw. deren optischer Achse 50, also in Z-Richtung verfahren wird, wobei ein Stapel von Bildern 56, 58, 60 erzeugt wird. Jedes Bild 56, 58, 60 wird von dem entsprechenden $m \times n$ -Operator, also im Ausführungsbeispiel dem 3×3 -Operator abgerastert, um sodann eine Kontrastkurve 62, 64 für jedes Pixel 42, 44 zu bestimmen, wie dies rein prinzipiell der Fig. 2a zu entnehmen ist.

Der Fokusort, also der Arbeitsabstand, bei dem in der Bildebene 38 ein Messpunkt der Oberfläche 46 scharf abgebildet wird, entspricht dem Maximum der Kontrastkurve 62, 64. Da erfindungsgemäß grundsätzlich jedem Pixel 42, 44 ein Fokusort zugeordnet wird, kann sodann die Raumkoordinate jeden Messpunktes und somit das Oberflächenprofil des zu messenden Objekts 48 ermittelt werden, wie die Darstellung der Fig. 2b prinzipiell verdeutlicht. Dabei nutzt man die Kenntnis der X-Y-Koordinate des jeweiligen Pixel 42, 44 in

dem Koordinatenmessgerät 10 sowie den aus den Kontrastkurven 62, 64 ermittelten Fokusort (Z-Koordinate).

Aus den Prinzipdarstellungen der Fig. 1 und 2 ergibt sich des Weiteren, dass die Messpunkte, d. h. die Fokusorte der einzelnen Pixel 42, 44 aus sich überlappenden Auswertebereichen errechnet werden, die durch die Größe des Operators vorgegeben werden.

Aus der Fig. 1 wird gleichfalls ersichtlich, dass im Ausführungsbeispiel die Kontrastwerte von insgesamt 9 Pixel, die mit den Zahlen 1 bis 9 symbolisiert sind, ermittelt und sodann aus diesen ein mittlerer Kontrastwert bestimmt wird, der dem Pixel im Mittelpunkt des Teilbereichs entspricht, also im Ausführungsbeispiel dem Pixel mit der Zahl „5“.

Sind gemäß der Fig. 2 rein prinzipiell ein Stapel von 3 Bildern 56, 58, 60 wiedergegeben, aufgrund der die Kontrastwertkurven 63, 64 ermittelt werden, so können gegebenenfalls auch zwei Ebenen ausreichen. Selbstverständlich kann auch eine größere Anzahl von Ebenen zur Bestimmung der Kontrastwertkurven und damit des Fokusortes ausgewertet werden.

In Fig. 3 ist rein prinzipiell eine Kontrastwertkurve 70 wiedergegeben, in der der Kontrast gegen die Z-Achse aufgetragen ist. Selbstverständlich kann das Höhenprofil eines Objektes auch in einer anderen Richtung als der Z-Achse eines Koordinatenmessgerätes bestimmt werden, und zwar in Abhängigkeit von der Ausrichtung der optischen Achse des zum Einsatz gelangenden optischen Sensors in Bezug auf die Koordinaten des Koordinatenmessgerätes.

Kann erfindungsgemäß ein Stapel mit einer gewünschten Anzahl von Bildern zur Bestimmung der Kontrastkurven und damit der Fokusorte ausgewertet werden, so besteht entsprechend der Fig. 4 die grundsätzliche Möglichkeit, allein einen Stapel mit drei Ebenen bzw. in diesen erfassten Bildern zu nutzen, wobei grundsätzlich pro Verarbeitungspixel ein Fokusort ermittelt wird. Drei Bilder reichen dann aus, wenn eine allgemeine Fokusfunktion des Systems ermittelt wird, wobei der Kontrastverlauf sodann aus der Lage von zwei oder drei Stützpunkten bestimmt wird. Im Ausführungsbeispiel der Fig. 4 sind die Kon-

trastwerte P1, P2 und P3 bei unterschiedlichen Arbeits- bzw. Bildabständen Z' , Z'' und Z''' ermittelt worden. Die im System ermittelte Kontrastwertkurve ist sodann durch die Messpunkte P1, P2 und P3 gelegt worden, um sodann den tatsächlichen Fokusort 74 zu bestimmen (Scheitelpunkt).

