



(10) **DE 10 2013 016 752 A1** 2015.03.05

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2013 016 752.3**  
(22) Anmeldetag: **02.10.2013**  
(43) Offenlegungstag: **05.03.2015**

(51) Int Cl.: **G01B 9/02 (2006.01)**  
**G01B 11/30 (2006.01)**

(66) Innere Priorität:  
**10 2013 015 031.0 03.09.2013**

(72) Erfinder:  
**Körner, Klaus, Dr., 70563 Stuttgart, DE; Osten,  
Wolfgang, Prof. Dr., 70569 Stuttgart, DE**

(71) Anmelder:  
**Universität Stuttgart, 70174 Stuttgart, DE**

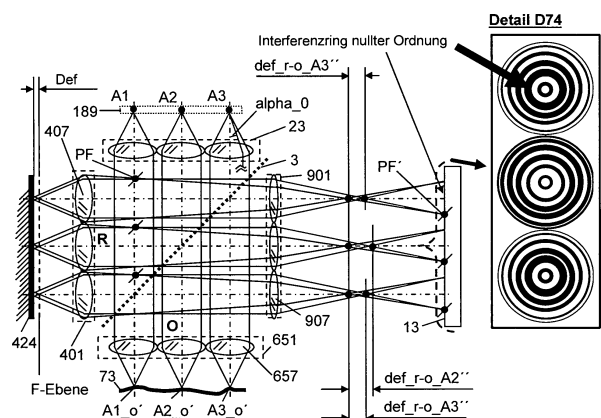
(56) Ermittelte Stand der Technik:  
**siehe Folgeseiten**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

(54) Bezeichnung: **Verfahren und Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie, insbesondere auch zur optischen Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial-domain-Ansatz (SD-OCT)**

(57) Zusammenfassung: Es handelt sich um ein Verfahren und eine Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie, insbesondere auch zur optischen Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial-domain-Ansatz (SD-OCT) und insbesondere auch nach dem Lichtfeld-Ansatz an Material und lebendem Gewebe, zur Abstandsmessung, insbesondere auch zur 2D- oder 3D-Messung mit einer feinstrukturierten, auf das Objekt beugungsbegrenzt abgebildeten Lichtquelle oder Spots derselben, mit einem Interferometer mit Objekt- und Referenzarm und einem Detektor für elektromagnetische Strahlung. Im Referenzarm erfolgt entweder eine Voll- oder teilweise Retro-Reflexion mit Querversatz oder schwacher Defokussierung von Referenzlicht, wobei strukturierte oder konfokale Beleuchtung zur Anwendung kommt. Bei der Detektion wird eine Vielzahl räumlicher Interferogramme durch Überlagerung einer Objektwellenfront mit geneigter oder gekrümmter Referenzwellenfront für jeden Messpunkt gebildet. Die entstehenden räumlichen Interferogramme werden in einem einzigen Detektor-Frame detektiert und mittels Rechnerprogramm ausgewertet.



(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2010 006 239	B3
DE	10 2010 046 907	B4
DE	196 32 594	A1
DE	10 2006 015 387	A1
DE	10 2011 000 213	A1
DD	2 68 771	A1
US	7 177 029	B2
US	1 565 533	A
WO	2010/ 139 764	A1

**EMER, W., SCHWIDER, J.:** Ultraviolet interferometry with apochromatic reflection optics. *Applied Optics*, Vol. 38, No. 16, 1999, S. 3516-3522.

**GASTINGER, K. et al.:** Optical, mechanical and electro-optical design of an interferometric test station for massive parallel inspection of MEMS and MOEMS. *Proc. of SPIE*, Vol. 7389, 2009, 73891J-1 bis 73891J12.

**GOODMAN, J. W.:** Holography Viewed from the Perspective of the Light Field Camera. Tagungsunterlagen zur Fringe 2013, S. 3 bis 15, 7th International Workshop on Advanced Optical Imaging and Metrology, Editor Wolfgang Osten, ISBN 978-3-642-36358-0, DOI 10.1007/978-3-642-36359-7, Springer Heidelberg New York Dordrecht London.

**HERING, M. et al:** Correlated speckle noise in white-light interferometry: theoretical analysis of measurement uncertainty. *Applied Optics*, Vol. 48, No. 3, 2009, 525-538.

**HERING, M. et al:** One-Shot Line-Profiling White Light Interferometer with Spatial Phase Shift for Measurement Rough Surfaces. *Proc. of SPIE*, Vol. 6188, 2006, 61880E-1 bis 61880E-11.

**KELSALL, D.:** Optical Frequency Response Characteristics in the presence of Spherical Aberration measured by an automatically recording Interferometric Instrument. *Proc. Phys. Soc.* 73, 1959, 465-479

**MALACARA, D.:** *Optical Shop Testing*; John Wiley & Sons, Inc., 1992, 140-141.

**NG, R. et al.:** Light Field Photography with a Hand-held Plenoptic Camera. *Stanford Tech Report CTSR 2005-02*, 1 bis 11.

**STEEL, W. H.:** *Interferometry*; Cambridge University Press, 1967, 83-84.

## Beschreibung

### Stand der Technik

**[0001]** In der Offenlegungsschrift DE 10 2006 015 387 A1 [1] von M. Hering u. a. ist eine interferometrische Messvorrichtung auf der Basis der Weißlicht-Interferometrie, auch als Kurzkohärenz-Interferometrie bekannt, beschrieben, bei der die Wellenfronten des reflektierten Objektstrahls und die des reflektierten Referenzstrahls mittels einer Neigungsvorrichtung um einen bestimmten Winkelbetrag zueinander geneigt sind, so dass ein räumliches Interferogramm als Single-Shot-Datensatz entstehen kann. Beispielsweise ist dieser Winkelbetrag hier in einer stark modifizierten Linnik-Interferometer-Anordnung, die auch Merkmale eines Mach-Zehnder-Interferometers aufweist, durch einen Kippspiegel, der vom Licht auf dem Weg zur Detektion nur einmalig passiert wird, realisiert.

**[0002]** Mit dieser optischen Anordnung können ein oder mehrere räumliche Interferogramme, auch als Lini-enstapel auf einer Matrixkamera, als Single-Shot-Datensätze in der Zeitdauer einer Bildaufnahme vollständig zur Verfügung gestellt werden.

**[0003]** Von besonderem Vorteil ist bei diesem Ansatz, dass die Ortsfrequenz für die Schwerpunktwellenlänge, beziehungsweise die Schwerpunktwellenzahl, im räumlichen Interferogramm am Ausgang des Interferometers in erster Näherung nicht von der Neigung der Objektoberfläche in Relation zum Interferometer beeinflusst wird.

**[0004]** Eine gezielte Veränderung des Winkelbetrages mittels Neigungsvorrichtung, beispielsweise um die Ortsfrequenz für die Schwerpunktwellenlänge im räumlichen Interferogramm vorbestimmt zu verändern, kann zu einem unerwünschten Lateralversatz von Objektwellenfront und Referenzwellenfront bei der Detektion führen, der nur aufwendig oder durch eine Justierung in einigen Fällen gar nicht zu kompensieren ist und eine Quelle von Messfehlern darstellen oder den Tiefenmessbereich erheblich einschränken kann. Das Interferometer ist in der Regel nicht sehr langzeitstabil.

**[0005]** In der Veröffentlichung von M. Hering u. a. in Applied Optics, Vol. 48, Nummer 3, Seite 525 bis 538 vom 20. Januar 2009 [2] zeigen die gemessenen räumlichen Interferogramme in **Abb. 3** das Potenzial dieses Ansatzes gemäß [1]. Die in der **Abb. 1** präsentierte One-Shot-Interferometer-Messanordnung stellt einen Experimentalbau zu Studienzwecken dar und ist für die wirtschaftliche Umsetzung eher zu komplex und zu voluminös. Typische Messergebnisse auf der Grundlage dieses Ansatzes wurden von M. Hering u. a. bereits im Jahr 2006 in den Proceedings of SPIE, Vol. 6188, 61880E-1 bis 61880E-11 in der **Fig. 7** dargestellt [3].

**[0006]** Dagegen sind Michelson-Typ-Interferometer mit einem planem Referenzspiegel, bei denen die Ortsfrequenz für die Schwerpunktwellenlänge in einem räumlichen Interferogramm am Ausgang des Interferometers durch Kippung des Referenzspiegels oder durch Kippung des Objekts in Bezug zum Interferometer oder des Interferometers in Bezug zum Objekt zu verändern ist, für Messobjekte mit variierender und unbekannter Oberflächenneigung hinsichtlich der Auswertung von räumlichen Interferogrammen hier überhaupt nicht von Interesse. Deshalb werden Ansätze auf dieser Grundlage nicht als Stand der Technik in Bezug zu dieser Erfindung angesehen und werden deshalb hier auch nicht weiter betrachtet.

**[0007]** Das Gewinnen räumlicher Interferogramme für die One-Shot-Messtechnik mittels Lateral-Shear zwischen Objekt- und Referenzwellenfronten am Ausgang eines Zweistrahl-Interferometers stellt grundsätzlich eine weitere Möglichkeit der Erzeugung räumlicher Interferogramme für die One-Shot-Messtechnik, beispielsweise zur Erfassung des Abstands, dar. Denn Lateral-Shear kann in einer optischen Anordnung als Grundlage zur Generierung von Interferenzen zueinander geneigter Wellenfronten genutzt werden. Einen ganz klassischen Ansatz stellt dafür eine Michelson-Interferometer-Anordnung mit zwei Dachkant-Reflektoren und einer lateral ausgedehnten Lichtquelle dar, um die erforderliche Lateral-Shear zu erzeugen. Dieser Ansatz mit zwei Dachkant-Reflektoren ist den Fachleuten gut bekannt, s. a. D. Malacara, Optical Shop Testing, John Wiley & Sons, Inc., 1992, S. 140–141, Figur 4.16 [4] und auch W. H. Steel, Interferometry, Cambridge University Press, 1967, S. 83 letzter Absatz bis S. 84 oben [5].

**[0008]** Um diesen Interferometer-Ansatz mit zwei Dachkant-Reflektoren für die Abstandsmessung und Profilmessung nutzen zu können, muss demzufolge im Objektarm des Interferometers der Objektoberfläche ein zusätzlicher Planspiegel zugeordnet werden, wobei dieser Planspiegel mit der Objektoberfläche dann eine Dachkante bildet. Im Referenzarm ist hierbei der zweite Dachkantreflektor angeordnet. Diese Anordnung liefert bei entsprechender Justierung eine Lateral-Shear zwischen den Wellenfronten und vermeidet dabei eine

Wellenfront-Inversion, weist aber in der Regel eindeutige Nachteile wegen des benötigten Bauvolumens im Objektarm auf, beispielsweise bei der Messung in Innenräumen.

**[0009]** Bekannt ist auch der von D. Kelsall im Jahr 1959 in Proc. Phys. Society, 73, S. 470, Fig. 1 [6] veröffentlichte Ansatz mit zwei Tripelreflektoren als Endreflektoren eines Michelson-Interferometers. Die Querverschiebung eines Tripelreflektors erzeugt ebenfalls eine Lateral-Shear zwischen Objekt- und Referenzwellenfronten am Ausgang eines Michelson-Interferometers. Der Einsatz eines Tripelreflektors im Referenzarm eines Michelson-Interferometers geht ja nach bestem Wissen jedoch bereits auf F. Twyman und A. Green zurück, s. a. US-Patent 1 565 533, Fig. 6, [7] zurück.

**[0010]** Diesen Interferometer-Ansatz als Anordnung für einen interferometrischen Sensor zur Abstandsmessung u. a. zu nutzen, bei dem ein Planspiegel des Tripelreflektors in Form einer Würfecke, auch als Corner Cube bekannt, durch die Objektoberfläche ersetzt ist, führt dazu, dem Objekt oder der Objektoberfläche im Objektarm noch einen Dachkant-Reflektor oder zwei Planspiegel beordnen zu müssen, da die unerwünschte Wellenfrontinversion zwischen Objekt- und Referenzstrahlung für eine flächenhafte Messung vermieden werden muss, da sonst der Interferenzkontrast null ist. Dieser Ansatz vergrößert das Sensorvolumen ganz erheblich, was für viele Applikationen sehr nachteilig ist oder dies schließt den Einsatz einer derartigen Lösung völlig aus.

**[0011]** In der Schrift DE 10 2010 006 239 B3 [8] ist ein Ansatz beschrieben, bei dem aufgrund des Einsatzes eines Dreifach-Spiegels als Endspiegel im Referenzarm des Interferometers der Nachteil besteht, dass kein fokussiertes Bündel mit einer sehr hohen numerischen Apertur über diesen Referenzarm geführt werden kann, wodurch ggf. der Messbereich begrenzt sein kann, da bei hoher NA, z. B. oberhalb von 0,7, das vom Referenzarm zurückkommende Licht im Aperturwinkel etwas limitiert ist und somit nicht das volle Winkelspektrum im Vergleich zum Objektlicht aufweisen kann. Das kann den lateralen Bereich des Entstehens von auswertbaren Interferenzen auf einem Kamera-Chip merklich einschränken.

**[0012]** Die Verfahren und Anordnung nach DE 10 2010 046 907 B4 [9] haben den Vorteil, einen zweiten Interferometerausgang nutzen zu können und die Objektpunkte können nahezu lateral beliebig angeordnet werden. Anordnungen nach [9] sind aufgrund des Tripelreflektors im Referenzarm hochstabil hinsichtlich des Interferometer-Justierzustandes, aber in der optischen Schaltung auch recht aufwendig. Darüber hinaus kann es bei diesem Verfahren bei einem ausgedehnten Messfeld Probleme mit einem sphärischen Phasenterm im Wavelet geben, da die effektiven Spiegelebenen im Referenz- und Objektarm nicht zwingend zusammenfallen, so dass eine größere Anzahl von Interferenzen gleicher Neigung, bekannt auch als Haidingersche Ringe, im Feld entstehen kann. Dies kann zu einer Verletzung des Sampling-Theorems bei der Detektion führen.

**[0013]** Ein Verfahren nach DD 268771 A1 [10] ermöglicht die zeitaufgelöste Objekterfassung. Dieser Ansatz ermöglicht jedoch eher keine Kurzkohärenz-Interferometrie für einzelne Messpunkte oder entlang einzelner Messlinien und erfordert ein erhebliches Sensorvolumen aufgrund der sehr großen Lateral-Shear.

**[0014]** Von K. Gastinger u. a. wird in Proc. of SPIE 7389, 73891J1 bis -73891J12, 2009, [11] und auch in der PCT-Schrift WO2010/139764 A1 [12] der Einsatz von Mikro-Mirau-Interferometern und Twyman-Green-Interferometern in Array-Form auch mit Kurzkohärenz-Lichtquelle zur parallelisierten Inspektion von MEMS und MOEMS beschrieben. Für die Kurzkohärenz-Technik wird hierbei jedoch die optische Weglänge über der Zeit gescannt, so dass hier kein One-shot-Verfahren gegeben ist. Selbst moderate Vibrationen im Umfeld sind hierbei im hohen Maße schädlich für im Scan zu detektierenden Wavelet-Signale, gemäß **Abb. 9** oben in [11], die im Extremfall mit üblichen Algorithmen gar nicht mehr auswertbar sind oder stark verfälschte Messergebnisse liefern.

**[0015]** Von J. Schwider wurde bereits 1996 in DE 196 32 594 A1 [13] für die Zweistrahl-Interferometrie ein Mach-Zehnder-Interferometer oder ein Michelson-Interferometer mit einem mikrooptischen Array in Form eines Mikrolinsen-Arays im Objektstrahlengang zwecks konfokaler Beleuchtung des Objekts und konfokaler Diskriminierung vorgeschlagen.

**[0016]** Erstmals wird nach bestem Wissen von W. Eurer und J. Schwider in Applied Optics, 38, No. 16, S. 3516–3522, 1999 [14] die Anwendung eines Schwarzschild-Spiegelobjektivs in einer Mirau-Anordnung für die Phasenschiebe-Interferometrie im UV-Bereich beschrieben. Der optische Gangunterschied wird hierbei zeitspezifisch verändert, um das Phasenschiebe-Verfahren anwenden zu können. Es handelt sich somit nicht um ein One-shot- und auch kein Kurzkohärenz-Verfahren.

**[0017]** Joseph W. Goodman beschreibt im Aufsatz „Holography Viewed from the Perspective of the Light Field Camera“ Goodman [15] Ansätze zur Fourier- und Fresnel-Holografie mit einer Maske in der Bildebene. Diese werden von der Lichtfeld-Kamera für die Holografie abgeleitet. Dieser Aufsatz findet sich in den Tagungsunterlagen zur Fringe 2013, S. 3 bis 15, 7th International Workshop on Advanced Optical Imaging and Metrology, Editor Wolfgang Osten, ISBN 978-3-642-36358-0 ISBN 978-3-642-36359-7 (eBook), DOI 10.1007/978-3-642-36359-7, Springer Heidelberg New York Dordrecht London. Mittels Video-Konferenzschaltung erfolgte die Video-Präsentation dieses Aufsatzes auf der Fringe 2013 in Nürtingen bei Stuttgart am 11.9.2013. Die dabei von Joseph W. Goodman präsentierten Ansätze zur Holografie stellt jedoch keine Lehre dar, um für die One-shot-Zweistrahl-Interferometrie oder die für die optische Kohärenz-Tomografie benötigten Zweistrahl-Interferogramme, insbesondere auch Kurzkohärenz-Interferogramme, zu generieren, welche sich im Vergleich zu Hologrammen in der Regel vergleichsweise sehr schnell numerisch auswerten lassen. Es wurde hierbei keine Lehre für eine strukturierte Beleuchtung des Objekts beim Lichtfeld-Ansatz für die Zweistrahl-Interferometrie gegeben.

**[0018]** Von Ren Ng u. a. wird im Stanford Tech Report CTSR 2005-02 [16] in der **Abb. 1** auf Seite 2 die Lichtfeld-Fotografie mit einer Kamera nach dem Plenoptic-Ansatz beschrieben, die ein Mikrolinsen-Array in der Bildebene aufweist. Diese Anordnung ist in dieser Form jedoch nicht für die One-shot-Zweistrahl-Interferometrie und auch nicht für die optische Kohärenz-Tomografie anwendbar, da mit dieser Anordnung in der Regel keine Zweistrahl-Interferenzen erzeugt werden können.

**[0019]** Von Peter J. deGroot wird in der Patentschrift US 7,177,029 B2 [17] ein stroboskopisches Interferometer beschrieben, das jedoch die Interferogramm-Daten zeitseriell mit einer Serie von Lichtpulsen detektiert, also auf der Time-domain-Methode basiert. Mit diesem Ansatz kann demzufolge keine One-Shot-Messung durchgeführt werden.

**[0020]** Von J. Niehues und Peter Lehmann wird in der Offenlegungsschrift DE 10 2011 000 213 A1 [18] eine Anordnung zur Weißlicht-Interferenzmikroskopie beschrieben, bei der eine konfokale Beleuchtung mittels eines räumlichen Lichtmodulators erzeugt wird. Auch mit diesem Ansatz kann keine One-Shot-Messung durchgeführt werden, da es sich um einen Time-domain-Ansatz handelt.

#### Ziel der Erfindung

**[0021]** Das Ziel der Erfindung besteht zum einen darin, vor allem robuste One-Shot-Messtechnik mit einer vergleichsweise hohen lateralen Auflösung zur Erfassung von Abstand, Tiefe, Profil, Form, Welligkeit und/oder Rauheit oder der optischen Weglänge in oder an technischen oder biologischen Objekten, auch in Schichtenform oder auch zur optischen Kohärenz-Tomografie (OCT), insbesondere auch mit One-Shot-Multi-Punkt-Antastung, bei der die Signale in der Regel in Wavelet-Form entstehen, der wirtschaftlichen Nutzung zuzuführen. Die Messung soll in einer vergleichsweise kurzen Messzeit ausgeführt werden können. Weiterhin soll die Verkippung und/oder die Neigung der Objekt Oberfläche oder deren Form, bzw. Mikroform innerhalb gewisser Grenzen, keinen oder nur einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Signalform, insbesondere die räumliche Frequenz des Wavelets, aufweisen.

**[0022]** Insbesondere sollen Messungen auch bei extremen mechanischen Stoßbelastungen im Messgebiet möglich sein.

**[0023]** Ein weiteres Ziel besteht darin, für die Koordinatenmesstechnik eine „fliegende“ Multipunkt-Abstandsmessung, eine „fliegende“ 3D-Messung oder eine „fliegende“ Linienprofilmessung zu ermöglichen.

#### Aufgabe der Erfindung

**[0024]** Damit ist also die erfinderische Aufgabe zu lösen, beim optischen Antasten der Objekt Oberfläche, eines Objektpunktes oder eines Objektvolumens mit einem Zweistrahl-Interferometer, optische Signale in möglichst gut auswertbarer Signalform für ein punktförmiges, ein linienhaftes Messfeld oder auch für ein flächiges Messfeld mit vielen einzelnen Messpunkten ohne einen mechanischen, zeitseriell erfolgenden Tiefen-Scan bereitzustellen, welche bei zumindest bei nicht oder wenig lichtstreuenden Messobjekten möglichst eine Phasenauswertung gestatten.

**[0025]** Es besteht wegen der Forderung nach einer hohen lateralen Auflösung auch die Aufgabe, das Messsystem mit einer vergleichsweise hohen numerischen Apertur bis in den Grenzbereich des technisch Machbaren, einschließlich auch in Immersionstechnik, auszubilden. Durch eine große und gegebenenfalls auch sehr

große numerische Apertur soll ein vergleichsweise hoher Anteil des auf das Objekt eingestrahlt Lichts zur Detektion gebracht werden, so dass die Messzeit gemäß der Aufgabenstellung vergleichsweise kurz gewählt werden kann und Messungen auch in einer vibrationsbelasteten Umgebung, an bewegten Komponenten oder bei der In-Vivo-Diagnostik von Geweben oder Zellen am lebenden Menschen möglich sind. Dabei sollen insbesondere auch Tumorzellen anhand ihrer geometrischen Struktur sicher erkannt werden können.

**[0026]** Es sollen dabei in einer Messung viele lateral benachbarte Objektelemente oder Objektpunkte gleichzeitig angemessen werden können. Das heißt, es besteht die Aufgabe, beim Stand der verfügbaren Auswert- Algorithmen in der Kurzkohärenz-Interferometrie und OCT gut auswertbare und vergleichsweise robuste optische Signale bei der optischen Antastung von Objekten durch das erfindungsgemäße Verfahren und die erfindungsgemäße Anordnung mittels eines das Objekt anmessenden Interferometers, auch in der Form eines hochaperturigen Interferenzmikroskops, insbesondere mit Messobjektiv im Objektarm, möglichst schnell bereitzustellen.

**[0027]** Die Ortsfrequenz für die Schwerpunktwellenlänge der Signale in Wavelet-Form, beziehungsweise die Schwerpunktwellenzahl  $k_S$  in einem räumlichen Interferogramm, soll dabei in hohem Maße vorbestimmt einstellbar sowie von der Verkipfung und Neigung der Objekt Oberfläche unabhängig sein.

**[0028]** Dabei ist im Einzelnen die Aufgabe zu lösen, den Betrag der Neigung interferierender Wellenfronten, die auf einem Detektor ein räumliches Interferogramms bilden, mit einfachen Mitteln, zumindest näherungsweise vorbestimmt zu realisieren.

**[0029]** Dabei ist im Einzelnen weiterhin die Aufgabe zu lösen, den Einfluss der Dispersion bei der Anwendung refraktiver Komponenten insbesondere im interferometrischen Strahlengang, vernachlässigbar klein oder numerisch beherrschbar zu halten, um eine weitgehend konstante Mittenfrequenz im entstehenden Interferenz-Wavelet zu erreichen. Dies wiederum begünstigt eine vergleichsweise einfache und zuverlässige Signalverarbeitung der aus räumlichen Interferogrammen abgeleiteten Signale. Der Einfluss der Dispersion des Objekts ist natürlich stets gegeben und ist auch bei der Signalverarbeitung zu beachten und gegebenenfalls durch eine geeignete Algorithmen zu bearbeiten.

**[0030]** Eine hoch-aperturige, interferometrische 2D- oder auch 3D-Objekterfassung soll im Extremfall auf der Basis der Daten eines einzigen Kamera-Frames durchgeführt werden, weil One-shot-Daten gewonnen mittels Kurzpuls-Technik, auch bei Vibrationen in sich konsistent sind. Insbesondere soll dazu kurzkohärentes Licht eingesetzt werden.

**[0031]** Es sollen auch Informationen über das Winkelspektrum für jeden einzelnen Objektpunkt gewonnen werden können.

#### Einsatzgebiete der erfinderischen Lösung

**[0032]** Einsatzgebiete der erfinderischen Lösung sollen sein: Die Mikroform- und die Mikrofilmmessung, die Messung der Rauheit sowie auch die Miniform-Messung, die Form-Messung an nicht oder nur wenig kooperativen Oberflächen, wie auch z. B. menschliches Lebergewebe.

**[0033]** Ein weiteres Anwendungsgebiet stellt auch die Messung von polierten und auch nichtpolierten optischen Asphären und Freiformflächen dar. Hier kann ein optisches Materialbearbeitungssystem der erfinderischen Anordnung beigeordnet sein. Dieses Bearbeitungssystem soll auf den Erkenntnissen der neuesten Materialforschung beruhen und ist in seinen Details und der Parametrisierung ebenfalls nicht Bestandteil dieser Erfindung.

**[0034]** Ein Beispiel für die Anwendung der Erfindung ist hier auch die Erfassung der Mikroform von lebenden Zellen, insbesondere auch Tumorzellen am lebenden Organismus.

**[0035]** Ein besonderes Anwendungsgebiet stellt auch die intraorale Vermessung der 3D-Form eines Zahns, eines Zahnbereiches zumindest in Teilbereichen dar.

**[0036]** Die Messanordnung und das Verfahren sollen auch zur optischen Kohärenz-Tomografie mit räumlichen Interferogrammen, auch als Optische Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial domain-Ansatz bekannt (SD OCT), insbesondere auch mit schneller Multi-Punkt-Antastung für technische oder biologische Objekte eingesetzt werden.

**[0037]** Ein spezielles Anwendungsgebiet kann die biologische und medizinische Grundlagenforschung darstellen. Beispielsweise können die erfinderischen Verfahren und Anordnungen durch die Ankopplung, insbesondere spektral höchstauflösender, Sensorsysteme zur Aufklärung der Entstehung und des Wachstums, einschließlich der Stoffwechselprozesse in-vivo von lebenden Zellen, eingesetzt werden.

**[0038]** Ein Einsatzgebiet ist auch die Messung an optisch rauen Objektoberflächen wo die Höhenwerte von Messpunkt zu benachbartem Messpunkt um mehr als ein Viertel der Wellenlänge differieren können.

**[0039]** Ein weiteres Anwendungsgebiet stellt auch die In-line-Vermessung von mikro-elektro-mechanischen Systemen (MEMS) und mikro-opto-elektro-mechanischen Systemen (MOEMS) dar.

**[0040]** Eine besondere Motivation für die Anwendung der Erfindung ist die Nutzbarmachung der interferometrischen Verstärkung eines schwachen Objektsignals von einem eher wenig kooperativen Messobjekt.

#### Beschreibung der Erfindung

**[0041]** Für die nachstehende Erfindung wird auch der Begriff Lichtfeld-Interferometrie (Light Field Interferometry) in Analogie zur Lichtfeld-Fotografie (Light Field Photography) verwendet. Dieser Ansatz wird hier auf der Basis der Zweistrahl-Interferometrie und mit strukturierter und konfokaler Beleuchtung beschrieben. Dabei soll der Fall der Zweistrahl-Interferometrie zumindest angenähert sein, da bei lichtstreuenden Objekten der Übergang zur Vielstrahl-Interferenz fließend gegeben sein kann. Es werden Zweistrahl-Interferometer-Anordnungen eingesetzt. Beim Einsatz eines Fizeau-Interferometers, welches in der Regel Interferenzen – je nach gegebenen Reflektivitäten – mit einer gewissen Vielstrahl-Charakteristik erzeugt, entstehen durch die hierbei stets gegebene Strahlführung Zweistrahl-Interferenzen. Die Beleuchtung des Objekts erfolgt hierbei – im Gegensatz zur Holografie – stets strukturiert und zumindest näherungsweise auch konfokal.

**[0042]** Hier wird der Begriff Licht stets als Synonym für elektromagnetische Strahlung vom Terahertz-, über den Infrarot- bis zum tiefen UV-Bereich verwendet.

**[0043]** Der Unterschied des holografischen Ansatzes nach J. W. Goodman [15] mit der Lichtfeld-Kamera zum erfinderischen Ansatz besteht darin, dass es sich hierbei um Zweistrahl-Interferometrie mit konfokaler, also feiner oder sehr feiner strukturierter Objektbeleuchtung handelt. Es werden Messpunkte vom Objekt erfasst und ausgewertet, die sich zumindest näherungsweise im wellenoptischen Schärfentiefebereich der Beleuchtung befinden. Darüber hinaus wird mit eher kurzkohärentem Licht beleuchtet, wodurch sich Kurzkohärenz-Interferogramme ergeben.

**[0044]** Die Auswertung der hier im Weiteren beschriebenen Zweistrahlinterferenzen erfordert einen in der Regel einen geringeren Aufwand als die numerische Rekonstruktion von Hologrammen

**[0045]** Erfindungsgemäß werden die folgenden Verfahrensschritte zur Lösung der Aufgaben durchgeführt:  
Zu 1. Die Erfindung wird im Weiteren für ein Messverfahren mit einem einzelnen Endreflektor im Referenzarm eines Zweistrahl-Interferometers beschrieben.

**[0046]** Es handelt sich um ein Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie, insbesondere auch zur optischen Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial-domain-Ansatz (SD-OCT), insbesondere zur Materialmessung und auch Tumorzellen-Erkennung. Dieses kann zur Abstandsmessung, insbesondere auch zur Messung in Verbindung mit einer 3D-Koordinaten-Messmaschine, zur zwei- oder dreidimensionalen Profilmessung, Rauheits-, Welligkeits- und Ebenheitsmessung an technischen und biologischen Objekten, insbesondere dort auch zur Tumorzellen-Erkennung mittels Erfassung des 3D-Profiles von Zellen, und zur Schichtenmessung eingesetzt werden.

**[0047]** Dazu wird ein Zweistrahl-Interferometer mit Referenz- und Objektarm, insbesondere auch in Form eines Interferenzmikroskops, eingesetzt. Im Referenzarm ist mindestens ein Endreflektor angeordnet. Das Zweistrahl-Interferometer ist insbesondere in Freistrahlusbildung und insbesondere auch als Michelson-, Twyman-Green-, Mirau-, Linnik-, Hybrid-Linnik- oder Mach-Zehnder-Interferometer ausgebildet. Dieses Zweistrahl-Interferometer weist folgende Komponenten auf:

- entweder mindestens eine, in mindestens einer Achsen-Richtung schmal ausgebildete Linien-Lichtquelle
- oder ein Linien-Lichtquellen-Array, ausgebildet mit einer Vielzahl von in einer Achsen-Richtung schmal gebildeten, zumindest näherungsweise parallelen Linienspots.

**[0048]** Die Achsenrichtung der schmalen Ausbildung wird hier jeweils als Quer-Achsen-Richtung (q) bezeichnet.

**[0049]** Weiterhin weist dieses Zweistrahl-Interferometer folgende Komponenten auf:

- ein der Linien-Lichtquelle oder dem Linien-Lichtquellen-Array nachfolgendes Lichtquellen-Objektiv zur zumindest näherungsweise beugungsbegrenzten Abbildung derselben,
- ein das Objekt abbildendes Objektiv,
- ein Detektor-Objektiv, wobei das Objektiv, welches das Objekt abbildet, und das Detektor-Objektiv auch als ein einziges Objektiv ausgebildet sein können,
- ein gerasterter Detektor mit Empfängerelementen für elektromagnetische Strahlung,
- und mindestens ein Digitalrechner mit mindestens einem Auswerteprogramm für detektierte Interferogramme zur schnellen Gewinnung von Informationen über das Objekt,

**[0050]** Erfindungsgemäß ist im Referenzarm

- entweder die Linien-Lichtquelle in der Quer-Achsen-Richtung (q) jeweils so schmal ausgebildet ist,
- oder die Linienspots des Linien-Lichtquellen-Arrays in der Quer-Achsen-Richtung (q) jeweils so schmal ausgebildet sind,

dass diese für das nachfolgende Lichtquellen-Objektiv in dieser Quer-Achsen-Richtung (q) zumindest näherungsweise gleich oder unterhalb dessen beugungsbegrenzter Lateral-Auflösung ist/sind, welche durch die numerische Apertur dieses Lichtquellen-Objektivs und der eingesetzten Lichtwellenlänge oder der eingesetzten Lichtwellenlängen der Linien-Lichtquelle oder des Linien-Lichtquellen-Arrays bestimmt ist.

