

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Autofokus-Verfahren, also ein Verfahren zum automatisierten Auffinden einer momentanen Best-Fokusebene. Bei diesem Verfahren wird durch Verstimmen einer Fokulinse eines optischen Abbildungssystems die Lage einer Fokusebene des optischen Abbildungssystems innerhalb eines Scan-Bereichs entlang einer optischen z-Achse verschoben. Dieses Verschieben der Fokusebene wird auch als z-Scan bezeichnet. Das Verstimmen der Fokulinse kann beispielsweise durch Verschieben der Fokulinse und/oder durch Durchstimmen der Fokulinse (sofern diese durchstimmbare ausgestaltet ist) erzielt werden.

[0002] Ferner betrifft die Erfindung ein zugehöriges optisches Abbildungssystem, mit dem sich ein solches Autofokus-Verfahren umsetzen lässt. Dieses Abbildungssystem kann insbesondere zum Visualisieren eines Objekts während eines medizinischen Eingriffs eingesetzt werden. Das Abbildungssystem umfasst hierzu eine Zoom-Optik, die mittels eines Zoom-Aktuators verstellbar ist, um ein optisches Zoomlevel anzupassen; ferner eine Fokulinse, die mittels eines Fokus-Aktuators verstimmbar ist (also verschiebbar und/oder durchstimmbare), um die Lage einer Fokusebene entlang einer optischen z-Achse anzupassen; einen Bildsensor zum Aufzeichnen von Bilddaten; und schließlich einen Controller zum Ansteuern des Fokus-Aktuators und/oder des Zoom-Aktuators.

[0003] Als Autofokus (AF) wird generell die Technik einer Kamera oder auch anderer optischer Geräte bezeichnet, automatisch auf ein zu beobachtendes Objekt scharf zu stellen. Hierbei unterscheidet man zwischen aktivem Autofokus, der auch ohne Umgebungslicht funktioniert, und passivem Autofokus, bei dem nur das vom Objekt abgestrahlte oder reflektierte Licht zur Fokussierung verwendet wird. Es ist zudem bekannt, bei passiven Autofokussystemen beispielsweise durch Phasenvergleich oder durch eine Kontrastmessung, insbesondere eine Kantenkontrastmessung, einzelne Fokusebenen mit Blick auf die jeweilige Bildqualität zu bewerten und so die Lage der Best-Fokusebene aufzufinden. Die Best-Fokusebene entspricht dabei gerade derjenigen Ebene, die der Ebene, in der das Objekt liegt, am nächsten kommt.

[0004] Autofokus-Verfahren wie eingangs beschrieben sind bekannt und werden vielfältig eingesetzt, insbesondere in medizinischen Visualisierungssystemen wie etwa Endoskopen, Exoskopen oder Mikroskopen. Insbesondere bei medizinischen Mikroskop-Anwendungen in denen ein variabler optischer Zoom verwendet wird und sich ein Arbeitsabstand (definiert als der Abstand zwischen der letzten Front-

linse des vom Mikroskop ausgebildeten Objektivs und dem mit dem Mikroskop beobachteten Objekt) verändert, ändert sich je nach Einstellung des optischen Zooms und des aktuellen Arbeitsabstands auch die Schärfentiefe. Unter Schärfentiefe wird allgemein die Ausdehnung des Bereichs vor und hinter der Fokusebene (manchmal auch als Schärfenebene bezeichnet) verstanden, in dem ein Punkt noch hinreichend scharf abgebildet wird. Die Fokusebene ist dabei diejenige Ebene im Objektraum, deren Punkte von dem Abbildungssystem als scharfe Punkte auf der Bildebene (was typischerweise der Ebene des Bildsensors entspricht) im Bildraum abgebildet werden. Punkte außerhalb der Fokusebene werden hingegen als Kreise bzw. Ellipsen auf die Bildebene/den Bildsensor abgebildet, also mit einer gewissen Unschärfe. Bis zu einer gewissen Größe erscheinen diese Zerstreuungskreise jedoch noch annähernd punktförmig, was zur Folge hat, dass auch Objekte, die außerhalb der Fokusebene liegen, also im Objektraum vor oder hinter der Fokusebene, noch hinreichend scharf abgebildet werden. Mit anderen Worten bestimmt die Schärfentiefe somit den Bereich an möglichen Fokusebenen, in denen ein Bild noch als scharf wahrgenommen wird bzw. von einem Bildsensor mit ausreichender Bildqualität wiedergegeben/aufgezeichnet werden kann.

[0005] Bei vorbekannten Autofokus-Verfahren, beispielsweise kontrastbasierten Autofokus-Verfahren, wird typischerweise die örtliche Auflösung, mit der die einzelnen Fokusebenen abgetastet werden, stets kleiner gewählt als die minimale Schärfentiefe des optischen Systems, welches zur Bildgebung verwendet wird. Hierbei hängt die Schärfentiefe wie bereits erwähnt vom Arbeitsabstand und vom eingestellten optischen Zoom ab. Eine solch kleine Schrittweite bei der Abtastung der Fokusebenen bietet den Vorteil, dass die jeweilige Lage derjenigen Fokusebene, die für ein bestimmtes Objekt, welches sich in einem gegebenen Arbeitsabstand zur Frontlinse befindet, eine optimale Bildqualität liefert, mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden kann. Diese Fokusebene wird im Folgenden als Best-Fokusebene bezeichnet.

[0006] Andererseits führt aber die beschriebene Abtastung der möglichen Fokusebenen mit kleinstmöglicher Schrittweite dazu, dass das Autofokus-Verfahren zeitlich ineffizient bzw. langsam wird, weil oftmals eine Überabtastung stattfindet. Wird hingegen die räumliche Auflösung bei der Abtastung der unterschiedlichen Fokusebenen verringert, um so das Verfahren zu beschleunigen, besteht die Gefahr, dass die Best-Fokusebene, insbesondere bei momentan geringer Schärfentiefe, nicht mehr mit ausreichender Genauigkeit aufgefunden werden kann.

[0007] Unter Zoomfaktor wird in solchen Systemen typischerweise das Verhältnis zwischen der längsten und der kürzesten Zoom-Brennweite verstanden, die mithilfe eines Zoomobjektivs einstellbar ist.

[0008] Unter Zoom-Level wird hingegen verstanden, welche Zoom-Brennweite momentan eingestellt ist. Hierbei gibt es Systeme, die einen Stufenzoom realisieren oder aber der Zoom wird stufenlos variiert. Bei kurzer Zoom-Brennweite (Weitwinkel) besteht somit ein kleines Zoom-Level, sodass dann ein vergleichsweise großer Bildausschnitt abgebildet wird und eine nur kleine Vergrößerung erzielt wird. Bei großer Zoom-Brennweite (Tele) wird hingegen ein hohes Zoom-Level erreicht, sodass dann nur ein kleiner Bildausschnitt abgebildet wird und somit eine hohe Vergrößerung erzielt wird. Mit anderen Worten bewirkt somit die Änderung des Zooms stets eine Änderung der optischen Vergrößerung. Hierbei gibt es Zoom-Objektive, die bei Änderung der Zoom-Brennweite die Lage der Bildebene (Fokusebene) nicht verändern. In diesem Fall bleibt das Bild scharf, aber es wird der Bildausschnitt verändert, der abgebildet wird, sodass sich die Bildvergrößerung ändert. Bei einem Zoom-in (Erhöhung des Zoom-Levels/der Zoom-Brennweite) wird somit die Bildvergrößerung erhöht, sodass eine Nahansicht des Objekts erhalten wird. Bei Zoom-out (Verringerung des Zoom-Levels/der Zoom-Brennweite und damit der Bildvergrößerung) wird entsprechend eine Fernansicht des Objekts geliefert. Hierbei kann es je nach verwendeter Zoom-Optik auch zu einer Verschiebung der Fokusebene kommen (bei Veränderung des Zoom-Levels), was aber relativ einfach durch Nachfokussieren mithilfe einer Fokuslinse behoben werden kann.

[0009] Vor diesem Hintergrund liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein verbessertes Autofokus-Verfahren bereitzustellen als auch hierfür geeignete optische Abbildungssysteme zur Verfügung zu stellen, die sowohl eine möglichst genaue Bestimmung der Best-Fokusebene ermöglichen, wobei auch die Geschwindigkeit bei der Bestimmung erhöht werden soll.

[0010] Zur Lösung dieser Aufgabe sind erfindungsgemäß die Merkmale des unabhängigen Verfahrensanspruchs vorgesehen. Insbesondere wird somit erfindungsgemäß zur Lösung der Aufgabe bei einem Verfahren der eingangs beschriebenen Art vorgeschlagen, dass wenigstens ein Parameter des z-Scans in Abhängigkeit eines aktuell eingestellten optischen Zoomlevels des Abbildungssystems und/oder in Abhängigkeit eines aktuellen Schätzwerts für einen Arbeitsabstand, der zwischen dem Abbildungssystem und einem mit dem Abbildungssystem visualisierten Objekt besteht, automatisch angepasst wird. Durch die dynamische Anpassung des wenigstens eines Parameters und damit des z-

Scans in Reaktion auf eine Änderung des Zoomlevels oder des Schätzwerts für den Arbeitsabstand kann das Verfahren so stets einen bestmöglich auf die aktuelle Aufnahmesituation angepassten z-Scan ausführen und so das Auffinden der Best-Fokusebene beschleunigen.

[0011] Sobald die Best-Fokusebene mit Hilfe des Autofokus-Verfahrens identifiziert / aufgefunden ist, kann die Fokuslinse so verstimmt werden, dass die Best-Fokusebene auf den Bildsensor abgebildet wird. D.h., die Fokuslinse kann so verstimmt werden, dass die final eingestellte momentane Fokusebene der Best-Fokusebene entspricht. Diese final eingestellte momentane Fokusebene kann dann genutzt werden, um scharfe Bilder des Objekts mit Hilfe des optischen Abbildungssystems (und eines Bildsensors) aufzuzeichnen. Hierbei kann die Best-Fokusebene einer der zuvor abgetasteten Ebenen entsprechen.

[0012] Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Fokuslinse selbstverständlich auch durch eine komplexe Linsengruppe gebildet sein kann; diese Linsengruppe kann auch mehrere verstimmbare Fokuslinsen aufweisen. Beispielsweise kann eine axial verschieblich erste Fokuslinse zur Grobverschiebung der Fokusebene eingesetzt werden und eine zusätzliche durchstimmbare Flüssiglinse zur Feinverschiebung der Fokusebene.