Ist durch die Fig. 1 bis 4 erläutert worden, dass Kontrastwertkurven, d. h. die aus dem Stapel von Bildern gemessenen Kontrastwerte durch Abrastern der Grauwerte der Pixel 42, 44 in Abhängigkeit von dem Arbeitsabstand des Objektivs 30 der CCD-Kamera 28 ermittelt, also bei verschiedenen Z-Positionen der Kamera 28 zur Oberfläche 46 des zu messenden Objekts 48, so kann ein diesbezügliches Verstellen entsprechend der Ausführungsform der Fig. 5 und 6 simuliert werden, indem der Sensor 28 durch im Ausführungsbeispiel drei Sensoren 76, 78, 80 ersetzt wird, die zu einem zu messenden Punkt 82 eines Objekts 84 voneinander abweichende Arbeits- bzw. Bildabstände aufweisen. Um den Abstand des Punktes 82 z. B. zu dem Sensor 78 zu ermitteln, der ebenfalls Bestandteil eines Tastkopfes eines nicht dargestellten Koordinatenmessgerätes ist, nutzt man die Kenntnis, dass die abstandsabhängigen Kontrastwerte, also der gesamte Kontrastverlauf in etwa auf einer Parabel liegt. Verändert man folglich den Abstand des Sensors 78 zu dem zu messenden Punkt 82, so ergibt sich in Abhängigkeit der Abbildungsebene zu Arbeits- bzw. Bildebene in dem Sensor 78 ein Kontrastverlauf, der einer Parabel entspricht, die in Fig. 6 mit dem Bezugszeichen 86 versehen ist. Hierzu wird der Strahlengang über ein Objektiv 88 auf die Arbeits- oder Bildebene des Sensors 78, also einer CCD-Matrix gelenkt. Dem Sensor 78 sind erwähnstermaßen die Sensoren 76, 80 zugeordnet, die zu dem zu messenden Punkt 82 einen unterschiedlichen optischen Abstand aufweisen. Dies wird dadurch erreicht, dass der zu dem Sensor 78 führende Strahl 90 über Strahlungsteiler 92, 94 und Umlenkelemente wie Prismen 96, 98 aufgeteilt wird, um so zu den Sensoren 76, 80 zu gelangen, die ihrerseits in Bezug auf ihre Bild- bzw. Arbeitsebenen, also CCD-Matrizes, ebenfalls in unterschiedlichem Abstand zu dem zu messenden Punkt 82 verlaufen. Das Objektiv 88 mit den Umlenkeinrichtungen sowie den Sensoren 76, 78, 80 bildet bevorzugterweise eine Einheit und ist in einem Tastkopf eines Koordinatenmessgerätes integriert.

Um im Ausführungsbeispiel den Fokusort des Punktes 82 mittels des Sensors 78 zu bestimmen, der im Ausführungsbeispiel die Z-Koordinate des Arbeitspunktes 82 vorgibt,

ohne dass der Punkt 82 in der Bildebene des Sensors 78 scharf abgebildet sein muss, wird zunächst der jeweils zu messende Kontrastverlauf in den Sensoren 76, 78, 80 bestimmt, so dass sich Messkurven ergeben, die der Fig. 6 zu entnehmen sind, die Parabel 86 für den Sensor 78 sowie aufgrund der im Vergleich zu dem Sensor 78 in unterschiedlichen optischen Abständen angeordneten Sensoren 76, 80 versetzt verlaufenden Parabeln 100, 102. Dabei ist die Parabel 100 dem Sensor 76 und die Parabel 102 dem Sensor 80 zugeordnet. Dieser abstandsmäßige Versatz der Parabeln 100, 86, 102 ergibt sich aus dem Umstand, dass die Sensoren 76, 78, 80 unterschiedliche Scharfebenen aufweisen, die in Fig. 5 mit den Bezugszeichen 104, 106 und 108 gekennzeichnet sind.

Ist folglich der Tastkopf, der die Sensoren 76, 78, 80 sowie die Optik 88 umfasst, zu dem Punkt 82 derart verstellt, dass sich dieser in der Scharfebene 106 des Sensors 80 befindet, so ergibt sich ein Kontrastwert 110, der dem Scheitelpunkt der Parabel 102 entspricht. Entsprechendes gilt in Bezug auf die Einstellung des Tastkopfes zu den Scharfebenen 104, 108 der Sensoren 78, 76.

Nachdem die Kontrastkurven 86, 100, 102 bestimmt und zueinander in Relation gesetzt sind, ist es nur noch erforderlich, in einem gewünschten Abstand des Tastkopfes zu einem zumessenden Punkt die jeweiligen Kontrastwerte der Sensoren 76, 78, 80 zu bestimmen, um aus diesen sodann unmittelbar den einem Abstand Z entsprechenden Scheitelpunkt des Sensors - im Ausführungsbeispiel des Sensors 78 - zu berechnen, bei dem der zu messende Punkt scharf auf der Arbeits- bzw. Bildebene des Sensors 78 abgebildet ist bzw. wäre, wodurch der Fokusort des zu messenden Punktes 82 bestimmbar ist. Dies wird anhand der Fig. 6 verdeutlicht. Werden in dem Abstand Z_1 die Kontrastwerte des in den Sensoren 76, 78, 80 abgebildeten Messpunktes 82 bestimmt, so ergeben sich Messwerte P_1 , P_2 und P_3 , wobei P_3 der Messwert des Sensors 78 ist. Der Messwert P_1 entspricht dem Kontrastwert, der von dem Sensor 76 und der Messwert P_3 dem Kontrastwert, der von dem Sensor 80 ermittelt worden ist. Da die Relation der Kontrastwertkurven 86, 100, 102 zueinander bekannt ist, ist es nur noch erforderlich, den Messwerten P_1 und P_3 Messwerte auf der Kontrastkurve 86 des Sensors 78 zuzuordnen, so dass sie insgesamt drei Messwerte P' , P'' und P''' ergeben, die auf der abgelegten Messwertkurve des Sensors 78 liegen. Aus diesen Werten lässt sich sodann der gesamte Messwerteverlauf und somit der Scheitelpunkt P_4

ermitteln, dem ein Abstand Z zugeordnet ist, bei dem der Messpunkt 82 scharf auf der Arbeitsebene bzw. Bildebene des Sensors 78 abgebildet ist. Somit lässt sich der Z -Abstand zwischen Messpunkt 82 und Tastkopf und somit der Fokusort ermitteln, ohne dass es eines Verstellens des Tastkopfes zu dem Objekt 84 bedarf. Um pro Pixel der CCD-Sensoren 76, 78, 80 einen Fokusort zu erhalten, wird die jeweilige CCD-Matrix entsprechend der Erläuterungen insbesondere im Zusammenhang mit den Fig. 1 und 2 von einem Bildverarbeitungsoperator gewünschter Größe abgerastert.