**[0051]** Es wird eine zumindest näherungsweise beugungsbegrenzte Abbildung der Linien-Lichtquelle oder der Linienspots des Linien-Lichtquellen-Arrays auf das Objekt mittels Objektiv durchgeführt.

**[0052]** Die Airy-Breite in dieser Abbildungssituation übersteigt also zumindest näherungsweise die der schmal ausgebildeten Linien-Lichtquelle oder die Breite der schmalen Linienspots ist dieser Airy-Breite zumindest näherungsweise gleichgemacht. Die Airy-Breite in dieser Abbildungssituation ergibt sich aus der numerischen Apertur der nachfolgenden Abbildungsoptik und der eingesetzten Wellenlänge.

**[0053]** Erfindungsgemäß ist weiterhin

- entweder zum einen
  - entweder ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor vollständig im Referenzarm angeordnet, welcher mit einem Referenzobjektiv ausgebildet ist,
  - oder ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System gebildet, welches mit einem Objektiv ausgebildet ist, das außerhalb des Referenzarms angeordnet ist. Dabei ist der Endreflektor selbst – als eine Komponente des Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-Systems – jedoch im Referenzarm angeordnet.
- Diese Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektoren sind jeweils in Kombination mit mindestens einem 90°-Dachkant-Endreflektor im Referenzarm ausgebildet und die Dachkante ist jeweils zumindest näherungsweise in der Brennebene des Referenzobjektivs oder des Objektivs, welches sich außerhalb des Referenzarms befindet, angeordnet.

Die Brennebene von beiden Objektiven ist dabei stets im Referenzraum lokalisiert. Die Dachkante des 90°-Dachkant-Endreflektors ist jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung (q) und parallel zur Längsrichtung der Linien-Lichtquelle angeordnet.

Mittels dieses Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektors wird durch einen Querversatz  $\Delta q$  der Dachkante (DK) zumindest näherungsweise parallel zur Richtung der Quer-Achsen-Richtung (q)

- entweder in der Brennebene (BER) des dem Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor zugeordneten Referenzobjektivs
  - oder in der Brennebene (BER) eines sowohl dem Referenz- als auch dem Objektarm zugeordneten Objektivs, welches sich außerhalb des Referenzarms befindet,
- in der dem Detektorobjektiv vorgeordneten Brennebene ( $F_{91_r}$ ,  $F_{9'}$ ) ein Querversatz  $2 \Delta q_{\text{strich}}$  von zueinander kohärenten Lichtspots ( $A_r$ ,  $A_o$ ) aus dem Referenz- und Objektarm und eingeführt.
- Dieser Querversatz  $\Delta q$  dieser Hybrid-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektoren ist maximal gleich dem zehnten Teil oder kleiner der Brennweite dieses Referenzobjektivs oder dieses Objektivs, welches sich außerhalb des Referenzarms befindet, und mindestens gleich oder größer als der objektivbezogene Airy-Scheibchen-Radius für die Schwerpunktwellenlänge im detektierten räumlichen Interferogramm gemacht.

**[0054]** Oder zum anderen ist weiterhin erfindungsgemäß



- ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor im Referenzarm angeordnet,
  - welcher entweder als Zylinder-Optik-Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor mit einem Zylinder-Objektiv mit einer Zylinderachse und einem Planspiegel in der Brennebene des Zylinder-Objektivs ausgebildet und die Zylinderachse jeweils senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung (q) und d parallel zur Längsrichtung der Linien-Lichtquelle ist,
  - oder welcher als Dachkantreflektor ausgebildet ist und die Dachkante jeweils senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung (q) und parallel zur Längsrichtung der Linien-Lichtquelle ist.
- Durch eine Kippung ( $\delta_{\beta\_tilt}$ ) des Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektors wird, wobei der Kippwinkel maximal gleich oder kleiner 6 Grad und mindestens gleich oder größer als eine halbe Schwerpunktwellenlänge im detektierten räumlichen Interferogramm, bezogen auf den ausgeleuchteten Pupillendurchmesser des Objektivs am Interferometerausgang (**62, 91, 9**) gemacht ist, jeweils um eine Kipp-Achse, die zumindest näherungsweise sowohl senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung (q) als auch senkrecht zur Richtung der Lichtausbreitung ist, jeweils bezogen auf einen entfalteten Strahlengang des Zweistrahl-Interferometers,
- in der dem Detektorobjektiv vorgeordneten Brennebene ein Querversatz  $2 \delta_q$  oder  $2 \delta_{q\_strich}$  von zueinander kohärenten Lichtspots ( $A_r$ ,  $A_o$ ) aus dem Referenz- und Objektarm eingeführt.

**[0055]** In beiden Fällen werden in der Ebene des gerasterten Detektors durch diesem gerasterten Detektor vorzugsweise vorgeordnete optische Mittel zur Einführung von Astigmatismus in den Detektionsstrahlengang, welche dem Objektiv zur Abbildung des Objekts zugeordnet oder nachgeordnet sind, jeweils zwei zueinander gekippte interferierende Wellenfronten, je eine vom Objekt- (O) und je eine vom Referenzarm (R), welche vorzugsweise zumindest näherungsweise eine Zylinderform aufweisen, gebildet und zur Interferenz gebracht. Dabei wird mindestens ein räumliches Interferogramm (KKI) gebildet und mittels gerastertem Detektor detektiert.

**[0056]** Dabei ist die Richtung der Längsachsen der Zylinder-Wellenfronten jeweils zumindest näherungsweise mit der Quer-Achsen-Richtung (q) – im entfalteten Strahlengang des Zweistrahl-Interferometers – übereinstimmend gemacht und die Kippachse der mindestens einen Referenz-Zylinder-Wellenfront ist jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung (q).

**[0057]** Zu 2. Die Erfindung wird im Weiteren für ein Messverfahren mit einem Endreflektor-Array im Referenzarm eines Zweistrahl-Interferometers beschrieben.

**[0058]** Es handelt sich um ein Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie, insbesondere auch zur optischen Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial-domain-Ansatz (SD-OCT), insbesondere zur Materialmessung und auch Tumorzellen-Erkennung. Dieses kann zur Abstandsmessung, insbesondere auch zur Messung in Verbindung mit einer 3D-Koordinaten-Messmaschine, zur zwei- oder dreidimensionalen Profilmessung, Rauheits-, Welligkeits- und Ebenheitsmessung an technischen und biologischen Objekten, insbesondere dort auch zur Tumorzellen-Erkennung mittels Erfassung des 3D-Profiles von Zellen, und zur Schichtenmessung eingesetzt werden.

**[0059]** Dazu wird ein Zweistrahl-Interferometer mit Referenz- und Objektarm, insbesondere auch in Form eines Interferenzmikroskops, eingesetzt. Im Referenzarm ist mindestens ein Endreflektor angeordnet. Das Zweistrahl-Interferometer ist insbesondere in Freistrahl Ausbildung und insbesondere auch als Michelson-, Twyman-Green-, Mirau-, Linnik-, Hybrid-Linnik- oder Mach-Zehnder-Interferometer ausgebildet. Dieses Zweistrahl-Interferometer weist folgende Komponenten auf:

- entweder mindestens eine, in mindestens einer Achsen-Richtung q schmal ausgebildete Linien-Lichtquelle
- oder ein Linien-Lichtquellen-Array, ausgebildet mit einer Vielzahl von in einer Achsen-Richtung q schmal gebildeten, zumindest näherungsweise parallelen Linienspots.

**[0060]** Diese Achsenrichtung der schmalen Ausbildung wird hier jeweils als Quer-Achsen-Richtung (q) bezeichnet.

**[0061]** Weiterhin weist dieses Zweistrahl-Interferometer folgende Komponenten auf:

- ein der Linien-Lichtquelle oder dem Linien-Lichtquellen-Array nachfolgendes Lichtquellen-Objektiv zur zumindest näherungsweise beugungsbegrenzten Abbildung derselben,
- ein das Objekt abbildendes Objektiv,
- ein Detektor-Objektiv, wobei das Objektiv, welches das Objekt abbildet, und das Detektor-Objektiv auch als ein einziges Objektiv ausgebildet sein können,
- ein gerasterter Detektor mit Empfängerelementen für elektromagnetische Strahlung,
- und mindestens ein Digitalrechner mit einem Auswerteprogramm für detektierte Interferogramme zur schnellen Gewinnung von Informationen über das Objekt,

**[0062]** Erfindungsgemäß ist im Referenzarm

- entweder die Linien-Lichtquelle in der Quer-Achsen-Richtung (q) jeweils so schmal ausgebildet ist,
- oder die Linienspots des Linien-Lichtquellen-Arrays in der Quer-Achsen-Richtung (q) jeweils so schmal ausgebildet sind,

dass diese für das nachfolgende Lichtquellen-Objektiv in dieser Quer-Achsen-Richtung (q) zumindest näherungsweise gleich oder unterhalb dessen beugungsbegrenzter Lateral-Auflösung ist/sind, welche durch die numerische Apertur dieses Lichtquellen-Objektivs und der eingesetzten Lichtwellenlänge oder der eingesetzten Lichtwellenlängen der Linien-Lichtquelle oder des Linien-Lichtquellen-Arrays bestimmt ist.

**[0063]** Es wird eine zumindest näherungsweise beugungsbegrenzte Abbildung der Linien-Lichtquelle oder der Linienspots des Linien-Lichtquellen-Arrays auf das Objekt mittels Objektiv durchgeführt.

**[0064]** Die Airy-Breite in dieser Abbildungssituation übersteigt also zumindest näherungsweise die der schmal ausgebildeten Linien-Lichtquelle oder die Breite der schmalen Linienspots ist dieser Airy-Breite zumindest näherungsweise gleichgemacht. Die Airy-Breite in dieser Abbildungssituation ergibt sich aus der numerischen Apertur der nachfolgenden Abbildungsoptik und der eingesetzten Wellenlänge.

**[0065]** Erfindungsgemäß ist

- zum einen entweder ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System im Referenzarm R angeordnet, welches mit einem mit einem Referenzobjektiv ausgebildet ist,
- oder zum anderen ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System angeordnet, das mit einem Objektiv ausgebildet ist, welches sich außerhalb des Referenzarms befindet.

Dieses Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System ist jeweils in Kombination mit

- entweder mit einem Hybrid-Referenz-Mikro-Endreflektor-Array mit Hybrid-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektoren vom 90°-Dachkant-Spiegel-Typ oder 90°-Dachkant-Prismen-Typ
- oder einem Referenz-Mikro-Endreflektor-Array mit Hybrid-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektoren vom Zylinder-Linsen-Cat'eye-Typ oder vom Zylinder-Spiegel-Cat'eye-Typ im Referenzarm ausgebildet.

Dieses Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System ist jeweils zumindest näherungsweise in der Brennebene des Referenzobjektivs oder des Objektivs, welches sich außerhalb des Referenzarms befindet, angeordnet.

Mittels Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System wird durch jeweils durch einen Querversatz  $\delta_q$  dieser Hybrid-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektoren vom Zylinder-Cat'eye-Typ oder vom 90°-Dachkant-Typ zumindest näherungsweise parallel zur Richtung der Quer-Achsen-Richtung (q)

- entweder in der Brennebene (BER) des dem Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor zugeordneten Referenzobjektivs (**4, 42**)

– oder in der Brennebene (BER) eines sowohl dem Referenz- als auch dem Objektarm zugeordneten Objektivs, eingeführt.

Damit ist auch in der dem Detektorobjektiv vorgeordneten Brennebene ( $F_{91_r}$ ,  $F_{9'}$ ) ein Querversatz  $2\delta_q$  von zueinander kohärenten Lichtspots ( $A_r$ ,  $A_o$ ) aus dem Referenz- und Objektarm eingeführt.

Dieser Querversatz  $\delta_q$  dieser Hybrid-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektoren ist maximal gleich dem zehnten Teil oder kleiner der Brennweite dieses Referenzobjektivs oder dieses Objektivs, welches sich außerhalb des Referenzarms befindet, und mindestens gleich oder größer als der objektivbezogene Airy-Scheibchen-Radius für die Schwerpunktwellenlänge im detektierten räumlichen Interferogramm gemacht.

**[0066]** In beiden Fällen werden in der Ebene des gerasterten Detektors durch diesem gerasterten Detektor vorzugsweise vorgeordnete optische Mittel zur Einführung von Astigmatismus in den Detektionsstrahlengang,

welche dem Objektiv zur Abbildung des Objekts zugeordnet oder nachgeordnet sind, eine Vielzahl von jeweils zwei zueinander gekippten interferierenden Wellenfronten, je eine vom Objekt- (O) und je eine vom Referenzarm (R),

welche vorzugsweise zumindest näherungsweise eine Zylinderform aufweisen, gebildet und zur Interferenz gebracht. Dabei wird eine Vielzahl von räumlichen Interferogrammen (KKI) gebildet und mittels gerastertem Detektor detektiert.

**[0067]** Dabei ist die Richtung der Längsachsen der Zylinder-Wellenfronten jeweils zumindest näherungsweise mit der Quer-Achsen-Richtung (q) – im entfalteten Strahlengang des Zweistrahl-Interferometers – übereinstimmend gemacht und die Kippachse der mindestens einen Referenz-Zylinder-Wellenfront ist jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung (q).

**[0068]** Zu 3. Die Erfindung wird im Weiteren für ein Messverfahren mit einem Endreflektor-Array im Referenzarm eines Zweistrahl-Interferometers beschrieben.

**[0069]** Es handelt sich um ein Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie, insbesondere auch zur optischen Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial-domain-Ansatz (SD-OCT), insbesondere zur Materialmessung und auch Tumorzellen-Erkennung. Dieses kann zur Abstandsmessung, insbesondere auch zur Messung in Verbindung mit einer 3D-Koordinaten-Messmaschine, zur zwei- oder dreidimensionalen Profilmessung, Rauheits-, Welligkeits- und Ebenheitsmessung an technischen und biologischen Objekten, insbesondere dort auch zur Tumorzellen-Erkennung mittels Erfassung des 3D-Profiles von Zellen, und zur Schichtenmessung eingesetzt werden.

**[0070]** Dazu wird ein Zweistrahl-Interferometer mit Referenz- und Objektarm, insbesondere auch in Form eines Interferenzmikroskops, eingesetzt. Im Referenzarm ist mindestens ein Endreflektor angeordnet. Das Zweistrahl-Interferometer ist insbesondere in Freistrahl Ausbildung und insbesondere auch als Michelson-, Twyman-Green-, Mirau-, Linnik-, Hybrid-Linnik- oder Mach-Zehnder-Interferometer ausgebildet. Dieses Zweistrahl-Interferometer weist folgende Komponenten auf:

- entweder mindestens eine fein ausgebildete Punkt-Lichtquelle
- oder eine fein ausgebildete Punkt-Lichtquellen-Matrix, ausgebildet mit einer Vielzahl von fein gebildeten Spots,
- ein der Lichtquelle nachfolgendes Lichtquellen-Objektiv zur zumindest näherungsweise beugungsbegrenzten Abbildung derselben oder der Spots derselben,
- ein das Objekt abbildendes Objektiv,
- ein Detektor-Objektiv, wobei das Objektiv, welches das Objekt abbildet, und das Detektor-Objektiv auch als ein einziges Objektiv ausgebildet sein können.
- ein gerasteter Detektor mit Empfängerelementen für elektromagnetische Strahlung,
- und mindestens ein Digitalrechner mit einem Auswerteprogramm für detektierte Interferogramme zur schnellen Gewinnung von Informationen über das Objekt,

**[0071]** Erfindungsgemäß

- ist im Referenzarm entweder die fein ausgebildete Punkt-Lichtquelle jeweils so fein ausgebildet,
  - oder sind im Referenzarm die Spots der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix jeweils so fein ausgebildet,
- dass diese für das nachfolgende Lichtquellen-Objektiv zumindest näherungsweise gleich oder unterhalb dessen beugungsbegrenzter Lateral-Auflösung ist/sind, welche durch numerische Apertur dieses Lichtquellen-Objektivs und der eingesetzten Lichtwellenlänge oder der eingesetzten Lichtwellenlängen der fein ausgebildeten Lichtquelle (**198**) oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix bestimmt ist.
- Entweder mittels eines Voll-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektor-Systems R mit einem Referenzobjektiv im Referenzarm
  - oder mit einem Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System, angeordnet im Referenzarm R, mit einem Objektiv, welches sich außerhalb des Referenzarms befindet, und mit Voll-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektoren in jeweils
  - entweder einem Mikro-Endreflektor-Array mit Voll-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektoren vom rotationssymmetrischen Linsen-Cat'eye-Typ
  - oder einem Mikro-Endreflektor-Array mit Voll-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektoren vom rotationssymmetrischen Spiegel-Cat'eye-Typ
  - oder einem Tripelprismenspiegel-Mikro-Endreflektor-Array mit Tripelprismenspiegel-Mikro-Endreflektoren
  - oder einem Hohl-Tripelreflektor-Mikro-Endreflektor-Array mit Tripelreflektor-Mikro-Endreflektoren

und bei den Mikro-Endreflektoren jeweils ein Querversatz  $\delta_{q}$  in der Brennebene des zugeordneten Referenzobjektivs besteht, der maximal gleich dem zehnten Teil oder kleiner der Brennweite dieses Referenzobjektivs und mindestens gleich oder größer als der objektivbezogene Airy-Scheibchen-Radius für die Schwerpunktwellenlänge im detektierten räumlichen Interferogramm gemacht ist, wird in der dem Detektorobjektiv vorgeordneten Brennebene ein Querversatz  $2\delta_{q}$  oder  $2\delta_{q\_strich}$  von zueinander kohärenten Lichtspots ( $A_r$ ,  $A_o$ ) aus dem Referenz- und Objektarm und eingeführt. Dieser ist mindestens gleich oder größer als der objektivbezogene Airy-Scheibchen-Radius für die Schwerpunktwellenlänge im detektierten räumlichen Interferogramm gemacht.

**[0072]** In der Ebene des gerasterten Detektors werden durch diesem gerasterten Detektor vorzugsweise vorgeordnete optische Mittel zur Einführung von Astigmatismus in den Detektionsstrahlengang, welche dem Objektiv zur Abbildung des Objekts zugeordnet oder nachgeordnet sind, jeweils zwei zueinander gekippte interferierende Wellenfronten, welche vorzugsweise zumindest näherungsweise eine Zylinderform aufweisen, je eine vom Objekt- (O) und je eine vom Referenzarm (R) gebildet und zur Interferenz gebracht. Dabei wird eine Vielzahl von räumlichen Interferogrammen (KKI) gebildet und mittels gerastertem Detektor detektiert.

**[0073]** Dabei ist die Richtung der Längsachsen der Zylinder-Wellenfronten jeweils zumindest näherungsweise mit der Quer-Achsen-Richtung ( $q$ ) – im entfalteten Strahlengang des Zweistrahl-Interferometers – übereinstimmend gemacht und die Kippachse der mindestens einen Referenz-Zylinder-Wellenfront ist jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung ( $q$ ).

**[0074]** Zu 4. Weiterhin ist vorzugsweise bei dem Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie die Richtung der Längsachsen der Zylinder-Wellenfronten jeweils zumindest näherungsweise mit der Quer-Achsen-Richtung ( $q$ ) – im entfalteten Strahlengang des Zweistrahl-Interferometers – übereinstimmend gemacht und die Kippachse der mindestens einen Referenz-Zylinder-Wellenfront ist jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung ( $q$ ) angeordnet. Bei einer Linien-Lichtquelle fällt diese mit der Längsausdehnungs-Richtung der Linien-Lichtquelle oder der Längsausdehnungs-Richtung von länglichen Lichtspots einer Lichtquelle zusammen.

**[0075]** Zu 5. Weiterhin wird vorzugsweise bei dem Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie im Schnitt, der die Quer-Achsen-Richtung ( $q$ ) enthält, die Fourier-Ebene (FEO) des objektabbildenden Objektivs auf den gerasterten Detektor zumindest näherungsweise scharf mit optischen Mitteln abgebildet und im Schnitt senkrecht dazu, der im entfalteten Strahlengang parallel zur Längsrichtung der Linienquelle ist, wird die Messebene des Objekts (MEO) scharf mit optischen Mitteln auf den gerasterten Detektor abgebildet wird, so dass im Detektionsstrahlengang eine astigmatische Abbildung durchgeführt wird.

**[0076]** Die Wellenfront-Inversion stellt hier keinen expliziten Vorteil dar. Vielmehr muss man in Kauf nehmen. Diese ist unerwünscht, aber durch beugungsbegrenzte Abbildung von schmalen Spots der Lichtquelle tolerierbar.

**[0077]** Zu 6: Bei dem Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie wird vorzugsweise bei der Abbildung in einer Zwischenbildebene ZBE zumindest für das Objektlicht eine konfokale Diskriminierung mittels optischer Mittel zur Tiefpassfilterung durchgeführt. Damit wird bekannter Weise das Streulicht aus der Tiefe des Objekts verringert. Außerdem dient diese zur Tiefpassfilterung des Objektlichts, was zu einer Verbesserung der Signalqualität bei den detektierten räumlichen Interferogrammen führen kann.

– Bei dem Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie wird vorzugsweise im Objektarm eine chromatische Tiefenaufspaltung mittels über der Wellenlänge brechkraftvariabler Mittel durchgeführt. Damit kann der wellenoptisch begründete Tiefenmessbereich bei dem Messverfahren wesentlich vergrößert werden.

**[0078]** Zu 7. Weiterhin wird bei dem Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie vorzugsweise bei der Abbildung in einer Zwischenbildebene ZBE für das Objektlicht eine Tiefpassfilterung mittels optischer Mittel durchgeführt.

– Bei dem Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie wird vorzugsweise weiterhin eine spektrale Aufspaltung im Detektionsstrahlengang zur Vergrößerung der Kohärenzlänge und somit eine Separierung der Interferogramme unterschiedlicher Wellenlängen oder Wellenlängenbereiche auf dem gerasterten Empfänger durchgeführt.

**[0079]** Die spektrale Aufspaltung im Detektionsstrahlengang bewirkt eine Vergrößerung der Kohärenzlänge, was wiederum eine Vergrößerung der Fläche mit kontrastreichen auswertbaren Interferenzen auf dem Detektor bewirkt und somit auch die Möglichkeit der Durchführung einer Multiwellenlängen-Auswertung mit Phasenauswertung gibt. Diese Phasenauswertung liefert den optischen Gangunterschied null zumindest näherungsweise, auch wenn nur Teile des Interferogramms vorliegen oder auch eine Information über die Nichtauswertbarkeit des Messpunktes, beispielsweise wegen zu starkem Specklings im Interferogramm.

- Bei dem Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie wird vorzugsweise eine rechnergesteuerte Lateral-Verschiebung des oder der Linienspots der Linien-Lichtquelle oder des Linien-Lichtquellen-Array durchgeführt. Somit kann das Messfeld voll erfasst werden.
- Bei dem Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie wird vorzugsweise eine rechnergesteuerte Lateral-Verschiebung des oder der Endreflektoren oder des Endreflektor-Arrays durchgeführt. Somit kann das Messfeld voll erfasst werden.
- Bei dem Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie wird vorzugsweise eine rechnergesteuerte Lateral-Verschiebung des oder der Linienspots der Linien-Lichtquelle oder des Linien-Lichtquellen-Array durchgeführt. Somit kann das Messfeld voll erfasst werden.
- Bei dem Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie wird vorzugsweise die rechnergesteuerte Lateral-Verschiebung des oder der Endreflektoren oder des Endreflektor-Arrays und die rechnergesteuerte Lateral-Verschiebung des oder der Linienspots der Linien-Lichtquelle oder des Linien-Lichtquellen-Array zueinander synchronisiert durchgeführt.
- Bei dem Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie wird vorzugsweise eine Immersionstechnik im Objektarm eingesetzt. Damit können auch Objekte in flüssiger Umgebung angemessen werden.
- Bei dem Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie wird vorzugsweise eine Immersionstechnik im Objektarm und im Referenzarm eingesetzt.
- Bei dem Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie wird vorzugsweise der Schwerpunkt der Einhüllenden eines kurzkohärenten, räumlichen Interferogramms (KKI) ausgewertet.
- Bei dem Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie wird vorzugsweise die Phase eines räumlichen Interferogramms (KKI) ausgewertet.

**[0080]** Die Erfindung wird im Weiteren für eine Messanordnung mit einem einzelnen Endreflektor im Referenzarm eines Zweistrahl-Interferometers beschrieben.

**[0081]** Erfindungsgemäß bestehen die folgenden Anordnungsmerkmale zur Lösung der Aufgaben:  
Zu 8. Die Erfindung wird im Weiteren für eine Messanordnung mit einem einzelnen Endreflektor im Referenzarm eines Zweistrahl-Interferometers beschrieben.

**[0082]** Es handelt sich um eine Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie, insbesondere auch zur optischen Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial-domain-Ansatz (SD-OCT), insbesondere zur Materialmessung und auch Tumorzellen-Erkennung. Dieses kann zur Abstandsmessung, insbesondere auch zur Messung in Verbindung mit einer 3D-Koordinaten-Messmaschine, zur zwei- oder dreidimensionalen Profilmessung, Rauheits-, Welligkeits- und Ebenheitsmessung an technischen und biologischen Objekten, insbesondere dort auch zur Tumorzellen-Erkennung mittels Erfassung des 3D-Profiles von Zellen, und zur Schichtenmessung eingesetzt werden.

**[0083]** Dazu wird ein Zweistrahl-Interferometer mit Referenz- und Objektarm, insbesondere auch in Form eines Interferenzmikroskops, eingesetzt. Im Referenzarm ist mindestens ein Endreflektor angeordnet. Das Zweistrahl-Interferometer ist insbesondere in Freistrahl Ausbildung und insbesondere auch als Michelson-, Twyman-Green-, Mirau-, Linnik-, Hybrid-Linnik- oder Mach-Zehnder-Interferometer ausgebildet. Dieses Zweistrahl-Interferometer weist folgende Komponenten auf:

- entweder mindestens eine, in mindestens einer Achsen-Richtung schmal ausgebildete Linien-Lichtquelle
- oder ein Linien-Lichtquellen-Array, ausgebildet mit einer Vielzahl von in einer Achsen-Richtung schmal gebildeten, zumindest näherungsweise parallelen Linienspots.

**[0084]** Diese Achsenrichtung der schmalen Ausbildung wird hier jeweils als Quer-Achsen-Richtung (q) bezeichnet.

**[0085]** Weiterhin weist dieses Zweistrahl-Interferometer folgende Komponenten auf:

- ein der Linien-Lichtquelle oder dem Linien-Lichtquellen-Array nachfolgendes Lichtquellen-Objektiv zur zumindest näherungsweise beugungsbegrenzten Abbildung derselben,
- ein das Objekt abbildendes Objektiv,
- ein Detektor-Objektiv, wobei das Objektiv, welches das Objekt abbildet, und das Detektor-Objektiv auch als ein einziges Objektiv ausgebildet sein können,
- ein gerasterter Detektor mit Empfängerelementen für elektromagnetische Strahlung,
- und mindestens ein Digitalrechner mit einem Auswerteprogramm für detektierte Interferogramme zur schnellen Gewinnung von Informationen über das Objekt,

**[0086]** Erfindungsgemäß ist im Referenzarm

- entweder die Linien-Lichtquelle in der Quer-Achsen-Richtung ( $q$ ) jeweils so schmal ausgebildet ist,
- oder die Linienspots des Linien-Lichtquellen-Arrays in der Quer-Achsen-Richtung ( $q$ ) jeweils so schmal ausgebildet sind,

dass diese für das nachfolgende Lichtquellen-Objektiv in dieser Quer-Achsen-Richtung ( $q$ ) zumindest näherungsweise gleich oder unterhalb dessen beugungsbegrenzter Lateral-Auflösung ist/sind, welche durch die numerische Apertur dieses Lichtquellen-Objektivs und der eingesetzten Lichtwellenlänge oder der eingesetzten Lichtwellenlängen der Linien-Lichtquelle oder des Linien-Lichtquellen-Arrays bestimmt ist.

**[0087]** Es wird eine zumindest näherungsweise beugungsbegrenzte Abbildung der Linien-Lichtquelle oder der Linienspots des Linien-Lichtquellen-Arrays auf das Objekt mittels Objektiv durchgeführt.

**[0088]** Die Airy-Breite in dieser Abbildungssituation übersteigt also zumindest näherungsweise die der schmal ausgebildeten Linien-Lichtquelle oder die Breite der schmalen Linienspots ist dieser Airy-Breite zumindest näherungsweise gleichgemacht. Die Airy-Breite in dieser Abbildungssituation ergibt sich aus der numerischen Apertur der nachfolgenden Abbildungsoptik und der eingesetzten Wellenlänge.

**[0089]** Die Airy-Breite in dieser Abbildungssituation übersteigt also zumindest näherungsweise die der schmal ausgebildeten Linien-Lichtquelle oder die Breite der schmalen Linienspots ist dieser Airy-Breite zumindest näherungsweise gleichgemacht. Die Airy-Breite in dieser Abbildungssituation ergibt sich aus der numerischen Apertur der nachfolgenden Abbildungsoptik und der eingesetzten Wellenlänge.

**[0090]** Erfindungsgemäß ist weiterhin

- entweder zum einen
  - entweder ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor vollständig im Referenzarm angeordnet, welcher mit einem Referenzobjektiv ausgebildet ist,
  - oder ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System gebildet, welches mit einem Objektiv ausgebildet ist, das außerhalb des Referenzarms angeordnet ist. Dabei ist der Endreflektor selbst – als eine Komponente des Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-Systems – jedoch im Referenzarm angeordnet.
- Diese Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektoren sind jeweils in Kombination mit mindestens einem 90°-Dachkant-Endreflektor im Referenzarm ausgebildet und die Dachkante ist jeweils zumindest näherungsweise in der Brennebene des Referenzobjektivs oder des Objektivs, welches sich außerhalb des Referenzarms befindet, angeordnet.

Die Brennebene von beiden Objektiven ist dabei stets im Referenzraum lokalisiert. Die Dachkante des 90°-Dachkant-Endreflektors ist jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung ( $q$ ) und parallel zur Längsrichtung der Linien-Lichtquelle angeordnet.

Mittels dieses Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektors wird durch einen Querversatz  $\Delta q$  der Dachkante (DK) zumindest näherungsweise parallel zur Richtung der Quer-Achsen-Richtung ( $q$ )

- entweder in der Brennebene (BER) des dem Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor zugeordneten Referenzobjektivs
  - oder in der Brennebene (BER) eines sowohl dem Referenz- als auch dem Objektarm zugeordneten Objektivs, welches sich außerhalb des Referenzarms befindet,
- in der dem Detektorobjektiv vorgeordneten Brennebene ( $F_{91_r}, F_{9'}$ ) ein Querversatz  $2 \Delta q_{\text{strich}}$  von zueinander kohärenten Lichtspots ( $A_r, A_o$ ) aus dem Referenz- und Objektarm und eingeführt.
- Dieser Querversatz  $\Delta q$  dieser Hybrid-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektoren ist maximal gleich oder kleiner dem zehnten Teil der Brennweite dieses Referenzobjektivs oder dieses Objektivs, welches sich außerhalb des Referenzarms befindet, und mindestens gleich oder größer als der objektivbezogene Airy-Scheibchen-Radius für die Schwerpunktwellenlänge im detektierten räumlichen Interferogramm gemacht.