[0013] Es ist aber insbesondere auch möglich, mit Hilfe von Methoden der Interpolation, eine Lage der Best-Fokusebene zu ermitteln, die gerade zwischen zwei während des z-Scans abgetasteten Fokusebenen liegt. Beispielsweise kann aus Stützstellen eines Verlaufs des Bildkontrasts entlang der z-Achse, die mit Hilfe des z-Scans ermittelt wurden, ein Modell des Verlaufs interpoliert werden und so das Maximum des Bildkontrasts und damit die Lage der Best-Fokusebene aufgefunden werden. In einem solchen Fall kann es vorkommen, dass die final durch Verstimmen der Fokuslinse eingestellte Fokusebene (=Best-Fokusebene) keiner der zuvor optisch abgetasteten Fokusebenen entspricht, sondern dass diese zwischen zwei solchen Fokusebenen liegt. Durch einen solchen Interpolationsansatz kann die Ortsauflösung bei der Bestimmung der Best-Fokusebene weiter verbessert werden.

[0014] Das erfindungsgemäße Verfahren kann auch vorsehen, dass die jeweilige momentane Fokusebene, die innerhalb des Scan-Bereichs durch Verstimmen der Fokuslinse eingestellt wird, mit Hilfe eines Bildsensors erfasst und ausgewertet wird. Zur Auswertung der Fokusebene können dabei übliche passive oder auch aktive Autofokus (AF)-Verfahren eingesetzt werden. Beispielsweise kann die jeweilige Fokusebene durch einen Phasenvergleich und/oder durch eine Kontrastmessung, insbesondere eine

Kantenkontrastmessung, ausgewertet werden. Es können auch Bildverarbeitungsalgorithmen eingesetzt werden, die das Objekt in den jeweils aufgenommenen Bildern identifizieren und die Qualität der Wiedergabe des Objekts bewerten. Hierbei kann auch eine künstliche Intelligenz zum Einsatz kommen, zum Beispiel basierend auf Trainingsdatensätzen von Bildern / Objekten.

[0015] Derartige vorbekannte Verfahren erlauben es somit diejenige Fokusebene (=Best-Fokusebene) zu identifizieren, die für das zu visualisierende Objekt die beste Bildqualität liefert, was typischerweise einem hohem Bildkontrast entspricht. Bevorzugt ist es, wenn die Lage der Best-Fokusebene anhand einer Bildauswertung der mittels des z-Scans optisch abgetasteten Fokusebenen ermittelt wird. Beispielsweise kann mittels Bildauswertung diejenige der abgetasteten Fokusebenen als Best-Fokusebene identifiziert werden, die einen Maximalwert in Bezug auf einen Bildkontrast, insbesondere einen Kantenkontrast, und/oder in Bezug auf mittels einer Fourier-Transformation ermittelten Ortsfrequenzen liefert.

[0016] Bei Verwendung eines aktiven Autofokus (AF) kann der Arbeitsabstand beispielsweise mit einer Entfernungsmessung (etwa mittels Ultraschall) abgeschätzt werden. Zudem ist es möglich, das Objekt aktiv zu beleuchten, zum Beispiel mit einem, insbesondere nicht-sichtbaren, AF-Hilfslicht.

[0017] Die Fokusebene kann beispielsweise innerhalb des Scan-Bereichs verschoben werden, in dem die Fokulinse entlang der optischen Achse des Abbildungssystems verschoben wird. Ist die Fokulinse hingegen als durchstimmbare Linse ausgestaltet (z.B. als durchstimmbare Membran- oder Flüssiglinse), kann die Fokusebene auch dadurch verschoben werden, dass die Fokulinse durchgestimmt wird. Diese Ansätze können selbstverständlich auch miteinander kombiniert werden.

[0018] Erfindungsgemäß kann die oben erwähnte Aufgabe auch durch weitere vorteilhafte Ausführungen gemäß den Unteransprüchen gelöst werden, die im Folgenden erläutert werden sollen:

Der wenigstens eine Parameter kann beispielsweise eine Länge des erwähnten Scan-Bereichs bzw. des z-Scans und/oder eine Anzahl an mit dem z-Scan optisch abgetasteten Fokusebenen (innerhalb des Scanbereichs) und/oder eine räumliche Abtastfrequenz des z-Scans (d.h. wie viele Fokusebenen /mm werden abgetastet; Beispiel: eine räumliche Abtastfrequenz von 10 Fokusebenen / 4 mm) und/oder eine Verstellgeschwindigkeit der Fokulinse und/oder ein optisches Zoomlevel des Abbildungssystems, welches während des z-Scans verwendet wird, umfassen. Je nach Situation können dabei alle diese Parameter (Scan-

Länge / # Fokusebenen / Abtastfrequenz / Verstellgeschwindigkeit / Zoomlevel) gleichzeitig angepasst werden oder aber es können nur einer oder einzelne dieser Parameter zu einem bestimmten Zeitpunkt angepasst werden. Hierbei können auch gegenseitige Abhängigkeiten bestehen: Wird der Bildsensor beispielsweise stets mit einer konstanten Bildfrequenz (Anzahl aufgezeichnete Bilder / sec) ausgelesen aber die Verstellgeschwindigkeit der Fokulinse reduziert, so erhöht sich automatisch die räumliche Abtastfrequenz und ggf. auch die Anzahl an abgetasteten Fokusebenen innerhalb einer bestimmten Scan-Länge, weil nun mehr Bilder für eine bestimmte Verstellstrecke der Fokulinse (und damit für eine zugehörige bestimmte optisch abgetastete Scan-Länge in mm) aufgezeichnet werden, d.h. die räumlichen Abstände der Fokusebenen, die zu den jeweiligen Bildern (im Mittel) korrespondieren, verkürzen sich.

[0019] Selbstverständlich ist es auch möglich, ein erfindungsgemäßes Verfahren ausschließlich nur durch Anpassung eines dieser Parameter zu implementieren. Wie im Folgenden noch im Detail zu zeigen sein wird, kann durch solche Maßnahmen das Auffinden der Best-Fokusebene erheblich beschleunigt werden und auch die Genauigkeit in der Bestimmung der Best-Fokusebene kann verbessert werden.

[0020] Da die Länge des z-Scans variieren kann, aber es oftmals ausreicht, den z-Scan innerhalb einer maximal verfügbaren Scan-Zeit auszuführen, kann insbesondere vorgesehen sein, dass die räumliche Abtastfrequenz erhöht wird, sobald die Länge des Scan-Bereichs verkürzt wird. Dies kann insbesondere so ausgestaltet werden, dass die Gesamtzeit, die zur Durchführung des z-Scans jeweils benötigt wird (wobei diese Gesamtzeit grundsätzlich durch die maximal mögliche Abtastfrequenz des verwendeten Bildsensors sowie der maximalen Verstellgeschwindigkeit der Fokulinse begrenzt wird) konstant gehalten wird. Dadurch kann eine vorgegebene maximale Gesamtzeit für den z-Scan, die zur Verfügung steht, jeweils optimal ausgenutzt werden (entweder für einen vergleichsweise langen z-Scan oder aber für einen vergleichsweise hochauflösenden z-Scan).

[0021] Durch die von der Erfindung vorgeschlagene Anpassungen kann somit entweder die Schärfentiefe aktiv angepasst werden (durch Änderung des Zoomlevels) und/oder es kann eine momentane Änderung der Schärfentiefe kompensiert werden, indem eine entsprechende Anpassung des z-Scans erfolgt (Anpassung von Abtastfrequenz und/oder Länge und/oder Anzahl an abgetasteten Fokusebenen).

[0022] Beispielsweise ist es besonders vorteilhaft, wenn die Anpassung der Länge des Scanbereichs und/oder der Anzahl an abgetasteten Fokusebenen innerhalb des Scanbereichs und/oder der Abtastfrequenz und/oder des optischen Zooms des Abbildungssystems während des z-Scans (jeweils) in Abhängigkeit eines aktuell eingestellten optischen Zoom-Levels des Abbildungssystems erfolgt und/oder in Abhängigkeit eines aktuellen Schätzwerts für einen Arbeitsabstand, der zwischen dem Abbildungssystem und einem mit dem Abbildungssystem visualisierten Objekts besteht. Mit anderen Worten kann somit die Anpassung der Länge des Scanbereichs und/oder der Anzahl an abgetasteten Fokusebenen und/oder der Abtastfrequenz und/oder des während des z-Scans verwendeten Zoom-Levels in Reaktion auf ein momentan (also zuvor vom Benutzer) eingestelltes Zoom-Level und/oder in Reaktion auf die Änderung eines (aktuellen) Schätzwerts für den Arbeitsabstand (insbesondere jeweils) angepasst werden.

[0023] Durch solche dynamischen Anpassungen kann sich das Verfahren selbsttätig auf eine aktuelle Aufnahmesituation anpassen und die Parameter des Verfahrens so wählen, dass die Best-Fokusebene schnell und mit hoher Genauigkeit aufgefunden werden kann. Bei einem solchen Ansatz ist es besonders vorzuziehen, wenn der Schätzwert für den Arbeitsabstand mithilfe eines zusätzlichen Sensors, beispielsweise eines berührungslosen Abstandssensors, also insbesondere einem Ultraschallsensor und/oder auf Basis einer zusätzlichen Ortsinformation mit Bezug auf eine momentane räumliche Lage des Abbildungssystems und/oder mithilfe einer zusätzlichen Kamera ermittelt wird. Denn alle diese Ansätze erlauben es, eine ausreichende Genauigkeit bei der Bestimmung des Arbeitsabstands zu ermöglichen und jeweils bei Änderung des Arbeitsabstands schnell einen aktuellen Schätzwert verlässlich zu liefern, auf Basis dessen sich das Verfahren anpassen kann. Dadurch kann der Schätzwert für den Arbeitsabstand in sinnvoller Weise (insbesondere mit ausreichender hoher Geschwindigkeit) dazu verwendet werden, die beschriebenen Anpassungen des z-Scans vorzunehmen. Dadurch kann für beliebige Arbeitsabstände jeweils ein optimal angepasstes Autofokus-Verfahren durchgeführt werden.

[0024] Durch diesen Ansatz kann insbesondere erreicht werden, dass immer nur eine notwendige Mindestanzahl an abgetasteten Fokusebenen innerhalb eines Scans zum Auffinden der Best-Fokusebene erfasst werden, was das Auffinden beschleunigt. Ohne Anpassung der Länge des Scanbereichs und/oder der Anzahl an abgetasteten Fokusebenen (innerhalb eines durchgeführten z-Scans innerhalb des Scan-Bereichs), wie hier vorgeschlagen, wird in vielen Fällen, nämlich dann, wenn die Schärfentiefe aktuell sehr klein ist, ein unnötig großer Scan-

Bereich durchfahren bzw. es werden unnötig viele Fokusebenen erfasst, was den Autofokus verlangsamt, d.h. die Zeit bis zum Auffinden der Best-Fokusebene verlängert sich entsprechend. Dies wird durch das erfindungsgemäße Verfahren wirksam vermieden.