Abweichend vom vorbekannten Stand der Technik wird eine Kontrastkurve nicht für den gesamten Bereich einer CCD-Matrix, sondern grundsätzlich für jedes Pixel selbst eine Kontrastkurve ermittelt. Mittels eines Algorithmus lässt man einen Bildverarbeitungsoperator über den Messbereich laufen und simuliert hierdurch eine Vielzahl von kleinen Fenstern. Somit werden die Teilbereiche dem Grunde nach gleichzeitig bei jeder Z -Einstellung des Sensors ausgemessen, wobei jeder Kontrastwert eines Teilbereichs jeweils einem von dem Teilbereich umfassten Pixel zugeordnet wird.

Die erfindungsgemäße Lehre wird jedoch auch dann nicht verlassen, wenn z. B. zwei oder mehr Pixel, die wiederum für sich genommen eine sehr kleine Einheit bilden, einem Kontrastwert zugeordnet werden.

Patentansprüche

Verfahren zur dreidimensionalen Messung einer Oberfläche

1. Verfahren zur dreidimensionalen Messung einer Oberfläche (46) eines Objektes (48, 84) nach dem Autofokusprinzip mittels eines Koordinatenmessgerätes (10), wobei zur Messung ein in einen Messbereich der Oberfläche erfassender optischer Sensor entlang dessen optischer Achse (50) verfahren oder scheinbar verfahren und ein für die Oberfläche charakteristischer Parameter wie Kontrastwert gemessen wird und wobei aus Position des Sensors (28, 78), die einem Fokusort entspricht, und Position zu messenden Messpunktes (82) bzw. diesem zugeordneten Bild in einer senkrecht zu der optischen Achse verlaufenden Ebene die Raumkoordinate des Messpunktes berechnet wird,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Messbereich (32) in Teilbereiche (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) unterteilt wird und der charakteristische Parameter jeden Teilbereichs während des Verfahrens des Sensors (28) entlang seiner optischen Achse gleichzeitig oder im Wesentlichen gleichzeitig bestimmt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass für jede gewünschte Position des optischen Sensors (28) entlang seiner optischen Achse (50) die Teilbereiche (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) in Bezug auf deren charakteristischen Parameter gleichzeitig oder im Wesentlichen gleichzeitig ausgewertet werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet,
dass als Sensor (28, 76, 78, 80) ein CCD-Chip bzw. eine CCD-Kamera verwendet wird.

4. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass als charakteristischer Parameter Kontrastwert des auf den Teilbereich abgebildeten Messpunktes (82) angewählt wird.
5. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass der charakteristische Parameter pro Teilbereich (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9) vorzugsweise geometrischem Mittelpunkt (5) des Teilbereichs zugeordnet wird.
6. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass für jeden Bildverarbeitungspixel der CCD-Chips bzw. CCD-Matrix der CCD-Kamera (28) ein Fokusort ermittelt wird.
7. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass mehrere charakteristische Parameter aus einander überlappenden Teilbereichen gleichzeitig bestimmt werden.
8. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass für jedes Bildverarbeitungspixel (42, 44) ein Kontrastwert pro Bild (56, 58 60) ermittelt und sodann aus durch tatsächlich oder scheinbares Verfahren des optischen Sensors (28) entlang dessen optischer Achse (50) sich ergebendem Bilderstapel pro Pixel ein Fokusort ermittelt wird.
9. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass unter Berücksichtigung koordinatenmessgerätbekannter Position des Pixel in der senkrecht zu der optischen Achse verlaufenden Ebene und Fokusort dieses die Raumkoordinate des Pixel ermittelt wird.

10. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Kontrastwert für jedes Pixel (42, 44) zur Bestimmung des Fokusorts aus einem $m \times n$ – Operator wie 3×3 – Operator über den gesamten Messbereich bzw. der CCD-Matrix (32) der CCD-Kamera (28) ermittelt wird.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass wenige Bilder eines Stapels wie zwei oder drei Bilder ausgewertet und zur Berechnung des Fokusorts die entsprechenden Kontrastwerte in einer vorher eingemesse-
ne Fokusfunktion eingesetzt werden.
12. Verfahren nach vorzugsweise zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass ein virtuelles 2D-Bild aus den ermittelten Maxima der Kontrastwerte derart erzeugt wird, dass jedem Pixel eine Amplitude zugeordnet wird, die dem Bild des maximalen Kontrastes entspricht.
13. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass für jedes Bildverarbeitungspixel der Fokusort durch Anordnung von zumindest zwei, vorzugsweise drei oder mehr optischen Sensoren (76, 78, 80) in Bezug auf den Messpunkt (82) in voneinander abweichenden optischen Abständen jeweiliger Kontrastwert ermittelt und aus diesen Koordinate des Messpunktes auf einer Achse ermittelt wird, die parallel zu der optischen Achse von zumindest einem optischen Sensor verläuft.
14. Verfahren nach vorzugsweise zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Fokusort für den jeweiligen Bildverarbeitungspixel aus Nachbarfokusort unter Hinzuziehung weiterer im Teilbereich (Auswertefenster) liegender Bildverarbeitungspixel berechnet wird.