**[0091]** Oder zum anderen ist weiterhin erfindungsgemäß

- ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor im Referenzarm angeordnet,
  - welcher entweder als Zylinder-Optik-Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor mit einem Zylinder-Objektiv mit einer Zylinderachse und einem Planspiegel in der Brennebene des Zylinder-Objektivs ausgebildet und die Zylinderachse jeweils senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung (q) und d parallel zur Längsrichtung der Linien-Lichtquelle ist,
  - oder welcher als Dachkantreflektor ausgebildet ist und die Dachkante jeweils senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung (q) und parallel zur Längsrichtung der Linien-Lichtquelle ist.
- Dabei ist der Kippwinkel maximal gleich oder kleiner 6 Altgrad und mindestens gleich oder größer als eine halbe Schwerpunktwellenlänge  $\lambda_S$  im detektierten räumlichen Interferogramm, bezogen auf den ausgeleuchteten Pupillendurchmesser des Objektivs am Interferometerausgang (62, 91, 9) gemacht, jeweils um eine Kipp-Achse, die zumindest näherungsweise sowohl senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung (q) als auch senkrecht zur Richtung der Lichtausbreitung ist, jeweils bezogen auf einen entfalteten Strahlengang des Zweistrahl-Interferometers.

**[0092]** Dem gerasterten Detektor sind vorzugsweise optische Mittel zur Einführung von Astigmatismus in den Detektionsstrahlengang vorgeordnet, welche dem Objektiv zur Abbildung des Objekts zugeordnet oder nachgeordnet sind, welche dem Objektiv zur Abbildung des Objekts zugeordnet oder nachgeordnet sind.

**[0093]** Zu 9. Die Erfindung wird im Weiteren für eine Anordnung mit einem Endreflektor-Array im Referenzarm eines Zweistrahl-Interferometers beschrieben.

**[0094]** Es handelt sich um eine Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie, insbesondere auch zur optischen Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial-domain-Ansatz (SD-OCT), insbesondere zur Materialmessung und auch Tumorzellen-Erkennung. Dieses kann zur Abstandsmessung, insbesondere auch zur Messung in Verbindung mit einer 3D-Koordinaten-Messmaschine, zur zwei- oder dreidimensionalen Profilmessung, Rauheits-, Welligkeits- und Ebenheitsmessung an technischen und biologischen Objekten, insbesondere dort auch zur Tumorzellen-Erkennung mittels Erfassung des 3D-Profiles von Zellen, und zur Schichtenmessung eingesetzt werden.

**[0095]** Dazu wird ein Zweistrahl-Interferometer mit Referenz- und Objektarm, insbesondere auch in Form eines Interferenzmikroskops, eingesetzt. Im Referenzarm ist mindestens ein Endreflektor angeordnet. Das Zweistrahl-Interferometer ist insbesondere in Freistrahl Ausbildung und insbesondere auch als Michelson-, Twyman-Green-, Mirau-, Linnik-, Hybrid-Linnik- oder Mach-Zehnder-Interferometer ausgebildet. Dieses Zweistrahl-Interferometer weist folgende Komponenten auf:

- entweder mindestens eine, in mindestens einer Achsen-Richtung q schmal ausgebildete Linien-Lichtquelle
- oder ein Linien-Lichtquellen-Array, ausgebildet mit einer Vielzahl von in einer Achsen-Richtung q schmal gebildeten, zumindest näherungsweise parallelen Linienspots.

**[0096]** Diese Achsenrichtung der schmalen Ausbildung wird hier jeweils als Quer-Achsen-Richtung (q) bezeichnet.

**[0097]** Weiterhin weist dieses Zweistrahl-Interferometer folgende Komponenten auf:

- ein der Linien-Lichtquelle oder dem Linien-Lichtquellen-Array nachfolgendes Lichtquellen-Objektiv zur zumindest näherungsweise beugungsbegrenzten Abbildung derselben,
- ein das Objekt abbildendes Objektiv,
- ein Detektor-Objektiv, wobei das Objektiv, welches das Objekt abbildet, und das Detektor-Objektiv auch als ein einziges Objektiv ausgebildet sein können,
- ein gerasteter Detektor mit Empfängerelementen für elektromagnetische Strahlung,
- und mindestens ein Digitalrechner mit einem Auswerteprogramm für detektierte Interferogramme zur schnellen Gewinnung von Informationen über das Objekt,

**[0098]** Erfindungsgemäß ist im Referenzarm

- entweder die Linien-Lichtquelle in der Quer-Achsen-Richtung (q) jeweils so schmal ausgebildet ist,
- oder die Linienspots des Linien-Lichtquellen-Arrays in der Quer-Achsen-Richtung (q) jeweils so schmal ausgebildet sind,

dass diese für das nachfolgende Lichtquellen-Objektiv in dieser Quer-Achsen-Richtung (q) zumindest näherungsweise gleich oder unterhalb dessen beugungsbegrenzter Lateral-Auflösung ist/sind, welche durch die

numerische Apertur dieses Lichtquellen-Objektivs und der eingesetzten Lichtwellenlänge oder der eingesetzten Lichtwellenlängen der Linien-Lichtquelle oder des Linien-Lichtquellen-Arrays bestimmt ist.

**[0099]** Es besteht eine zumindest näherungsweise beugungsbegrenzte Abbildung der Linien-Lichtquelle oder der Linienspots des Linien-Lichtquellen-Arrays auf das Objekt mittels Objektiv.

**[0100]** Die Airy-Breite in dieser Abbildungssituation übersteigt also zumindest näherungsweise die der schmal ausgebildeten Linien-Lichtquelle oder die Breite der schmalen Linienspots ist dieser Airy-Breite zumindest näherungsweise gleichgemacht. Die Airy-Breite in dieser Abbildungssituation ergibt sich aus der numerischen Apertur der nachfolgenden Abbildungsoptik und der eingesetzten Wellenlänge.

**[0101]** Erfindungsgemäß ist

- entweder ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System im Referenzarm R angeordnet, welches mit einem mit einem Referenzobjektiv ausgebildet ist,
- oder ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System angeordnet, das mit einem Objektiv ausgebildet ist, welches sich außerhalb des Referenzarms befindet.

Dieses Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System ist jeweils in Kombination mit

- entweder mit einem Hybrid-Referenz-Mikro-Endreflektor-Array mit Hybrid-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektoren vom 90°-Dachkant-Spiegel-Typ oder 90°-Dachkant-Prismen-Typ
- oder einem Referenz-Mikro-Endreflektor-Array mit Hybrid-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektoren vom Zylinder-Linsen-Cat'eye-Typ oder vom Zylinder-Spiegel-Cat'eye-Typ im Referenzarm ausgebildet.

Dieses Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System ist jeweils zumindest näherungsweise in der Brennebene des Referenzobjektivs oder des Objektivs, welches sich außerhalb des Referenzarms befindet, angeordnet.

Im Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System besteht jeweils ein vergleichsweise kleiner Querversatz  $\delta_q$  dieser Hybrid-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektoren vom Zylinder-Cat'eye-Typ oder vom 90°-Dachkant-Typ zumindest näherungsweise parallel zur Richtung der Quer-Achsen-Richtung ( $q$ )

- entweder in der Brennebene (BER) des dem Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor zugeordneten Referenzobjektivs (4, 42)
- oder in der Brennebene (BER) eines sowohl dem Referenz- als auch dem Objektarm zugeordneten Objektivs,

in der dem Detektorobjektiv vorgeordneten Brennebene ( $F_{91_r}, F_{9'}$ ).

So wird ein Querversatz  $2 \delta_q$  von zueinander kohärenten Lichtspots ( $A_r$ ,  $A_o$ ) aus dem Referenz- und Objektarm und eingeführt.

Dieser Querversatz  $\delta_q$  dieser Hybrid-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektoren ist maximal gleich oder kleiner dem zehnten Teil der Brennweite dieses Referenzobjektivs oder dieses Objektivs, welches sich außerhalb des Referenzarms befindet, und mindestens gleich oder größer als der objektivbezogene Airy-Scheibchen-Radius für die Schwerpunktwellenlänge im detektierten räumlichen Interferogramm gemacht.

**[0102]** Dem gerasterten Detektor sind vorzugsweise optische Mittel zur Einführung von Astigmatismus in den Detektionsstrahlengang vorgeordnet, welche dem Objektiv zur Abbildung des Objekts zugeordnet oder nachgeordnet sind, welche dem Objektiv zur Abbildung des Objekts zugeordnet oder nachgeordnet sind.

**[0103]** Zu 10. Die Erfindung wird im Weiteren für eine Anordnung mit einem Endreflektor-Array im Referenzarm eines Zweistrahl-Interferometers beschrieben.

**[0104]** Es handelt sich um eine Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie, insbesondere auch zur optischen Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial-domain-Ansatz (SD-OCT), insbesondere zur Materialmessung und auch Tumorzellen-Erkennung. Dieses kann zur Abstandsmessung, insbesondere auch zur Messung in Verbindung mit einer 3D-Koordinaten-Messmaschine, zur zwei- oder dreidimensionalen Profilmessung, Rauheits-, Welligkeits- und Ebenheitsmessung an technischen und biologischen Objekten, insbesondere dort auch zur Tumorzellen-Erkennung mittels Erfassung des 3D-Profiles von Zellen, und zur Schichtenmessung eingesetzt werden.

**[0105]** Dazu wird ein Zweistrahl-Interferometer mit Referenz- und Objektarm, insbesondere auch in Form eines Interferenzmikroskops, eingesetzt. Im Referenzarm ist mindestens ein Endreflektor angeordnet. Das Zweistrahl-Interferometer ist insbesondere in Freistrahlusbildung und insbesondere auch als Michelson-, Twyman-Green-, Mirau-, Linnik-, Hybrid-Linnik- oder Mach-Zehnder-Interferometer ausgebildet. Dieses Zweistrahl-Interferometer weist folgende Komponenten auf:



- entweder mindestens eine fein ausgebildete Punkt-Lichtquelle
- oder eine fein ausgebildete Punkt-Lichtquellen-Matrix, ausgebildet mit einer Vielzahl von fein gebildeten Spots,
- ein der Lichtquelle nachfolgendes Lichtquellen-Objektiv zur zumindest näherungsweise beugungsbegrenzten Abbildung derselben oder der Spots derselben,
- ein das Objekt abbildendes Objektiv,
- ein Detektor-Objektiv, wobei das Objektiv, welches das Objekt abbildet, und das Detektor-Objektiv auch als ein einziges Objektiv ausgebildet sein können.
- ein gerasterter Detektor mit Empfängerelementen für elektromagnetische Strahlung,
- und mindestens ein Digitalrechner mit einem Auswerteprogramm für detektierte Interferogramme zur schnellen Gewinnung von Informationen über das Objekt,

**[0106]** Erfindungsgemäß

- ist im Referenzarm entweder die fein ausgebildete Punkt-Lichtquelle jeweils so fein ausgebildet,
  - oder sind im Referenzarm die Spots der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix jeweils so fein ausgebildet,
- dass diese für das nachfolgende Lichtquellen-Objektiv zumindest näherungsweise gleich oder unterhalb dessen beugungsbegrenzter Lateral-Auflösung ist/sind, welche durch numerische Apertur dieses Lichtquellen-Objektivs und der eingesetzten Lichtwellenlänge oder der eingesetzten Lichtwellenlängen der fein ausgebildeten Lichtquelle (**198**) oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix bestimmt ist.
- Mittels eines Voll-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektor-Systems mit einem Referenzobjektiv und mit Voll-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektoren in jeweils
- entweder einem Mikro-Endreflektor-Array mit Voll-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektoren vom rotations-symmetrischen Linsen-Cat'eye-Typ
  - oder einem Mikro-Endreflektor-Array mit Voll-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektoren vom rotationssymmetrischen Spiegel-Cat'eye-Typ
  - oder einem Tripelprismenspiegel-Mikro-Endreflektor-Array mit Tripelprismenspiegel-Mikro-Endreflektoren
  - oder einem Hohl-Tripelspiegel-Mikro-Endreflektor-Array mit Tripelspiegel-Mikro-Endreflektoren angeordnet ist,
- und bei den Mikro-Endreflektoren jeweils ein Querversatz  $\delta_{q}$  in der Brennebene des zugeordneten Referenzobjektivs besteht, der maximal gleich oder kleiner dem zehnten Teil der Brennweite des Referenzobjektivs beträgt, und mindestens gleich oder größer als der objektivbezogene Airy-Scheibchen-Radius für die Schwerpunktwellenlänge im detektierten räumlichen Interferogramm gemacht ist.
- In der dem Detektorobjektiv vorgeordneten Brennebene besteht ein Querversatz  $2 \delta_{q}$  oder  $2 \delta_{q\_strich}$  von zueinander kohärenten Lichtspots ( $A_{r}$ ,  $A_{o}$ ) aus dem Referenz- und Objektarm.

**[0107]** Dem Detektor sind vorzugsweise optische Mittel zur Einführung von Astigmatismus in den Detektionsstrahlengang vorgeordnet,

welche dem Objektiv zur Abbildung des Objekts zugeordnet oder nachgeordnet sind,  
welche dem Objektiv zur Abbildung des Objekts zugeordnet oder nachgeordnet sind.

- Weiterhin ist vorzugsweise bei einer Anordnung zur robusten One-Shot-Interferometrie die Lichtquelle als Multiwellenlängen-Lichtquelle ausgebildet. Dies ist eine Voraussetzung für die Gewinnung kurzkohärenter Interferogramme (KKI).
- Weiterhin ist vorzugsweise bei einer Anordnung zur robusten One-Shot-Interferometrie die Lichtquelle als Kurzpuls-Lichtquelle ausgebildet. Mit Pulslängen im Nano-, Mikro- bis Millisekundenbereich können kurzkohärente Interferogramme auch an bewegten Objekten gewonnen werden. Es erfolgt vorzugsweise eine Synchronisierung mit dem gerasterten Detektor.
- Weiterhin ist vorzugsweise bei einer Anordnung zur robusten One-Shot-Interferometrie die Lichtquelle als Frequenzkamm-Lichtquelle ausgebildet ist. Damit kann ein unbalancierten Zweistrahl-Interferometer zur Generierung von Kurz-Kohärenz-Interferenzen verwendet werden, indem der optische Gangunterschied des unbalancierten Zweistrahl-Interferometers durch die optische Verzögerungslänge  $Y$  oder ein ganzzahliges Vielfaches der optischen Verzögerungslänge  $Y$  der Frequenzkamm-Lichtquelle ausgeglichen wird.
- Weiterhin ist vorzugsweise bei einer Anordnung zur robusten One-Shot-Interferometrie die Lichtquelle als durchstimmbare Frequenzkamm-Lichtquelle ausgebildet. Mittels feinem Durchstimmen der Frequenzkamm-Lichtquelle kann vorbestimmt eine Phasenschiebung in Zweistrahl-Interferogrammen erzeugt werden.
- Weiterhin ist vorzugsweise bei einer Anordnung zur robusten One-Shot-Interferometrie die Rasterkonstante von gerasterter Lichtquelle und gerasterten Referenz-Endreflektoren, bezogen auf die Brennebene des Tubusobjektivs oder auf die Brennebene des objektabbildenden Objektivs, zumindest näherungsweise gleichgemacht.

- Weiterhin ist vorzugsweise bei einer Anordnung zur robusten One-Shot-Interferometrie mindestens ein Mikro-Endreflektor-Array mit Voll-Retro-Mikro-Endreflektoren vom Spiegel- oder Linsen-Cat'eye-Typ angeordnet, wobei jeder Mikro-Endreflektor um den Querversatz  $\delta_q$  – in Bezug auf den Objektarm im entfalteten Interferometer-Strahlengang – lateral versetzt ist.
- Weiterhin ist vorzugsweise bei einer Anordnung zur robusten One-Shot-Interferometrie ein Mess-Abtaster in Nagelbrett-Form, das durch eine gerasterte Punkt-Lichtquellen-Matrix vorgegeben ist, zu einem flächigen Detektor um einen spitzen Winkel gedreht angeordnet ist, wobei die Drehung der Punkt-Lichtquellen-Matrix zumindest näherungsweise um die optische Achse der optischen Anordnung im entfalteten Strahlengang ausgeführt ist.
- Weiterhin ist vorzugsweise bei einer Anordnung zur robusten One-Shot-Interferometrie eine Dachkante (DK) mindestens eines  $90^\circ$ -Hohl-Dachkantreflektors oder der Dachkanten eines  $90^\circ$ -Hohl-Dachkantreflektor-Arrays zumindest näherungsweise in der Ebene BER und zumindest näherungsweise parallel zur Richtung ( $l_0$ ) der Längsausdehnung der Linienlichtquelle oder der feinen Linienspots des Linien-Lichtquellen-Arrays angeordnet. Diese Dachkante muss sich im wellenoptischen Schärfentiefebereich befinden, was eine Voraussetzung für die Funktion des Verfahrens darstellt.
- Weiterhin ist vorzugsweise bei einer Anordnung zur robusten One-Shot-Interferometrie eine Dachkante (DK) mindestens eines  $90^\circ$ -Prismen-Dachkantreflektors oder eines  $90^\circ$ -Prismen-Dachkantreflektor-Arrays optisch – unter Berücksichtigung des Bildversatzes  $v$  – zumindest näherungsweise in der Ebene BER und zumindest näherungsweise parallel zur Richtung ( $l_0$ ) der Längsausdehnung der Linienlichtquelle oder der feinen Linienspots des Linien-Lichtquellen-Arrays abgebildet – bei Beobachtung vom Referenzobjektiv im Referenzraum aus.
- Weiterhin ist vorzugsweise bei einer Anordnung zur robusten One-Shot-Interferometrie eine Dachkante (DK) eines  $90^\circ$ -Hohl-Dachkantreflektors in der Ebene FER zumindest näherungsweise senkrecht zur Richtung  $l_0$  und parallel zur Richtung  $q$  angeordnet.
- Weiterhin ist vorzugsweise bei einer Anordnung zur robusten One-Shot-Interferometrie eine Dachkante (DK) eines  $90^\circ$ -Prismen-Dachkantreflektors zumindest näherungsweise in der Ebene FER optisch – unter Berücksichtigung des Bildversatzes  $v$  – und zumindest näherungsweise senkrecht zur Richtung  $l_0$  und parallel zur Richtung  $q$  abgebildet – bei Beobachtung vom Referenzobjektiv aus. Hier muss eine Frequenzkamm-Lichtquelle, vorzugsweise in Form eines Frequenzkamm-Lasers zur Kompensation des optischen Gangunterschieds zwingend eingesetzt werden.
- Weiterhin sind vorzugsweise bei einer Anordnung zur robusten One-Shot-Interferometrie die Tripelpunkte (TP) der Tripel-Hohl-Reflektoren in einem Hohl-Tripel-Reflektor-Array angeordnet oder der Tripelpunkt eines einzelnen Tripel-Hohl-Reflektors ist zumindest näherungsweise in der Ebene BER angeordnet. Diese Tripelpunkte (TP) sollen sich vorzugsweise im wellenoptischen Schärfentiefebereich befinden.
- Weiterhin sind vorzugsweise bei einer Anordnung zur robusten One-Shot-Interferometrie die Tripelpunkte (TP) der Tripel-Prismen-Reflektoren in einem Tripelprismen-Reflektor-Array oder der Tripelpunkt eines einzelnen Tripelprisma-Reflektors optisch – unter Berücksichtigung des Bildversatzes  $v$  – zumindest näherungsweise in der Ebene BER abgebildet – bei Beobachtung von einem Referenzobjektiv aus.
- Weiterhin ist vorzugsweise bei einer Anordnung zur robusten One-Shot-Interferometrie der Brennpunkt einer rotationssymmetrischen Mikro-Linse in einem Voll-Retro-Mikro-Endreflektor als Bestandteil eines Voll-Mikro-Endreflektors jeweils zumindest näherungsweise in der Ebene BER angeordnet. Alle Brennpunkte aller rotationssymmetrischen Mikro-Linsen in jeweils einem Voll-Retro-Mikro-Endreflektor eines Voll-Mikro-Endreflektors sollen sich vorzugsweise in der Ebene BER befinden.
- Weiterhin sind vorzugsweise Anordnung zur robusten One-Shot-Interferometrie die Brennpunkte der Zylinder-Mikro-Linsen in einem Hybrid-Retro-Mikro-Endreflektor als Bestandteil eines Voll-Mikro-Endreflektors jeweils zumindest näherungsweise in der Ebene BER angeordnet. Alle Brennpunkte aller Mikro-Linsen in jeweils einem Voll-Retro-Mikro-Endreflektor eines Voll-Mikro-Endreflektors sollen sich vorzugsweise in der Ebene BER befinden.
- Weiterhin sind vorzugsweise brechkraftvariable Mittel zur chromatischen Tiefenaufspaltung im Objektarm angeordnet. Damit kann der wellenoptisch begründete Tiefenmessbereich wesentlich vergrößert werden.

**[0108]** Der erfinderische Ansatz wird in Folgendem zusammengefasst:

Es handelt sich um ein Verfahren und eine Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie, insbesondere auch zur optischen Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial-domain-Ansatz (SD-OCT), an Material und lebendem Gewebe, zur Abstandsmessung, insbesondere auch zur Messung in einer Messmaschine, zur 2D- oder 3D-Profilmessung an technischen und biologischen Objekten, insbesondere auch zur Tumorzellen-Erkennung mittels Erfassung des geometrischen Zell-Profiles an Gewebeoberflächen und Messung im oberflächennahen Bereich, mit einer feinstrukturierten, auf das Objekt beugungsbegrenzt abgebildeten Lichtquelle, mit einem Interferometer mit Objekt- und Referenzarm sowie einem Detektor für elektromagnetische Strahlung. Im Referenzarm ist entweder mindestens ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor oder es ist ein Array von Hybrid-

Retro-Referenz-End-Reflektoren oder Array von Voll-Retro-Referenz-End-Reflektoren zur Erzeugung von verkippten Wellenfronten angeordnet. Nach dem Passieren einer Transfer-Optik durch die interferierenden Bündel entstehen bei der Detektion räumliche Interferogramme mit zueinander geneigter Referenz- und Objektwellenfront, welche zur Bestimmung von Abstand, Profil oder optischer Weglänge in einem Detektor-Frame detektiert und mittels Digitalrechner und Rechnerprogramm ausgewertet werden.

**[0109]** Im Referenzarm erfolgt in einem anderen Ansatz eine Defokussierung von Referenzlicht im Referenzarm des Zweistrahl-Interferometers, wobei bei Letzterem der Lichtfeld-Ansatz zur Anwendung kommt. Bei der Detektion werden räumliche Interferogramme mit ringförmigen Interferenzstreifen durch eine unterschiedlich gekrümmte Referenz- und Objektwellenfront von jedem erfassten Objektpunkt gebildet und detektiert werden können, welche zur Bestimmung von Abstand, Profil oder optischer Weglänge in einem Detektor-Frame detektiert und mittels Digitalrechner und Rechnerprogramm ausgewertet werden.

**[0110]** Das Messsystem ist mit einer feinstrukturierten, mindestens in einer Dimension auf das Objekt beugungsbegrenzt abgebildeten Strahlungsquelle, die vorzugsweise als feine Linienquelle und die vorzugsweise als Kurzpuls-Kurzkohärenz-Lichtquelle ausgebildet, wobei definitionsgemäß deren Längsrichtung in Richtung der y-Achse ausgebildet ist, vorzugsweise mit einem Teil-Spektralbereich, der sich vom EUV- bis zum Terahertz-Bereich erstrecken kann und diese Strahlungsquelle vorzugsweise kurzkohärent ist.

**[0111]** Der gerasterte Detektor für elektromagnetische Strahlung ist vorzugsweise in einem spektralen Teilbereich sensitiv, der sich vom EUV- bis zum Terahertz-Bereich erstrecken kann.

**[0112]** Im Referenzarm ist entweder mindestens ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor, vorzugsweise in Form eines Dachkantspiegel-Reflektors, sowohl zur Erzeugung von einer oder mehreren verkippten Referenz-Wellenfronten als auch einer Wellenfront-Inversions-Kompensation entweder um seine kipp-sensitive Achse geneigt oder es besteht im Referenzarm in Verbindung mit einem Objektiv ein Querversatz des mindestens eines Dachkantspiegel-Reflektors, so dass Lateral-Shear erzeugt wird. Es können auch eindimensionale Retro-End-Reflektoren in Form von Arrays ausgebildet sein. In allen Fällen entsteht – nach anschließendem Passieren der interferierenden Bündel einer Transfer-Optik mit vorzugsweise konfokaler Diskriminierung von Objekt-Strahlung – bei der Detektion mindestens ein räumliches Zweistrahl-Interferogramm mit zueinander geneigter Referenz- und Objektwellenfront, welches zur Bestimmung von Abstand, Tiefe, Profil oder des optischen Wegs in einem einzigen Detektor-Frame detektiert und mittels Digitalrechner-Technik ausgewertet wird.

**[0113]** Ein eindimensionaler Retro-End-Reflektor wird auch als hybrider Retro-Reflektor bezeichnet. Ein hybrider Retro-Reflektor weist entweder eine Dachkante – im Fall eines Dachkantreflektors oder eine Zylinderachse – im Fall eines Zylinder-Cat'eye-Reflektors – auf. Sowohl die Dachkante (DK) als auch eine zur Zylinder-Achse ZA parallele Linie, welche modellhaft die Ebene der Reflexion enthält, werden verallgemeinernd im Weiteren als DK-Linie (DKL) des hybriden Retro-Reflektors bezeichnet.

**[0114]** Die Lage des eindimensionalen Retro-End-Reflektors im Referenzarm, wenn im Objektarm ein fokussierendes Objektiv angeordnet ist, welches das Objekt abbildet, jedoch im Referenzarm kein fokussierendes Objektiv angeordnet ist, ist jeweils mit seiner DK-Linie (DKL) senkrecht zur Längsrichtung  $l_0$  der Linien-Lichtquelle angeordnet.

**[0115]** Die Lage des eindimensionalen Retro-End-Reflektors im Referenzarm, wenn sowohl im Objektarm als auch im Referenzarm jeweils ein fokussierendes Objektiv angeordnet ist, ist jeweils mit seiner DK-Linie (DKL) parallel zur Längsrichtung  $l_0$  der Linien-Lichtquelle angeordnet.

**[0116]** Zu 13: Die Erfindung wird im Weiteren für ein Messverfahren mit einem Endreflektor im Referenzarm eines Zweistrahl-Interferometers nach dem Lichtfeld-Ansatz beschrieben.

**[0117]** Es handelt sich um ein Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie, insbesondere auch zur optischen Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial-domain-Ansatz (SD-OCT) und insbesondere auch nach dem Lichtfeld-Ansatz, insbesondere zur Materialmessung und auch Tumorzellen-Erkennung. Dieses kann zur Abstandsmessung, insbesondere auch zur Messung in Verbindung mit einer 3D-Koordinaten-Messmaschine, zur zwei- oder dreidimensionalen Profilmessung, Rauheits-, Welligkeits- und Ebenheitsmessung an technischen und biologischen Objekten, insbesondere dort auch zur Tumorzellen-Erkennung mittels Erfassung des 3D-Profiles von Zellen, und zur Schichtenmessung eingesetzt werden.

**[0118]** Dazu wird ein Zweistrahl-Interferometer mit Referenz- und Objektarm, insbesondere auch in Form eines Interferenzmikroskops, eingesetzt. Im Referenzarm ist mindestens ein Endreflektor angeordnet. Das Zweistrahl-Interferometer ist insbesondere in Freistrahlausbildung und insbesondere auch als Michelson-, modifiziertes Michelson-, Twyman-Green-, Mirau-, Linnik-, Hybrid-Linnik-, Mach-Zehnder-Interferometer oder auch als vielkanalige Interferometeranordnung ausgebildet. Dieses Zweistrahl-Interferometer weist folgende Komponenten auf:

- entweder mindestens eine fein ausgebildete Punkt-Lichtquelle
- oder eine fein ausgebildete Punkt-Lichtquellen-Matrix, ausgebildet mit einer Vielzahl von fein gebildeten Spots,
- mindestens ein der Lichtquelle nachfolgendes Lichtquellen-Objektiv zur zumindest näherungsweise beugungsbegrenzten Abbildung derselben oder der Spots derselben,
- mindestens ein das Objekt abbildendes Objektiv,
- mindestens ein Detektor-Objektiv, wobei das Objektiv, welches das Objekt abbildet, und das Detektor-Objektiv auch als ein einziges Objektiv ausgebildet sein können.
- mindestens ein gerasterter Detektor mit Empfängerelementen für elektromagnetische Strahlung,
- und mindestens ein Digitalrechner mit einem Auswerteprogramm für detektierte Interferogramme zur schnellen Gewinnung von Informationen über das Objekt,

**[0119]** Erfindungsgemäß

- ist entweder die fein ausgebildete Punkt-Lichtquelle jeweils so fein ausgebildet,
- oder sind die Spots der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix jeweils so fein ausgebildet, dass diese für das nachfolgende Lichtquellen-Objektiv zumindest näherungsweise gleich oder unterhalb dessen beugungsbegrenzter Lateral-Auflösung ist/sind, welche durch numerische Apertur dieses Lichtquellen-Objektivs und der eingesetzten Lichtwellenlänge oder der eingesetzten Lichtwellenlängen der fein ausgebildeten Lichtquelle oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix bestimmt ist.

**[0120]** Dabei werden Objektpunkte des Objekts mit optischen Mitteln

- bei optisch rauen Objekten mit zumindest näherungsweise beugungsbegrenzt scharf fokussierten Bildpunkten der Punkt-Lichtquelle oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix beleuchtet
- oder bei optisch glatten Objekten werden auch mit schwach defokussierten Bildpunkten der Punkt-Lichtquelle oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix beleuchtet.

**[0121]** Nach der Strahlvereinigung wird mit optischen Mitteln eine geometrisch-optisch unscharfe Abbildung dieser beleuchteten Objektpunkte auf den Detektor durchgeführt und Licht von jedem Objektpunkt beleuchtet dabei einen Teilbereich mit einer Vielzahl von Detektorelementen des gerasterten Detektors. Mit optischen Mitteln wird im Referenzarm R eine geometrisch-optisch unscharfe Abbildung von Punkten der Punkt-Lichtquelle oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix durchgeführt und Licht von jedem leuchtenden Punkt der Punkt-Lichtquelle oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix beleuchtet nach der Strahlvereinigung einen Teilbereich mit einer Vielzahl von Elementen des gerasterten Detektors. Die Teilbereichsflächen auf dem gerasterten Detektor von zueinander kohärenten Strahlenbündeln aus O und R werden zumindest näherungsweise zueinander zur Überdeckung gebracht und mindestens ein räumliches Interferogramm von kohärenter Strahlung aus Referenzarm R und Objektarm O wird gebildet und das Interferenzgebiet in der Lateralausdehnung beträgt mindestens 30% der maximalen Ausdehnung der beiden Teilbereichsflächen.

**[0122]** Am Ausgang des Zweistrahl-Interferometers werden im Raum

- nach dem Tubusobjektiv
- oder einem zumindest näherungsweise fokussierenden Objektiv
- oder einem zumindest näherungsweise fokussierenden Objektiv aus dem Beleuchtungsstrahlengang, welches auch zur Detektion mitbenutzt wird,
- sowohl Bildpunkte  $A_r$  von der Punkt-Lichtquelle oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix, die über den Referenzarm R abgebildet werden,
- als auch Bildpunkte  $A_o$  von der Punkt-Lichtquelle oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix, die über Objektarm O abgebildet werden,
- entweder bei optisch rauen Objekten zumindest näherungsweise beugungsbegrenzt scharf abgebildet
- oder bei optisch glatten Objekten auch schwach defokussiert abgebildet.

zumindest in der Tiefe voneinander separiert gebildet.

**[0123]** Die Tiefenseparierung

def\_r-o

weist dabei im Minimum den folgenden Betrag auf:

Halbe Schwerpunktwellenlänge ( $\lambda_S$ ) im detektierten Signal vom räumlichen Interferogramm dividiert durch das Quadrat der effektiv genutzten numerischen Apertur

- entweder des Tubusobjektivs
- oder des zumindest näherungsweise fokussierenden Objektivs
- oder des zumindest näherungsweise fokussierenden Objektivs aus dem Beleuchtungsstrahlengang, welches auch zur Detektion mitbenutzt wird.