[0025] Der momentane Schätzwert für den Arbeitsabstand kann beispielsweise aus einer 3D-Tiefenkarte ermittelt werden, die mit Hilfe der zusätzlichen Kamera ermittelt worden ist. Oder beispielsweise aus einem Steuersignal, mit dem ein Roboterarm verfahren wird, der das optische Abbildungssystem trägt und somit eine zusätzliche Ortsinformation mit Bezug auf eine momentane räumliche Lage des Abbildungssystems liefert.

[0026] Nimmt das optische Zoom-Level zu, etwa weil der Benutzer heranzoomt, so kann die Länge des Scan-Bereichs verkleinert werden. Alternativ oder ergänzend kann auch die Anzahl an abgetasteten Fokusebenen innerhalb des Scan-Bereichs reduziert werden. Hierdurch wird berücksichtigt, dass bei Zunahme des optischen Zoomlevels (=zoom-in) die Schärfentiefe abnimmt, was eine höhere z-Auflösung erfordert. Beispielsweise wird bei Beibehaltung einer konstanten Schrittweite die Verkürzung des Scan-Bereichs automatisch zu einer geringen Anzahl an abgetasteten Fokusebenen führen, was das Verfahren beschleunigt. In beiden Fällen kann das Auffinden der Best-Fokus-Ebene beschleunigt werden, weil die notwendige Länge des Scan-Bereichs und/oder die Anzahl an abgetasteten Fokusebenen dynamisch an die momentanen Erfordernisse angepasst wird.

[0027] Nimmt hingegen der Schätzwert für den Arbeitsabstand ab, so kann die Länge des Scan-Bereichs verkleinert werden und/oder es kann die Anzahl an abgetasteten Fokusebenen innerhalb des Scan-Bereichs reduziert werden. Denn auch ein abnehmender Arbeitsabstand wirkt sich so aus, dass die Schärfentiefe abnimmt.

[0028] Eine mögliche Ausgestaltung des zuvor beschriebenen Autofokus-Verfahrens sieht vor, dass der Scan-Bereich schrittweise durchfahren wird (diskontinuierlicher z-Scan). Hierzu kann die Lage der Fokusebene schrittweise in einer Schrittweite verschoben werden. Dies kann beispielsweise dadurch erreicht werden, dass die Fokulinse um eine entsprechende Verfahrstrecke verfahren wird oder um einen gewissen Betrag durchgestimmt wird. Besonders vorteilhaft ist es nun, wenn dabei die Schrittweite in Abhängigkeit des momentan eingestellten optischen Zoom-Levels und/oder des besagten Schätzwerts für den Arbeitsabstand angepasst wird.

[0029] Sinnvoll ist es etwa, wenn bei Zunahme des Zoom-Levels und damit einhergehender zunehmender Bildvergrößerung und/oder bei Abnahme des Schätzwerts für den Arbeitsabstand die Schrittweite jeweils reduziert wird. // Denn bei Erhöhung des Zoomlevels (=zoom-in), verringert sich die Schärfentiefe (DOF). Die verringerte Schrittweite führt dann zu einer höheren z-Auflösung auf beim Auffinden der Best-Fokusebene. Gleichermaßen wird die Schärfentiefe (DOF) abnehmen, wenn sich der Arbeitsabstand verringert. D.h. auch in diesem Fall wird eine höhere z-Auflösung benötigt, was durch die verringerte Schrittweite ermöglicht wird.

[0030] Durch den obigen Ansatz kann insbesondere vermieden werden, dass die Schrittweite zu groß gewählt wird, sodass die Best-Fokus-Ebene nicht mit ausreichender Genauigkeit aufgefunden werden kann, und andererseits, dass übermäßig viele Fokusebenen (Stützstellen) abgefahren und erfasst werden müssen, um die Lage der die Best-Fokus-Ebene zu ermitteln.

[0031] Eine zum schrittweisen Abtasten der Fokusebenen alternative Ausgestaltung des Verfahrens sieht vor, dass der Scan-Bereich kontinuierlich durchfahren wird. Dies kann beispielsweise dadurch geschehen, dass die Lage der Fokusebene kontinuierlich innerhalb des Scan-Bereichs verschoben wird (kontinuierlicher z-Scan). Es versteht sich, dass hierzu die besagte Fokulinse kontinuierlich verschoben bzw. kontinuierlich durchgestimmt werden kann. Bei einem solchen Vorgehen kann also die Fokulinse mit konstanter Verfahrensgeschwindigkeit und/oder kontinuierlich verfahren werden.

[0032] Mit anderen Worten kann somit die Lage der Fokusebene kontinuierlich entlang der z-Achse verschoben werden, was beispielsweise auch durch kontinuierliches Verstimmen der Fokulinse erzielbar sein kann. Um nun eine Beschleunigung des Autofokus-Verfahrens zu erzielen, kann vorgesehen sein, dass eine mittlere Scan-Geschwindigkeit, mit der die Lage der Fokusebene entlang der z-Achse verschoben wird, angepasst wird. Auch diese Anpassung kann bevorzugt in Abhängigkeit eines momentan eingestellten optischen Zoom-Levels und/oder eines Schätzwerts für den Arbeitsabstand erfolgen.

[0033] Besonders bevorzugt ist es hierbei, wenn bei Zunahme des Zoom-Levels und damit einhergehender zunehmender Bildvergrößerung und/oder bei Abnahme des Schätzwerts für den Arbeitsabstand die mittlere Scan-Geschwindigkeit (des z-Scans) reduziert wird.

[0034] Das Reduzieren der Scan-Geschwindigkeit bietet den Vorteil, dass für eine gegebene maximale Bildrate eines Bildsensors, mit dem die Fokusebenen erfasst / abgetastet werden und für eine gegebene

benene Länge des Scan-Bereichs, mehr Abtastungen vorgenommen bzw. eine kleinere effektive Schrittweite realisiert werden kann. Auch hierdurch kann die z-Auflösung erhöht werden.

[0035] Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Geschwindigkeit, mit der die Fokusebene entlang der z-Achse innerhalb des Scan-Bereichs verschoben wird, zunehmen oder abnehmen kann, auch dann, wenn beispielsweise die Fokulinse mit konstanter Geschwindigkeit verfahren wird. Ursächlich hierfür kann eine nicht-lineare Beziehung zwischen der Position der Fokulinse und der Lage der Fokusebene sein. Somit kann sich die Scan-Geschwindigkeit während eines z-Scans beispielsweise beschleunigen, auch wenn die Fokulinse mit konstanter Geschwindigkeit verschoben wird. Zum besseren Vergleich kann daher auf eine mittlere Scan-Geschwindigkeit abgestellt werden, die während des z-Scans erreicht wird. Gleiches gilt auch für ein kontinuierliches Verstimmen der Fokulinse, denn auch hierbei kann sich die Lage der Fokusebene nichtlinear ändern, sodass sich die Scan-Geschwindigkeit, je nach Scan-Richtung (in + oder -z-Richtung) beschleunigen oder verlangsamen kann.

[0036] Bei dem beschriebenen Autofokus-Verfahren kann insbesondere ein Bildsensor eingesetzt werden, mit dem die unterschiedlichen Fokusebenen als Einzelbilder erfasst bzw. abgetastet werden. Dieser Bildsensor kann insbesondere Teil des beschriebenen optischen Abbildungssystems sein. Hierbei kann der Bildsensor insbesondere in einem sogenannten rolling-shutter-Modus betrieben werden. In diesem Fall werden unterschiedliche Bildbereiche der mit dem Bildsensor aufgenommenen Einzelbilder unterschiedlichen z-Positionen entlang der optischen z-Achse entsprechen. Denn das jeweilige Einzelbild wird dann aufgezeichnet, während sich die Lage der Fokusebene ändert. In einem solchen Fall ist es vorzuziehen, wenn ein Auswertebereich innerhalb des jeweiligen Einzelbilds, der zur Bewertung der jeweiligen Fokusebene ausgewertet wird, in Abhängigkeit einer mittleren Scan-Geschwindigkeit und/oder eine Anzahl an zu erfassenden Fokusebenen angepasst wird. Beispielsweise ist es vorteilhaft, wenn der Auswertebereich verkleinert wird, sobald die Scan-Geschwindigkeit erhöht wird. Ferner kann es sinnvoll sein, den Auswertebereich zu verkleinern, wenn die Anzahl an zu erfassenden Fokusebenen erhöht werden soll.

[0037] Bei hoher Scan-Geschwindigkeit, also schnellem Verschieben der Lage der Fokusebene entlang der z-Achse (aufgrund von entsprechend schnellem Verstimmen der Fokulinse), wird sich die Bildschärfe innerhalb eines mit dem Bildsensor aufgezeichneten Einzelbilds (image frame) stark verändern, also eine hohe Variabilität zeigen. Entsprechend muss also der auszuwertende Bildbereich ver-

kleinert werden, um eine ausreichend hohe z-Auflösung zu erreichen. Ist die Scan-Geschwindigkeit hingegen niedriger, so entspricht derselbe Bildbereich einer noch kleineren Schrittweite in z-Richtung, sodass dann ggf. der Bildbereich wieder vergrößert werden kann. Durch eine Verkleinerung des Auswertebereichs wird somit eine genauere Abtastung in z-Richtung ermöglicht, da der verkleinerte Bildbereich einem verkleinerten z-Bereich entlang der optischen Achse entspricht.

[0038] Zum Auffinden der Best-Fokusebene können auch wenigstens zwei z-Scans nacheinander innerhalb des Scan-Bereichs durchgeführt werden. Hierzu kann jeweils die Lage einer aktuellen Fokusebene innerhalb des Scan-Bereichs verschoben werden. Die beiden z-Scans können sich hierbei in ihrer jeweiligen Länge (gemessen in mm) und/oder in einer verwendeten Schrittweite (gemessen in mm) und/oder in einer verwendeten Scan-Geschwindigkeit (gemessen in mm/sec) und/oder in ihrer jeweiligen Lage innerhalb des Scan-Bereichs (z-Koordinate) unterscheiden. In allen diesen Fällen ist es jedoch bevorzugt, wenn sich die beiden z-Scans zumindest teilweise überlappen. Denn in diesem Fall kann eine Information aus dem ersten Scan dazu verwendet werden, den zweiten Scan innerhalb des Scan-Bereichs zu positionieren.