15. Verfahren nach vorzugsweise zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass zur Berechnung einer allgemeinen Kontrastfunktion einige wie zumindest zwei Kontrastverläufe von Pixeln herangezogen werden und eine allgemeine Fokusfunktion des Systems ermittelt wird, deren Koordinatenlage für jeden Messpunkt sodann jeweils aus zwei oder drei Stützpunkten (Fokusebenen) ermittelt wird.
16. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass während des Verfahrens des optischen Sensors (28) entlang dessen optischer Achse (50) ein Stapel von Bildern (56, 68, 60) ermittelt wird, dass pro Bild für jeden Teilbereich ein charakteristischer Parameter ermittelt wird und dass aus dem Stapel der Bilder bzw. unter Zugrundelegung der jeweiligen charakteristischen Parameter der Fokussort pro Teilbereich ermittelt wird.
17. Verfahren nach vorzugsweise einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass der nach dem erfindungsgemäßen Verfahren ermittelte dreidimensionale Flächenverlauf zur weiteren Auswertung mit dem nach dem erfindungsgemäßen Verfahren entsprechend Anspruch 12 ermittelten 2D-Bild mit großer Schärfentiefe so überlagert wird, dass eine gemeinsame Auswertung des im Raum gekrümmten 2D-Bilds mit Bildverarbeitungsmethoden möglich wird.
18. Verfahren zur dreidimensionalen Messung einer Oberfläche (46) eines Objektes (48, 84) nach dem Autofokusprinzip mittels eines Koordinatenmessgerätes (10), wobei zur Messung ein in einen Messbereich der Oberfläche erfassender optischer Sensor entlang dessen optischer Achse (50) verfahren oder scheinbar verfahren und ein für die Oberfläche charakteristischer Parameter wie Kontrastwert gemessen wird und wobei aus Position des Sensors (28, 78), die einem Fokussort entspricht, und Position zu messenden Messpunktes (82) bzw. diesem zugeordneten Bild in einer senkrecht zu der optischen Achse verlaufenden Ebene die Raumkoordinate des Messpunktes berechnet wird, nach insbesondere zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,
dass als Sensor eine CCD-Kamera verwendet wird, deren CCD-Matrix in sich überlappende Teilbereiche unterteilt werden, die von einem $n \times m$ – Operator zur Ermittlung von einem Kontrastwert für jeden Teilbereich abgerastert werden, dass während des Verfahrens der CCD-Kamera entlang deren optischer Achse ein Stapel von Bildern generiert wird und dass aus den Kontrastwerten von Teilbereich mit gleichen Koordinaten in der senkrecht zu der optischen Achse verlaufenden Ebene eine Kontrastwertkurve mit einem Maxima ermittelt wird, das Fokusort des Messpunktes entspricht.