**[0124]** Im Maximum ist dieser Betrag def\_r-o gleich der Brennweite

- entweder des Tubusobjektivs
- oder des zumindest näherungsweise fokussierenden Objektivs
- oder des zumindest näherungsweise fokussierenden Objektivs aus dem Beleuchtungsstrahlengang, welches auch zur Detektion mitbenutzt wird.

**[0125]** Bei optisch glatten, asphärischen Oberflächen, die etwas außerhalb des wellenoptischen Schärfentiefebereiches des Objektivs im Objektarm eines Linnik-Interferometers liegen, welches eine Lichtquelle in Form einer Punktmatrix aufweist, kann es etwas Astigmatismus in den Objektbündeln nach dem Tubusobjektiv geben, so dass dort keine scharfen Spots im Detektionsstrahlengang entstehen können. Dennoch können bei vergleichsweise geringer Ablage der Beleuchtungssspots von der Objektivbrennebene auf der Objektfläche im Objektarm eines Linnik-Interferometers im Detektionsstrahlengang nach einem Mikrolinsen-Array noch Lichtfeld-Interferogramme detektiert und ausgewertet werden.

**[0126]** Zu 14: Weiterhin ist vorzugsweise bei dem Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie die Tiefenseparierung def\_r-o\_strich von Foki A\_r", A\_o" von Licht aus dem Referenzarm R und dem Objektarm O im Detektionsstrahlengang bei zumindest näherungsweise gleicher optischer Weglänge in den beiden Armen des Zweistrahl-Interferometers

- entweder durch Nutzung etwas unterschiedlicher Laufwege in unterschiedlich optisch dichten Medien im Referenz- und im Objektarm des Zweistrahl-Interferometers vorbestimmt gegeben
- oder die Separierung der Foki im Detektionsstrahlengang durch die Ausbildung schwach defokussierter Spots im Referenzarm auf dem Endreflektor vorbestimmt gegeben.

**[0127]** Zu 15: Weiterhin wird vorzugsweise bei dem Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie vor der Detektion eine Strahlformung mit Elementen positiver oder negativer Brechkraft eines Arrays durchgeführt, dessen Brenn-Ebenen zumindest näherungsweise in einer gemeinsamen Ebene liegen und diese Brennebenen mit der Detektionsebene des gerasterten Detektors zusammenfallen oder zu dieser mittels einer optischen Transferstufe optisch konjugiert gemacht sind.

**[0128]** Die Elemente positiver oder negativer Brechkraft eines Arrays stellen einen optischen Fourier-Transformator dar. Es erfolgt das Durchführen einer objekt-punktweisen/messpunktweisen Fourier-Transformation und es wird ein flächenhaftes räumliches Interferogramm gebildet, das auch als Lichtfeld-Interferogramm bezeichnet werden kann. Dieses wird mit einer Vielzahl von Pixeln vom gerasterten Detektor erfasst. Bei Anwendung von Schwarzschild-Objektiven stört die konstruktiv gegebene Mittenabschattung nicht, da genug aktive Pixel belichtet werden und Redundanz im räumlichen Interferogramm gegeben ist.

**[0129]** Es ist möglich zusätzlich zu einer Defokussierung auch noch eine Lateral-Shear in der beschriebenen Art einzuführen. Dies kann Eindeutigkeit über die Tiefen-Position eines Objektpunkts bei speziellen Anordnungen bringen, insbesondere wenn mit Licht großer Kohärenzlänge gearbeitet wird. Hierbei handelt es sich um einen Ansatz mit Trägerfrequenz, die optimal angepasst sein kann.

**[0130]** Zu 16: Weiterhin wird vorzugsweise bei dem Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie aus dem sphärischen Anteil im räumlichen Interferogramm die Ringordnungszahl bestimmt.

**[0131]** Dies ermöglicht auch den Einsatz langkohärenter Lichtquellen wie der eines HeNe-Lasers zur absoluten Formmessung.

**[0132]** Durch die Trennung der Foki im Detektionsstrahlengang in lateraler Weise oder in der Tiefe können bei den hier beschriebenen Ansätzen Referenzfoki im Detektionsstrahlengang auch vorbestimmt ausgeblendet werden. Damit ist es möglich, auch das Winkelspektrum des Objektlichts messpunktweise unbeeinflusst

durch Referenzlicht zu erfassen, was bei wenig kooperativen Objekten zum Gewinnen weiterer Informationen über das Objekt beitragen kann. Die Erfassung des Objektlicht-Winkelspektrums erfolgt dabei vorzugsweise in einem separierten, vergleichsweise schmalen Spektral-Kanal oder in mehreren, vergleichsweise schmalen Spektral-Kanälen, um mittels verbleibender Spektral-Kanäle mit Zweistrahl-Interferenzen für die Messpunkte Kurzkohärenz-Zweistrahl-Interferogramme gewinnen zu können. Die Auskopplung des Objektlichts für das Winkelspektrum kann dabei mittels Mikro-Blenden oder Mikro-Reflektoren erfolgen. Wird beispielsweise der Rotanteil des Referenzlichts gesperrt, kann die Beobachtung im Rotkanal einer Farb- oder Hyperspektral-Kamera erfolgen. Auch die simultane Beobachtung der Objektlicht-Ausbreitung in der Tiefe, ohne das Referenzlicht merklich vorhanden ist, nach der Fokussierung von Objektlicht und simultaner Detektion in verschiedenen diskreten Tiefen ist bei diesen Ansätzen mit Separierung der Foki grundsätzlich gegeben. Dies kann genutzt werden, um auch Phase Retrieval-Verfahren zur Anwendung bringen zu können.

**[0133]** Zu 17: Eine Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie, insbesondere auch zur optischen Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial-domain-Ansatz (SD-OCT) und insbesondere auch nach dem Lichtfeld-Ansatz,

insbesondere zur Materialmessung und auch Tumorzellen-Erkennung, zur Abstandsmessung, insbesondere auch zur Messung in Verbindung mit einer 3D-Koordinaten-Messmaschine, zur zwei- oder dreidimensionalen Profilmessung, Rauheits-, Welligkeits- und Ebenheitsmessung an technischen und biologischen Objekten, insbesondere dort auch zur Tumorzellen-Erkennung mittels Erfassung des 3D-Profiles von Zellen, und zur Schichtenmessung und dazu ein Zweistrahl-Interferometer mit Referenz- und Objektarm, insbesondere auch in Form eines Interferenzmikroskops, wobei im Referenzarm mindestens ein Endreflektor angeordnet ist, insbesondere in Freistrahlausbildung und insbesondere auch als Michelson-, modifiziertes Michelson-, Twyman-Green-, Mirau-, Linnik-, Hybrid-Linnik-, Mach-Zehnder-Interferometer oder auch als vielkanalige Interferometeranordnung ausgebildet ist, weist folgende Komponenten auf:

- entweder mindestens eine fein ausgebildete Punkt-Lichtquelle
- oder eine fein ausgebildete Punkt-Lichtquellen-Matrix, ausgebildet mit einer Vielzahl von fein gebildeten Spots,
- mindestens ein der Lichtquelle nachfolgendes Lichtquellen-Objektiv zur zumindest näherungsweise beugungsbegrenzten Abbildung derselben oder der Spots derselben,
- mindestens ein das Objekt abbildendes Objektiv,
- mindestens ein Detektor-Objektiv, wobei das Objektiv, welches das Objekt abbildet, und das Detektor-Objektiv auch als ein einziges Objektiv ausgebildet sein können,
- mindestens ein gerasterter Detektor mit Empfängerelementen für elektromagnetische Strahlung,
- und mindestens ein Digitalrechner mit einem Auswerteprogramm für detektierte Interferogramme zur schnellen Gewinnung von Informationen über das Objekt.

**[0134]** Erfindungsgemäß ist

- entweder die fein ausgebildete Punkt-Lichtquelle jeweils so fein ausgebildet,
- oder die Spots der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix sind jeweils so fein ausgebildet,

dass diese für das nachfolgende Lichtquellen-Objektiv zumindest näherungsweise gleich oder unterhalb dessen beugungsbegrenzter Lateral-Auflösung ist/sind, welche durch numerische Apertur dieses Lichtquellen-Objektivs und der eingesetzten Lichtwellenlänge oder der eingesetzten Lichtwellenlängen der fein ausgebildeten Lichtquelle oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix bestimmt ist.

**[0135]** Es besteht im Zweistrahl-Interferometer eine schwache Asymmetrie, hervorgerufen

- entweder durch unterschiedliche Laufwege des Lichts in unterschiedlichen Materialien unterschiedlicher Brechkraft
- und/oder durch in den beiden Interferometerarmen R und O ungleich verteilte Brechkräfte optischer Komponenten

und/oder durch in den beiden Interferometerarmen ungleich in der Tiefe positionierte Komponenten mit Brechkraft

und entweder

- im Raum nach dem Tubusobjektiv
- oder einem zumindest näherungsweise fokussierenden Objektiv
- oder dem zumindest näherungsweise fokussierenden Objektiv aus dem Beleuchtungsstrahlengang, welches auch zur Detektion mitbenutzt wird,

bestehen zwei separierte Fokusebenen in der Tiefe, die zumindest näherungsweise um einen Betrag  $Def\_strich$  voneinander vorbestimmt separiert sind.

**[0136]** Dieser Betrag  $Def\_strich$  stellt eine durch Optik-Design, Konstruktion, Montage und einschließlich der Gerätejustierung fest eingestellte Gerätekonstante dar.

**[0137]** Dieser Betrag  $Def\_strich$  ist mindestens oder größer als die halbe Schwerpunktwellenlänge  $\lambda_S$  im detektierten Signal vom räumlichen Interferogramm dividiert durch das Quadrat der effektiv genutzten numerischen Apertur

- des Tubusobjektivs
- oder des zumindest näherungsweise fokussierenden Objektivs
- oder des zumindest näherungsweise fokussierenden Objektivs aus dem Beleuchtungsstrahlengang, welches auch zur Detektion mitbenutzt wird,

gemacht.

**[0138]** Dieser Betrag  $Def\_strich$  ist außerdem kleiner als die Brennweite des

- Tubusobjektivs
- oder des zumindest näherungsweise fokussierenden Objektivs
- oder des zumindest näherungsweise fokussierenden Objektivs aus dem Beleuchtungsstrahlengang, welches auch zur Detektion mitbenutzt wird,

gemacht.

**[0139]** Es ist aber auch möglich ein stark unbalanciertes Interferometer – also mit einem signifikant von null verschiedenen optischen Gangunterschied – mit einer Frequenzkamm-Strahlungsquelle zu betreiben, um Kurzkohärenz-Interferogramme generieren zu können.

**[0140]** Dabei können die Komponenten in den beiden Interferometerarmen R und O als refraktive, als spiegelnde oder auch als Spiegellinsen-Komponenten ausgebildet sein.

**[0141]** Vorzugsweise sind baugleiche Komponenten im Referenzarm R und im Objektarm O eingesetzt.

**[0142]** Vorzugsweise sind unterschiedliche Komponenten im Referenzarm R und im Objektarm O eingesetzt.

**[0143]** Zu 18: Weiterhin ist bei der Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie in der Bildebene des Zweistrahl-Interferometers in der Art einer Lichtfeld-Kamera oder Plenoptic-Kamera ein optisches Array mit Elementen positiver oder negativer Brechkraft angeordnet und jedem Paar, bestehend aus einem beugungsbegrenzten Bildspot aus dem Referenzarm R und dem Objektarm O, die jeweils kohärente Spots darstellen, ist mindestens eines dieser Elemente positiver oder negativer Brechkraft zugeordnet.

**[0144]** Es ist vorzugsweise ein Mikrolinsen-Array, oder ein Array von Mikro-Spiegeln mit positiver oder negativer Brechkraft angeordnet.

**[0145]** Zu 19: Weiterhin ist bei der Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie das optische Array mit Elementen positiver oder negativer Brechkraft zumindest näherungsweise schwach gekrümmt ausgebildet.

**[0146]** Dies dient zur Anpassung an die Rest-Bildfeldkrümmung eines Tubusobjektivs. Dabei ist es möglich, dass die Brennweite der Elemente positiver oder negativer Brechkraft an diese Rest-Bildfeldkrümmung adaptiert ist, um den Einsatz eines ebenen gerasterten Detektors zu ermöglichen.

**[0147]** Zu 19: Weiterhin entspricht bei der Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie die Brennweite der Elemente positiver oder negativer Brechkraft im Array zumindest näherungsweise der vorbestimmten Tiefenseparierung  $Def\_strich$ .

**[0148]** Zu 20: Weiterhin befinden sich bei der Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie die fokussierten Objektbildspots  $A_o$  zumindest näherungsweise in der Pupille der Elemente positiver oder negativer Brechkraft im Array.

**[0149]** Zu 21: Weiterhin besteht bei der Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie im Zweistrahl-Interferometer zumindest näherungsweise der optische Gangunterschied null. Somit kann eine Lichtquelle mit geringer Kohärenzlänge eingesetzt werden.

**[0150]** Zu 22: Weiterhin ist bei der Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie das Mikrolinsen-Array im Detektionsstrahlengang mit diffraktiven optischen Elementen, DOEs, auf der Basis eines schaltbaren räumlichen Lichtmodulators ausgebildet.

**[0151]** Damit ist es möglich, bei Einsatz eines schaltbaren räumlichen Lichtmodulators als erstes Array für die Punktlichtquelle, welches Bestandteil einer gepulsten Lichtquelle ist, eine strenge zeitliche und räumliche Synchronisation zu diesem zweiten Array im Detektionsstrahlengang durchzuführen, um das Objekt schnell lateral mit einer Folge von gepulsten Beleuchtungen, die jeweils lateral etwas versetzt sind, abtasten zu können. Dabei bleiben die diffraktiven optischen Elementen, die vorzugsweise Fresnel-Linsen mit positiver oder negativer Brechkraft darstellen, wobei jeweils nur eine Beugungsordnung genutzt wird, vorzugsweise zumindest näherungsweise zentriert zu den fokussierten Lichtspot-Paaren aus dem Zweistrahl-Interferometer. Dabei handelt es sich jeweils um räumliche Interferogramme, hier auch als Lichtfeld-Interferogramme bezeichnet, die völlig separiert voneinander ausgewertet werden können. Die mehrfach aufgenommenen Detektor-Frames mit räumlichen Interferogrammen erhöhen die Dichte der Messpunkte auf dem Objekt und können mittels geeigneter Algorithmik in einen Datensatz zusammengebracht werden, so dass eine möglichst vollständige 3D-Information über das Objekt – im Sinne der Messaufgabe – erhalten werden kann.

**[0152]** Es kann das Array, vorzugsweise ein Mikrolinsen-Array, im Detektionsstrahlengang auch als Array mit refraktiven Linsen ausgebildet sein, die mit einem Lateral-Scanner der lateralen Bewegung von Punktlichtquellen zwischen den einzelnen Belichtungen nachgeführt werden.

**[0153]** Bei optisch rauen Oberflächen muss sich das Messobjekt oder die erfassenden Messpunkte zumindest näherungsweise im wellenoptischen Schärfentiefebereich, auch als Depth of View (DOV) bekannt, befinden, damit ein für die Interferogramm-Auswertung hinreichend hoher Interferenzkontrast gegeben ist.

**[0154]** Dagegen können sich bei diesem Ansatz zur Lichtfeld-Interferometrie Objekte mit optisch glatten und stetigen Oberflächen, die sich auch außerhalb des wellenoptischen Schärfentiefebereiches der optischen Antastung befinden, erfasst werden, vorausgesetzt die Kohärenzlänge des verwendeten Lichts ist ausreichend groß gemacht. Unter dieser Voraussetzung können in diesem Fall räumliche Interferogramme beobachtet und detektiert werden. Damit ist auch ein Ansatz zur Vermessung von Asphären auf der Basis eines Michelson-Interferometers in Twyman-Green-Anordnung oder bei Mikro-Asphären oder in Teilbereichen von Asphären mit eher größeren Gradienten auch auf der Basis eines modifizierten Mirau- oder eines modifizierten Linnik-Interferometers nach dem Lichtfeld-Interferometer-Ansatz gegeben. Für diese Applikation kann es sinnvoll sein, die Anzahl der Lichtspots zu limitieren, beispielsweise auf 30×30 in einer Matrix-Punktlichtquelle mit angepasster zeitlicher Kohärenz der genutzten Strahlung. Die Lichtfeld-Interferogramme liefern in der Regel neben der Tiefeninformation auch noch eine Information über den Gradienten des Objekts. Dies kann für die Auswertung, speziell bei der Messung von Asphären, sehr von Vorteil sein.

**[0155]** In ausgewählten Fällen kann auch die Nutzung eines Fizeau-Interferometers mit dem Lichtfeld-Ansatz von Vorteil sein. Hierzu kann, wie bereits von J. Schwider in "Multiple beam Fizeau interferometer with filtered frequency comb illumination," Opt. Comm. 282, 3308–3324 (2009) beschrieben, eine Frequenzkamm-Lichtquelle eingesetzt werden, um den im Fizeau-Interferometer stets gegebenen optischen Gangunterschied zu überbrücken.

**[0156]** Weiterhin ist es möglich, zur Gewinnung des Winkelspektrums von Messpunkten am Objekt in Echtzeit bei Interferometern mit Asymmetrie wegen der hierbei auftretenden Fokuslagen-Differenzen zwischen Strahlenbündeln aus dem Referenzarm und dem Objektarm im Detektionsstrahlengang eine spektrale Bandsperr-Filter-Matrix von Mikrospot-Blenden im Raster der Referenz-Foki auf einem dünnen Substrat, das alle Bündel aus R und O gemeinsam passieren, permanent anzuordnen. Diese Matrix von Mikrospot-Blenden sperrt die Foki in einem Spektralbereich. Dies erfolgt vorzugsweise im blauen Spektralbereich. Eine RGB-Farbkamera oder ein Farbkamera-System detektiert dann nur im grünen und roten Bereich die räumlichen Interferenzen, jedoch im blauen Spektralbereich nur Objektlicht, da hier das zugehörige Referenzlicht geblockt wurde. Für jeden Messpunkt wird ein Bereich des Winkelspektrums vorzugsweise durch Nutzung einer Transferoptik auf dem gerasterten Detektor im blauen Spektralbereich reserviert, so dass die Winkelspektren parallel mit den räumlichen Interferenzen zur Detektion kommen. Das Winkelspektrum von separiertem Objektlicht wird vorzugsweise in der Fourier-Ebene eines Objektivs oder eines Mikrolinsen-Arrays detektiert.



**[0157]** Weiterhin kann Objektlicht gleichzeitig objektpunktweise in verschiedenen Tiefen beobachtet werden, um das Phase Retrieval-Verfahren anwenden zu können.

**[0158]** Vorzugsweise wird weiterhin durch eine vergleichsweise kleine Asymmetrie im Strahlengang des Zweistrahl-Interferometers erreicht, dass für einen Winkel im mittleren Bereich des Winkelspektrums in der Detektionsebene der optische Gangunterschied null besteht. Dabei wird in einem Mirau-Interferometer mit einem Plattenstrahlteiler, bestehend aus Teiler- und Kompensationsplatte aus demselben Werkstoff, die geometrische Weglänge im Bereich von  $5\ \mu\text{m}$  bis  $50\ \mu\text{m}$  unterschiedlich gestaltet. So können für diesen Ansatz typischerweise  $10\ \mu\text{m}$  oder  $20\ \mu\text{m}$  Differenz genügen. Es ist aber möglich, gezielt ein gechirptes Kurzkohärenz-Interferogramm (chirped white light) zu erzeugen mit geometrischen Weglängendifferenzen im Bereich bis maximal  $100\ \mu\text{m}$ , was je nach Spektralbereich und Werkstoff-dispersion ganz unterschiedlich sein kann. Das Ergebnis ist ein gechirptes Kurzkohärenz-Interferogramm, dessen Asymmetrie bewusst gewollt ist. Diese besteht darin, dass die beiden Streifen erster Ordnung in ihren Intensitätsmaxima stark unterschiedlich sind. Es besteht ein großer Hub auf der einen Seite des Kurzkohärenz-Wavelets – also zwischen Streifen nullter Ordnung und einem erster Ordnung) und auf der anderen Seite dieses Wavelets ein kleiner Hub. Es kann mit Vorteil der Ort des halben Hubs bestimmt werden für die z-Position eines Objektpunkts. Dies ist zwar nicht der exakte Ort des optischen Gangunterschiedes gleich null, stellt aber eine sehr gute Referenz dar. Hierbei handelt es sich um einen in der Regel akzeptablen Offset, der bei üblichen Messobjekten einen zumindest näherungsweise gleichen Wert weit im Submikrometerbereich haben sollte.

**[0159]** In einem Linnik-Interferometer wird vorzugsweise eine kleine Defokussierung im Referenzarm eingebracht. Der optische Gangunterschied lässt sich hierbei durch feines Verschieben des gesamten Endreflektors im Referenzarm auf einen Wert einstellen, so dass für eine Strahlneigung zumindest näherungsweise in der Mitte des Winkelbereichs des Winkelspektrums sich in der Detektionsebene der optische Gangunterschied ergibt. Für ein Linnik-Interferometer ist dies vergleichsweise einfach im Referenzarm einzustellen als eine Kombination von Defokussierung und Verschiebung des Endreflektorsystems mit Objektiv. Dies erfordert keine sehr engen Komponenten-Toleranzen wie z. B. bei einem Mirau-Interferometer bezüglich der Plattendicken. Dort besteht nur die Möglichkeit, die Einstellung des optischen Gangunterschieds null an geeigneter Stelle über die Differenz der Plattendicke von Teiler- und Kompensationsplatte und die Tiefenlage (z) des planen Referenzspiegels oder auch noch über das Einführen einer schwachen Brechkraft durch Einführen einer Flächenkrümmung am Strahlteiler-System zu bewerkstelligen. Die Verschiebung des Endreflektorsystems mit Objektiv erzeugt in der Regel einen kleinen sphärischen Phasenanteil durch Interferenzen gleicher Neigung, was aber numerisch vergleichsweise einfach zu korrigieren ist.

**[0160]** Bei einem weiteren Ansatz zur eindimensionalen Profilmessung, Rauheits-, Welligkeits- und Ebenheitsmessung oder zur Optischen Kohärenz-Tomografie (OCT) an technischen und biologischen Objekten mit einem Zweistrahl-Interferometer auf der Basis eines Michelson-Interferometers, welches ein objektabbildendes Messobjektiv im Objektarm aufweist, ist der Endspiegel vorzugsweise als schwach gekrümmter Spiegel ausgebildet. Dieser Ansatz arbeitet mit einer Punktlichtquelle, die sich zumindest näherungsweise auf der optischen Achse des objektabbildenden Messobjektivs befindet. Der Einsatz einer feinen Punktlichtquelle ist notwendig, da bei der Interferenz eine punktsymmetrische Wellenfrontinversion besteht. Vorzugsweise ist dieser Endspiegel im Referenzarm R des Zweistrahl-Interferometers in einer Entfernung vom Strahlteiler angeordnet, die auch zu einem optischen Gangunterschied null auf dem gerasterten Detektor führt. So können bei Einsatz einer spektral breitbandigen Lichtquelle Kurzkohärenz-Interferogramme detektiert werden. Bei optischen Komponenten zwischen Lichtquelle und Detektor mit hinreichend kleinen Aberrationen können in der Detektionsebene ringförmige Interferenzen beobachtet werden.

**[0161]** Vorzugsweise ist im Referenzarm R des Zweistrahl-Interferometers der Endspiegel als schwach gekrümmter Konkav-Spiegel ausgebildet. Vorzugsweise ist dessen Brennweite so ausgelegt, dass nach dem Tubusobjektiv der sich ergebende Fokusspot  $A_r$  in der vorderen Brennebene einer Mikrolinse besteht. So entsteht nach dieser eine ebene Referenzwelle zur Interferenz mit kohärentem Licht mit einer gekrümmten Wellenfront von einem im wellenoptischen Schärfevolumen erfassten Objektpunkt  $A_o$  in der Fourier-Ebene der Mikrolinse. Vorzugsweise ist das objektabbildende Messobjektiv als Schwarzschild-Spiegelobjektiv ausgebildet. Da hierbei ringförmige Interferenzen beobachtet werden, ist die bei einem Schwarzschild-Spiegelobjektiv gegebene Mittenabschattung in diesem Fall ohne Nachteil, da das Zweistrahl-Interferometer so abgeglichen werden kann, dass die Interferenzringe mit dem Interferenzring nullter Ordnung im verbleibenden Kreisring detektiert werden.

**[0162]** Um den optischen Gangunterschied im Zweistrahl-Interferometer auszugleichen, der besteht, wenn der gekrümmte Spiegel in einer Position angeordnet ist, die nicht zu einem optischen Gangunterschied null

führt, wird vorzugsweise ein Laser mit hinreichend großer Kohärenzlänge eingesetzt. Kurzkohärenz-Interferogramme treten in diesem Fall nicht auf. Um auch Kurzkohärenz-Interferenzen detektieren zu können, wird vorzugsweise eine Frequenzkamm-Lichtquelle verwendet, die diesen optischen Gangunterschied im Zweistrahl-Interferometer in bekannter Art und Weise ausgleicht, so dass Kurzkohärenz-Interferogramme detektiert werden können.

**[0163]** Die in einem Zweistrahl-Interferometer mit spektral breitbandiger Lichtquelle auftretenden und nahezu unvermeidlichen chromatischen Restaberration, insbesondere die chromatischen Längsaberrationen, können vorzugsweise genutzt werden, um ein Kurzkohärenz-Interferogramm mit einem moderaten vorbestimmten, eng vergleichsweise tolerierten Chirping zu erzeugen, das zu einem asymmetrischen Intensitäts-Wavelet führt. Dabei ist das Chirping im Signal vorzugsweise so eingestellt, dass zwischen dem absoluten Maximum Kurzkohärenz-Interferogramm und einem ersten Nebenmaximum einseitig ein möglichst großer Intensitäts-Hub besteht, der beispielsweise bei hinreichender spektraler Bandbreite des detektierten Lichts und passendem Chirping durchaus 50% des Intensitätsmaximums im Kurzkohärenz-Interferogramm betragen kann. Dabei besteht vorzugsweise eine Differenz der Laufwege in brechenden Materialien oberhalb des Brechungsindex 1,4 für Objekt-Licht und Referenz-Licht von bis zu maximal 100  $\mu\text{m}$  im Zweistrahl-Interferometer im sichtbaren und nahinfraroten Bereich. Im Werkstoff BK7 beispielsweise genügt im sichtbaren Spektralbereich jedoch beispielsweise bereits eine Laufwegsdifferenz in den beiden Interferometer-Strahlengängen im unteren zweistelligen Mikrometerbereich, um eine merkliche Asymmetrie im Kurzkohärenz-Interferogramm-Wavelet zu erreichen, die dann jedoch eine spezielle Signalauswertung erfordert. Dazu kann vorzugsweise auf dem halben Wert des Intensitäts-Hubs numerisch eine gleitende Triggerschwelle gesetzt werden. Auch die Nutzung von refraktiven Mikrolinsen in einem Array für die Lichtfeld-Interferometrie kann Chirping bewirken, da Objekt-Licht und Referenz-Licht in der Regel getrennte Wege durch eine Mikrolinse gehen oder unterschiedliche Strahleinfalls-Winkel auf die Mikrolinsenfläche aufweisen.

**[0164]** Bei gechirpten räumlichen Interferogrammen kann bei einem hinreichend breiten Spektralbereich auf der langen Flanke zwischen dem nullten Streifen und dem kleineren Intensitätsmaximum eines Streifens erster Ordnung vorzugsweise ein hochgenauer Triggerpunkt numerisch gesetzt werden.