[0039] Für ein schnelles und effektives Auffinden der Lage der Best-Fokusebene ist es hierbei vorzuziehen, wenn die Länge eines ersten Grob-Scans länger und/oder dessen Schrittweite größer und/oder dessen Scangeschwindigkeit höher ist als diejenige Länge/Schrittweite/Scangeschwindigkeit, welche in einem nachfolgenden Fein-Scan angewandt wird.

[0040] Die Länge des jeweiligen z-Scans kann in mm angegeben werden, ebenso wie die jeweilige Schrittweite. Die Scan-Geschwindigkeit mit der sich die Lage der Fokusebene innerhalb des Scan-Bereichs bewegt kann z.B. in mm/sec angegeben werden.

[0041] Ein großer Scan-Bereich in z-Richtung kann beispielsweise mit einer hohen Verfahrensgeschwindigkeit der Fokulinse / einer hohen Scan-Geschwindigkeit einhergehen. Bei gegebener maximaler Bildrate des Bildsensors kann dadurch zwar die Auflösung in z-Richtung begrenzt sein; es kann aber so in kurzer Zeit ein großer Scan-Bereich abgefahren werden.

[0042] Ein kleiner Scan-Bereich in z-Richtung kann beispielsweise mit einer vergleichsweise langsamen Verfahrensgeschwindigkeit der Fokulinse / einer langsamen Scan-Geschwindigkeit einhergehen. Dadurch kann eine hohe Auflösung in z-Richtung erzielt werden. Dies bietet sich an, wenn ein interessanter Bereich zuvor im Grob-Scan identifiziert wurde.

[0043] Durch dieses zweistufige Vorgehen wird also sowohl eine Beschleunigung als auch eine hohe Genauigkeit des Autofokus ermöglicht. Es versteht sich, dass sich dieses Konzept beispielsweise auch auf drei oder mehr Stufen erweitern lässt, sodass also nachfolgend drei oder mehr Scans durchgeführt werden, zum Beispiel mit zunehmend höherer Ortsauflösung in z-Richtung.

[0044] Eine besonders bevorzugte Ausgestaltung sieht vor, dass die wenigstens zwei z-Scans einen Grob-Scan und einen zeitlich nachfolgenden Fein-Scan umfassen. Hierbei kann der Grob-Scan bei einem niedrigeren Zoom-Level und damit bei geringerer Bildvergrößerung erfolgen als der Fein-Scan. Ferner ist es bevorzugt, wenn vor der Durchführung des Grob-Scans zunächst ein minimales Zoom-Level eingestellt wird und/oder wenn der Grob-Scan über einen maximal möglichen Scan-Bereich (der durch Verstimmen der Fokulinse abgetastet werden kann) ausgeführt wird.

[0045] Hierbei kann insbesondere anschließend noch vor der Durchführung des Fein-Scans ein zuletzt von einem Benutzer eingestelltes (also vom Benutzer gewünschtes Zoom-Level) wiederhergestellt werden. Hierdurch kann sichergestellt werden, dass der Fein-Scan in dem Zoomlevel ausgeführt wird, welches nachfolgend für das Aufzeichnen von Bilddaten verwendet werden soll / wird.

[0046] Durch das Durchführen des Grob-Scans bei niedrigem Zoomlevel wird hingegen die Schärfentiefe zunächst erhöht, was dazu führt, dass eine größere Schrittweite ausreichend sein kann, um die Lage der Best-Fokusebene schnell und grob vorzubestimmen (bei reduzierter räumlicher Auflösung).

[0047] Wenn die wenigstens zwei z-Scans einen Grob-Scan und einen zeitlich nachfolgenden Fein-Scan umfassen, kann auch vorgesehen sein, dass eine örtliche z-Auflösung des Fein-Scans höher ist als eine örtliche z-Auflösung des Grob-Scans. Es kann ferner auch vorgesehen sein, dass eine Länge des Grob-Scans größer ist als eine Länge des Fein-Scans. Ferner kann auch vorgesehen sein, dass eine Schrittweite des Grob-Scans größer ist als eine Schrittweite des Fein-Scans. Und schließlich kann auch eine Scan-Geschwindigkeit des Grob-Scans höher sein als eine Scan-Geschwindigkeit des Fein-Scans sein. Bevorzugt ist es ferner, wenn der Fein-Scan in gegenläufiger Scan-Richtung wie der Grob-Scan erfolgt. Das letzte Merkmal hat den Vorteil, dass ein Rückverfahren der Fokusebene an den Ausgangspunkt des Fein-Scans verkürzt wird, was das Verfahren beschleunigt. Dies gilt auch dann, wenn der Fein-Scan innerhalb des Scan-Bereichs des Grob-Scans liegt.

[0048] Zur Lösung der eingangs genannten Aufgabe wird ferner ein optisches Abbildungssystem vorgeschlagen, welches insbesondere wie eingangs beschrieben ausgestaltet sein kann. Dieses optische Abbildungssystem, welches beispielsweise als Exoskop oder Mikroskop oder Endoskop ausgestaltet werden kann, zeichnet sich dadurch aus, dass der Controller dazu eingerichtet ist, einen Autofokus zu implementieren und hierzu den Fokus-Aktuator und/oder den Zoom-Aktuator (jeweils) in Abhängigkeit eines momentan (mithilfe des Zoom-Aktuators zuvor) eingestellten Zoomlevels und/oder in Abhängigkeit eines (aktuellen) Schätzwerts für einen momentanen Arbeitsabstand zwischen dem Abbildungssystem und dem Objekt anzusteuern.

[0049] Je nach Anwendung, kann der Controller also dazu eingerichtet sein, den Zoom-Aktuator kurz vor dem z-Scan anzusteuern, um so das Zoomlevel, welches während des z-Scans verwendet wird, anzupassen. Diese kann etwa in Reaktion auf eine Eingabe eines Benutzers erfolgen, der zuvor das Zoomlevel auf einen Wert angepasst hatte, welcher für den auszuführenden z-Scan suboptimal ist und daher korrigiert werden sollte, um das Auffinden der Best-Fokusebene zu beschleunigen.

[0050] Wie zuvor erläutert, kann hier unter Verstimmen der Fokulinse eine Verschiebung der Fokusebene des Abbildungssystems verstanden werden, entweder durch Verschieben der Fokulinse im Falle einer nicht durchstimmbaren Linse (nontunable lens / fixed focal length lens) oder aber durch Durchstimmen (tuning) der Fokulinse im Falle einer durchstimmbaren Linse (tunable lens), wobei eine durchstimmbare Linse auch zusätzlich noch verschoben werden kann, um die Lage der momentanen Fokusebene anzupassen.

[0051] Durch das Ansteuern des Fokus-Aktuators kann der Controller ein Verfahren gemäß Anspruch 1 implementieren, also beispielsweise die Länge des Scan-Bereichs und/oder eine Anzahl an abgetasteten Fokusebenen innerhalb des Scan-Bereichs in Abhängigkeit des Zoom-Levels oder des Schätzwerts anpassen.

[0052] Hierdurch lässt sich nicht nur die Genauigkeit des Autofokusverfahrens verbessern, sondern das Verfahren lässt sich hierdurch auch beschleunigen, wie bereits zuvor erläutert wurde.

[0053] Ferner ist es auch möglich, dass der Controller zusätzlich oder aber alternativ durch Ansteuern des Zoom-Aktuators das Zoom-Level anpasst, der während des z-Scans verwendet wird. Hierzu ändert der Controller also den optischen Zoom des Abbildungssystems kurz bevor der z-Scan durchgeführt wird, wobei auch dies in Abhängigkeit des Zoom-Levels oder des Schätzwerts für den Arbeitsabstand

erfolgen kann. Wie zuvor mit Bezug auf die Durchführung eines Grob-Scans und eines nachfolgenden Fein-Scans erläutert, kann auch eine solche Anpassung des Zooms dazu führen, dass das Autofokus-Verfahren beschleunigt und/oder in seiner Genauigkeit verbessert wird.

[0054] Mit anderen Worten ist es somit besonders wertvoll, wenn der Controller dazu eingerichtet ist, den Fokus-Aktuator und/oder den Zoom-Aktuator so anzusteuern, dass ein Autofokus-Verfahren gemäß einem der auf ein solches Verfahren gerichteten Ansprüche oder wie hierin beschrieben implementiert wird.

[0055] Schließlich sei noch angemerkt, dass das optische Abbildungssystem als ein medizinisches Visualisierungssystem ausgestaltet sein kann, als insbesondere als ein Endoskop, ein Exoskop oder ein Mikroskop. Hierbei können die Bilddaten, die mit dem Bildsensor erfasst werden, beispielsweise auf einem externen Monitor angezeigt werden, um das mit dem Visualisierungssystem beobachtete Objekt einem Benutzer zu visualisieren. Das Abbildungssystem kann so beispielsweise eine Video-Kamera realisieren.

[0056] Die Erfindung wird nun anhand von Ausführungsbeispielen näher beschrieben, ist aber nicht auf diese Ausführungsbeispiele beschränkt. Weitere Ausführungen der Erfindung können aus der nachfolgenden Beschreibung eines bevorzugten Ausführungsbeispiels in Verbindung mit der allgemeinen Beschreibung, den Ansprüchen sowie den Zeichnungen gewonnen werden.

[0057] Bei der folgenden Beschreibung verschiedener bevorzugter Ausführungsformen der Erfindung erhalten in ihrer Funktion übereinstimmende Elemente auch bei abweichender Gestaltung oder Formgebung übereinstimmende Bezugszahlen.

[0058] Es zeigt:

Fig. 1 eine schematische Skizze einer typischen Anwendungssituation eines erfindungsgemäßen Abbildungssystems, welches zur Beobachtung eines Objekts eingesetzt wird,

Fig. 2 einzelne Komponenten des Abbildungssystems aus **Fig. 1** sowie Aktuatoren und einen Controller,

Fig. 3 eine stark vereinfachte Illustration des Verlaufs eines Bildkontrasts entlang der optischen z-Achse,

Fig. 4 eine Illustration von zwei in unterschiedlichen Situationen durchgeführten z-Scans, um jeweils die Lage einer Best-Fokusebene aufzufinden, und

Fig. 5 eine weitere Illustration eines erfindungsgemäßen Autofokus-Verfahrens, das eine Grob-Scan sowie zwei nachfolgende Feinscans umfasst,

Fig. 6 ein mit einem Bildsensor des in **Fig. 1** gezeigten Abbildungssystems aufgezeichnetes Einzelbild,

Fig. 7 die einzelnen Schritte beim Durchlaufen eines Autofokus-Verfahrens gemäß der Erfindung, welches einen Grob-Scan und einen Fein-Scan umfasst.