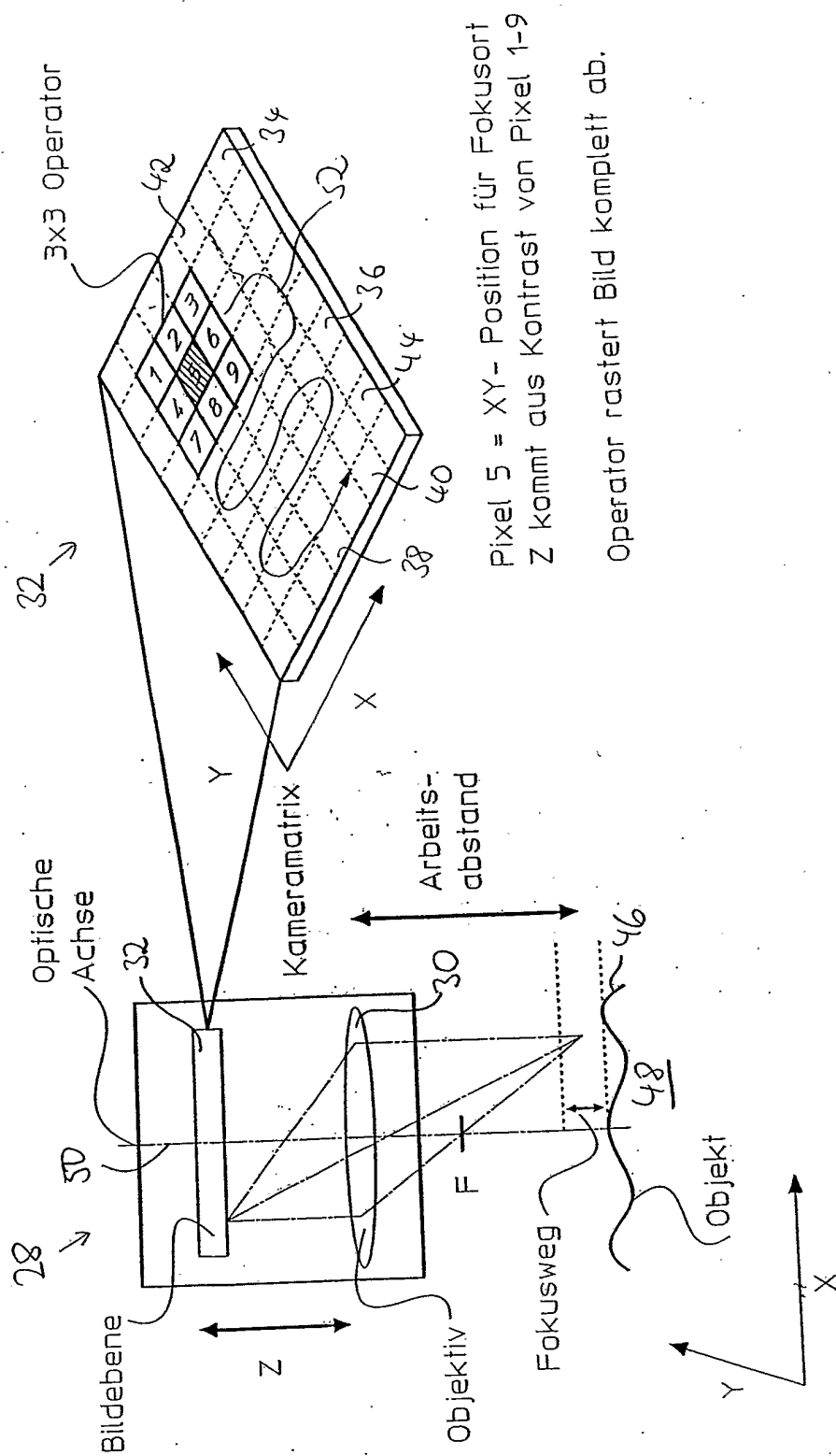


Fig. 1

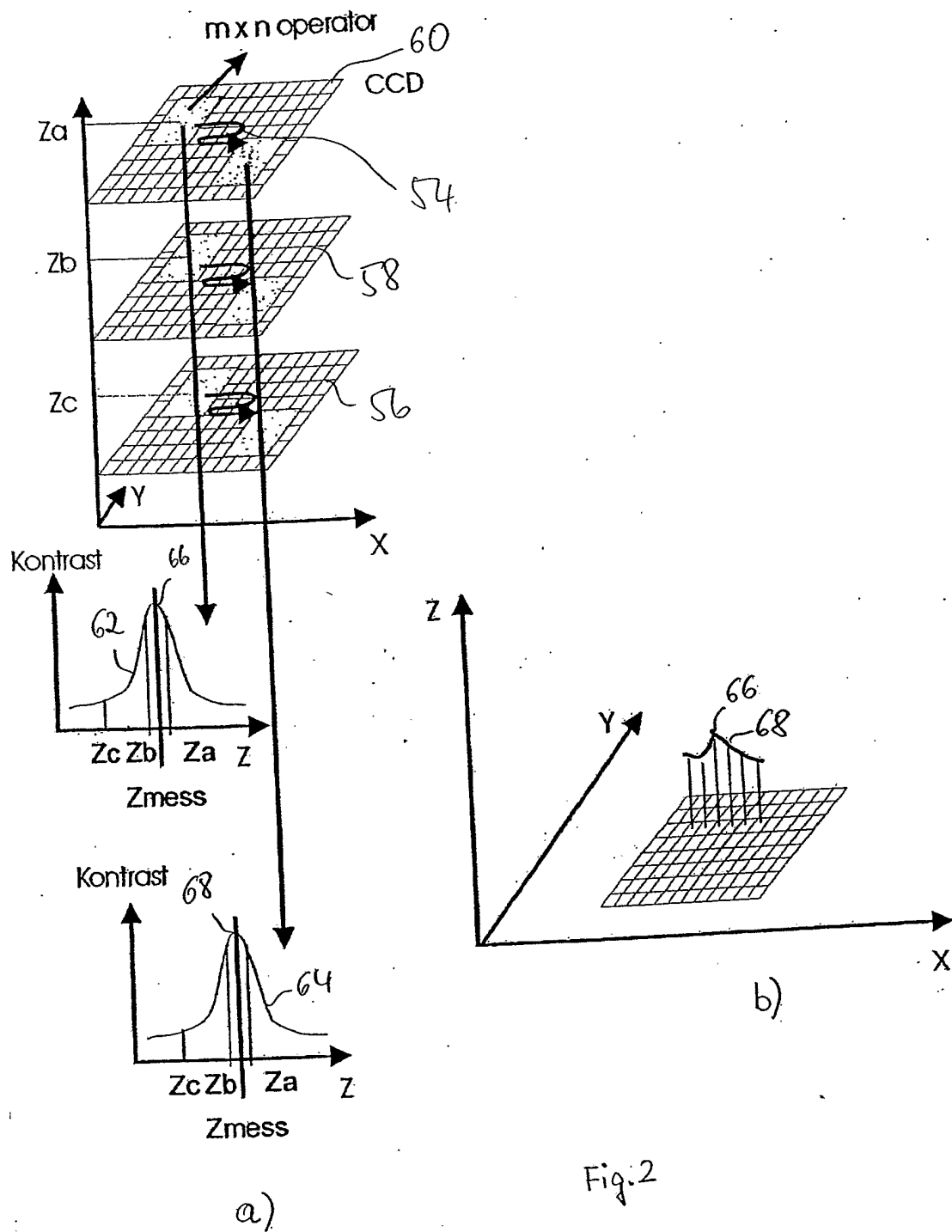