#### Bezugszeichenliste mit Erläuterungen

Bezugszeichen	Bezeichnung
<b>1</b>	feine Linienquelle im NIR mit Längsrichtung in y-Richtung, vorzugsweise spektral breitbandig, in Querrichtung q mit Breite unterhalb der beugungsbegrenzten Lateral-Auflösung der jeweils nachfolgenden Optik
<b>101</b>	gepulste Linienquelle im NIR, vorzugsweise spektral breitbandig, in Querrichtung q mit Breite unterhalb der beugungsbegrenzten Lateral-Auflösung der jeweils nachfolgenden Optik
<b>102</b>	feine punktförmige Lichtquelle, in Querrichtung q mit Breite unterhalb der beugungsbegrenzten Lateral-Auflösung der jeweils nachfolgenden Optik
<b>103</b>	feine Linienquelle ausgebildet mittels Frequenzkamm-Lichtquelle, vorzugsweise ein Frequenzkamm-Laser (FCL), spektral breitbandig feine Linienquelle, vorzugsweise spektral breitbandig gepulste feine Linienquelle, vorzugsweise spektral breitbandig
<b>104</b>	räumlicher Lichtmodulator, DMD, Digital micro mirror device, erzeugt Lichtmuster an oder unterhalb der lateralen Auflösung der nachfolgenden Optik zur Abbildung derselben in den Objektraum
<b>105</b>	räumlicher Lichtmodulator, transmissives oder reflexives LCD, erzeugt feine Lichtmuster an oder unterhalb der lateralen Auflösung der nachfolgenden Optik zur Abbildung derselben in den Objektraum
<b>187</b>	Lichtquelle mit zwei Pinhole-Ketten um 90° zueinander gedreht, gespeist von einer gepulsten, spektral breitbandigen Lichtquelle

<b>188</b>	feine Matrix-Lichtquelle mit feinen Lichtspots jeweils ein Spot am Ende einer Single-Mode-Faser. Die Faserenden sind in einer Matrix-Struktur angeordnet. Das Licht wird in die Fasern von spektral vergleichsweise breitbandigen fasergekoppelter Superlumineszenz-Dioden eingekoppelt. Die sich ergebende effektive Lichtspotgröße ist unterhalb der beugungsbegrenzten Auflösung der nachfolgenden Optik.
<b>189</b>	feine Linien-Lichtquelle mit feinen Lichtspots, erzeugt mittels spektral breitbandiger LEDs und Pinholes. Die Spotgröße, hier die Pinhole-Größe, ist unterhalb der beugungsbegrenzten Auflösung der nachfolgenden Optik.
<b>190</b>	feine Matrix-Lichtquelle mit feinen Lichtspots, erzeugt mittels spektral breitbandiger LED-Matrix und nachgeordneten Pinholes. Die Spotgröße, hier die Pinhole-Größe, ist unterhalb der beugungsbegrenzten Auflösung der nachfolgenden Optik.
<b>191</b>	feine Linien-Lichtquelle mit räumlichem rechnergesteuerten Lichtmodulator ausgebildet. Ermöglicht die rechnergesteuerte Lateralverschiebung von einem oder mehreren feinen Lichtspalten, die unterhalb der beugungsbegrenzten Auflösung der nachfolgenden Optik sind.
<b>192</b>	feine Linien-Lichtquelle, vorzugsweise spektral breitbandig
<b>193</b>	gepulste feine Linien-Lichtquelle (Pulslängen im Millisekundenbereich, bzw. im einstelligen Mikrosekundenbereich) vergleichsweise spektral breitbandig und mit einem Frequenzkamm-Laser (FCL) mit der optischen Verzögerungslänge $Y$ dargestellt,
<b>194</b>	feiner Spalt mit Single-Mode Laser-Strahlung beleuchtet, in Querrichtung $q$ mit Breite unterhalb der beugungsbegrenzten Lateral-Auflösung der jeweils nachfolgenden Optik
<b>195</b>	feine Punktlichtquellen-Kette, vorzugsweise spektral breitbandig, in Querrichtung $q$ mit Breite unterhalb der beugungsbegrenzten Lateral-Auflösung der jeweils nachfolgenden Optik
<b>196</b>	feiner Lichtspalt in $y$ -Richtung, Licht vorzugsweise spektral breitbandig, in Querrichtung $q$ mit Breite unterhalb der beugungsbegrenzten Lateral-Auflösung der jeweils nachfolgenden Optik
<b>197</b>	Linien-Lichtquellen-Array (gerastert) mit mehreren feinen, zumindest näherungsweise parallelen Linien-Spots, vorzugsweise spektral breitbandig, in Querrichtung $q$ mit Breite der Linien-Spots unterhalb der beugungsbegrenzten Lateral-Auflösung der jeweils nachfolgenden Optik. Das Linien-Lichtquellen-Array kann auch mittels räumlichen Lichtmodulators elektronisch steuerbar ausgebildet sein.
<b>198</b>	fein ausgebildete Punkt-Lichtquelle, vorzugsweise spektral breitbandig, mit Ausdehnung der Lichtspots unterhalb der beugungsbegrenzten Lateral-Auflösung der jeweils nachfolgenden Optik
<b>199</b>	fein ausgebildete (gerasterte) Punkt-Lichtquellen-Matrix, vorzugsweise spektral breitbandig, mit Ausdehnung der Lichtspots unterhalb der beugungsbegrenzten Lateral-Auflösung der jeweils nachfolgenden Optik
LS	feiner Linienspalt, mit Breite unterhalb der beugungsbegrenzten Lateral-Auflösung der jeweils nachfolgenden Optik
LSO'	Bild des feines Linienspalts im Objektraum
LSR'	Bild des feines Linienspalts im Referenzraum
LSR''	Bild des feines Linienspalts im Referenzraum nach erster Reflexion am Hohl-Dachkantreflektor
<b>2</b>	Kollimator-Objektiv, Lichtquellenobjektiv
<b>21</b>	fokussierendes Lichtquellen-Objektiv
<b>23</b>	linienhaftes Array von Mikro-Kollimator-Objektiven

24	flächenhaftes Array von Mikro-Kollimator-Objektiven
3	Strahlteiler, allgemein
31	Strahlteilerschicht in einem Mirau-Interferometer, auf einer Platte
32	Strahlteilerschicht in einem Mirau-Interferometer mit Kompensations-Platte
33	Platte in einem Strahlteiler, die Strahlteilerschicht tragend
34	Kompensationsplatte in einem Strahlteiler
35	Auskoppel-Strahlteiler
36	Auskoppel-Strahlteiler
361	Strahlteilerschicht
37	Strahlteilerwürfel
38	Strahlteilerschicht für Michelson-Interferometer für interferometrisches Referenzsystem für Lageregelung des hochdynamischen Linear-Antriebs für Referenzobjektiv
39	Strahlteiler-System mit mehreren Einzel-Strahlteilern
391	Strahlteilerpatte mehrere Strahlteiler-Schichten tragend
4	rotationssymmetrisches Referenz-Schwarzschildobjektiv im Hybrid Retro-Referenz-Endreflektor im Referenzarm
401	Mikrolinsen-Array in Linienform im Referenzarm eines vielkanaligen Linnik-Interferometers
402	Mikrolinsen-Array in Matrix-Form im Referenzarm eines vielkanaligen Linnik-Interferometers
407	rotationssymmetrische Mikrolinse in einem Mikrolinsen-Array in Linienform <b>401</b> im Referenzarm R eines vielkanaligen Linnik-Interferometers
408	rotationssymmetrische Mikrolinse in einem Mikrolinsen-Array in Matrix-Form <b>402</b> im Referenzarm R eines vielkanaligen Linnik-Interferometers
41	Zylinder-Spiegel-Objektiv im ZSHRRER ( <b>44</b> ), Zylinder-Objektiv-Achse (CA) ist senkrecht zur Längsrichtung $l_0$ der Linienquelle <b>1</b>
42	rotationssymmetrisches Referenzobjektiv im Referenz-Endreflektor, auch in <b>45</b> , <b>46</b> , <b>47</b> , <b>471</b> angeordnet
421	ebener Interferometer-Endspiegel im Referenzarm R eines Linnik-Interferometers
422	ebener Interferometer-Endspiegel im Referenzarm R eines Twyman-Green-Interferometers
423	Konkaver, rotationssymmetrischer Endspiegel im Referenzarm eines Hybrid-Linnik-Interferometers
424	ebener Interferometer-Endspiegel im Referenzarm eines vielkanaligen Linnik-Interferometers
43	Planspiegel im Zylinder-Objektiv ( <b>41</b> ) im Zylinderspiegel-Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor (ZSHRRER)
44	Zylinder-Spiegel-Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor (ZSHRRER) Ein ZSHRRER stellt auch einen (speziellen) hybriden Retro-Reflektor dar, der im Referenzarm als Endreflektor eingesetzt wird und eine spiegelsymmetrische Wellenfront-Inversion erzeugt. Der ZSHRRER ist schwach verkippt um eine Achse, die parallel zur Längsrichtung (optischer Strahlengang des Interferometers entfaltet) der Linienquelle und senkrecht zur Zylinder-Objektiv-Achse ist.
441	Zylinder-Linsen-Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor (ZLHRER)
45	Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor (HRRER), Oberbegriff ohne Spezifikation

<b>46</b>	Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System mit einem Hohl-90°-Dachkantreflektor-Array ( <b>564</b> ) und einem rotationssymmetrischen Referenzobjektiv <b>42, 4</b> im Referenzarm (R)
<b>460</b>	Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System mit einem 90°-Mikro-Dachkantprismen-Spiegel-Endreflektor-Array ( <b>565</b> ) und einem rotationssymmetrischen Referenzobjektiv <b>42, 4</b> im Referenzarm (R)
<b>461</b>	Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System mit einem 90°-Hohl-Dachkantreflektor-Array ( <b>564</b> ) und einem rotationssymmetrischen Objektiv <b>61, 62</b> oder <b>91</b> außerhalb des Referenzarms R
<b>462</b>	Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System mit einem 90°-Mikro-Dachkantprismen-Spiegel-Endreflektor-Array ( <b>565</b> ) und einem rotationssymmetrischen Objektiv <b>61, 62</b> oder <b>91</b> außerhalb des Referenzarms R
<b>47</b>	Voll-Retro-Referenz-Endreflektor (VRRER) mit einem Hohl-Tripel-Reflektor ( <b>567</b> ) und einem rotationssymmetrischen Referenzobjektiv <b>42</b>
<b>471</b>	Voll-Retro-Referenz-Endreflektor-System (VRRERS) mit einem Hohl-Tripel-Reflektor-Array ( <b>566</b> ) und einem rotationssymmetrischen Referenzobjektiv <b>42</b>
<b>480</b>	Mikro-Planspiegel in einem Voll-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektor
<b>481</b>	Voll-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektor vom rotationssymmetrischen Linsen-Cat's eye-Typ
<b>482</b>	Voll-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektor vom rotationssymmetrischen Spiegel-Cat's eye-Typ
<b>483</b>	Hybrid-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektor vom Zylinder-Linsen-Cat's eye-Typ
<b>484</b>	Hybrid-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektor vom Zylinder-Spiegel-Cat's eye-Typ
<b>485</b>	rotationssymmetrische Mikro-Linse in einem Voll-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektor <b>481</b>
<b>486</b>	Zylinder-Mikro-Linse in einem Hybrid-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektor <b>483</b>
<b>491</b>	Mikro-Endreflektor-Array mit Voll-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektoren vom rotationssymmetrischen Linsen-Cat'eye-Typ
<b>492</b>	Referenz-Mikro-Endreflektor-Array mit Voll-Retro-Mikro-Endreflektoren vom rotationssymmetrischen Spiegel-Cat's eye-Typ
<b>493</b>	Referenz-Mikro-Endreflektor-Array mit Hybrid-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektoren vom Zylinder-Linsen-Cat's eye-Typ
<b>494</b>	Referenz-Mikro-Endreflektor-Array mit Hybrid-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektoren vom Zylinder-Spiegel-Cat's eye-Typ
<b>498</b>	Voll-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektor-System
<b>499</b>	Hybrid-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektor-System
	Der Referenz-Endreflektor <b>45</b> und die Referenz-Endreflektor-Arrays <b>481</b> bis <b>484</b> und <b>491</b> bis <b>494</b> sind vorzugsweise mit einem feinen rechnersteuerbaren Lateral-Translator ausgebildet, der vorzugsweise mit dem räumlichen Lichtmodulator <b>104, 105</b> zum Anfahren definierter Messpositionen auf dem Objekt ( <b>71, 72, 73, 74</b> ) synchronisiert ist. Dies dient zur schnellen lateralen Abtastung des Messfeldes durch mehrere Messungen in den „Zwischenräumen“, um einen quasi-Vollflächen 3D-Datensatz vom Objekt ( <b>71, 72, 73, 74</b> ) gewinnen zu können.
<b>5</b>	90°-Hohl-Dachkantreflektor, alleinstehend im Referenzarm, sehr enge 90°-Toleranz, Dachkante ist parallel zur Längsrichtung $l_0$ der Linien-Lichtquelle und senkrecht zur Querrichtung $q$
<b>51</b>	Umlenkspiegel
<b>52</b>	Umlenkspiegel
<b>53</b>	Umlenkspiegel

<b>54</b>	Umlenkspiegel
<b>55</b>	Umlenkspiegel
<b>56</b>	90°-Hohl-Dachkant-Endreflektor in Verbindung mit einem rotationssymmetrischen Objektiv ( <b>62, 91</b> ) außerhalb des Interferometers 90°, einen Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor bildend
<b>561</b>	1. Hohl-90°-Dachkant-Endreflektor im Referenzarm in Kombination mit einem rotationssymmetrischen Referenzobjektiv <b>42</b> im HR-RER, eher geringe 90°-Toleranz, Dachkante in y-Richtung stehend, Dachkante ist parallel zur Längsrichtung $l_0$ der Linien-Lichtquelle und senkrecht zur Querrichtung $q$
<b>562</b>	2. Hohl-90°-Dachkant-Endreflektor im Referenzarm in Kombination mit einem rotationssymmetrischen Referenzobjektiv <b>42</b> im HR-RER, Dachkante in x-Richtung angeordnet (hier liegend), 90°-Winkel-Toleranz eher gering
<b>564</b>	90°-Hohl-Dachkantspiegel-Mikro-Endreflektor-Array in Kombination mit einem rotationssymmetrischen Referenzobjektiv <b>42</b> im Referenzarm
<b>565</b>	90°-Dachkantprismenspiegel-Mikro-Endreflektor-Array in Kombination mit einem rotationssymmetrischen Referenzobjektiv <b>42</b> im Referenzarm
<b>566</b>	Hohl-Tripelspiegel-Mikro-Endreflektor-Array (Jeder Tripel-Mikro-Endreflektor ist jeweils als Raumecke ausgebildet.)
<b>567</b>	Hohl-Tripelspiegel-Mikro-Endreflektor (Raumecke)
<b>568</b>	Tripelprismenspiegel-Mikro-Endreflektor-Array
	Alle Mikro-Endreflektor-Arrays <b>564</b> bis <b>566</b> und <b>568</b> sind vorzugsweise mit einem feinen rechnersteuerbaren Lateral-Translator ausgebildet, der vorzugsweise mit dem räumlichen Lichtmodulator <b>104, 105</b> synchronisiert ist. Dies dient zur schnellen lateralen Abtastung des Messfeldes durch mehrere Messungen, um einen Vollflächen- oder quasi-vollflächen 3D-Datensatz vom Objekt <b>71</b> bis <b>74</b> gewinnen zu können.
<b>569</b>	Kompensationsplatte im Objektarm (Platte zur zumindest näherungsweisen Kompensation der Dicke $d$ des optischen Mediums für ein 90°-Dachkantprismen-Reflektor-Array, 90°-Dachkantprisma ( <b>58</b> ) oder Tripel-Prisma oder für Cat'eye-Linsen, auch für ein Cat'eye-Linsen-Array)
<b>57</b>	90°-Hohl-Leichtbau-Dachkant-Endreflektor in Kombination mit einem rotationssymmetrischen Objektiv <b>42</b> im RHRER, eher geringe 90°-Winkel-Toleranz
<b>58</b>	90°-Dachkantprisma im Objektiv <b>42, 64</b> jeweils feststehend, 90°-Winkel-Toleranz des 90°-Dachkantprismas eher groß
<b>581</b>	Um 90° gedrehtes 90°-Dachkantprisma im Objektiv <b>42, 64</b> feststehend
<b>59</b>	90°-Dachkantprisma bewegt in z-Richtung im Referenzarm
<b>6</b>	rotationssymmetrisches Schwarzschildobjektiv im Objektarm O, dem Messstrahlengang
<b>61</b>	rotationssymmetrisches Objektiv dem Michelson-Interferometer zugeordnet in zweifachem Strahldurchgang genutzt
<b>62</b>	rotationssymmetrisches Objektiv am Interferometer-Ausgang in einfachem Strahldurchgang genutzt, Detektorobjektiv, Objektiv <b>62</b> bildet Objekt nach Unendlich ab
<b>63</b>	Schwarzschild-Messobjektiv als Bestandteil eines Mirau-Interferometers, rotationssymmetrisch,
<b>64</b>	Messobjektiv als Bestandteil eines Mirau-Interferometers, rotationssymmetrisch,
<b>651</b>	Mikrolinsen-Array in Linienform im Objektarm eines vielkanaligen Linnik-Interferometers

652	Mikrolinsen-Array in Matrix-Form im Objektarm eines vielkanaligen Linnik-Interferometers
653	Mikrolinsen-Array in Matrix-Form in einem vielkanaligen Mirau-Interferometer
654	rotationssystemmetrische Mikrolinse in einem Mikrolinsen-Array in Matrix-Form in einem vielkanaligen Mirau-Interferometer
657	rotationssystemmetrische Mikrolinse in einem Mikrolinsen-Array in Linien-Form im Objektarm eines vielkanaligen Linnik-Interferometers
658	rotationssystemmetrische Mikrolinse in einem Mikrolinsen-Array in Matrix-Form im Objektarm eines vielkanaligen Linnik-Interferometers
66	Messobjektiv, rotationssystemmetrisch, ansonsten unspezifiziert, hier i. d. R. in einem Linnik-Interferometer
67	Mirau-Objektiv-Interferometer mit Messobjektiv <b>64</b> , rotationssystemmetrisch
68	Mirau-Objektiv-Interferometer mit rotationssystemmetrischem Schwarzschild-Objektiv <b>63</b>
681	ebener Referenzspiegel in einem Mirau-Objektiv-Interferometer
69	geführtes Sensor-Array, bestehend aus einer Vielzahl von Mirau-Systemen – mindestens jedoch zwei – ausgebildet mit 90°-Hohl-Dachkantreflektor <b>56</b>
71	menschliche Haut
72	lebendes Organ
73	raue Metalloberfläche
74	optisch glatte Metalloberfläche
75	polierte Asphärenoberfläche, optisch glatt
8	astigmatisches Abbildungssystem
81	astigmatisches Abbildungssystem mit zwei rotationssystemmetrischen Objektiv in 4f-Anordnung, eines davon das Tubusobjektiv <b>9</b> , mit nachgeordnetem Zylinder-Objektiv <b>12</b> , dessen Brennebene mit der letzten Brennebene der 4f-Anordnung zusammenfällt, wo sich der gerasterte Detektors <b>13</b> befindet.
82	astigmatisches Detektor-Objektiv, bestehend aus einem rotationssystemmetrischen Objektiv <b>11</b> und einem Zylinder-Objektiv <b>12</b>
821	astigmatisches Detektor-Objektiv für zweiten Kanal, bestehend aus einem rotationssystemmetrischen Objektiv <b>11</b> und einem Zylinder-Objektiv <b>12</b>
83	Schwarzschild-Zylinder-Objektiv für Detektor <b>13</b>
84	Mikrolinsen-Array arbeitet als optischer Fourier-Prozessor
841	Mikrolinse in einem Mikrolinsen-Array
842	Mikrolinse
85	kleines Spiegelobjektiv als Fourier-Transformations-Komponente
86	Spiegelobjektiv-Array als Fourier-Transformations-Array
87	4f-Transferstufe
88	Rot-Durchlass-Filter
89	Mikro-Rotsperrfilter-Array
891	Mikro-Rot-Sperrfilter
9	rotationssystemmetrisches Tubusobjektiv
901	Tubus-Mikrolinsen-Array in Linienform im Detektionsstrahlengang eines vielkanaligen Linnik-Interferometers
902	Tubus-Mikrolinsen-Array in Matrix-Form im Detektionsstrahlengang eines vielkanaligen Linnik-Interferometers

903	Tubus-Mikrolinsen-Array in Matrix-Form im Detektionsstrahlengang eines vielkanaligen Mirau-Interferometers
907	rotationssymmetrische Tubus-Mikrolinse in einem Tubus-Mikrolinsen-Array in Linienform
908	rotationssymmetrische Tubus-Mikrolinse in einem Tubus-Mikrolinsen-Array in Matrix-Form
95	feine Spaltblende für Raumfilterung von Licht aus dem Referenzarm kommend
96	feine Spaltblende für Raumfilterung von Licht aus dem Objektarm kommend
961	feine Spaltblende dient auch der Unterdrückung des Hintergrundlichts aus der Tiefe von angemessenen Haut
97	feines Spaltblenden-Array für Raumfilterung von Licht vom Objekt
98	planer Umlenkspiegel
99	planer Umlenkspiegel mit feiner Spaltblende
11	rotationssymmetrisches Objektiv
111	rotationssymmetrische Mikro-Linse in einem Mikro-Linsen-Array
115	rotationssymmetrisches Objektiv
116	hochdynamischer Linear-Antrieb für Mirau-Objektiv
117	hochdynamischer Linear-Antrieb für 90°-Dachkant-Prisma, vorzugsweise ein Piezo-Steller
118	hochdynamischer Linear-Antrieb für Referenzobjektiv
119	hochdynamischer Linear-Antrieb für Messobjektiv
12	Zylinder-Objektiv
121	Zylindrische Mikro-Linse in einem Zylinder-Mikro-Linsen-Array
122	Single-mode-Laser für interferometrisches Referenzmesssystem als Sensor für Lageregelung des Antriebs für das Referenzobjektiv <b>104</b>
128	astigmatisches Abbildungssystem für Referenzmesssystem mit Vierfach-Fotodioden-Block
129	Spiegel-Zylinder-Objektiv
13	gerasterter Detektor für elektromagnetische Strahlung
132	Ein zweiter gerasterter Detektor für elektromagnetische Strahlung, Chip einer Digital-Kamera,
133	Beobachtungs-Kamera
A	leuchtender Punkt auf der Lichtquelle oder im leuchtenden Lichtspalt
Ar'	Bild eines leuchtenden Punkts im Referenzarm R
A_o'	Bild eines leuchtenden Punkts im Objektarm O
A_r''	Bild eines leuchtenden Punkts im Detektionsstrahlengang, aus dem Referenzarm R kommend
A_o''	Bild eines leuchtenden Punkts im Detektionsstrahlengang, aus dem Objektarm O kommend
	Die Bilder A_o'' und A_r'' eines leuchtenden Punkts sind optisch konjugiert zueinander.
alpha_y_source	Aperturwinkel, der zumindest näherungsweise vom beugungsbegrenzten Lichtquellenabbildungssystem noch erfasst wird.



alpha_0	Aperturwinkel im Winkelspektrum der Beleuchtung, bei dem der optische Gangunterschied auf dem gerasterten Detektor <b>13</b> null wird.
ASL	Airy-Scheibchen-Symmetrie-Linie
aTS	adaptive Triggerschwelle, entspricht einem Referenzpunkt bei einem Kurzkohärenz-Interferogramm mit Chirping in der Umgebung des Streifens nullter Ordnung, der noch klar identifizierbar ist
BER	Äußere Brennebene (dem Strahlteiler abgewandte Brennebene) des Referenzobjektivs im Referenzraum R
b_spot	Breite der Linienlichtquelle
b_spot_g'	geometrisch-optisch abgebildete Breite der Linienlichtquelle im Objektraum
b_spot	Linien-Spot-Breite des leuchtenden Linien-Spots
b_spot_g'	geometrisch-optisch abgebildete Breite des leuchtenden Linien-Spots b_spot der Lichtquelle im Objektraum
2 bl_Airy	volle Breite bis zu den beiden ersten Nullstellen im Airy-Muster im Objektraum, hier auch als volle Airy-Breite bezeichnet
CA	Zylinderachse bei einem zylindrischen Objektiv
d_r	geometrische Dicke der Strahlteilerplatte im Referenzarm R in einem Mirau-Interferometer
d_o	geometrische Dicke der Strahlteilerplatte im Objektraum O in einem Mirau-Interferometer
DK	Dachkante eines Dachkantreflektors
DKL	Dachkant-Linie des Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektors (im Referenzarm) mit spiegelsymmetrischer Wellenfront-Inversion (spiegelsymmetrisch)
HRRER	Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor (im Referenzarm) mit spiegelsymmetrischer Wellenfront-Inversion
2 delta_beta_tilt	Verkippungswinkel der interferierenden Wellenfronten im Referenzarm nach Passieren des Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektors mit spiegelsymmetrischer Wellenfront-Inversion, Kippachse ist die y-Achse.
2 delta_beta'_tilt	Verkippungswinkel der interferierenden Wellenfronten bei der Detektion, vorzugsweise auch als Zylinderwellen ausgebildet und dabei der Verkippungswinkel zwischen den Fokusslinien der Zylinderwellen, Kippachse ist die y-Achse.
delta_beta_HRRER	Verkippung des Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektors (im Referenzarm) ist gleich beta_tilt, Kippachse ist die y-Achse.
delta_beta_DK	Verkippung der Dachkante um y-Achse
delta_d	geometrische Dickendifferenz der beiden Strahlteilerplatten in einem Mirau-Interferometer
delta_q	Querversatz des Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektors
2 delta_q = s	Lateral-Shear zwischen einer Objekt- und einer Referenz-Wellenfront im Referenzarm nach Passieren des Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektors
2 delta_q_strich = s'	Lateral-Shear unter Berücksichtigung des Abbildungsmaßstabes der Optik am Ausgang des Zweistrahl-Interferometers zwischen einem Objekt- (A_o'') und einem optisch konjugierten Referenzpunkt (A_r'') als die notwendige Voraussetzung für eine Verkippung jeweils von Objekt- und Referenz-Wellenfront zueinander in der Ebene des gerasterten Detektors <b>13</b>
d_H	Durchmesser des Strahlenbündels auf dem Hybrid-Retro-Referenz Endreflektor in y-Richtung
DK_hollow	Dachkante im hohlen 90°-Dachkant-Spiegelreflektor
Dm_spot	Durchmesser eines leuchtenden Punkt-Spots der Lichtquelle

Dm_spot_g'	Durchmesser des geometrisch-optischen Bildes eines leuchtenden Punkt-Spots im Objektraum, der geometrisch-optisch abgebildet ist
DOV	wellenoptischer Schärfentiefebereich des Sensors (depth of field)
def_r-o	aktuelle, Objektpunkt-abhängige (variable) Tiefenseparierung (z-Richtung) von einem Referenzbildpunkt und einem Objektbildpunkt im Detektionsstrahlengang nach dem Objektiv ( <b>62, 91, 9</b> ). Dies stellt eine sowohl durch Konstruktion und Justierung als auch durch die aktuelle Objektpunktlage gegebene Größe dar. def_r-ol beschreibt dann die Tiefenseparierung der Bildpunkte im Detektionsstrahlengang, die aus dem leuchtenden Punkt A1 der Punktlichtquelle <b>199</b> gebildet sind.
def_r-o_strich	aktuelle, Objektpunkt-abhängige (variable) Tiefenseparierung (z-Richtung) von einem Referenzbildpunkt und einem Objektbildpunkt im Detektionsstrahlengang in einer weiteren Abbildungssituation nach dem Objektiv ( <b>9, 62, 91</b> , ggf. auch <b>2</b> im Rückwärtsstrahlengang). def_r-o_strich stellt eine sowohl durch Konstruktion und Justierung als auch durch die jeweils aktuelle Objektpunktlage gegebene variable Größe dar.
Def	feste Tiefenseparierung (z-Richtung) der Foki im Interferometer als Bilder der Punktlichtquelle, bezogen auf einen entfalteten Interferometerstrahlengang. Def stellt eine durch Konstruktion und Justierung gegebene feste Größe im optischen System dar.
Def_strich	feste Tiefenseparierung (z-Richtung) der Foki im Detektionsstrahlengang, Def_strich kann hier der Brennweite der Mikrolinse <b>841</b> entsprechen.
Def_strich_2	feste Tiefenseparierung (z-Richtung) der Foki im Detektionsstrahlengang nach einer weiteren Abbildung, üblicherweise nach dem Tubusobjektiv <b>9</b>
E_R	Ebene, wo die Reflexion der Referenzwellen lokalisiert ist.
EFL	Ebene E_xy im gewählten Koordinatensystem, welches fest der Linien-Lichtquelle zugeordnet ist
E_xz	Ebene E_xz im gewählten Koordinatensystem, welches fest der Linien-Lichtquelle zugeordnet ist
F, F', F''	Brennpunkte
F, auch F_o und F_r	Brennpunkt im Objektraum O, beziehungsweise im Referenzraum R (Diese Brennpunkte im Objektraum sind stets ohne Strich, Dagegen bekommt die Fourier-Ebene einen Strich beim „F“ also „F“.)
F auch F_o' oder F_r'	Brennpunkt in Fourier-Ebene des Objektraums O, beziehungsweise des Referenzraums R
F_11'	Bild-Brennpunkt des Zylinderobjektivs <b>11</b>
F_MLA	objektseitige Brennebene des Mikrolinsen-Arrays
F_MLA'	bildseitige Brennebene des Mikrolinsen-Arrays
FCL	Frequenzkamm-Laser
FEO	Fourier-Ebene im Objektraum O
FER	Fourier-Ebene im Referenzraum R
HRRER ( <b>45, 46</b> )	Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor Ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor erzeugt hier per Definition immer eine zur Objekt-Wellenfront gekippte Referenz-Wellenfront. Dieser Querversatz wird mittels Dachkant-Reflektor in der Brennebene des Objektivs ( <b>4, 42</b> ) erzeugt.
h_spot'	Höhe/Länge des Bildes des leuchtenden Linien-Spots im Objektraum
KKI	Kurzkohärenz-Interferogramm
Lambda	Wellenlänge der detektierten elektromagnetischen Strahlung

Lambda_S	Schwerpunkt-Wellenlänge der detektierten elektromagnetischen Strahlung
lb	lateraler Bereich im Schärfentiefebereich T des Sensors bei ideal ebener Oberfläche
LKI	Lang-Kohärenz-Interferogramm, entsteht, wenn Lichtquelle eine große Kohärenzlänge besitzt
l_lat	lateraler Bereich, in dem sich eine ebene Objektfläche eines gekippten Sensors im wellenoptischen Schärfentiefebereich T befindet
L_opt_P	optische Wegdifferenz im Prisma bei einfachem Lichtdurchgang
L_opt_T	optische Wegdifferenz in Teilerplatte bei einfachem Lichtdurchgang
LS	feiner Lichtspalt
LS_r'	Bild des feinen Lichtspalts im Referenzarm
LS_o'	Bild des feinen Lichtspalts im Objektarm
MEO	Messebene im Objektraum
n	ganze Zahl
n*	Brechzahl eines optischen Mediums
2 q <sub>l</sub> Airy	Voller Durchmesser bis zu den beiden ersten Nullstellen im Airy-Pattern, hier auch als voller Airy-Durchmesser bezeichnet, im Objektraum
OPD	Optical path difference
OPD-FCL_c	Optical path difference compensated by FCL, region of high spatial coherence
RL	Linie des Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektors. Diese definiert die Ebene E <sub>R</sub> , wo modellhaft die Reflexion mindestens einer Referenzwelle lokalisiert ist RL ist eine parallele Linie zu einer Zylinderachse CA bei einem Cat'eye-Reflektor, wo die Fokussierung von Zylinderwellen, generiert aus ebener Eingangswelle, lokalisiert ist. RL fällt bei einem 90°-Dachkantspiegel-Endreflektor mit der Dachkantlinie DKL zusammen.
RS_hin	hinlaufender Referenzstrahl
OWF	Objekt-Wellenfront
RWF	Referenz-Wellenfront
RS_rück	rücklaufender Referenzstrahl
SH	Signalhub zwischen Maximalwert in der nullten Streifenordnung und dem kleineren der beiden Maxima im Streifen erster Ordnung, die adaptive Triggerschwelle aTS
v	optischer Bildversatz durch Dicke d des optischen Mediums (Glas, Kunststoff, Flüssigkeit) und Brechungsindex n desselben in Bezug auf Luftweg $v = (n - 1)/n^*$
VRRERA	Voll-Retro-Referenz-Endreflektor-Array Ein Voll-Retro-Referenz-Endreflektor-Array mit Tripel-Reflektoren erzeugt immer eine gekippte Referenz-Wellenfront, d. h., es muss immer mindestens ein Objektiv (42) dazugehören.
Y	Optische Verzögerungslänge im FCL
y	Richtung der Längsausdehnung der (ersten) Linienquelle
y_tilt	Kippachse des Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektors mit spiegelsymmetrischer Wellenfront-Inversion für die Verkippung delta_beta_y desselben
ZBE	Zwischenbildebene
z_Tsep	Tiefenseparierung der kohärenten Foki von Objektarm O und Referenzarm R

## Beschreibung der Figuren

[0165] Die Erfindung wird beispielhaft anhand der **Fig. 1** bis **Fig. 76** beschrieben.

[0166] Hier wird der Begriff Licht stets als Synonym für elektromagnetische Strahlung vom Terahertz-, über das Infrarot- bis zum EUV-Spektrum verwendet.

[0167] Die **Fig. 1** stellt einen linienhaft messenden OCT-Sensor auf der Basis eines One-shot-Interferometers auf der Basis eines modifizierten Interferometers vom Linnik-Typs mit einem fokussierenden Objektiv **6** im Objektarm dar, der auch zur Messung von Haut am Menschen eingesetzt werden soll. **Fig. 1** stellt einen Ansatz dar, den gesamten Messkopf zu bewegen.

[0168] Die gepulste Lichtquelle **1** wird von einer Superlumineszenz-Dioden-Batterie mit nachgeordnetem und mit schnell rotierendem Schlitz-Chopper-Rad mit einer hochgenauen Drehzahl-Regelung und Drehwinkel-Regelung durch einen Digitalrechner gebildet. Die Schlitzbreite am Rad beträgt relativ näherungsweise 40% der mittleren Schlitzabstände. So ist eine gepulste Linien-Lichtquelle gegeben, die einen nachgeordneten feststehenden Spalt beleuchtet, dessen Längsachse hier in y-Richtung weist. Die Breite des Spalts beträgt 5  $\mu\text{m}$  und die ausgeleuchtete Länge beträgt 5 mm.

[0169] Die wichtigsten Parameter der gepulste Linienquelle **1** sind:  
Linienquelle im NIR mit 800 nm bis 900 nm Mittenwellenlänge, mit einer Pulsrate von 400 Hz und einer mittleren Pulszeit von 100  $\mu\text{s}$  (40% relative Einschaltzeit, Trapez-Form, Licht kommt von Chopper), Kohärenzlänge 6  $\mu\text{m}$ , Dauerstrichleistung einer Superlumineszenz-Dioden-Batterie: 20 mW.

[0170] Der Sensorkopf bewegt sich mit 1 mm/s in Tiefenrichtung über einen Tiefenbereich von 500  $\mu\text{m}$  in Lichtrichtung (z-Richtung).

[0171] Das von der gepulsten kurzkohärenten-Lichtquelle **1** ausgehende Licht wird von einem beugungsbegrenzt arbeitenden Kollimator-Objektiv **2** mit dem halben Aperturwinkel  $\alpha_{y\_source}$ , der zu einer numerischen Apertur von 0,1 führt, erfasst und kollimiert. Das kollimierte Licht gelangt auf einen Strahlteiler **3** im Interferometer. Die Breite  $b_{spot}$  liegt unterhalb der beugungsbegrenzten Lateral-auflösung des Kollimator-Objektivs **2**. Das Interferometer arbeitet zumindest näherungsweise am optischen Gangunterschied null. Das reflektierte Licht gelangt im Referenzarm R auf ein beugungsbegrenztes Schwarzschildobjektiv **4** mit einem Dachkantreflektor **5** mit dessen Dachkante in der Fokusebene. Der Dachkantreflektor **5** weist einen Querversatz  $\delta_{q\_}$  auf. Das eingestrahlte Licht wird querversetzt und erfährt eine spiegelsymmetrische Wellenfrontinversion und trifft nach Passieren des Schwarzschildobjektivs **4** geneigt wieder auf den Strahlteiler **3**, wo es transmittiert und in den Detektionsstrahlengang gelangt. Das hindurchgelassene Licht trifft im Objektarm O auf ein beugungsbegrenztes Schwarzschildobjektiv **6** mit einer numerischen Apertur von 0,25.