[0059] Die **Fig. 1** zeigt ein optisches Abbildungssystem 1 gemäß der Erfindung, welches dazu eingerichtet ist, ein Objekt 3 während eines medizinischen Eingriffs zu visualisieren. Hierzu verfügt das optische Abbildungssystem 1 über eine Zoom-Optik 4, die mittels eines Zoom-Aktuators 5 verstellbar ist, um ein optisches Zoom-Level anzupassen, wie dies in **Fig. 2** illustriert ist, die die inneren Komponenten des optischen Abbildungssystems 1 im Detail zeigt. Darüber hinaus verfügt das Abbildungssystem 1 über eine Fokulinse 6, die mittels eines Fokus-Aktuators 7 verstimmbar ist, um die momentane Lage einer Fokusebene 12 entlang der optischen z-Achse 8 zu verschieben, wie dies in den **Fig. 1** und **Fig. 2** illustriert ist. Zum Ansteuern des Fokus-Aktuators 7 als auch des Zoom-Aktuators 5 ist ein Controller 10 vorgesehen.

[0060] Die gestrichelten vertikalen Linien in **Fig. 1** geben dabei die z-Positionen an (z.B. z_1 bis z_8), in denen die Fokusebene 12 während eines z-Scans 17 positioniert wird. D.h., die jeweilige gestrichelte vertikale Linie in **Fig. 1** gibt die Position derjenigen Ebene an, die - als Folge der Verstimmung der Fokulinse 6 - momentan scharf auf den Bildsensor 9 abgebildet und somit optisch abgetastet wird.

[0061] Wie in **Fig. 2** zu sehen ist, weist die Zoom-Optik 4 zwei, jeweils als Achromaten ausgebildete, Zoom-Linsen 24 auf, wobei die vordere Zoom-Linse mithilfe des Zoom-Aktuators 5 entlang der optischen Achse 8 verschoben werden kann, um so mehr oder weniger stark das Objekt 3 heranzuzoomen. Die optischen Komponenten 4 und 6 sind mit einer Frontlinse 23 in einem kompakten Objektiv 26 zusammengefasst. Die Frontlinse 23 ist als Zerstreuungslinse ausgebildet und ermöglicht so einen vergleichsweise großen Arbeitsabstand 11 zwischen der Frontlinse 23 und dem Objekt 3. Zusammen mit dem in **Fig. 2** illustrierten Bildsensor 9, bilden diese Komponenten 4,6 und 23 eine Video-Kamera 2.

[0062] Wie in **Fig. 1** gezeigt, kann durch Verstimmen der Fokulinse 6 (die entweder als entlang der z-Achse 8 verschiebbare und/oder als durchstimmbare Linse ausgestaltet sein kann) die momentane Fokusebene 12 beispielsweise schrittweise in einer Schritt-

weite 15 von Δz_1 in positiver Scan-Richtung 29 (d.h. in positiver z-Richtung 8 - Vgl. **Fig. 1**) entlang der optischen z-Achse 8 verschoben werden.

[0063] Ist die in **Fig. 2** gezeigte Fokulinse 6 beispielsweise als verschiebbare Linse ausgestaltet und wird diese mit kontinuierlicher Verfahrensgeschwindigkeit entlang der z-Achse 8 verschoben, so wird sich auch die momentane Fokusebene 12 entsprechend kontinuierlich entlang der z-Achse 8 verschieben, wobei diese Bewegung nicht-linear von einer momentanen z-Position der Fokulinse 6 abhängen kann. Durch Auslesen des Bildsensors 9 in regelmäßigen Zeitabständen können so beim kontinuierlichen Verschieben der momentanen Fokusebene 12, jeweils ein ganzer Satz an unterschiedlichen (momentanen) Fokusebenen 12 optisch abgetastet werden, wie durch die gestrichelten vertikalen Linien in **Fig. 1** illustriert ist. Durch Wahl der Verstimmungsgeschwindigkeit der Fokulinse 6 und/oder der Auslesefrequenz des Bildsensors 9 kann somit nicht nur die jeweilige Länge 16 des im jeweiligen z-Scan 17 abgefahrenen Scan-Bereichs 14 angepasst werden, sondern auch die effektive Schrittweite 15, also der Abstand zwischen zwei benachbarten Fokusebenen 12, die im Rahmen eines solchen z-Scans 17 mithilfe des Bildsensors 9 abgetastet werden.

[0064] Die **Fig. 3** zeigt einen stark vereinfachten möglichen Verlauf einer Bildschärfe (vertikale Achse) als Funktion der z-Koordinate. Wie zu erkennen ist, kann es in realen Anwendungssituationen vorkommen, dass neben einem globalen Maximum 22 der Bildschärfe auch weitere lokale Maxima 21 bestehen. Die in **Fig. 1** illustrierte Best-Fokusebene 13 entspricht dabei dem globalen Maximum 22 der Bildschärfe in **Fig. 3**. Das heißt, wenn die Fokulinse 6 so verstimmt ist, dass die momentane Fokusebene 12, wie in **Fig. 1** illustriert, im momentanen Arbeitsabstand 11 des Objekts 3 von der Frontlinse 23 positioniert ist, so wird das Objekt 3 in optimaler Bildschärfe auf den Bildsensor 9 abgebildet. Mit anderen Worten entspricht somit die Best-Fokusebene 13 gerade derjenigen mithilfe des Abbildungssystems 1 abgetasteten Fokusebene 12, die derjenigen Ebene, in der das Objekt 3 liegt, am nächsten kommt. Wie die **Fig. 4** zeigt, kann dabei die Best-Fokusebene 13, die mit einem erfindungsgemäßen Autofokus-Verfahren bestimmt wird, von der tatsächlichen Best-Fokusebene 13* noch etwas abweichen, weil sich letztere nicht mit beliebig hoher z-Auflösung bestimmen lässt.

[0065] Wie im Folgenden erläutert wird, ist der Controller 10 des Abbildungssystems 1 dazu eingerichtet, ein erfindungsgemäßes Autofokus-Verfahren zu implementieren. Hierzu steuert der Controller 10 den Fokus-Aktuator 7 und/oder den Zoom-Aktuator 5 entsprechend an und zwar abhängig davon, welches Zoom-Level gerade mithilfe des Zoom-Aktuators 5

eingestellt ist (etwa in Reaktion auf eine vorhergehende Eingabe des Benutzers des Abbildungssystems 1) und/oder abhängig von einem momentanen Schätzwert für den (tatsächlichen) Arbeitsabstand 11, der zwischen dem Abbildungssystem 1 und dem Objekt 3 momentan besteht.

[0066] Hierbei ist zu berücksichtigen, dass in einer typischen Anwendungssituation, also beispielsweise dann, wenn das Abbildungssystem 1 in Form eines Exoskops ausgestaltet ist und am Ende eines Roboterarms in unterschiedlichen Arbeitsabständen 11 zu dem zu beobachtenden Objekt 3 positioniert wird, sich sowohl das Zoom-Level (je nach Wunsch des Benutzers) als auch der Arbeitsabstand 11 von Situation zu Situation ändern können. Um in solchen Situationen das Auffinden der Best-Fokusebene 13 zu beschleunigen, wählt der Controller 10 sowohl die Länge 16 des Scan-Bereichs 14, innerhalb dessen eine bestimmte Anzahl an Fokusebenen 12 abgetastet wird und damit auch die Anzahl dieser Fokusebenen 12 selbstständig. Ferner passt der Controller 10, je nach Situation, auch das optische Zoom-Level des Abbildungssystems 1 an, welches während des beschriebenen z-Scans 17 verwendet wird, also dann, wenn das Abbildungssystem 1 die unterschiedlichen Fokusebenen 12 abtastet.

[0067] Der Controller 10 prüft hierzu, welches Zoom-Level aktuell eingestellt ist und fragt zudem einen aktuellen Schätzwert ab für den Arbeitsabstand 11 zwischen dem Abbildungssystem 1 und dem Objekt 3. Zur Ermittlung des Schätzwerts für den Arbeitsabstand 11 kann der Controller 10 beispielsweise eine zusätzliche Ortsinformation auswerten, die einen Bezug hat auf die momentane räumliche Lage des Abbildungssystems 1, zum Beispiel eine aktuelle Position eines Roboterarms, an welchem das Abbildungssystem 1 befestigt und mit welchem das Abbildungssystem 1 im Raum, relativ zu dem Objekt 3, verfahren wird. Alternativ oder ergänzend hierzu kann aber das Abbildungssystem 1 auch über einen zusätzlichen Sensor, beispielsweise einen berührungslosen Abstandssensor, verfügen oder zum Beispiel über eine zusätzliche Kamera. Denn auch derartige Vorrichtungen können dazu verwendet werden, jeweils einen aktuellen Schätzwert für den Arbeitsabstand 11 zu ermitteln.

[0068] Beispielsweise zeigt die **Fig. 4**, dass dann, wenn sich das Objekt 3 in einem vergleichweisen kurzen Arbeitsabstand z_1 befindet, die Schärfentiefe (depth of field = DOF) gering ausfällt, während die Schärfentiefe sich vergrößert, wenn sich der Arbeitsabstand vergrößert, etwa auf den Wert z_2 . Entsprechend verkleinert der Controller die Länge 16 des Scan-Bereichs 14 und reduziert damit auch die Anzahl an abgetasteten Fokusebenen 12 innerhalb des Scan-Bereichs 14, wenn der Schätzwert für den Arbeitsabstand 11 abnimmt. Hierbei kann beispiels-

weise die Schrittweite 15 zwischen den einzelnen, abgetasteten Fokusebenen 12 beibehalten werden. Eine Verbesserung der z-Auflösung beim Auffinden der Best-Fokusebene 13 wird aber, wie in **Fig. 4** illustriert, insbesondere dann erreicht, wenn bei Abnahme des Schätzwerts für den Arbeitsabstand 11 (entweder alternativ oder ergänzend zur Anpassung der Länge 16 des Scan-Bereichs 14) die Schrittweite 15 reduziert wird. Dies bietet sich insbesondere dann an, wenn der Scan-Bereich 14 schrittweise durchfahren wird, indem die Lage der jeweiligen Fokusebene 12 schrittweise in einer Schrittweite 15 (beispielsweise Δz_1 wie links in **Fig. 4** illustriert) verschoben wird.