Fig. 2

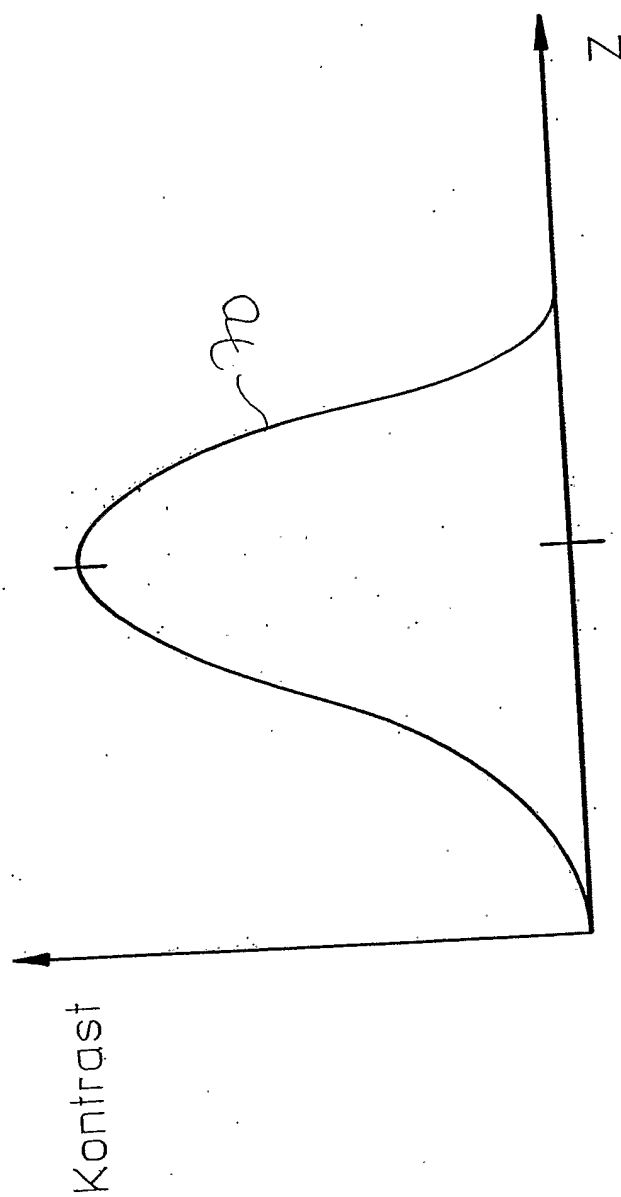


Fig. 3

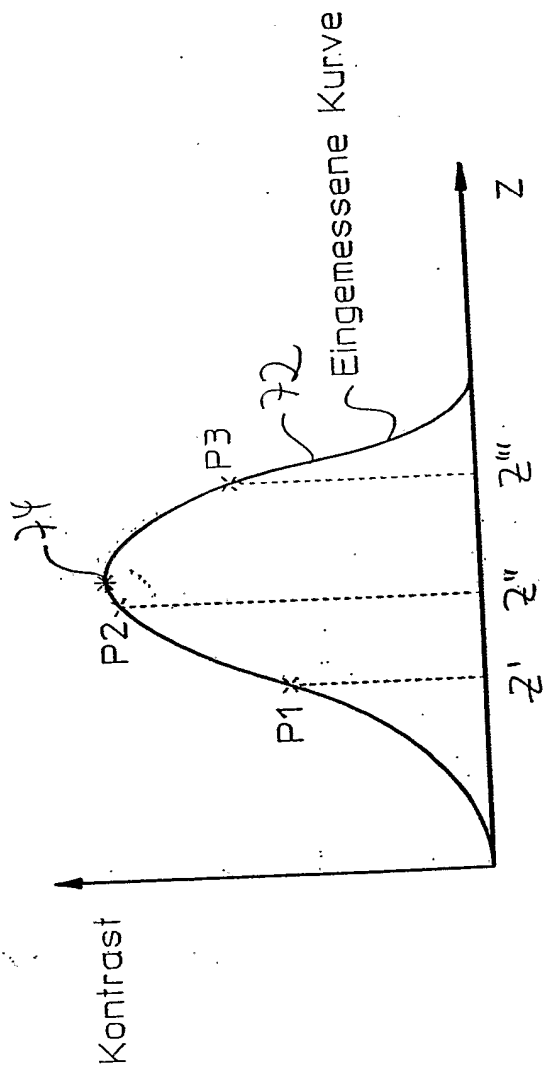