[0172] Das vom Strahlteiler **3** kommende Licht wird mittels Schwarzschildobjektiv **6** auf die menschliche Haut **7** in Linienform beugungsbegrenzt fokussiert und gestreut reflektiert. Der Tiefenbereich des mechanisch bewegten Sensorkopfs beträgt hier 500  $\mu\text{m}$ , so dass auch fokussiertes Licht in die menschliche Haut **7** etwas eindringen kann, wo es gestreut wird und sich auch in Lichtung des Schwarzschildobjektivs **6** ausbreitet. Dieses Schwarzschildobjektiv **6** erfasst das von der menschlichen Haut **7** zurückkommende Licht und lenkt es in Richtung Strahlteiler **3**, wo es in den Detektionsstrahlengang reflektiert wird. Im Detektionsstrahlengang befindet sich ein astigmatisches Abbildungssystem **8** mit einer Spaltblende **9** zur konfokalen Diskriminierung des Objektlichts, mit zwei rotationssymmetrischen Objektiven **10** und **11** sowie mit einer Zylinderoptik **12** mit liegender Zylinderachse zur Bildung von Zylinderwellen auf dem Kamera-Chip **13** der Digital-Kamera. Diese Digital-Kamera wird mit 400 Hz betrieben. Deren zugeordneter Digital-Rechner gibt den zeitlichen Takt vor und erzwingt den streng synchronisierten Lauf des schnell rotierenden Schlitz-Chopper-Rad mit hochgenauer Drehzahl-Regelung und Drehwinkel-Regelung.

[0173] Auf der Digital-Kamera kommt von jedem fokussierten Messpunkt in oder auf der menschlichen Haut **7** eine fokussierte Zylinderwelle auf die Digital-Kamera, die mit einer fokussierten und zur Objekt-Zylinderwelle geneigten Referenz-Zylinderwelle aus dem Referenzarm zur Interferenz kommt. So entsteht ein räumliches, linienhaftes Interferogramm KKI entlang einer Zeile des Kamera-Chip **13** für jeden einzelnen Messpunkt, Das linienhafte Interferogramm KKI wird mit 256 Pixeln pro erfassten Messpunkt detektiert. Der Kamera-Chip **13** besitzt eine Frame-Rate von 400 Hz. In 1024 Spalten werden also 1024 Messpunkte in Linie im Messraum, wo sich die menschliche Haut **7** befindet, erfasst. Zu jedem Messpunkte gehört ein Interferogramm KKI, so dass

maximal 1024 Interferogramme KKI in einem einzigen Kamera-Frame als One-shot-Interferogramme detektiert werden können.

**[0174]** Pro 5  $\mu\text{m}$  Tiefenwert der Fokussierung wird im Mittel ein Kamerabild aufgenommen, wobei die Verschmierung durch die Pulsbeleuchtung mit 100  $\mu\text{s}$  Dauer auf weniger als 0,1  $\mu\text{m}$  in der Tiefe kommt. Der optische Gangunterschied zwischen den interferierenden Wellen ändert sich durch den Kurzpuls mit 100  $\mu\text{s}$  mittlerer Pulszeit in Trapez-Dreieck-Form um etwa 0,2  $\mu\text{m}$ , was bei der den Wellenlängen im NIR zu einer effektiven Phasenänderung im Interferogramm von weniger als  $\text{Pi}/2$  führt. Das ist bekanntermaßen bezüglich des Kontrasts im zeitgemittelten Interferogramm noch gut zu akzeptieren.

**[0175]** Mit diesem System lässt sich ein Tiefen-Scan (A-Scan) mit 460  $\mu\text{m}$  erfasster Messtiefe und 1024 lateral erfassten Messpunkten pro 100 ms durchführen. Dabei wird von einer lateralen Ortsauflösung von 2  $\mu\text{m}$  und in der Tiefe einer Auflösung von 5  $\mu\text{m}$  ausgegangen.

**[0176]** Die Auswertung der räumlichen Interferogramme, deren Ortsfrequenz zumindest näherungsweise bekannt ist, erfolgt mittels in der Weißlicht-Interferometrie bekannter Verfahren, welche den 3D-OCT-Datensatz der detektierten Haut liefern.

**[0177]** Fig. 2 stellt ein stellt einen linienhaft messenden OCT-Sensor auf der Basis eines One-shot-Interferometers auf der Basis eines modifizierten Interferometers vom Linnik-Typs mit einem fokussierenden Schwarzschild-Objektivs **6** im Objektarm dar, der auch zur Messung von Haut am Menschen eingesetzt werden soll. Im Referenzarm ist ein Zylinder-Spiegel-Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor **44** eingesetzt, der wie in Fig. 8 dargestellt mit einem Zylinder-Spiegel-Objektiv **41**. Dabei ist dessen Zylinder-Objektiv-Achse (CA) senkrecht zur Längsrichtung  $l_0$  der Linienquelle **1**. Die Kippachse des Zylinder-Spiegel-Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektors **44** ist zumindest näherungsweise parallel zur y-Achse. Das rotationssymmetrische Tubusobjektiv **9** bildet zumindest näherungsweise die Fourier-Ebene FEO des Schwarzschild-Objektivs **6** in die Ebene des gerasterten Detektors **13** ab. Mittels astigmatischer Abbildungsstufe **8** mit dem Zylinder-Objektiv **12** entstehen längliche und voneinander lateral separierte Kurzkohärenz-Interferogramme KKI in der Ebene des gerasterten Detektors **13**. Das Detail A stellt die um 90° herausgekippte Lichtquellenebene mit der Breite  $b$  der feinen Linienlichtquelle **1** dar.

**[0178]** Zu Fig. 3: Hier wird ein Lichtquellen-bezogenes Koordinaten-System dargestellt, in dem die Längsrichtung der Lichtquelle, hier ein feiner Lichtspalt **196**, die y-Achse darstellt und die Richtung der Minimalausdehnung der Lichtquelle die x-Achse. Die azimuthale Lage des feinen Lichtspalts **196** kann beliebig sein. Die Endreflektor-Komponenten im Referenzarm sind darauf auszurichten. In x- beziehungsweise Querrichtung  $q$  liegt die Ausdehnung des feinen Lichtspalts **196** unterhalb der lateralen Auflösung, die durch die Beugungsbegrenzung der numerischen Apertur NA des nachfolgenden Kollimator-Objektivs **2** und des verwendeten Lichtspektrums gegeben ist.

**[0179]** Die Fig. 4 stellt einen feiner Lichtspalt **196** dar, der lateral versetzt angeordnet ist. Endreflektor-Komponenten im Referenzarm sind darauf auszurichten. Zumindes in Querrichtung  $q$  liegt die Ausdehnung des feinen Lichtspalts **196** an oder unterhalb der lateralen Auflösung, die durch die Beugungsbegrenzung der numerischen Apertur NA des nachfolgenden Kollimator-Objektivs **2** und des verwendeten Lichtspektrums gegeben ist.

**[0180]** Die Fig. 5 stellt eine feine Punktlichtquelle in Kettenform **195** dar. Zumindes in Querrichtung  $q$  liegt die Ausdehnung der feinen Punkte der Punktlichtquelle in Kettenform **195** an oder unterhalb der lateralen Auflösung, die durch die Beugungsbegrenzung aufgrund der numerischen Apertur NA des nachfolgenden Kollimator-Objektivs **2** und des verwendeten Lichtspektrums gegeben ist.

**[0181]** Die Fig. 6 stellt eine fein ausgebildete Punktlichtquellen-Matrix dar. Auch ist zumindest in Querrichtung  $q$  die laterale Ausdehnung der einzelnen Lichtspots jeweils an oder unterhalb der lateralen Auflösung, die durch die Beugungsbegrenzung aufgrund der numerischen Apertur NA des nachfolgenden Kollimator-Objektivs **2** und des verwendeten Lichtspektrums gegeben ist.

**[0182]** Die Fig. 7 stellt eine feine Linien-Lichtquelle dar, die mittels rechnergesteuerten räumlichen Lichtmodulators in Transmission auf Flüssigkristall-Basis und vorgeordneter kurzkohärenter Lichtquelle, die hier nicht dargestellt ist, gebildet ist. Die adressierten linienhaften Transmissionsbereiche sind rechnergesteuert verschiebbar, um bei der Messung eine Messfeld nahezu vollflächig erfassen zu können. In Querrichtung  $q$  ist die laterale Ausdehnung der einzelnen Lichtspots jeweils an oder unterhalb der lateralen Auflösung, die durch die

Beugungsbegrenzung aufgrund der numerischen Apertur NA des nachfolgenden Kollimator-Objektivs **2** und des verwendeten Lichtspektrums gegeben ist.

**[0183]** Die **Fig. 8** stellt einen entfalteten Referenzarm R dar, in welchem sich ein Zylinder-Spiegel-Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor (ZSHRRER) **44** mit Zylinder-Spiegel-Objektiv **41** befindet. Die Zylinder-Objektiv-Achse (CA) des Zylinder-Spiegel-Objektivs **41** ist senkrecht zur Längsrichtung  $l_0$  der Linienquelle **1** ausgerichtet. Der gesamte -Spiegel-Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor **44** ist schwach verkippt um den Winkel  $\delta_{\text{beta\_tilt}}$ , so dass für Referenzbündel der Kippwinkel  $2 \delta_{\text{beta\_tilt}}$  besteht.

**[0184]** Die **Fig. 9** bis **Fig. 12** beschreiben mögliche Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-Anordnungen. **Fig. 9** stellt einen gekippten Dachkantreflektor **5** dar. **Fig. 10** stellt einen Dachkantreflektor **5** mit der Dachkante DK im Referenzarm dar.

**[0185]** **Fig. 11** stellt den Referenzstrahlengang im Referenzarm R in einem modifizierten Linnik-Interferometer mit einem rotationssymmetrischen Referenzobjektiv **42** und einem Hohl-90°-Dachkant-Endreflektor **561** dar. Die feine Linienlichtquelle **1** weist eine Breite  $b$  auf. Der Dachkanspiegel-Reflektor **561** weist nicht zwingend eine enge Toleranz des 90°-Dachkantwinkels auf. Das Interferometer weist zur Beleuchtung einen feinen Lichtspalt auf, der hier nicht dargestellt ist. Es entsteht für das zurücklaufende Licht RS\_r aus dem Lateralversatz ein Winkel  $2 \delta_{\text{beta\_strich}}$ .

**[0186]** Die **Fig. 12** stellt vom Grundtyp ein Linnik-Interferometer mit einer fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix **199** dar, die spektral breitbandig ausgebildet ist und eine Ausdehnung der Lichtspots unterhalb der beugungsbegrenzten Lateral-Auflösung des nachfolgenden Kollimator-Objektivs **2** aufweist. In der Messebene MEO des Interferometers befindet sich eine raue Metalloberfläche **73** als Objekt. Im Referenzarm ist ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System **46** mit einem rotationssymmetrischen Referenzobjektiv **42** angeordnet, dem ein 90°-Hohl-Dachkantspiegel-Mikro-Endreflektor-Array **564** zugeordnet ist. Die 90°-Dachkanspiegel-Reflektoren haben hierbei keine zwingend enge 90°-Winkel-Toleranz. Das 90°-Hohl-Dachkantspiegel-Mikro-Endreflektor-Array **564** ist lateral etwas versetzt, so dass auch die kleinen 90°-Hohl-Dachkantspiegel etwas versetzt sind und die Bildpunkte  $A_{r1'}$ ,  $A_{r2'}$  und  $A_{r3'}$  als leuchtende Spots A1, A2 und A3 von der Punkt-Lichtquellen-Matrix **199** nicht in die Dachkanten abgebildet werden, wohl zumindest näherungsweise jedoch scharf in die Dachkantenebene. So entsteht vielfach ein Querversatz  $2 \delta_{\text{beta\_q}}$ .

**[0187]** Eine astigmatische Abbildung von Punkten der rauhen Metalloberfläche **73**, die von Lichtspots der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix **199** beleuchtet werden, auf den gerasterten Detektor **13** wird durch ein Zylinder-Objektiv **12** in Kombination mit einem rotationssymmetrischen Objektiv **11** erreicht.

**[0188]** Die **Fig. 13** stellt eine Anordnung im Grundtyp nach **Fig. 12** dar. Hier ist im Referenzarm ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System **46** mit einem rotationssymmetrischen Referenzobjektiv **42** angeordnet, dem im Gegensatz zu **Fig. 12** ein 90°-Dachkantprismenspiegel-Mikro-Endreflektor-Array **565** zugeordnet ist. Im Objektarm befindet sich zur Kompensation der optischen Dicke der 90° Prismen im 90°-Dachkantprismenspiegel-Mikro-Endreflektor-Array **565** zwecks Vermeidung von starker unkompensierter Dispersion im Interferometer eine Kompensationsplatte **569** gleicher optischer Dicke wie die 90°-Prismen im Mikro-Endreflektor-Array **565**. So wird das unerwünschte und in diesem Fall auch viel zu starke Chirping im Kurzkohärenz-Interferogramm KKI verhindert. Eine astigmatische Abbildung von Punkten der rauhen Metalloberfläche **73**, die von Lichtspots der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix **199** beleuchtet werden, auf den gerasterten Detektor **13** wird durch zylindrische Mikro-Linsen **121** in einem Zylinder-Mikro-Linsen-Array erreicht, die mit rotationssymmetrischen Mikro-Linsen **111** in einem Mikro-Linsen-Array kombiniert sind. Das Detail D13-1 zeigt die Beleuchtung mit drei Lichtspalten. Das Detail D13-2 stellt das 90°-Dachkantprismenspiegel-Mikro-Endreflektor-Arrays **565** dar. Das Detail D13-3 zeigt die Anordnung von Kurzkohärenz-Interferogramm KKI auf dem gerasterten Detektor **13**. und Das Detail D13-4 den Signalverlauf in einem detektierten Kurzkohärenz-Interferogramm KKI.

**[0189]** Die **Fig. 14** stellt eine Anordnung mit einem Mirau-Interferometer **67** dar. Die Beleuchtung erfolgt über einen, hier nicht dargestellten feinen Lichtspalt. Im Referenzarm R des Mirau-Interferometers ist ein feststehendes 90°-Dachkantprisma **58** angeordnet, dessen Dachkante DK sich optisch in der Fokusebene des Objektivs **64** befindet. Die Dachkante DK des 90°-Dachkantprismas **58** ist parallel zur y-Achse ausgerichtet und parallel zur Längsausdehnung des feinen Lichtspalts zur Interferometerbeleuchtung, die hier nicht dargestellt ist. Die 90°-Winkel-Toleranz des 90°-Dachkantprismas ist hier eher groß. Bei dieser Mirau-Interferometer-Anordnung wird eine Lateral-Shear  $2 \delta_{\text{beta\_q}}$  zwischen den Wellenfronten eingeführt, die nach dem Passieren des Objektivs **64** zu einer Verkipfung der Wellenfronten von Objekt- und Referenzarm von  $2 \delta_{\text{beta\_tilt}}$  führt. Die optische Weglänge des 90°-Dachkantprismas **58** wird durch die optische Weglänge des Strahlteilers

**33** ausgeglichen. Das Detail D14 stellt das Dachkantprisma **58** dar, dessen optische Weglänge der Platte **33** im Strahlteiler **31** entspricht.

**[0190]** Die **Fig. 15** stellt eine Interferometeranordnung mit einer schmalen Linienquelle **1**, dargestellt im Detail D15 und mit einem Schwarzschild-Zylinder-Spiegel-Objektiv **41** dar. Die Breite  $b_{\text{spot}}$  der schmalen Linienquelle **1** liegt unter der beugungsbegrenzten Auflösung des Lichtquellenobjektivs **2**, s. Detail D15-1. Das Detail D15-2 zeigt ein Schwarzschild-Zylinder-Spiegel-Objektiv **83** im Detektionsstrahlengang, um Zylinderwellen auf dem gerasterten Detektor **13** zu erzeugen.

**[0191]** Die **Fig. 16** stellt eine Anordnung mit einem Hybrid-Interferometer nach dem Linnik-Ansatz dar oder kann auch als Zweistrahl-Anordnung auf der Basis eines Michelson-Interferometers mit einem objektabbildenden Objektiv im Objektarm verstanden werden. Dieses Zweistrahl-Interferometer wird mit einem Frequenzkamm-Laser betrieben. Es erfolgt eine linienhafte Beleuchtung mittels feinem Lichtspalt **196**, dargestellt im Detail D16-1, wobei die Linienbreite  $b_{\text{spot}}$  unterhalb des lateralen Auflösungsvermögens des Kollimatorobjektivs **2** liegt. Die Anordnung wird zur Messung der Reustraheit einer optisch glatten Metalloberfläche **74** eingesetzt. Das Bild des Spalts ( $A_o'$ ) befindet sich auf der optischen Achse des Schwarzschild-Spiegel-Objektivs **6**. Detail D-16-2 zeigt das Schwarzschild-Spiegel-Objektiv **6**, das im Objektarm O des Interferometers angeordnet ist. Durch die Spiegeloptik wird Dispersion im Interferometer vermieden. Die Lateral-Shear der Dachkante DK des Dachkantreflektors **5** in y-Richtung ist zu null gemacht. Die Dachkante DK liegt optisch zumindest näherungsweise in der Fourier-Ebene des Fokussier-Objektivs **6**, wodurch Interferenzen gleicher Neigung in der Detektionsebene weitgehend vermieden werden. Das Detail D16-4 zeigt Kurzkohärenz-Interferogramme KKI auf dem gerasterten Detektor **13**, jeweils eines für jeden Messpunkt auf der optisch glatten Metalloberfläche **74**.

**[0192]** Das Detail D16-3 ist in **Fig. 17** vergrößert dargestellt. Hier ist eine feine Spaltblende **96** für Objektstrahlung angeordnet, die zur Tiefpassfilterung am Airy-Limit und darunter genutzt wird, damit eine Objekt-Wellenfront OWF auch von einem weniger kooperativen Messpunkt zumindest näherungsweise voll ausgebildet werden kann. Es ist jedoch möglich, dass es einen „unbestimmbaren“ Phasensprung im detektierten räumlichen Interferogramm auf dem gerasterten Detektor **13** gibt, so dass die Phasen-Information eines Objektpunkts verloren gehen kann und nicht für die Tiefenbestimmung zur Verfügung steht.

**[0193]** Die **Fig. 18** stellt ein Hybrid-Interferometer nach dem Linnik-Ansatz dar, in dessen Referenzarm R sich ein um den Kippwinkel  $\delta_{\text{beta\_tilt}}$  geneigter  $90^\circ$ -Hohl-Dachkantreflektor **5** mit der Dachkante DK befindet. Gemäß Detail D18-1 wird über einen feinen Lichtspalt **196** beleuchtet. Detail D18-2 stellt das im Objektarm O eingesetzte Schwarzschildobjektiv **6** im Objektarm O dar. Detail D18-3 zeigt den um  $90^\circ$  herausgekippten  $90^\circ$ -Hohl-Dachkantreflektor **5** im Referenzarm R. Nach der Strahlvereinigung am Strahlteiler des rückkommenden Lichts aus Referenzarm R und des Lichts von einer rauen Metalloberfläche **73** aus dem Objektarm O erfolgt die Fokussierung der Bündel mittels Tubusobjektiv **9**. Aufgrund der Kippung des  $90^\circ$ -Hohl-Dachkantreflektors **5** sind die Fokusspots  $A_r''$  und  $A_o''$  in der Brennebene  $F_9'$  lateral separiert.  $A_r''$  und  $A_o''$  stellen Bilder eines leuchtenden Punktes A dar. Mittels astigmatischem Detektorobjektiv in der Kombination rotationssystemmetrisches Objektiv **11** und Zylinderobjektiv **12** entsteht auf dem gerasterten Detektor **13** von jedem im Schärfentiefebereich des Schwarzschildobjektivs **6** erfassten Objektpunkt eine Objekt-Zylinderwelle, die jeweils um den Winkelbetrag  $2 \delta_{\text{beta\_tilt}}$  zur Referenz-Zylinderwelle geneigt ist, so dass dort ein Paar interferierender Zylinderwellen besteht. Detail D18-4 zeigt die entstehenden Kurzkohärenz-Interferogramme KKI.

**[0194]** Das Rechteck in **Fig. 19** zeigt die Breite  $b_{\text{spot\_g'}}$  des errechneten geometrisch-optisches Bildes vom feinen Lichtspalt **196**, dessen Bild hier etwa der halben Airy-Scheibchenbreite entspricht.

**[0195]** Die **Fig. 20** basiert aus der optischen Schaltung nach **Fig. 18** stellt einen Sensor für die Messung von jeweils einer sehr kurzen Profil-Linie dar, da sich im räumlichen Interferogramm ein quadratischer Phasenterm befindet. Detail D20-2 zeigt das Koordinatensystem.

**[0196]** Als Lichtquelle wird ein vergleichsweise starker Single-Mode-Laser als Lichtquelle mit einem zum gerasterten Detektor **13** synchronisierten, rotierenden Chopper-Rad eingesetzt. Gemessen wird hier die Ebenheitsabweichung einer ebenen und optisch glatten Metalloberfläche **74**. Somit entstehen auf dem gerasterten Detektor **13** Wavelets ohne einen Streifen nullter Ordnung. Die Höhenunterschiede benachbarter Messpunkte in einem sehr kurzen Bereich liegen deutlich unter einem Viertel der Laserwellenlänge. Demzufolge müssen zur Messung der optisch glatten Metalloberfläche **74** nur Phasendifferenzen deutlich unter  $180$  Altgrad ausgewertet werden, um das Profil der optisch glatten Metalloberfläche **74** darstellen zu können.

**[0197]** Die Fig. 21 stellt eine zu Fig. 20 bis auf die Referenz-Endreflektor-Position vergleichbare Anordnung dar. Jedoch wird hierbei eine feine Lichtquelle **103** mit einem Frequenzkamm-Laser eingesetzt, der mit einem rotierenden Chopper-Rad im einstelligen kHz-Bereich moduliert wird. Der Frequenzkamm-Laser kompensiert in bekannter Art und Weise den vergleichsweise großen optischen Gangunterschied des Zweistrahl-Interferometers, so dass Kurzkohärenz-Interferogramme detektiert werden können. Der Dachkantreflektor **5** steht hier zumindest näherungsweise in der zur Ebene FER konjugierten Ebene, so dass im Wavelet kein quadratischer Phasenterm auftritt und so auch längere Profilmessungen im Vergleich zur Anordnung in Fig. 20 durchgeführt werden können.

**[0198]** Die Fig. 22 präsentiert ein Linnik-Interferometer, bei dem in zwei rechtwinklig zueinander stehenden Richtungen gleichzeitig linienhaft gemessen werden kann. Dazu sind, dargestellt im Detail D22-1, zwei feine Lichtquellen **197** als Punktlichtkette in 90°-Anordnung ausgebildet, die im niedrigen kHz-Bereich gepulstes Licht ausstrahlen. Die laterale Ausdehnung in  $q_x$ - und  $q_y$ -Richtung liegt jeweils unter der lateralen Auflösung bei der Abbildung auf die Objektoberfläche, die hier eine raue Metalloberfläche **73** darstellt. Im Referenzarm R sind entsprechend zwei um 90° zueinander angeordnete 90°-Hohl-Dachkantreflektoren **561** und **562** positioniert. So besteht eine Zweikanal-x-y-Messanordnung. Im Detektionsstrahlengang werden die beiden Kanäle mittels planem Umlenkspiegel **99** mit feiner Spaltblende strahlenoptisch getrennt und nach Passieren je eines astigmatischen Detektorobjektivs **82** und **821** jeweils einem gerasterten Detektor **13** und **132** zugeführt, wo von angemessenen Objektpunkten Kurzkohärenz-Interferogramme KKI detektiert werden.

**[0199]** In Fig. 23 sind die kohärenten Airy-Spots  $A_{o_i}$  und  $A_{r_i}$  sowie  $A_{o_i} + 1'$  und  $A_{r_i} + 1'$ , die jeweils von einer feinen Lichtquelle **190** mit feinen Lichtspots über Strahlteilung und Passieren von Referenzarm R und Objektarm O gebildet sind, vergleichsweise dicht beieinander positioniert. Die Darstellung ist auf den Hohl-90°-Dachkant-Endreflektor **561** bezogen, auf den die Objektpots rückprojiziert wurden. Der Abstand der Airy-Spots ist in der Größenordnung der Airy-Musterbreite. Fig. 24 zeigt die sich hierbei ergebende räumlichen Interferogramme für drei Messpunkte, denen jeweils über hier nicht dargestellte Mikrolinsen ein eigener Strahlengang bis zur Detektion zugeordnet ist, wobei hier auf eine astigmatische Abbildung der interferierenden Bündel mit Bildung von Zylinderwellen verzichtet wurde. Einen Hinweis auf einen möglichen Strahlengang mit Mikrolinsen gibt hier die Anordnung in Fig. 72, wo die Foki jedoch in der Tiefe separiert sind.

**[0200]** Die in Fig. 24 dargestellten räumlichen Interferogramme können auch als Lichtfeld-Interferogramme bezeichnet werden, je eines für jeden einzelnen Objektpunkt. Aufgrund des geringen lateralen Abstands der kohärenten Spots  $A_{o_i}$  und  $A_{r_i}$  sowie  $A_{o_i} + 1'$  und  $A_{r_i} + 1'$  entstehen nur sehr wenige Streifen bei der Detektion. Der mittlere Streifen stellt hier aufgrund der exakten Position des zugehörigen Objektpunkts den Streifen nullter Ordnung dar. Der Streifenabstand ist zumindest näherungsweise konstant.

**[0201]** In Fig. 25 sind Airy-Spots etwas weiter voneinander auf dem Hohl-90°-Dachkant-Endreflektor **561** im Referenzarm R des Interferometers beieinander positioniert mit einem Abstand in der deutlich mehr als zehnfachen Größenordnung der Airy-Musterbreite. Auch hierbei wurden die Objektpots zur Darstellung auf den Hohl-90°-Dachkant-Endreflektor **561** rückprojiziert. Fig. 26 zeigt das sich hierbei ergebende räumliche Interferogramm als Überlagerung von kohärenten Referenz-Spots und Objektpots. Es entsteht aufgrund des hier im Vergleich zu Fig. 23 deutlich größeren Querversatzes  $2 \Delta q$  eine Vielzahl von Interferenzstreifen bei der Detektion. Auch hier ist der Streifenabstand zumindest näherungsweise konstant und trägt eher keine Information über das Messobjekt.

**[0202]** Die Fig. 27 stellt einen Linien-Sensor in Mirau-Interferometer-Anordnung dar. Das Referenz-Dachkantspiegelprisma **58** weist für Hauptstrahlen im gleichen Glastyp den gleichen geometrischen Weg wie die Teilerplatte **33** auf. Somit besteht eine Kompensation der optischen Glasweglängen und es tritt in den Kurzkohärenz-Interferogrammen kein Chirping auf. Zur schnellen Erfassung der Miniform einer rauen und etwas gekrümmten Metalloberfläche **73** bewegt sich das Mirau-Objektiv-Interferometer **67** mittels hier nicht dargestelltem Hubtisch in Tiefenrichtung zur Erfassung der Objektpunkte jeweils im Schärfentiefebereich, so dass dann vom feinen Lichtspalt **196** ein Bild mit Airy-Muster auf der Objektoberfläche entstehen kann. Im Detektionsstrahlengang werden schließlich durch astigmatische Abbildung Kurzkohärenz-Interferogramme auf dem gerasterten Detektor **13** gebildet.

**[0203]** Die Fig. 28 stellt einen Linien-Sensor mit schnellstmöglichem Scan des Mirau-Objektiv-Interferometers **67** für das Erfassen der Oberfläche von menschlicher Haut **71** am Patienten dar. Der optische Aufbau entspricht zunächst dem von Fig. 27, jedoch ist hierbei neben dem hochdynamischen Linear-Antrieb **116** für das Mirau-Objektiv-Interferometer **67** auch noch ein hochdynamischer Linear-Antrieb für das 90°-Dachkant-Prisma **59**, ein Piezo-Steller **117**, angeordnet. Diese Kombination ermöglicht aufgrund der großen Beschleunigung



nigung des Piezo-Stellers **117** einen Weg-Zeit-Verlauf der optischen Abtastung mit einem vergleichsweise gut angenäherten Dreieckprofil und somit praktisch keinen Zeitverlust in den Umkehrpunkten der Abtastung. Somit ergibt sich für den Sensor ein Tiefenmessbereich für die Profilerfassung, der ein Mehrfaches des wellenoptischen Schärfetiefenbereiches beträgt. Mittels Lateral-Scan kann dadurch ein vergleichsweise großes Messvolumen schnell durchmustert werden. Auch bei dieser Anordnung weist das Referenz-Dackantspiegelprisma **59** in gleichem Glastype den gleichen geometrischen Weg für Hauptstrahlen wie die Teilerplatte **33** auf. Die Spaltblende **961** dient auch der Unterdrückung des Hintergrundlichts aus der Tiefe der angemessenen Haut **71**, um den Signalkontrast zu verbessern.

**[0204]** Die **Fig. 29** stellt ein Mirau-Interferometer **68** für die Weißlicht-Interferometrie mit einem Schwarzschild-Objektiv **63** dar. Es sind mehrere Positionier-Systeme zur schnellen Bewegung des Mirau-Interferometers **68** angeordnet. Auch das 90°-Dachkantprisma **59** bewegt sich im Referenzarm in z-Richtung hochdynamisch. So kann gemäß **Fig. 30** ein Dreiecks-Profil im Verlauf des Weges des Mirau-Interferometers **68** über der Zeit erreicht werden. **Fig. 31** zeigt näherungsweise den Wegverlauf in x-Richtung über der Zeit t. **Fig. 32** präsentiert den Scanweg an einem lebenden Organ. Das Detail D32-1 stellt einzelne Messzellen dar und Detail D32-2 das in einem Messvorgang erfassbare Messvolumen.

**[0205]** In **Fig. 33** ist eine weitere Mirau-Interferometer-Anordnung mit einem Schwarzschild-Messobjektiv **63** dargestellt. Das Detail D33 zeigt das Koordinatensystem. **Fig. 34** präsentiert eine Mirau-Interferometer-Anordnung mit einem refraktiven Messobjektiv **64**.

**[0206]** Die **Fig. 35** stellt ein Mirau-Interferometer-System für die Messung von zwei Linienprofilen dar, die senkrecht zueinander angeordnet sind.

**[0207]** Die **Fig. 36** zeigt die Scanrichtung des Messkopfes, der sich auf einer Dreikoordinatenmessmaschine befindet, und die rechtwinklig zueinander angeordneten feinen Messlinien, die aus der feinen, gepulsten Linien-Lichtquelle **193** stammen.

**[0208]** Die **Fig. 37** zeigt ein Sensor-Array zur mikroskopischen 3D-Untersuchung eines menschlichen Organs zum Auffinden von Krebszellen durch schnellen Linear-Scan auf der Oberfläche des lebenden Organs **72** bei einer chirurgischen Operation.

**[0209]** In der **Fig. 38** wird ein Multi-Linien-Sensor mit einem 90°-Hohl-Dachkantspiegel-Mikro-Endreflektor-Array **564** in Kombination mit einem rotationssymmetrischen Referenzobjektiv **42** im Referenzarm in einer Mirau-Konfiguration dargestellt. Somit können auf einer rauen Metalloberfläche **73** zur Profilerfassung mehrere Messlinien gleichzeitig adressiert werden. Die **Fig. 39** und **Fig. 40** zeigen das 90°-Hohl-Dachkantspiegel-Mikro-Endreflektor-Array **564** in je einer Ansicht.