[0069] Darüber hinaus ist es zum Beschleunigen des Auffindens der Best-Fokusebene 13 sinnvoll, das momentan eingestellte optische Zoom-Level des Abbildungssystems 1 zu berücksichtigen. Hat das Zoom-Level beispielsweise zugenommen, d.h. wird gerade eine große Zoom-Brennweite verwendet (Tele), sodass nur ein kleiner Bildausschnitt des Objekts 3 auf den Bildsensor 9 abgebildet wird und entsprechend eine hohe Vergrößerung des Objekts 3 erzielt wird, so macht es Sinn, die Länge 16 des Scan-Bereichs 14 zu verkleinern beziehungsweise die Anzahl an abgetasteten Fokusebenen 12 innerhalb des Scan-Bereichs 14 zu reduzieren. Denn bei hohem optischen Zoom-Level wird, analog wie bei einem vergleichsweise kurzen Arbeitsabstand 11, die Tiefenschärfe abnehmen, sodass in einem kleineren z-Bereich entlang der optischen z-Achse 8 die Best-Fokusebene 13 aufgefunden werden muss.

[0070] Wie bereits erläutert wurde kann der Scan-Bereich 14, der in **Fig. 1** illustriert ist, auch kontinuierlich durchfahren werden, indem die Lage der Fokusebene 12 kontinuierlich innerhalb des Scan-Bereichs 14 verschoben wird, während der Bildsensor 9 ausgelesen wird. Beispielsweise kann hierzu die Fokulinse 6 mit konstanter Verfahrensgeschwindigkeit verfahren werden. Ist die Fokulinse 6 hingegen als durchstimmbare Flüssiglinse ausgestaltet, so kann die Lage der Fokusebene 12 kontinuierlich entlang der z-Achse 8 durch kontinuierliches Durchstimmen der Fokulinse 6 verschoben werden. In solchen Fällen kann die mittlere Scan-Geschwindigkeit, mit der die Lage der Fokusebene 12 entlang der z-Achse 8 verschoben wird, in Abhängigkeit des momentan eingestellten optischen Zoom-Levels und/oder eines Schätzwerts für den (momentanen) Arbeitsabstand 11 angepasst werden. So kann der Controller 10 bei Zunahme des Zoom-Levels und damit einhergehender zunehmender Bildvergrößerung und/oder bei Abnahme des Schätzwerts für den Arbeitsabstand 11 die Scan-Geschwindigkeit reduzieren. Denn sofern der Bildsensor 9 während des kontinuierlich ausgeführten z-Scans 17 mit einer konstanten (zum Beispiel maximalen Bild-) Frequenz ausgelesen wird, so erhöht sich die z-Auflösung bei abnehmen-

der Scan-Geschwindigkeit, weil dann die z-Abstände zwischen den einzelnen Fokusebenen 12, die jeweils beim Auslesen des Bildsensors 9 abgetastet werden, abnehmen. Mit anderen Worten kann also durch Absenken der Scan-Geschwindigkeit für eine gegebene maximale Bildfrequenz des Bildsensors 9 die z-Auflösung bei der Bestimmung der Best-Fokusebene 13 erhöht werden.

[0071] Der Bildsensor 9 kann aber auch beispielsweise in einem rolling-shutter-Modus betrieben werden. In diesem Fall können unterschiedliche Bildbereiche 20a, 20b und 20c von Einzelbildern 19, die mit dem Bildsensor 9 erfasst werden, unterschiedlichen z-Positionen z_1, z_2, z_3 entlang der optischen z-Achse 8 entsprechen, wie dies in **Fig. 6** illustriert ist, wobei dort der Blockpfeil die Richtung des rolling-shutters angibt. In diesem Fall kann ein Auswertebereich 21 innerhalb des jeweiligen Einzelbilds 19, welcher zur Bewertung der jeweiligen Fokusebene 12 von dem Controller 10 ausgewertet wird, beispielsweise in Abhängigkeit einer mittleren Scangeschwindigkeit des z-Scans 17 und/oder einer Anzahl an zu erfassenden Fokusebenen 12 innerhalb des Scan-Bereichs 14 angepasst werden. Beispielsweise macht es Sinn, den Auswertebereich 21 in der vertikalen Richtung in **Fig. 6** zu verkleinern (also in Richtung des rolling-shutters), wenn die Scan-Geschwindigkeit erhöht wird. Denn in diesem Fall wird ein größerer z-Bereich bei der Erfassung eines einzelnen Einzelbilds 19 abgedeckt (d.h. es wird eine größere Scan-Strecke in z-Richtung während der Erfassung des Einzelbilds 19 optisch abgefahren), sodass zur Beibehaltung einer hohen z-Auflösung der Auswertebereich 21 verkleinert werden sollte.

[0072] Wie bereits in **Fig. 1** illustriert, können zum Auffinden der Best-Fokusebene 13 auch wenigstens zwei z-Scans 27, 28 nacheinander innerhalb des Scan-Bereichs 14 ausgeführt werden. Dabei können sich die beiden z-Scans 27, 28 in ihrer jeweiligen Länge 18 und auch der jeweils verwendeten Schrittweite 15 oder beispielsweise auch in der verwendeten Scan-Geschwindigkeit und nicht zuletzt auch in ihrer jeweiligen Lage (zum beispielsweise mittlere z-Position) innerhalb des Scan-Bereichs 14 unterscheiden. Bei dem Beispiel der **Fig. 1** erstreckt sich ein erster grober z-Scan 27 (mit vergleichsweise großem Abstand zwischen den einzelnen optisch abgetasteten Ebenen 12) über die gesamte Länge 16 des Scan-Bereichs 14. Der zeitlich nachfolgend ausgeführte Fein-Scan 28 weist gegenüber dem ersten Grob-Scan 27 eine kleinere Schrittweite $15 \Delta z_2 < \Delta z_1$ auf sowie eine kürzere Länge 18. Zudem wird der Grob-Scan 27 bei einem niedrigeren Zoom-Level und damit bei geringerer Bildvergrößerung ausgeführt als der Fein-Scan 28. Genauer wird zur Durchführung des Grob-Scans 27 zunächst ein minimales Zoom-Level durch den Controller 10 eingestellt, welches mittels der Zoom-Optik 4 einstellbar

ist, und der Grob-Scan 27 wird über den maximal möglichen Scan-Bereich 14 ausgeführt, der durch Verstimmen der Fokuslinse 6 abdeckbar ist. Erst anschließend wird dann zur Durchführung des nachfolgenden Fein-Scans 28 auf ein Zoom-Level zurückgestellt, das zuvor von einem Benutzer ausgewählt worden war, um einen Videobild-Datenstrom aufzunehmen. Aufgrund der kleineren Schrittweite Δz_2 des Fein-Scans 28 ist die mit diesem Scan erzielbare örtliche z-Auflösung höher als diejenige des zuvor durchgeführten Grob-Scans 27. Gleichzeitig wird durch dieses zweistufige Vorgehen das Auffinden der Best-Fokusebene 13 zeitlich beschleunigt, da der Fein-Scan nicht über den gesamten Scan-Bereich 14, sondern nun innerhalb eines zuvor mit Hilfe des Grob-Scans 27 identifizierten kleineren z-Bereichs, in welchem sich die Best-Fokusebene 13 befindet.

[0073] Diese einzelnen Verfahrensschritte sind nochmals in **Fig. 7** illustriert, wobei anhand der Blockpfeile erkennbar ist, dass zunächst die einzelnen Fokusebenen 12 an den z-Koordinaten z_1 bis z_3 schrittweise angefahren und mithilfe des Bildsensors 9 aufgezeichnet werden (= Grob-Scan 27, schwarze Blockpfeile) und dass anschließend die erste Fokusebene 12 des Fein-Scans 28 an der z-Koordinate z_a angefahren wird. Von dort aus wird dann anschließend der Fein-Scan 28 schrittweise bis zu der Fokusebene 12 bei der z-Koordinate z_n durchgeführt. Somit erfolgt also der Fein-Scan 28 in gegenläufiger Scan-Richtung wie der Grob-Scan 27.

[0074] Zusammenfassend wird zur Verbesserung der Genauigkeit als auch der Geschwindigkeit eines Autofokus-Verfahrens, mit dem sich automatisiert eine momentane Best-Fokusebene 13 auffinden lässt, die für ein Objekt 3, welches sich in einem bestimmten Arbeitsabstand 11 zu einem optischen Abbildungssystem 1 befindet, eine bestmögliche Bildqualität ermöglicht, vorgeschlagen, dass wenigstens ein während eines z-Scans 17 verwendeter Parameter automatisiert in Abhängigkeit eines momentan eingestellten optischen Zoom-Levels und/oder eines aktuellen Schätzwerts des Arbeitsabstands 11 angepasst wird. Während des z-Scans 17 wird dabei eine momentane Lage einer Fokusebene 12 des optischen Abbildungssystems 1 innerhalb eines Scan-Bereichs 14 entlang einer optischen z-Achse 8 des Abbildungssystems 1 verschoben, wobei die einzelnen Fokusebenen 12 jeweils ausgewertet werden, um unter ihnen die Best-Fokusebene 13 zu identifizieren, (vgl. **Fig. 4**). Diese Auswertung kann bevorzugt auf Basis einer Bildinformation erfolgen, die mit dem Bildsensor 9 des Abbildungssystems 1 erfasst wird (= bildbasierter Autofokus).