Fig. 4

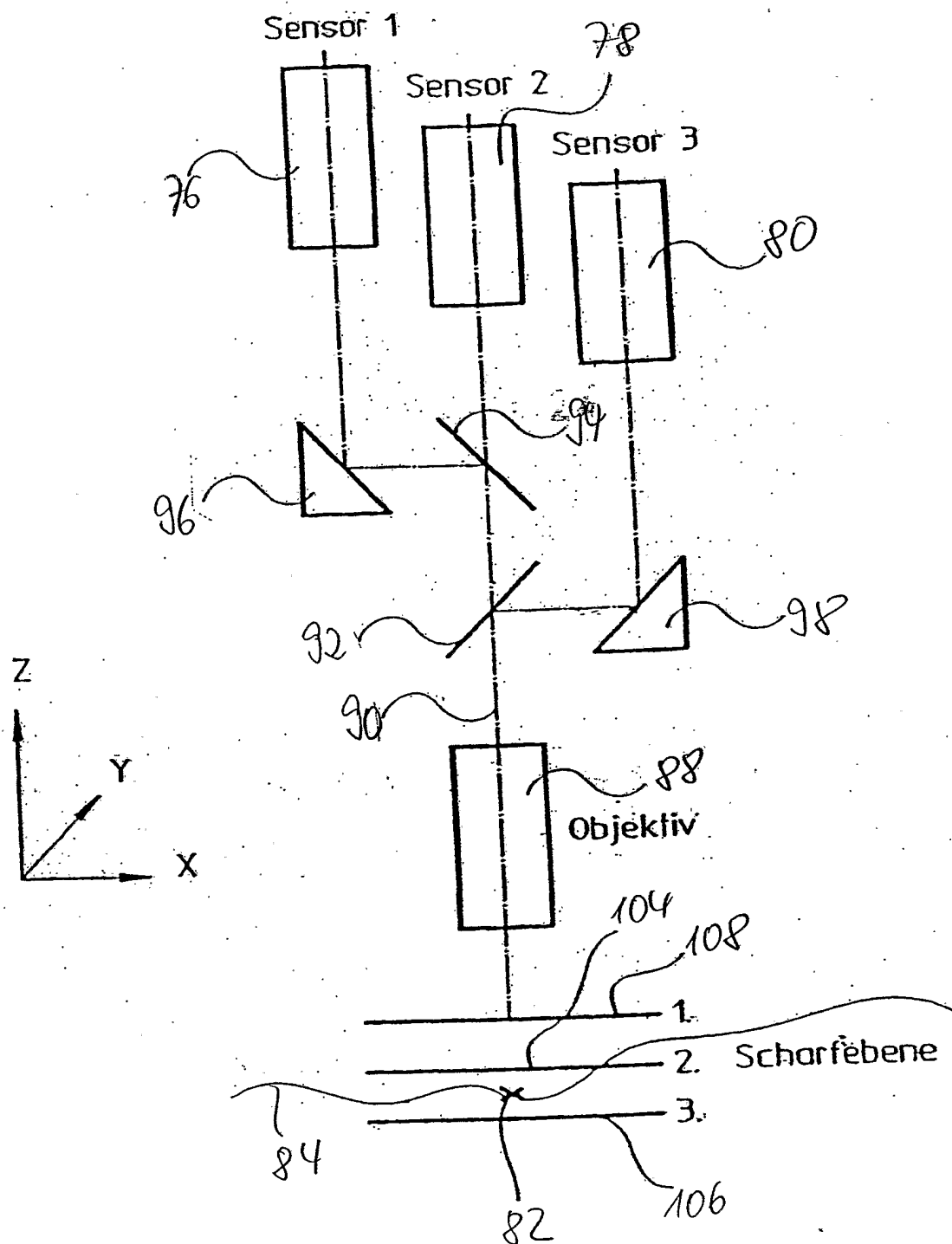


Fig. 5