Bezugszeichenliste

- | | |
|---|----------------------------|
| 1 | Optisches Abbildungssystem |
|---|----------------------------|

2	Video-Kamera	zeichnet , dass wenigstens ein Parameter des z-Scans (17) in Abhängigkeit
3	Objekt	- eines aktuell eingestellten optischen Zoomlevels des Abbildungssystems (1) und/oder
4	Zoom-Optik (verschiebbar oder durchstimmbar)	- eines aktuellen Schätzwerts für einen Arbeitsabstand (11) zwischen dem Abbildungssystem (1) und einem mit dem Abbildungssystem (1) visualisierten Objekt (3) automatisch angepasst wird,
5	Zoom-Aktuator	- insbesondere um so das Auffinden der Best-Fokusebene (13) zu beschleunigen.
6	Fokuslinse (verschiebbar oder durchstimmbar)	2. Autofokus-Verfahren nach Anspruch 1, wobei der wenigstens eine Parameter
7	Fokus-Aktuator	- eine Länge (16) des Scan-Bereichs (14) und/oder
8	optische z-Achse	- eine Anzahl an mit dem z-Scan (17) optisch abgetasteten Fokusebenen (12) und/oder
9	Bildsensor	- eine räumliche Abtastfrequenz des z-Scans (17) und/oder
10	Controller	- eine Verstellgeschwindigkeit der Fokuslinse (6) und/oder
11	Arbeitsabstand (working distance - zwischen 1 und 3)	- ein während des z-Scans (17) verwendetes optisches Zoomlevel des Abbildungssystems (1) umfasst.
12	(momentane) Fokusebene (vorgegeben durch 1 bzw. 6)	3. Autofokus-Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die räumliche Abtastfrequenz des z-Scans (17) erhöht wird, wenn die Länge des Scan-Bereichs (14) des z-Scans (17) verkürzt wird,
13	Best-Fokusebene (um 3 optimal scharf auf 9 abzubilden)	- insbesondere um so eine Gesamtzeit, die zur Durchführung des z-Scans (17) benötigt wird, konstant zu halten.
14	Scan-Bereich (entlang von 8 in Bezug auf 12)	4. Autofokus-Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei durch die Anpassung des wenigstens einen Parameters
15	Schrittweite (Abstand zwischen 12, nach schrittweiser Anpassung der Lage von 12)	- eine Schärfentiefe aktiv angepasst wird, insbesondere durch Änderung eines Zoomlevels des Abbildungssystems (1), und/oder
16	Länge (von 14)	- eine momentane Änderung der Schärfentiefe kompensiert wird, insbesondere durch Anpassung einer räumlichen Abtastfrequenz und/oder einer Länge (16) des z-Scans (17).
17	z-Scan innerhalb von 14	5. Autofokus-Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Schätzwert für den Arbeitsabstand (11)
18	Länge von 17	- mit Hilfe eines zusätzlichen Sensors, beispielsweise eines berührungslosen Abstandssensors, insbesondere eines Ultraschallsensors und/oder
19	Einzelbild (aufgezeichnet mit 9)	- auf Basis einer zusätzlichen Ortsinformation mit Bezug auf eine momentane räumliche Lage des Abbildungssystems (1) und/oder
20	Bildbereich (innerhalb von 19)	- mit Hilfe einer zusätzlichen Kamera ermittelt wird.
21	Lokales Maximum	6. Autofokus-Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei bei Zunahme des optischen Zoomlevels
22	Globales Maximum	- die Länge (16) des Scan-Bereichs (14) verkleinert wird und/oder
23	Frontlinse	
24	Zoom-Linse	
25	(bidirektionale) Steuerleitung	
26	Objektiv	
27	Grob-Scan	
28	Fein-Scan	
29	(momentane) Scan-Richtung (von 17)	

Patentansprüche

1. Autofokus-Verfahren zum automatisierten Auffinden einer momentanen Best-Fokusebene (13),

- wobei hierzu durch Verstimmen einer Fokuslinse (6) eines optischen Abbildungssystems (1) die Lage einer Fokusebene (12) des optischen Abbildungssystems (1) in einem z-Scan (17) innerhalb eines Scan-Bereichs (14) entlang einer optischen z-Achse (8) verschoben wird, **dadurch gekenn-**

- die Anzahl an abgetasteten Fokusebenen (12) innerhalb des Scan-Bereichs (14) reduziert wird.

7. Autofokus-Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei bei Abnahme des Schätzwerts für den Arbeitsabstand (11)

- die Länge (16) des Scan-Bereichs (14) verkleinert wird und/oder

- die Anzahl an abgetasteten Fokusebenen (12) innerhalb des Scan-Bereichs (14) reduziert wird.

8. Autofokus-Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

- wobei der Scan-Bereich (14) schrittweise durchfahren wird, indem die Lage der Fokusebene (12) schrittweise in einer Schrittweite (15) verschoben wird und

- wobei die Schrittweite (15) in Abhängigkeit des momentan eingestellten optischen Zoomlevels und/oder des Schätzwerts für den Arbeitsabstand (11) angepasst wird,

- vorzugsweise wobei

- bei Zunahme des Zoomlevels und damit einhergehender zunehmender Bildvergrößerung und/oder
- bei Abnahme des Schätzwerts für den Arbeitsabstand (11) die Schrittweite (15) reduziert wird.

9. Autofokus-Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 7, wobei der Scan-Bereich (14) kontinuierlich durchfahren wird, indem die Lage der Fokusebene (12) kontinuierlich innerhalb des Scan-Bereichs (14) verschoben wird,

- insbesondere wobei hierzu

- die Fokulinse (6) mit konstanter Verfahrensgeschwindigkeit und/oder kontinuierlich verfahren wird und/oder

- die Lage der Fokusebene (12) kontinuierlich entlang der z-Achse verschoben wird, beispielsweise durch kontinuierliches Verstimmen der Fokulinse,

- und wobei eine mittlere Scan-Geschwindigkeit, mit der die Lage der Fokusebene (12) entlang der z-Achse (8) verschoben wird, angepasst wird, vorzugsweise in Abhängigkeit eines momentan eingestellten optischen Zoomlevels und/oder eines Schätzwerts für den Arbeitsabstand (11),

- besonders bevorzugt wobei

- bei Zunahme des Zoomlevels und damit einhergehender zunehmender Bildvergrößerung und/oder
- bei Abnahme des Schätzwerts für den Arbeitsabstand (11) die Scan-Geschwindigkeit reduziert wird.

10. Autofokus-Verfahren nach Anspruch 9,

- wobei ein Bildsensor (9), mit dem die unterschiedlichen Fokusebenen (12) als Einzelbilder (19) erfasst bzw. abgetastet werden, in einem rolling-shutter-Modus betrieben wird, sodass unterschiedliche Bildbereiche (20a, 20b, 20c) dieser Einzelbilder unterschiedlichen z-Positionen (z1, z2, z3) entlang der optischen z-Achse (8) entsprechen, da das jeweilige Einzelbild (19) aufgezeichnet wird, wäh-

rend sich die Lage der Fokusebene (12) ändert, und
- wobei ein Auswertebereich (21) innerhalb des jeweiligen Einzelbilds (19), der zur Bewertung der jeweiligen Fokusebene (12) ausgewertet wird, in Abhängigkeit

- einer mittleren Scan-Geschwindigkeit und/oder

- einer Anzahl an zu erfassenden Fokusebenen (12) angepasst wird,

- vorzugsweise wobei der Auswertebereich (21) verkleinert wird, wenn die Scan-Geschwindigkeit erhöht wird und/oder wenn die Anzahl an zu erfassenden Fokusebenen (12) erhöht werden soll.

11. Autofokus-Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei zum Auffinden der Best-Fokusebene (13) wenigstens zwei z-Scans (27, 28) nacheinander innerhalb des Scan-Bereichs (14) durchgeführt werden, indem jeweils die Lage einer aktuellen Fokusebene (12) innerhalb des Scan-Bereichs (14) verschoben wird,

- wobei sich die beiden z-Scans (27, 28)

- in ihrer jeweiligen Länge (18) und/oder

- in einer verwendeten Schrittweite (15) und/oder

- in einer verwendeten Scan-Geschwindigkeit und/oder

- in ihrer jeweiligen Lage innerhalb des Scan-Bereichs (14) unterscheiden,

- vorzugsweise wobei sich beiden z-Scans (27, 28) zumindest teilweise überlappen.

12. Autofokus-Verfahren nach Anspruch 11,

- wobei die wenigstens zwei z-Scans (27, 28) einen Grob-Scan (27) und einen zeitlich nachfolgenden Fein-Scan (28) umfassen, und

- wobei der Grob-Scan (27) bei einem niedrigeren Zoomlevel und damit bei geringerer Bildvergrößerung erfolgt als der Fein-Scan (28),

- vorzugsweise wobei

- vor Durchführung des Grob-Scans (27) zunächst ein minimales Zoomlevel eingestellt wird und/oder

- der Grob-Scan (27) über einen maximal möglichen Scan-Bereich (14) ausgeführt wird, insbesondere wobei anschließend vor Durchführung des Fein-Scans (28) ein zuletzt von einem Benutzer eingestelltes gewünschtes Zoomlevel wiederhergestellt wird.

13. Autofokus-Verfahren nach Anspruch 11 oder 12,

- wobei die wenigstens zwei z-Scans (17 a, 28) einen Grob-Scan (27) und einen zeitlich nachfolgenden Fein-Scan (28) umfassen, und

- wobei eine örtliche z-Auflösung des Fein-Scans (28) höher ist als eine örtliche z-Auflösung des Grob-Scans (27) und/oder

- wobei eine Länge (18a) des Grob-Scans (27) größer ist, als eine Länge (18b) des Fein-Scans (28) und/oder

- wobei eine Schrittweite (15a) des Grob-Scans (27) größer ist als eine Schrittweite (15b) des Fein-Scans

- (28) und/oder
- wobei eine Scan-Geschwindigkeit des Grob-Scans (27) höher ist als eine Scan-Geschwindigkeit des Fein-Scans (28)
 - vorzugsweise wobei der Fein-Scan (28) in gegenläufiger Scan-Richtung wie der Grob-Scan (27) erfolgt.

14. Optisches Abbildungssystem (1), insbesondere ausgestaltet als Exoskop oder Mikroskop oder Endoskop, zum Visualisieren eines Objekts (3) während eines medizinischen Eingriffs, umfassend

- eine Zoom-Optik (4), die mittels eines Zoom-Aktuators (5) verstellbar ist, um ein optisches Zoomlevel anzupassen,
- eine Fokuslinse (6), die mittels eines Fokus-Aktuators (7) verstimmbar ist, um die Lage einer Fokusebene (12) entlang einer optischen z-Achse (8) anzupassen,
- einen Bildsensor (9) zum Aufzeichnen von Bilddaten, und
- einen Controller (10) zum Ansteuern des Fokus-Aktuators (7), **dadurch gekennzeichnet**,
- dass der Controller (10) dazu eingerichtet ist, einen Autofokus zu implementieren und hierzu den Fokus-Aktuator (7) und/oder den Zoom-Aktuator (5) in Abhängigkeit
- eines momentan mit Hilfe des Zoom-Aktuators (5) eingestellten Zoomlevels und/oder
- eines Schätzwerts für einen momentanen Arbeitsabstand (11) zwischen dem Abbildungssystem (1) und dem Objekt (3) anzusteuern.

15. Optisches Abbildungssystem (1) gemäß Anspruch 14, wobei der Controller (10) dazu eingerichtet ist, den Fokus-Aktuator (7) und/oder den Zoom-Aktuator (5) so anzusteuern, dass ein Autofokus-Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 13 implementiert wird.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

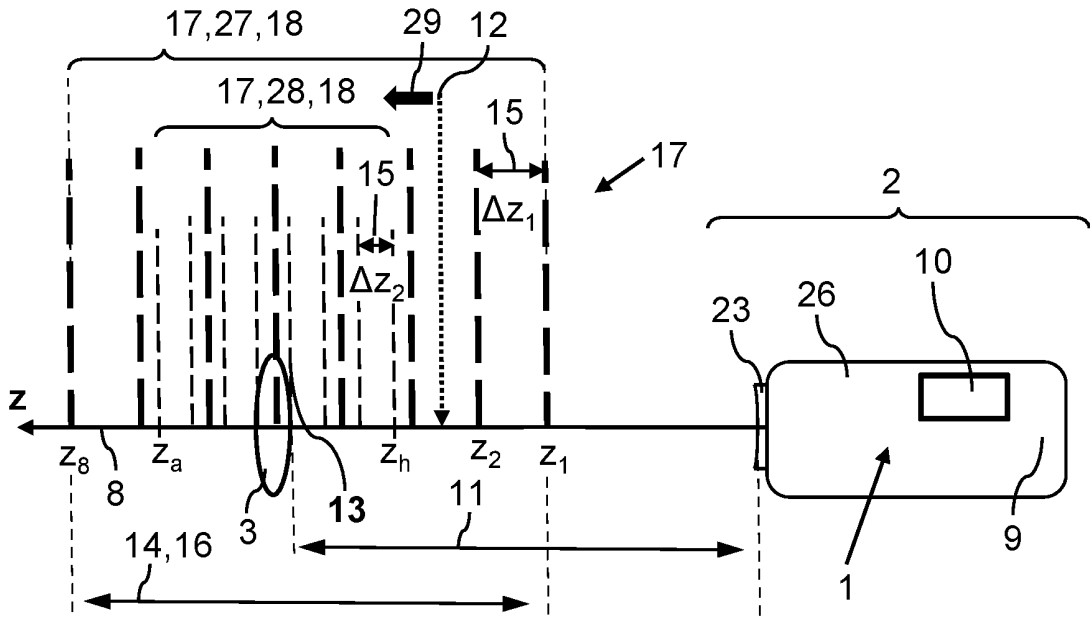


Fig. 1

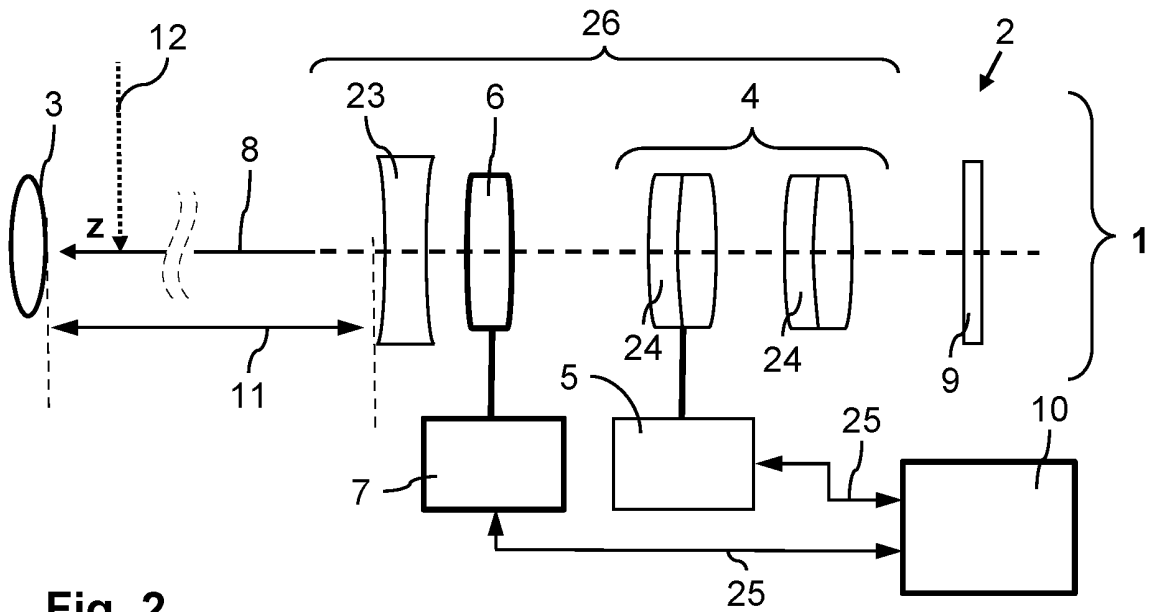


Fig. 2

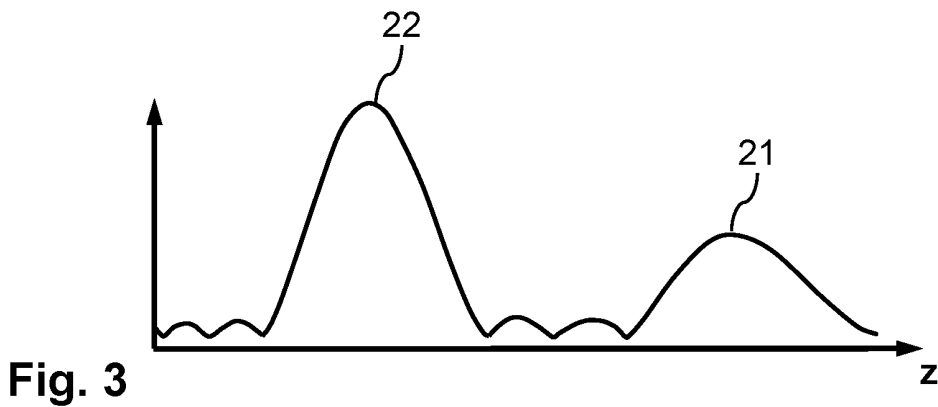


Fig. 3

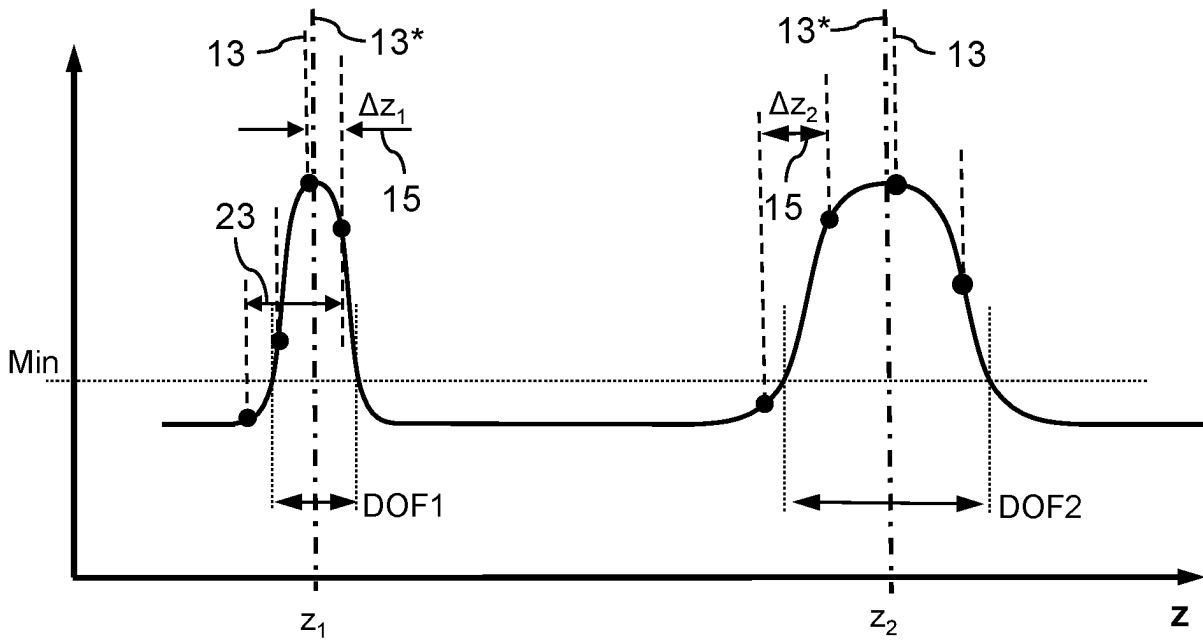


Fig. 4

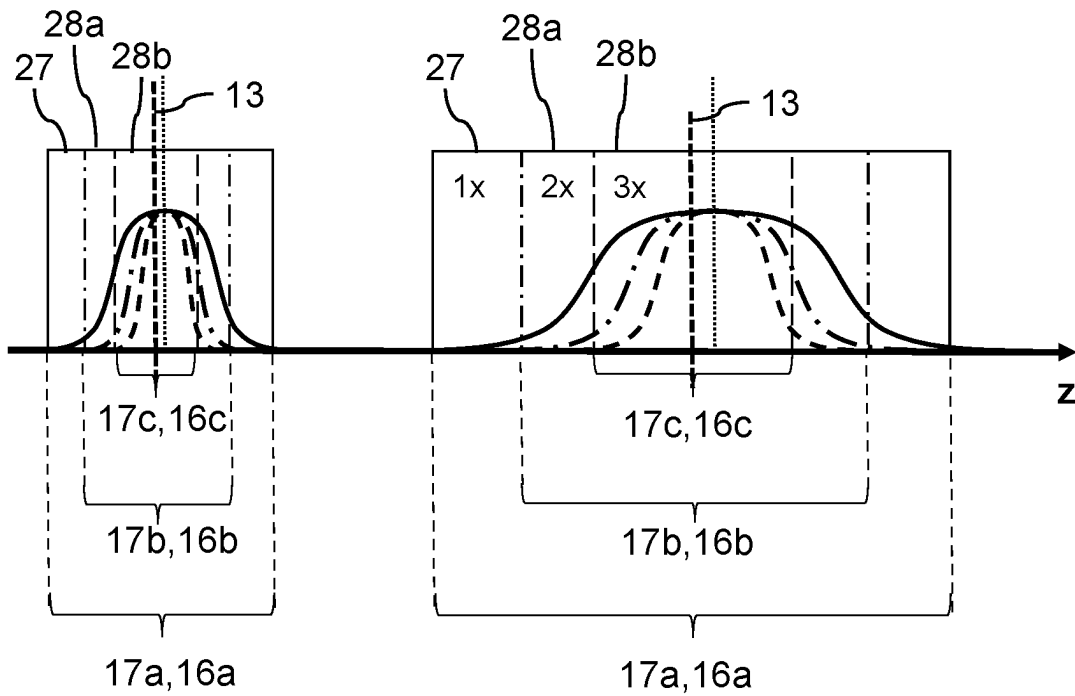


Fig. 5