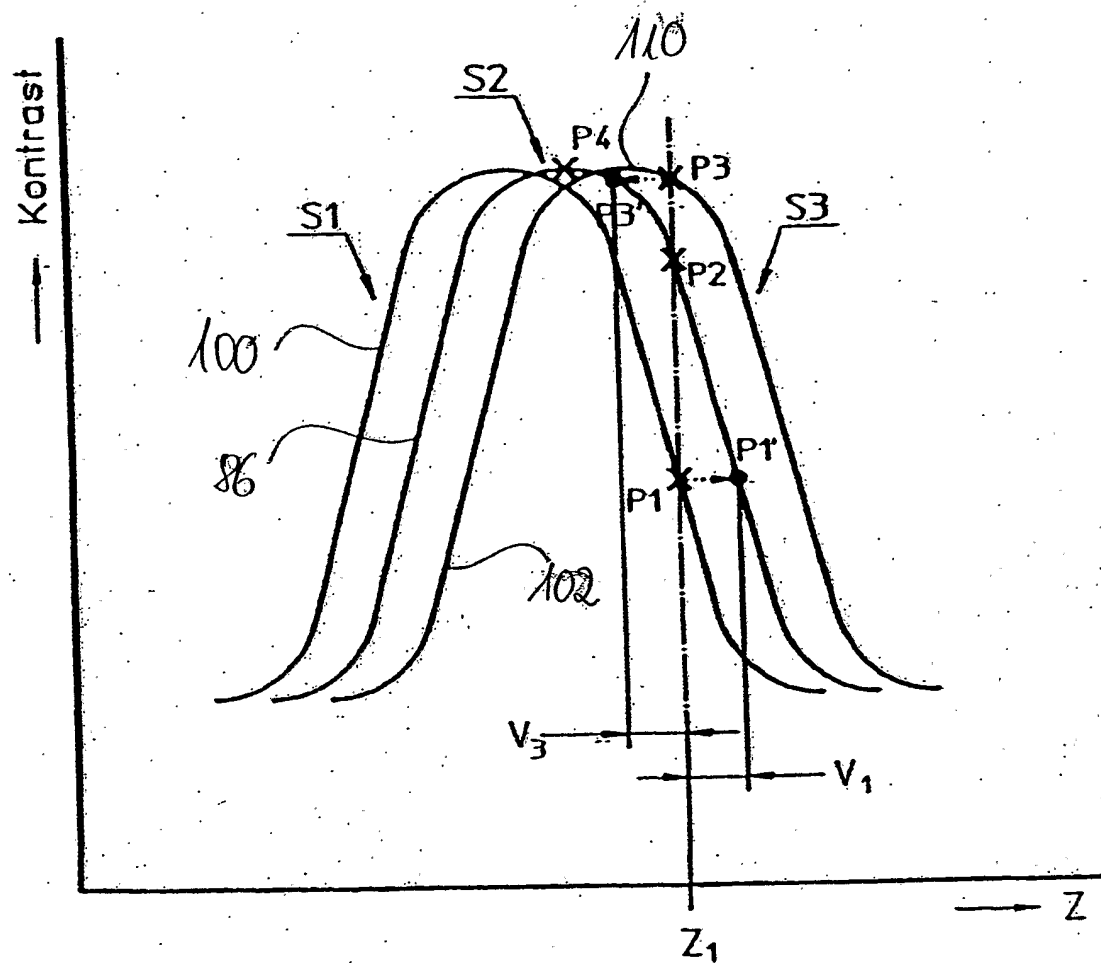


Fig. 6

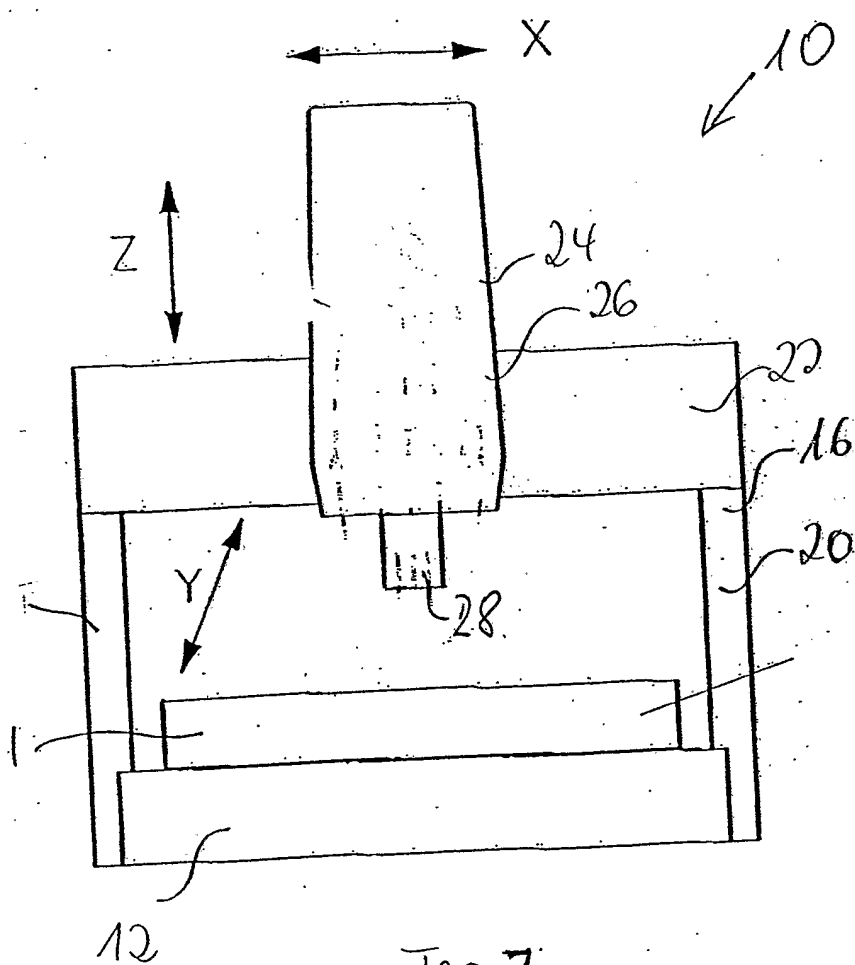


Fig. 7