**[0210]** Die **Fig. 41** stellt ein Sensor-Array zur mikroskopischen 3D-Untersuchung von metallischen Werkstücken dar.

**[0211]** Die **Fig. 42** stellt einen Linien-Sensorkopf dar, der über ein großes Messobjekt **73** etwas geneigt ist und schnell über das Messobjekt **73** zur Formerfassung bewegt wird. Diese Bewegung erfolgt mittels einer 3-D-Koordinatenmesmaschine. Es wird beim Messen mit „Datenüberschuss“ gearbeitet. Viele Messpunkte an optisch rauen Objekten, hier weiß dargestellt, sind nicht-kooperativ, d. h. nicht auswertbar. Dies stellt durch die parallelisierte Aufnahme und des „Datenüberschusses“ i. d. R. jedoch kein Problem dar. Aus vielen gültigen Messwerten – hier stellt der schwarze Bereich die gültigen Messpunkte dar – wird das 3D-Profil in Teilbereichen ermittelt, auch, wenn z. T. in Teilbereichen des Messfeldes der Füllgrad mit gültigen Messpunkten z. B. nur 30% beträgt. Jeder Messpunkt erfährt einen „Qualitäts-Check“, den er bestehen muss, damit dieser für die Weiterverarbeitung zu einem 3D-Datensatz „zugelassen“ wird. Die sich ergebende Profillinie ist demzufolge ggf. nicht ganz geradlinig. Für die numerische Auswertung und weitere Nutzung der Daten muss dies aber in der Regel kein Problem darstellen.

**[0212]** Die **Fig. 43** stellt einen Teil des Detektionsstrahlenganges mit der Möglichkeit zur Auskopplung von Objektlicht mittels Strahlteiler **36** zur spektroskopischen Analyse dar.

**[0213]** Die **Fig. 44** stellt ein Hybrid-Interferometer dar. Es erfolgt ein synchronisiertes Gegenschwingen der beiden Objektive **66** und **42** zur weitgehenden Kompensation von Rückstellkräften beim sehr schnellen Beschleunigen der Objektiv-Massen. Der Einsatz der Anordnung erfolgt als hochmobiler Haut-Scanner zur Krebszellen-Detektion für jede Körperregion an einem Menschen.

**[0214]** Das von einer gepulsten kurzkohärenten-Lichtquelle **1** ausgehende Licht – nach einem von dieser Lichtquelle **1** beleuchteten Spalt mit 10  $\mu\text{m}$  Spaltbreite und 5 mm ausgeleuchteter Spaltbreite – wird von einem beugungsbegrenzt arbeitenden Kollimator **2** mit dem halben Aperturwinkel  $\alpha_{y\_source}$  um  $2,8^\circ$ , der zu einer numerischen Apertur von 0,05 führt, erfasst und kollimiert.

**[0215]** Die wichtigsten Parameter der eingesetzten gepulsten kurzkohärenten-Linien-Lichtquelle **1**, s. a. Detail D44-1, im NIR, s. a. Detail D44-2, um 800 nm bis 900 nm sind dabei: 4 kHz Pulsrate und 4% relative Einschaltzeit der gepulsten kurzkohärenten-Lichtquelle **1**. Die Lichtpulse werden mittels eines hier nicht dargestellten rotierenden Chopper-Rades erzeugt und weisen eine mittlere Pulszeit von 10  $\mu\text{s}$  auf. Die Kohärenzlänge der Lichtquelle **1** beträgt 8  $\mu\text{m}$ . Die Dauerstrichleistung der gepulsten kurzkohärenten-Lichtquelle **1** beträgt im NIR 100 mW. Die digitale Kamera **13** mit 1024×256 Pixeln weist eine Frame-Rate von 4 kHz auf und ist zum Lauf des Chopper-Rades streng synchronisiert.

**[0216]** Das kollimierte Licht gelangt auf einen hochsymmetrisch ausgebildeten und auf besser als 10  $\mu\text{m}$  Glasweglängendifferenz abgeglichenen Strahlteilerwürfel **37** im Interferometer. Das Interferometer arbeitet zumindest näherungsweise am optischen Gangunterschied null. Das transmittierte Strahlenbündel gelangt im Referenzarm R nach dreifacher  $90^\circ$ -Umlenkung in Luft auf ein beugungsbegrenztes Referenzobjektiv **42** mit einem fest in dessen Fokusposition angeordneten Dachkantreflektor **561** mit dessen Dachkante DK in der Brennebene des Referenzobjektivs **42**. Die optischen Achsen von Referenzobjektiv **42** und baugleichem Messobjektiv **66** fluchten. Der Dachkantreflektor **561** weist einen Querversatz  $\delta_q$  zur optischen Achse des Referenzobjektivs **42** auf. Das eingestrahlte Licht wird um  $2 \delta_q$  mittels Dachkantreflektor **561** querversetzt und erfährt dabei am Dachkantreflektor **561** auch eine Wellenfrontinversion und trifft nach Passieren des Referenzobjektivs **42** wieder geneigt auf den Strahlteilerwürfel **37**, wo das Licht teilweise reflektiert wird und in den Detektionsstrahlengang gelangt. Das am Strahlteilerwürfel **37** nach Lichteintritt reflektierte Strahlenbündel gelangt auf das Messobjektiv **66**, welches das Spaltbild mit seiner NA von 0,14 beugungsbegrenzt in Linienform in den Objektraum fokussiert abbildet. Der mechanische Scan-Bereich des mechanisch bewegten Messobjektivs **106** beträgt hier  $\pm 1$  mm Hub. Fokussiertes Licht dringt auch in die menschliche Haut **71** etwas ein kann. Es wird gestreut und breitet sich auch in Lichtung des Messobjektivs **66** aus. Dieses Messobjektiv **66** erfasst das von der menschlichen Haut **71** zurückkommende Licht und lenkt es teilweise in Transmission in Richtung Strahlteilerwürfel **37**, wo es in den Detektionsstrahlengang reflektiert wird. Gescannt wird der oberflächennahe Bereich der Haut mit einer maximalen Tiefe von 100  $\mu\text{m}$ . Aus den Details D44-5 und D44-6 ist ersichtlich, dass die Objektive hierbei im Messvorgang entgegengesetzt schwingen, um die Rückstellkräfte zu kompensieren.

**[0217]** Ab **Fig. 45** bis **Fig. 54** werden einige Interferometer-Anordnungen dargestellt, die technisch und wirtschaftlich sinnvoll sind. Die **Fig. 45** stellt ein Michelson-Interferometer mit dem üblicherweise genutzten Ausgang und einem das Objekt abbildenden Objektiv dar, welches in einmaligem Durchgang genutzt wird. Es entstehen zwei gekippte Wellenfronten in der Fourier-Ebene FEO oder in der vorderen Brennebene  $F_9$  des Tubus-Objektivs **9**.

**[0218]** Die **Fig. 46** stellt ein Michelson-Interferometer mit üblichem Ausgang und Objekt abbildendem Objektiv dar.

**[0219]** Die **Fig. 47** stellt ein Michelson-Interferometer mit g-Ausgang dar. Dieses ist hier in der Wirkung gleich einem Mirau-Interferometer. Das Objektiv **61** wird in zweifachem Durchgang genutzt.

**[0220]** Die **Fig. 48** stellt ein Linnik-Interferometer mit „üblichem“ Ausgang dar.

**[0221]** Die **Fig. 49** stellt ein hybrides Linnik-Interferometer dar. Wegen der ungleichen optischen Weglängen wird hierbei eine Frequenzkamm-Lichtquelle zur Kompensation eingesetzt.

**[0222]** Die **Fig. 50** stellt ein Hybrid-Linnik-Interferometer mit hier eher unerwünschten Interferenzen gleicher Neigung im Feld dar. Deshalb ist nur ein sehr kleines Feld möglich. Der hohle Dachkantreflektor **5** bildet ohne Objektiv bereits einen Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor und führt die Verkippung der Referenzwellenfront zur Objektwellenfront ein.

**[0223]** Die **Fig. 51** stellt ein Hybrid-Linnik-Interferometer mit Zylinder-Spiegel-Objektiv und planem Endspiegel im Referenzarm R dar.

**[0224]** Die **Fig. 52** stellt ein Michelson-Interferometer mit „üblichem“ Ausgang und Objekt abbildendem Objektiv und einem Tubus-Objektiv dar.

**[0225]** Die Fig. 53 stellt ein Michelson-Interferometer mit üblichem Ausgang und Objekt **73** abbildendem Objektiv dar. Alternativ ist hier auch ein Tripel-Matrix-Array im Referenzarm R einsetzbar. In diesem Fall wird die Lichtquelle als Matrix-Punktquellen-Array ausgebildet. Die Rasterkonstante im Feld ist dann von Lichtquellen-Array und Tripel-Matrix-Array gleichgemacht.

**[0226]** Die Fig. 54 stellt ein Michelson-Interferometer mit g-Ausgang dar. Das Michelson-Interferometer ist hier in der Wirkung gleich einem Mirau-Interferometer. Das Objekt-Objektiv **61** wird zweifach genutzt. Alternativ ist hier auch ein Tripel-Matrix-Array im Referenzarm R einsetzbar. In diesem Fall wird die Lichtquelle als Matrix-Punktquellen-Array **199** ausgebildet. Die Rasterkonstante im Feld ist dann von Lichtquellen-Array und Tripel-Matrix-Array gleichgemacht.

**[0227]** Die Fig. 55 stellt ein Linnik-Interferometer zur Formmessung einer kleinen schwachen Asphäre dar. Diese schwache Asphäre **75** wird mit einer fein ausgebildeten, gerasterten Punkt-Lichtquellen-Matrix **199** über den Objektstrahlengang des Linnik-Interferometers strukturiert beleuchtet. Die Tubuslinse **9** bildet das mehr oder weniger defokussierte Punktmuster am Ausgang des Interferometers ab. In der Brennebene mit dem Brennpunkt  $F_{9'}$  der Tubuslinse **9** entstehen die scharfen Bilder der Punktquellen, die über den Referenzstrahlengang abgebildet wurden. Im Bereich der Brennebene der Tubuslinse **9** mit dem Brennpunkt  $F_{9'}$  entstehen die mehr oder weniger fokussierten Bilder von den Punktlichtquellen der Punkt-Lichtquellen-Matrix **199**, die über die schwache Asphäre **75** abgebildet wurden. Nach dem Mikrolinsen-Array **84** entstehen auf dem gerasterten Detektor **13** räumliche Interferogramme, hier stark vergrößert dargestellt, s. a. Detail D55. In den beiden äußeren räumlichen Interferogrammen ist auch der Defokus zu erkennen, der sich aus der Krümmung der schwachen Asphäre **75** ergibt, da sich diese Flächenbereiche nicht mehr im DOV befinden. Neigung der beleuchteten Flächenbereiche der schwachen Asphäre **75** außerhalb der Brennebene des Linnik-Objektivs **66** und Ablage von der Brennebene der Tubuslinse **9** mit dem Brennpunkt  $F_{9'}$  können aus dem Interferogramm berechnet werden.

**[0228]** Die Fig. 56 stellt ein Linnik-Interferometer mit Punktlichtquellen-Matrix-Array und Tripel-Array **566** dar. Das Tripel-Array **566** bildet mit dem Objektiv **42** ein Voll-Retro-Reflektor-System **471**. Es bestehen zwei gekippte Wellenfronten in der Fourier-Ebene eines dem Referenzarm R in Lichtrichtung zum Detektor **13** nachgeordneten Objektivs oder in der vorderen Brennebene  $F_9$  des Tubus-Objektivs **9**.

**[0229]** Die Fig. 57 stellt ein Voll-Retro-Referenz-Endreflektor-Array mit Tripel-Reflektor dar. Hier sind nicht dargestellte Mittel zur rechnergesteuerten Lateralverschiebung dem Array zugeordnet. Das Punktlichtquellen-Array mit Lichtspots unterhalb der beugungsbegrenzter Auflösung ist lateral versetzt zum Referenz-Voll-Retro-Endreflektor-Array. Jeder Lichtquellenpunkt wird um  $2 \delta_q$  lateral versetzt. Detail D57-1 stellt die fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix **199** und Detail D57-2 stellt typische Kurzkohärenz-Interferogramme dar.

**[0230]** Die Fig. 58 stellt ein Mikro-Endreflektor-Array-System **498** mit einem Mikro-Endreflektor-Array **491** mit Voll-Retro-Mikro-Endreflektoren **481** vom rotationssymmetrischen Linsen-Cat'eye-Typ dar. Jeder Voll-Retro-Mikro-Endreflektor ist um  $\delta_q$  versetzt. Die Anordnung ist mit einer Frequenz-Kamm-Lichtquelle **103** und einer Kompensations-Platte **569** im Objektarm O ausgebildet. Hier sind nicht dargestellte Mittel zur rechnergesteuerten Lateralverschiebung **493** zugeordnet. Detail D58-1 stellt die Messzellen auf dem gerasterten Detektor **13** dar. In der Patentschrift DE 10 2006 007 172 B4 sind die Beziehungen für das lückenlose Anordnen von länglichen Messzellen auf einem gerasterten Empfänger bei einer Drehung der länglichen Messzellen zur Empfänger-Matrix angegeben.

**[0231]** Die Fig. 59 stellt ein Mikro-Endreflektor-Array-System **499** mit einem Mikro-Endreflektor-Array **493** mit Hybrid-Retro-Mikro-Endreflektoren **483** vom Zylinder-Linsen-Cat'eye-Typ dar. Jeder Hybrid-Retro-Mikro-Endreflektor **483** ist um  $\delta_q$  versetzt. Dieser Ansatz wird in Kombination mit einer Frequenzkamm-Lichtquelle **103** und einer Kompensationsplatte **568** im Referenzarm angewendet. Die Mittel zur rechnergesteuerten zweidimensionalen Lateralverschiebung, um eine vollflächige Abtastung des Objekts zu erreichen, sind dem Mikro-Endreflektor-Array **493** zugeordnet, jedoch hier nicht dargestellt. Detail 59-1 stellt die Messzellen in ihrer Anordnung auf dem gerasterten Detektor **13** und Detail 59-2 ein detektiertes Kurzkohärenz-Interferogramm dar.

**[0232]** Die Fig. 60 stellt ein Mirau-Interferometer dar, welches zur Mikroformmessung eingesetzt werden kann. Es ist vorbestimmt asymmetrisch gemacht. Es besteht ein telezentrischer Strahlengang. Die Beleuchtung erfolgt als Kurzpuls. Durch die Asymmetrie ergibt sich, wie in Fig. 61 dargestellt, eine Tiefenseparierung  $def_r$  von Bildspots im Detektionsstrahlengang. Die Fig. 62 stellt die Lichtfeld-Interferenzen mit unterschiedlichen Phasenlagen dar, die sich aus den unterschiedlichen Höhenlagen auf der rauen Metalloberfläche **73** ergeben. Das Mikrolinsen-Array **84** kann zeitlich und lateral synchronisiert mit den Spots der Beleuchtung des räumlichen

Lichtmodulators **104** über die raue Metalloberfläche **73** bewegt werden, um mehr Single-shot-Daten gewinnen zu können. Die Single-shot-Daten aus mehreren Messungen können rechnergestützt mittels Merkmals-Korrelations-Algorithmik zusammengefügt werden.

**[0233]** Die **Fig. 63** stellt das Mirau-Interferometer aus **Fig. 60** dar, mit einem Winkel  $\alpha_0$  aus dem Winkelspektrum der Beleuchtung, für den der optische Gangunterschied bei der Detektion null wird. Das Detail **D63** stellt das Lichtfeld-Interferogramm mit einem Interferenzring nullter Ordnung dar, der hier zur Kenntlichmachung fett gezeichnet ist. Der Winkel  $\alpha_{0,o}$  ist dann genau der Winkel im Objektraum-Winkelspektrum, für den – für einen gegebenen Objektpunkt – der optische Gangunterschied in der Ebene  $E_{13}$  auf dem gerasterten Detektor **13** null wird. Somit entsteht für diesen Objektpunkt der Interferenzring nullter Ordnung etwa in der Mitte des Winkelspektrums bzw. Interferenzringsystems. Da eine radiale Shear zu den Referenzstrahlen besteht, muss das gesamte optische System bis zur Detektion sehr gut korrigiert sein, insbesondere auch chromatisch.

**[0234]** In **Fig. 64** ist ein Ensemble von Lichtfeld-Interferogrammen – jeweils mit einem Interferenzring nullter Ordnung – dargestellt, das von einem gerasterten Detektor **13** aufgenommen wird.

**[0235]** Die **Fig. 65** und **Fig. 66** stellen Kurzkohärenz-Wavelets mit vorbestimmt eingeführtem Chirping dar. Es wird das Design und die Montage mit Justierung auf einen möglichst großen Hub SH in Kurzkohärenz-Wavelets ausgerichtet. Zur Messung wird der Referenzpunkt aTS als alternative Triggerschwelle bestimmt. Durch den sphärischen Anteil ist das Kurzkohärenz-Wavelet nichtlinear, was bei der Auswertung besonders berücksichtigt werden muss. Jeder Messkanal auf der Grundlage eines räumlichen Interferogramms wird rechnergesteuert angelernt, mittels Teaching-Algorithmik in Verbindung mit einem Referenzmessobjekt sein eigenes Wavelet zu erkennen und auszuwerten. Der Interferometer-Aufbau muss dazu nur über der Zeit hinsichtlich der eingesetzten Komponenten und deren Lagen zueinander hochstabil aufgebaut sein.

**[0236]** Die **Fig. 67** stellt einen Interferometeraufbau, der mit gepulster Beleuchtung betrieben wird, mit kleinen Spiegelobjektiven **85** als Fourier-Transformations-Komponente in einem Spiegelobjektiv-Array **86** nach dem Tubusobjektiv **9** dar. Mittels 4f-Transferstufe **87** werden die räumlichen Interferogramme auf den gerasterten Detektor **13** gebildet, dargestellt in **Fig. 68**. In der gemeinsamen Brennebene der 4f-Transferstufe **87** ist ein Mikro-Rotsperrfilter-Array **89** mit Mikro-Rot-Sperrfiltern **891** angeordnet, um Referenzlicht im roten Spektralbereich zu sperren, siehe **Fig. 69**, welche die die Ausblendung des Referenzlichts darstellt. So können nach der 4f-Transferstufe **87** nach dem Auskoppel-Strahlteiler **36** mittels Kamera **132**, welche mittels eines Rot-Durchlass-Filters **88** allein im roten Spektralbereich sensitiv gemacht ist, Winkelspektren von einzelnen Objektpunkten detektiert werden.

**[0237]** Die **Fig. 70** präsentiert ein Linnik-Interferometer mit einer fein ausgebildete Punkt-Lichtquellen-Matrix **199**, dargestellt im Detail **D70-1**, wobei Detail **D70-2** die Position der Punkt-Lichtquellen-Matrix **199** darstellt. Im Referenzarm R ist eine kleine Defokussierung Def als Gerätekonstante fest eingeführt. Diese Defokussierung Def wurde durch eine kleine Verschiebung des Objektivs **42** in Richtung Strahlteiler **3** erreicht, wodurch sich die Ringanzahl ergibt, während sich beim gemeinsamen Verschieben von Interferometer-Endspiegel **421** und Objektiv **42** der optische Gangunterschied ändert, also der Streifen nullter Ordnung im Interferenzfeld also im räumlichen Interferogramm radial wandert. Das Linnik-Interferometer wurde dabei so abgeglichen, dass für den Winkel  $\alpha_0$  im Winkelspektrum der Beleuchtung sich bei der Detektion auf dem gerasterten Detektor **13** der Streifen nullter Ordnung etwa in der Mitte des räumlichen Interferogramms ergibt, dargestellt im Detail **D70-3** für ein einzelnes räumlichen Interferogramm. Die Tiefenseparierung  $def_{r-o}$  wird jeweils durch die aktuelle Objektpunktlage bestimmt und die im Referenzarm R fest eingestellte Defokussierung Def.

**[0238]** In der **Fig. 71** ist ein Twyman-Green-Interferometer dargestellt, bei dem die gewünschte Asymmetrie durch ungleiche optische Wege in unterschiedlichen optischen Materialien erzeugt ist. Beleuchtet wird mittels einer fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix **199**, s. a. Detail **D71-1**. Im Referenzarm R besteht am optischen Gangunterschied null eine Defokussierung Def. Diese bewirkt im Detektionsstrahlengang eine Defokussierung  $Def_{strich}$ . Die räumlichen Interferogramme, hier auch als Lichtfeld-Interferogramme bezeichnet, werden mittels Mikrolinsen-Array **84** auf den gerasterten Detektor **13** abgebildet. Detail **D71-2** zeigt die Lichtfeld-Interferogramme, die aufgrund unterschiedlicher Höhenlagen der Objektpunkte unterschiedliche Phasen in den Lichtfeld-Interferogrammen aufweisen. Das Detail **D71-3** stellt eine Anordnung mit dem Detektor **13** in der Fourier-Ebene der Mikrolinsen **841** dar. Die Bildpunkte aus dem Referenzarm und dem Objektarm sind deutlich separiert, so dass in Detail **D71-2** gezeigte Interferogramme entstehen können.

**[0239]** In der **Fig. 72** ist ein Mikrolinsen-Array **84** mit den Mikrolinsen **841** dargestellt. Dieses Mikrolinsen-Array **84** ist in einem Twyman-Green-Interferometer nach dem Tubusobjektiv **9** angeordnet, wie es auch in der **Fig. 71n**, **Fig. 77** dargestellt ist. Detektiert wird die Interferenz in der Fourier-Ebene der Mikrolinsen **841** auf dem gerasterten Detektor **13**. Die dort entstehenden Lichtfeld-Interferenzen sind im Detail D72 dargestellt. Bei Verwendung von kurzkohärentem Licht kann bei entsprechender Systemauslegung auch ein Ring nullter Ordnung detektiert werden. Es entstehen hier auf dem gerasterten Detektor **13** auch dezentrierte Interferenz-Ringsysteme, da ein optisch glattes Objekt mit gekrümmter Oberfläche vermessen wird, bei dem ein erfasster Teilbereich der Oberfläche etwas defokussiert ist und somit eine Neigung der angemessenen Oberfläche besteht. Die zur Interferenz kommende Wellenfront vom Objekt trägt bei Defokussierung bei der Objektbeleuchtung im Interferometer stets auch die Information über die Objektform selbst, so dass die Objektwellenfront bei der Interferenz auf dem gerasterten Detektor **13** bei einem asphärischen defokussierten Objekt auch asphärisch ist.

**[0240]** Die **Fig. 73** stellt ein Zweistrahlinterferometer mit einem objektabbildenden Schwarzschild-Objektiv **6** im Objektarm O dar. Die Punkt-Lichtquelle **188** erzeugt einen feinen Lichtspot, der in seiner Lateral-Ausdehnung  $b_{\text{spot}}$  unterhalb der beugungsbegrenzten Auflösung des nachfolgenden Kollimatorobjektivs **2** ist, s. a. Detail D73-1. Die Lichtquelle **188** ist mit einer Frequenzkamm-Lichtquelle, die hier nicht dargestellt ist, ausgebildet. Diese Frequenzkamm-Lichtquelle weist eine optische Verzögerungslänge  $Y$  auf, die zumindest näherungsweise gleich dem optischen Gangunterschied im Interferometer gemacht ist oder der optischen Gangunterschied im Interferometer beträgt ein ganzzahliges Vielfaches der optischen Verzögerungslänge  $Y$ . Im Referenzarm R ist ein konkaver, rotationssymmetrischer Spiegel **423** mit einer schwachen Krümmung angeordnet. Aus der Krümmung ergibt sich im Zusammenwirken mit dem Zweistrahlinterferometer die Ringanzahl auf dem gerasterten Detektor **13**.

**[0241]** Die Geometrie des Zweistrahlinterferometers wurde dabei so auf die Frequenzkamm-Lichtquelle abgestimmt, dass sich bei der Detektion auf dem gerasterten Detektor **13** bei Position eines Objektpunkts in der Mitte des wellenoptischen Schärfentiefebereichs der Streifen nullter Ordnung etwa in der Mitte des räumlichen Interferogramms ergibt, dargestellt im Detail D73-3. Die Tiefenseparierung  $\text{def}_{\text{r-o}}$  wird jeweils durch die aktuelle Objektpunktlage bestimmt und die im Referenzarm R durch den konkaven, rotationssymmetrischen Spiegel **423** fest vorgegebene Spiegelkrümmung.

**[0242]** Die **Fig. 74** und **Fig. 75** stellen jeweils eine miniaturisierte Variante des Single-Shot-Ansatzes in Form eines vielkanaligen Linnik-Interferometers ausschließlich mit Optiken in Array-Form dar.

**[0243]** **Fig. 74** stellt dar, wie das von einer Linien-Lichtquelle **189** mit feinen Lichtspots A1, A2, A3 ausgehende Licht durch die Mikro-Kollimator-Objektive eines linienhaften Arrays **23** jeweils kollimiert wird. Dieses Licht wird hierbei mittels spektral breitbandiger leistungsstarker LEDs erzeugt, denen je ein Pinhole nachgeordnet ist. Dabei ist die Pinhole-Größe unterhalb der beugungsbegrenzten Auflösung der nachfolgenden Mikro-Kollimator-Objektive des linienhaften Arrays **23**. Am Strahlteiler **3** des vielkanaligen Linnik-Interferometers entstehen jeweils Referenz- und Objektstrahlenbündel. Im Referenzarm R mit einem Mikrolinsen-Array **401** in Linienform mit rotationssymmetrischen Mikrolinsen **407** besteht eine fest eingestellte schwache Defokussierung  $\text{Def}$ . Das vielkanalige Linnik-Interferometer ist hier so justiert, dass die Foki im Referenzarm R am optischen Gangunterschied null in einer intrafokalen Position sind. Die reflektierten Lichtbündel sind schwach konvergent und treffen nach dem Strahlteiler **3** auf die Tubus-Mikrolinsen **907** des linienhaften Mikrolinsen-Arrays **901**. Durch die schwache Defokussierung  $\text{Def}$  im Referenzstrahlengang ist bei einer Objektpunktlage im wellenoptischen Tiefenschärfebereich des Objektarm O als Folge dessen dann im Detektionsstrahlengang eine eindeutige Separierung der Foki  $\text{def}_{\text{r-o}}$  von Objekt- O und Referenzarm R gegeben. So entsteht in der Ebene der Detektion von jedem erfassten Objektpunkt im wellenoptischen Tiefenschärfebereich auf dem gerasterten Detektor **13** eine Interferenzfigur mit Ringen und dabei auch einem Interferenzring nullter Ordnung. Dazu wird zumindest näherungsweise jeweils die Fourier-Ebene der Mikrolinsen des Mikrolinsen-Arrays **401** auf den gerasterten Detektor scharf abgebildet. Das Detail D74 zeigt die entstehenden Interferenzfiguren, hier beispielhaft für die drei Kanäle dargestellt. Je nach Tiefenlage eines Objektpunkts des Objekts ergibt sich eine andere Position für den Interferenzring nullter Ordnung, die mittels Rechnerprogramm ausgewertet wird.

**[0244]** **Fig. 75** stellt in Ergänzung zu **Fig. 74** den Ansatz in einer flächenhaften Anordnung mit  $3 \times 3$  Messkanälen dar. Das Detail D75 zeigt die Interferenzfiguren, hier beispielhaft für die neun Messkanäle dargestellt. Allein aus Darstellungsgründen wurden hier nur die neun Mikrolinsen des Beleuchtungs-Arrays **24** und des Tubus-Arrays **902** präsentiert. Je nach aktueller Tiefenlage eines Objektpunktes ergibt sich eine jeweils aufgrund des dann gegebenen optischen Gangunterschieds auch andere Position für den Interferenzring nullter Ordnung.

**[0245]** Eine besonders stabile Ausbildung für das vielkanalige Linnik-Interferometer ergibt sich jeweils für die Anordnungen in **Fig. 74** und **Fig. 75**, die hier nicht dargestellt ist, wenn der Strahlteiler als kompakter Strahlteilerwürfel ausgebildet ist und die Mikrolinsen-Arrays **401** beziehungsweise **402** und der ebene Interferometer-Endspiegel im Referenzarm **424** mit dem Strahlteiler in Würfelform durch Kleben oder Kitten starr verbunden sind. Der Vorteil bei dieser Anordnung besteht darin, dass sowohl im Referenzarm R als auch im Objektarm O keine zusätzlichen Glaswege bestehen. Dies ermöglicht Mikrolinsen mit einer vergleichsweise hohen numerischen Apertur einzusetzen, beispielsweise auch Mikrolinsen mit einer numerischen Apertur von 0,5.

**[0246]** **Fig. 76** stellt, entsprechend Ref. [11], **Abb. 6**, einen vielkanaligen Mirau-Interferometer-Ansatz dar. Dieser kann auf einer miniaturisierten Interferometer-Anordnung auch gemäß **Fig. 60** mit einem gemeinsamen Auskoppelstrahlteiler **32** und einem Tubus-Mikrolinsen-Array **901** gemäß **Fig. 74** und **Fig. 75** bestehen. Auch beim vielkanaligen Mirau-Interferometer können so wie beim vielkanaligen Linnik-Interferometer die Mirau-Interferometer-Komponenten starr miteinander verbunden sein, da es zur One-shot-Signalbildung hierbei prinzipbedingt keine Verschiebung von Komponenten des Mirau-Interferometers zueinander geben muss.

**[0247]** Beim vielkanaligen Mirau entfällt im Vergleich zum vielkanaligen Linnik-Interferometer die Notwendigkeit der genauen Mikrolinsen-Pupillenjustierung, Fehllagen der Mikrolinsen-Pupillen können beim Linnik-Interferometer zu Wellenfrontfehlern und zu dezentrierten Interferenzringen führen.

**[0248]** Das Detail D76 zeigt ein einzelnes Mirau-Interferometer, also einen einzigen Messkanal, der Array-Interferometeranordnung, auch als Vielkanal-Interferometer-Anordnung zu bezeichnen, nach **Fig. 76**. Die Strahlteilerplatte **391** und die Kompensationsplatte **34** sind aus demselben Glaswerkstoff BK7 gefertigt und weisen mit  $d_o$  und  $d_r$  nur schwach unterschiedliche geometrische Dicken auf, beispielsweise mit einer Dickendifferenz im unteren zweistelligen Mikrometerbereich. Die sich deshalb ergebende Fokusverschiebung führt zu einem, zum ebenen Referenzspiegel **681** verschobenen Fokus-Spot. Somit überlagert sich nach der Reflexion im Rücklauf des Lichts in der Brennebene  $F_{654}$ , der Fourier-Ebene, der Objektwelle stets eine schwach gekrümmte Referenzwelle. Diese Fourier-Ebene wird jeweils in jedem Messkanal auf den gerasterten Detektor **13** abgebildet. Die Abstimmung der Mirau-Interferometer mit  $d_o$  und  $d_r$  sowie der bestehenden numerischen Apertur und der Schwerpunktwellenlänge erfolgt so, dass sich für die Fokusposition der Objektpunkte in der Mitte des wellenoptischen Schärfentiefebereichs jeweils ein Ring nullter Ordnung zumindest näherungsweise am halben Radius des größten detektierbaren Ringes ergibt.

**ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG**

*Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.*

**Zitierte Patentliteratur**

- DE 102006015387 A1 [0001]
- US 1565533 [0009]
- DE 102010006239 B3 [0011]
- DE 102010046907 B4 [0012]
- DD 268771 A1 [0013]
- WO 2010/139764 A1 [0014]
- DE 19632594 A1 [0015]
- US 7177029 B2 [0019]
- DE 102011000213 A1 [0020]
- DE 102006007172 B4 [0230]

**Zitierte Nicht-Patentliteratur**

- M. Hering u. a. in Applied Optics, Vol. 48, Nummer 3, Seite 525 bis 538 vom 20. Januar 2009 [0005]
- M. Hering u. a. bereits im Jahr 2006 in den Proceedings of SPIE, Vol. 6188, 61880E-1 bis 61880E-11 [0005]
- D. Malacara, Optical Shop Testing, John Wiley & Sons, Inc., 1992, S. 140–141, Figur 4.16 [0007]
- W. H. Steel, Interferometry, Cambridge University Press, 1967, S. 83 letzter Absatz bis S. 84 [0007]
- D. Kelsall im Jahr 1959 in Proc. Phys. Society, 73, S. 470, Fig. 1 [0009]
- K. Gastinger u. a. wird in Proc. of SPIE 7389, 73891J1 bis -73891J12, 2009 [0014]
- W. Eurer und J. Schwider in Applied Optics, 38, No. 16, S. 3516–3522, 1999 [0016]
- Joseph W. Goodman beschreibt im Aufsatz „Holography Viewed from the Perspective of the Light Field Camera“ Goodman [0017]
- Fringe 2013, S. 3 bis 15, 7th International Workshop on Advanced Optical Imaging and Metrology, Editor Wolfgang Osten, ISBN 978-3-642-36358-0 ISBN 978-3-642-36359-7 (eBook), DOI 10.1007/978-3-642-36359-7, Springer Heidelberg New York Dordrecht London [0017]
- Ren Ng u. a. wird im Stanford Tech Report CTSR 2005-02 [0018]
- J. W. Goodman [0043]
- J. Schwider in "Multiple beam Fizeau interferometer with filtered frequency comb illumination," Opt. Comm. 282, 3308–3324 (2009) [0155]

## Patentansprüche

1. Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie, insbesondere auch zur optischen Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial-domain-Ansatz (SD-OCT), insbesondere zur Materialmessung und auch Tumorzellen-Erkennung, zur Abstandsmessung, insbesondere auch zur Messung in Verbindung mit einer 3D-Koordinaten-Messmaschine, zur zwei- oder dreidimensionalen Profilmessung, Rauheits-, Welligkeits- und Ebenheitsmessung an technischen und biologischen Objekten, insbesondere dort auch zur Tumorzellen-Erkennung mittels Erfassung des 3D-Profiles von Zellen, und zur Schichtenmessung und dazu ein Zweistrahl-Interferometer mit Referenz- und Objektarm, insbesondere auch in Form eines Interferenzmikroskops, wobei im Referenzarm mindestens ein Endreflektor angeordnet ist, insbesondere in Freistrahl Ausbildung und insbesondere auch als Michelson-, Twyman-Green-, Mirau-, Linnik-, Hybrid-Linnik- oder Mach-Zehnder-Interferometer ausgebildet ist, das zur Durchführung folgende Komponenten aufweist:

- entweder mindestens eine, in mindestens einer Achsen-Richtung schmal ausgebildete Linien-Lichtquelle (**1, 101, 102, 103, 191, 192, 193, 194, 196, LS**),
- oder ein Linien-Lichtquellen-Array (**191, 197**), ausgebildet mit einer Vielzahl von in einer Achsen-Richtung schmal gebildeten, zumindest näherungsweise parallelen Linienspots, und diese Achsenrichtung der schmalen Ausbildung hier jeweils als Quer-Achsen-Richtung (q) bezeichnet wird,
- ein der Linien-Lichtquelle (**1, 101, 102, 103, 192, 193, 194, 195, 196, LS**) oder dem Linien-Lichtquellen-Array (**191, 197**) nachfolgendes Lichtquellen-Objektiv (**2, 21**) zur zumindest näherungsweise beugungsbegrenzten Abbildung derselben,
- ein das Objekt (**71, 72, 73, 74**) abbildendes Objektiv (**6, 61, 62, 63, 64, 66, 91**),
- ein Detektor-Objektiv (**11, 12, 62, 82, 91**), wobei das Objektiv, welches das Objekt (**71, 72, 73, 74**) abbildet, und das Detektor-Objektiv auch als ein einziges Objektiv (**62, 91**) ausgebildet sein können,
- ein gerasterter Detektor (**13**) mit Empfängerelementen für elektromagnetische Strahlung,
- und mindestens ein Digitalrechner mit einem Auswerteprogramm für detektierte Interferogramme zur schnellen Gewinnung von Informationen über das Objekt (**71, 72, 73, 74**), gekennzeichnet dadurch, dass
- entweder die Linien-Lichtquelle (**1, 101, 102, 103, 192, 193, 194, 195, 196, LS**) in der Quer-Achsen-Richtung (q) jeweils so schmal ausgebildet ist,
- oder die Linienspots des Linien-Lichtquellen-Arrays (**191, 197**) in der Quer-Achsen-Richtung (q) der Linienspots jeweils so schmal ausgebildet sind,

dass diese für das nachfolgende Lichtquellen-Objektiv (**2, 21**) in dieser Quer-Achsen-Richtung (q) zumindest näherungsweise gleich oder unterhalb dessen beugungsbegrenzter Lateral-Auflösung ist/sind, welche durch die numerische Apertur dieses Lichtquellen-Objektivs (**2, 21**) und der eingesetzten Lichtwellenlänge oder der eingesetzten Lichtwellenlängen der Linien-Lichtquelle (**1, 101, 102, 103, 192, 193, 194, 195, 196, LS**) oder des Linien-Lichtquellen-Arrays (**191, 197**), bestimmt ist, und eine zumindest näherungsweise beugungsbegrenzte Abbildung der Linien-Lichtquelle (**1, 101, 102, 103, 192, 193, 194, 195, 196, LS**) oder der Linienspots des Linien-Lichtquellen-Arrays (**191, 197**) auf das Objekt (**71, 72, 73, 74**) mittels Objektiv (**6, 61, 62, 63, 64, 66, 91**) durchgeführt wird

- und entweder
- ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor (**45**) vollständig im Referenzarm (R) angeordnet ist, ausgebildet mit einem Referenzobjektiv (**4, 42**),
- oder ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System (**461**) gebildet ist, ausgebildet mit einem Objektiv (**61, 62, 63, 64, 91**), das außerhalb des Referenzarms (R) angeordnet ist, und jeweils das Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System (**461**) in Kombination mit mindestens einem 90°-Dachkant-Endreflektor (**5, 56, 561, 562, 57, 58, 581, 59**) ausgebildet ist, und die Dachkante (DK) jeweils zumindest näherungsweise in der Brennebene des Referenzobjektivs (**4, 42**) oder des Objektivs (**61, 62, 63, 64, 91**), das außerhalb des Referenzarms (R) angeordnet ist, angeordnet ist
- und die Dachkante (DK) jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung (q) angeordnet ist
- und mittels dieses Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektors (**45**) oder dieses Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektors (**461**) durch einen vergleichsweise kleinen Querversatz  $\delta_q$  der Dachkante (DK) zumindest näherungsweise parallel zur Richtung der Quer-Achsen-Richtung (q) und dieser Querversatz  $\delta_q$  maximal gleich dem zehnten Teil oder kleiner der Brennweite dieses Objektivs (**4, 42, 44, 61, 62, 63, 64, 91**) und mindestens gleich



oder größer als der objektivbezogene Airy-Scheibchen-Radius für die Schwerpunktwellenlänge im detektierten räumlichen Interferogramm gemacht ist,

- entweder in der Brennebene (BER) des dem Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor (**45**) zugeordneten Referenzobjektivs (**4, 42**)
- oder in der Brennebene (BER) des Objektivs (**61, 62, 63, 64, 91**),

oder

- ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor im Referenzarm (R) angeordnet ist, entweder ausgebildet als Zylinder-Optik-Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor (**44**) mit einem Zylinder-Objektiv (**41**) mit einer Zylinderachse (CA) und einem Planspiegel (**43**) in der Brennebene des Zylinder-Objektivs (**41**) und die Zylinderachse (CA) jeweils senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung (q) ist, oder ausgebildet als Dachkantreflektor (**5**) und durch eine Kippung ( $\delta_{\beta\_tilt}$ ) des Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektors (**44, 5**), wobei der Kippwinkel maximal gleich oder kleiner 6 Grad und mindestens gleich oder größer als eine halbe Schwerpunktwellenlänge im detektierten räumlichen Interferogramm, bezogen auf den ausgeleuchteten Pupillendurchmesser des Objektivs am Interferometerausgang (**62, 91, 9**) gemacht ist, jeweils um eine Kipp-Achse, die zumindest näherungsweise sowohl senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung (q) als auch senkrecht zur Richtung der Lichtausbreitung ist, jeweils bezogen auf einen entfalteten Strahlengang des Zweistrahl-Interferometers, in der dem Detektorobjektiv (**82, 91**) vorgeordneten Brennebene ( $F_{91\_r}, F_{91\_o}$ ) ein Querversatz  $2 \delta_{q\_strich}$  oder  $2 \delta_{q\_strich}$  von zueinander kohärenten Lichtspots ( $A_{r\_o}, A_{o\_o}$ ) aus dem Referenz- (R) und Objektarm (O) und eingeführt wird und in der Ebene des gerasterten Detektors (**13**) durch diesem gerasterten Detektor (**13**) vorgeordnete optische Mittel (**12, 121, 81, 82, 83**) zur Einführung von Astigmatismus in den Detektionsstrahlengang, welche dem Objektiv (**6, 61, 62, 63, 64, 66, 91**) zur Abbildung des Objekts (**71, 72, 73, 74**) zugeordnet oder nachgeordnet sind, jeweils zwei zueinander gekippte interferierende Wellenfronten, je eine vom Objekt- (O) und je eine vom Referenzarm (R), welche zumindest näherungsweise eine Zylinderform aufweisen, gebildet und zur Interferenz gebracht werden und dabei mindestens ein räumliches Interferogramm (KKI) gebildet und mittels gerastertem Detektor (**13**) detektiert wird.

2. Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie, insbesondere auch zur optischen Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial-domain-Ansatz (SD-OCT), insbesondere zur Materialmessung und auch Tumorzellen-Erkennung, zur Abstandsmessung, insbesondere auch zur Messung in Verbindung mit einer 3D-Koordinaten-Messmaschine, zur zwei- oder dreidimensionalen Profilmessung, Rauheits-, Welligkeits- und Ebenheitsmessung an technischen und biologischen Objekten, insbesondere dort auch zur Tumorzellen-Erkennung mittels Erfassung des 3D-Profiles von Zellen, und zur Schichtenmessung mit den Merkmalen des Oberbegriffs des Anspruchs 1, gekennzeichnet dadurch, dass

- entweder die Linien-Lichtquelle (**1, 101, 102, 103, 192, 193, 194, 195, 196, LS**) in der Quer-Achsen-Richtung (q) jeweils so schmal ausgebildet ist,
- oder die Linienspots des Linien-Lichtquellen-Arrays (**191, 197**) in der Quer-Achsen-Richtung (q) jeweils so schmal ausgebildet sind,

dass diese für das nachfolgende Lichtquellen-Objektiv (**2, 21**) in dieser Quer-Achsen-Richtung (q) zumindest näherungsweise gleich oder unterhalb dessen beugungsbegrenzter Lateral-Auflösung ist/sind, welche durch die numerische Apertur dieses Lichtquellen-Objektivs (**2, 21**) und der eingesetzten Lichtwellenlänge oder der eingesetzten Lichtwellenlängen der Linien-Lichtquelle (**1, 101, 102, 103, 192, 193, 194, 195, 196, LS**) oder des Linien-Lichtquellen-Arrays (**191, 197**), bestimmt ist, und eine zumindest näherungsweise beugungsbegrenzte Abbildung der Linien-Lichtquelle (**1, 101, 102, 103, 192, 193, 194, 195, 196, LS**) oder der Linienspots des Linien-Lichtquellen-Arrays (**191, 197**) auf das Objekt (**71, 72, 73, 74**) mittels Objektiv (**6, 61, 62, 63, 64, 66, 91**) durchgeführt wird

- und
- ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System (**46, 460, 499**) im Referenzarm (R) angeordnet ist, ausgebildet mit einem Referenzobjektiv (**4, 42**),
- oder ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System (**461, 462**) angeordnet ist, ausgebildet mit einem Objektiv (**61, 62, 63, 64, 91**), welches sich außerhalb des Referenzarms (R) befindet, jeweils ausgebildet mit
- entweder einem Referenz-Mikro-Endreflektor-Array (**564, 565**) mit Hybrid-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektoren vom 90°-Dachkant-Spiegel-Typ oder 90°-Dachkant-Prismen-Typ

– oder einem Referenz-Mikro-Endreflektor-Array (**493, 494**) mit Hybrid-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektoren vom Zylinder-Linsen-Cat'eye-Typ (**483**) oder vom Zylinder-Spiegel-Cat'eye-Typ (**484**) und mittels dieses Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-Systems (**46, 460, 461, 462, 499**) jeweils durch einen vergleichsweise kleinen Querversatz  $\delta_q$  dieser Hybrid-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektoren vom Zylinder-Cat'eye-Typ (**483, 484**) oder vom Dachkant-Typ (**564, 565**) zumindest näherungsweise parallel zur Richtung der Quer-Achsen-Richtung ( $q$ ) und dieser Querversatz  $\delta_q$  maximal gleich dem zehnten Teil oder kleiner der Brennweite dieses Referenzobjektivs (**4, 42**) oder dieses Objektivs (**61, 62, 63, 64, 91**), welches sich außerhalb des Referenzarms ( $R$ ) befindet, und mindestens gleich oder größer als der objektivbezogene Airy-Scheibchen-Radius für die Schwerpunktwellenlänge im detektierten räumlichen Interferogramm gemacht ist,

– entweder in der Brennebene (BER) des dem Hybrid-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektor-Array (**564, 565**) zugeordneten Referenzobjektivs (**4, 42**)

– oder in der Brennebene (BER) eines sowohl dem Referenz- als auch dem Objektarm zugeordneten Objektivs (**61, 62, 63, 64, 91**), welches sich außerhalb des Referenzarms ( $R$ ) befindet, in der dem Detektorobjektiv (**82, 91**) vorgeordneten Brennebene ( $F_{91_r}, F_{91}$ ) ein Querversatz  $2\delta_q$  oder  $2\delta_{q\text{-strich}}$  von zueinander kohärenten Lichtspots ( $A_{r''}, A_{o''}$ ) aus dem Referenz- und Objektarm und eingeführt wird

und in der Ebene des gerasterten Detektors (**13**) durch diesem gerasterten Detektor (**13**) vorgeordnete optische Mittel (**12, 121, 81, 82, 83**) zur Einführung von Astigmatismus in den Detektionsstrahlengang, welche dem Objektiv (**6, 61, 62, 63, 64, 66, 91**) zur Abbildung des Objekts (**71, 72, 73, 74**) zugeordnet oder nachgeordnet sind, eine Vielzahl von jeweils zwei zueinander gekippten interferierenden Wellenfronten, welche zumindest näherungsweise eine Zylinderform aufweisen, je eine vom Objekt- ( $O$ ) und je eine vom Referenzarm ( $R$ ) gebildet und zur Interferenz gebracht werden, und eine Vielzahl von räumlichen Interferogrammen (KKI) gebildet und mittels gerastertem Detektor (**13**) detektiert wird.

3. Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie, insbesondere auch zur optischen Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial-domain-Ansatz (SD-OCT), insbesondere zur Materialmessung und auch Tumorzellen-Erkennung, zur Abstandsmessung, insbesondere auch zur Messung in Verbindung mit einer 3D-Koordinaten-Messmaschine, zur zwei- oder dreidimensionalen Profilmessung, Rauheits-, Welligkeits- und Ebenheitsmessung an technischen und biologischen Objekten, insbesondere dort auch zur Tumorzellen-Erkennung mittels Erfassung des 3D-Profiles von Zellen, und zur Schichtenmessung und dazu ein Zweistrahl-Interferometer mit Referenz- und Objektarm, insbesondere auch in Form eines Interferenzmikroskops, wobei im Referenzarm mindestens ein Endreflektor angeordnet ist, insbesondere in Freistrahl Ausbildung und insbesondere auch als Michelson-, Twyman-Green-, Mirau-, Linnik-, Hybrid-Linnik- oder Mach-Zehnder-Interferometer ausgebildet ist, das zur Durchführung folgende Komponenten aufweist:

– entweder mindestens eine fein ausgebildete Punkt-Lichtquelle (**198**)

– oder eine fein ausgebildete Punkt-Lichtquellen-Matrix (**199**), ausgebildet mit einer Vielzahl von fein gebildeten Spots,

– ein der Lichtquelle (**198, 199**) nachfolgendes Lichtquellen-Objektiv (**2, 21**) zur zumindest näherungsweise beugungsbegrenzten Abbildung derselben oder der Spots derselben,

– ein das Objekt abbildendes Objektiv (**6, 61, 62, 63, 64, 66, 91**),

– ein Detektor-Objektiv (**11, 12, 62, 82, 91**), wobei das Objektiv, welches das Objekt (**71, 72, 73, 74**) abbildet, und das Detektor-Objektiv auch als ein einziges Objektiv (**62, 91**) ausgebildet sein können,

– ein gerasteter Detektor (**13**) mit Empfängerelementen für elektromagnetische Strahlung,

– und mindestens ein Digitalrechner mit einem Auswerteprogramm für detektierte Interferogramme zur schnellen Gewinnung von Informationen über das Objekt (**71, 72, 73, 74**), gekennzeichnet dadurch, dass

– entweder die fein ausgebildete Punkt-Lichtquelle (**198**) jeweils so fein ausgebildet ist,

– oder die Spots der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix (**199**) jeweils so fein ausgebildet sind, dass diese für das nachfolgende Lichtquellen-Objektiv (**2, 21**) zumindest näherungsweise gleich oder unterhalb dessen beugungsbegrenzter Lateral-Auflösung ist/sind, welche durch numerische Apertur dieses Lichtquellen-Objektivs (**2, 21**) und der eingesetzten Lichtwellenlänge oder der eingesetzten Lichtwellenlängen der fein ausgebildeten Lichtquelle (**198**) oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix (**199**) bestimmt ist, und im Referenzarm ein Voll-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektor-System (**471, 498**) mit einem Referenzobjektiv (**4, 42**) und mit Voll-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektoren (**481, 482, 566, 567**) jeweils

– entweder einem Mikro-Endreflektor-Array (**491**) mit Voll-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektoren vom rotations-symmetrischen Linsen-Cat'eye-Typ (**481**)

– oder einem Mikro-Endreflektor-Array (**492**) mit Voll-Retro-Referenz-Mikro-Endreflektoren vom rotationssymmetrischen Spiegel-Cat'eye-Typ (**482**)

– oder einem Tripelprimenspiegel-Mikro-Endreflektor-Array (**568**) mit Tripelprimenspiegel-Mikro-Endreflektoren

– oder einem Hohl-Tripel Spiegel-Mikro-Endreflektor-Array (**566**) mit Tripel Spiegel-Mikro-Endreflektoren (**567**) angeordnet ist,

und bei den Mikro-Endreflektoren (**481, 482, 567**) jeweils ein Querversatz  $\delta_q$  in der Brennebene des zugeordneten Referenzobjektivs (**4, 42**) besteht, der maximal gleich dem zehnten Teil oder kleiner der Brennweite des Referenzobjektivs (**4, 42**) und mindestens gleich oder größer als der objektivbezogene Airy-Scheibchen-Radius für die Schwerpunktwellenlänge im detektierten räumlichen Interferogramm gemacht ist, in der dem Detektorobjektiv (**82, 91**) vorgeordneten Brennebene ( $F_{91_r}, F_{91}$ ) ein Querversatz  $2\delta_q$  oder  $2\delta_{q\text{-strich}}$  von zueinander kohärenten Lichtspots ( $A_r'', A_o''$ ) aus dem Referenz- und Objektarm und eingeführt wird

und in der Ebene des gerasterten Detektors (**13**) durch diesem gerasterten Detektor (**13**) vorgeordnete optische Mittel (**12, 121, 81, 82, 83**) zur Einführung von Astigmatismus in den Detektionsstrahlengang, welche dem Objektiv (**6, 61, 62, 63, 64, 66, 91**) zur Abbildung des Objekts (**71, 72, 73, 74**) zugeordnet oder nachgeordnet sind, eine Vielzahl von jeweils zwei zueinander gekippten interferierenden Wellenfronten, welche zumindest näherungsweise eine Zylinderform aufweisen, je eine vom Objekt- (O) und je eine vom Referenzarm (R) gebildet und zur Interferenz gebracht werden, und eine Vielzahl von räumlichen Interferogrammen (KKI) gebildet und mittels gerastertem Detektor (**13**) detektiert wird.

4. Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 3, gekennzeichnet dadurch, dass die Richtung der Längsachsen der Zylinder-Wellenfronten jeweils zumindest näherungsweise mit der Quer-Achsen-Richtung ( $q$ ) – im entfalteten Strahlengang des Zweistrahl-Interferometers – übereinstimmend gemacht ist und die Kippachse der mindestens einen Referenz-Zylinder-Wellenfront jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung ( $q$ ) angeordnet ist.

5. Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 4, gekennzeichnet dadurch, dass im Schnitt, der die Quer-Achsen-Richtung ( $q$ ) enthält, die Fourier-Ebene (FEO) des objektabbildenden Objektivs (**6, 61, 62, 63, 64, 66, 91**) auf den gerasterten Detektor (**13**) zumindest näherungsweise scharf mit optischen Mitteln (**6, 61, 62, 63, 64, 66, 91, 9, 11**) abgebildet wird und im Schnitt senkrecht dazu, der im entfalteten Strahlengang parallel zur Längsrichtung der Linienquelle (**1**) ist, die Messebene des Objekts (MEO) scharf mit optischen Mitteln (**6, 61, 62, 63, 64, 66, 91, 9, 11, 12**) auf den gerasterten Detektor (**13**) abgebildet wird, so dass im Detektionsstrahlengang eine astigmatische Abbildung durchgeführt wird.

6. Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 5, gekennzeichnet dadurch, dass bei der Abbildung in einer Zwischenbildebene ZBE zumindest für das Objektlicht eine konfokale Diskriminierung mittels optischer Mittel (**96, 99**) durchgeführt wird.

7. Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 5, gekennzeichnet dadurch, dass bei der Abbildung in einer Zwischenbildebene ZBE für das Objektlicht eine Tiefpassfilterung mittels optischer Mittel (**96, 99**) durchgeführt wird.

8. Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie, insbesondere auch zur optischen Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial-domain-Ansatz (SD-OCT), insbesondere zur Materialmessung und auch Tumorzellen-Erkennung, zur Abstandsmessung, insbesondere auch zur Messung in Verbindung mit einer 3D-Koordinaten-Messmaschine, zur zwei- oder dreidimensionalen Profilmessung, Rauheits-, Welligkeits- und Ebenheitsmessung an technischen und biologischen Objekten, insbesondere dort auch zur Tumorzellen-Erkennung mittels Erfassung des 3D-Profiles von Zellen, und zur Schichtenmessung und dazu ein Zweistrahl-Interferometer mit Referenz- und Objektarm, insbesondere auch in Form eines Interferenzmikroskops, wobei im Referenzarm mindestens ein Endreflektor angeordnet ist, insbesondere in Freistrahl Ausbildung und insbesondere auch als Michelson-, Twyman-Green-, Mirau-, Linnik-, Hybrid-Linnik- oder Mach-Zehnder-Interferometer ausgebildet ist, die folgende Komponenten aufweist:

– entweder mindestens eine, in mindestens einer Achsen-Richtung schmal ausgebildete Linien-Lichtquelle (**1, 101, 102, 103, 191, 192, 193, 194, 196, LS**),

– oder ein Linien-Lichtquellen-Array (**191, 197**), ausgebildet mit einer Vielzahl von in einer Achsen-Richtung schmal gebildeten, zumindest näherungsweise parallelen Linienspots, und diese Achsenrichtung der schmalen Ausbildung hier jeweils als Quer-Achsen-Richtung (q) bezeichnet wird,

– ein der Linien-Lichtquelle (**1, 101, 102, 103, 192, 193, 194, 195, 196, LS**) oder dem Linien-Lichtquellen-Array (**191, 197**) nachfolgendes Lichtquellen-Objektiv (**2, 21**) zur zumindest näherungsweise beugungsbegrenzten Abbildung derselben,

– ein das Objekt (**71, 72, 73, 74**) abbildendes Objektiv (**6, 61, 62, 63, 64, 66, 91**),

– ein Detektor-Objektiv (**11, 12, 62, 82, 91**), wobei das Objektiv, welches das Objekt (**71, 72, 73, 74**) abbildet, und das Detektor-Objektiv auch als ein einziges Objektiv (**62, 91**) ausgebildet sein können,

– ein gerasterter Detektor (**13**) mit Empfängerelementen für elektromagnetische Strahlung,

– und mindestens ein Digitalrechner mit einem Auswerteprogramm für detektierte Interferogramme zur schnellen Gewinnung von Informationen über das Objekt (**71, 72, 73, 74**), gekennzeichnet dadurch, dass

– entweder die Linien-Lichtquelle (**1, 101, 102, 103, 192, 193, 194, 195, 196, LS**) in der Quer-Achsen-Richtung (q) jeweils so schmal ausgebildet ist,

– oder die Linienspots des Linien-Lichtquellen-Arrays (**191, 197**) in der Quer-Achsen-Richtung (q) jeweils so schmal ausgebildet sind,

dass diese für das nachfolgende Lichtquellen-Objektiv (**2, 21**) in dieser Quer-Achsen-Richtung (q) zumindest näherungsweise gleich oder unterhalb dessen beugungsbegrenzter Lateral-Auflösung ist/sind,

welche durch die numerische Apertur dieses Lichtquellen-Objektivs (**2, 21**) und der eingesetzten Lichtwellenlänge oder der eingesetzten Lichtwellenlängen der Linien-Lichtquelle (**1, 101, 102, 103, 192, 193, 194, 195, 196, LS**) oder des Linien-Lichtquellen-Arrays (**191, 197**), bestimmt ist,

und eine zumindest näherungsweise beugungsbegrenzte Abbildung der Linien-Lichtquelle (**1, 101, 102, 103, 192, 193, 194, 195, 196, LS**) oder der Linienspots des Linien-Lichtquellen-Arrays (**191, 197**) auf das Objekt (**71, 72, 73, 74**) mittels Objektiv (**6, 61, 62, 63, 64, 66, 91**) durchgeführt wird

– und entweder

– ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor (**45**) im Referenzarm (R) angeordnet ist, ausgebildet mit einem Referenzobjektiv (**4, 42**),

– oder ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor (**461**) im Referenzarm (R) angeordnet ist, ausgebildet mit einem Objektiv (**61, 62, 63, 64, 91**), welches außerhalb des Referenzarms (R) angeordnet ist, jeweils ausgebildet in Kombination mit mindestens einem 90°-Dachkant-Endreflektor (**5, 56, 561, 562, 57, 58, 581, 59**),

und die Dachkante (DK) jeweils zumindest näherungsweise in der Brennebene des Referenzobjektivs (**4, 42**) oder des Objektivs (**61, 62, 63, 64, 91**), welches außerhalb des Referenzarms (R) angeordnet ist, positioniert ist

und die Dachkante (DK) jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung (q) angeordnet ist

und ein Querversatz  $\delta_q$  der Dachkante (DK) zumindest näherungsweise parallel zur Richtung der Quer-Achsen-Richtung (q) besteht

– entweder in der Brennebene (BER) des dem Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor (**45**) zugeordneten Referenzobjektivs (**4, 42**)

– oder in der Brennebene (BER) eines sowohl dem Referenz- als auch dem Objektarm zugeordneten Objektivs (**61, 62, 63, 64, 91**),

und dieser Querversatz  $\delta_q$  maximal gleich dem zehnten Teil oder kleiner der Brennweite dieses Objektivs (**4, 41, 42, 44, 61, 62, 63, 64, 91**) und mindestens gleich oder größer als der objektivbezogene Airy-Scheibchen-Radius für die Schwerpunktwellenlänge im detektierten räumlichen Interferogramm gemacht ist, oder

– ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor im Referenzarm (R) angeordnet ist,

– entweder ausgebildet als Zylinder-Optik-Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor (**44**) mit einem Zylinder-Objektiv (**41**) mit einer Zylinderachse (CA) und einem Planspiegel (**43**) in der Brennebene des Zylinder-Objektivs (**41**) und die Zylinderachse (CA) jeweils senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung (q) ist,

– oder ausgebildet als Dachkantreflektor (**5**)

und eine vergleichsweise schwache Kippung ( $\delta_{\beta\_tilt}$ ) des Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektors (**44, 5**) besteht,

wobei der Kippwinkel maximal gleich oder kleiner 6 Altgrad und mindestens gleich oder größer als eine halbe Schwerpunktwellenlänge im detektierten räumlichen Interferogramm, bezogen auf den ausgeleuchteten Pupillendurchmesser des Objektivs am Interferometerausgang (**62, 91, 9**) gemacht ist, jeweils um eine Kipp-Achse, die zumindest näherungsweise sowohl senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung (q) als auch senkrecht zur Richtung der Lichtausbreitung ist, jeweils bezogen auf einen entfalteten Strahlengang des Zweistrahl-Interferometers,

und dem gerasterten Detektor (13) vorgeordnete optische Mittel (12, 121, 81, 82, 83) zur Einführung von Astigmatismus in den Detektionsstrahlengang, welche dem Objektiv (6, 61, 62, 63, 64, 66, 91) zur Abbildung des Objekts (71, 72, 73, 74) zugeordnet oder nachgeordnet sind.

9. Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie, insbesondere auch zur optischen Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial-domain-Ansatz (SD-OCT), insbesondere zur Materialmessung und auch Tumorzellen-Erkennung, zur Abstandsmessung, insbesondere auch zur Messung in Verbindung mit einer 3D-Koordinaten-Messmaschine, zur zwei- oder dreidimensionalen Profilmessung, Rauheits-, Welligkeits- und Ebenheitsmessung an technischen und biologischen Objekten, insbesondere dort auch zur Tumorzellen-Erkennung mittels Erfassung des 3D-Profiles von Zellen, und zur Schichtenmessung mit den Merkmalen des Oberbegriffs des Anspruchs 7, gekennzeichnet dadurch, dass

- entweder die Linien-Lichtquelle (1, 101, 102, 103, 192, 193, 194, 195, 196, LS) in der Quer-Achsen-Richtung (q) jeweils so schmal ausgebildet ist,
- oder die Linienspots des Linien-Lichtquellen-Arrays (191, 197) in der Quer-Achsen-Richtung (q) jeweils so schmal ausgebildet sind,

dass diese für das nachfolgende Lichtquellen-Objektiv (2, 21) in dieser Quer-Achsen-Richtung (q) zumindest näherungsweise gleich oder unterhalb dessen beugungsbegrenzter Lateral-Auflösung ist/sind, welche durch die numerische Apertur dieses Lichtquellen-Objektivs (2, 21) und der eingesetzten Lichtwellenlänge oder der eingesetzten Lichtwellenlängen der Linien-Lichtquelle (1, 101, 102, 103, 192, 193, 194, 195, 196, LS) oder des Linien-Lichtquellen-Arrays (191, 197), bestimmt ist, und eine zumindest näherungsweise beugungsbegrenzte Abbildung der Linien-Lichtquelle (1, 101, 102, 103, 192, 193, 194, 195, 196, LS) oder der Linienspots des Linien-Lichtquellen-Arrays (191, 197) auf das Objekt (71, 72, 73, 74) mittels Objektiv (6, 61, 62, 63, 64, 66, 91) durchgeführt wird

- und
- ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System (46, 461, 499) im Referenzarm (R) angeordnet ist, ausgebildet mit einem Referenzobjektiv (4, 42),
- oder ein Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-System im Referenzarm angeordnet ist, ausgebildet mit einem Objektiv (61, 62, 63, 64, 91), welches außerhalb des Referenzarms (R) angeordnet ist, jeweils in ausgebildet mit
- entweder einem Mikro-Referenz-Endreflektor-Array (564, 565) mit Hybrid-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektoren vom Dachkant-Spiegel-Typ oder Dachkant-Prismen-Typ
- oder einem Mikro-Referenz-Endreflektor-Array (493, 494) mit Hybrid-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektoren vom Zylinder-Linsen-Cat'eye-Typ (483) oder vom Zylinder-Spiegel-Cat'eye-Typ (484) und mittels dieses Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor-Systems (46, 461, 499) jeweils durch einen Querversatz dieser Hybrid-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektoren vom Zylinder-Cat'eye-Typ (483, 484) oder vom Dachkant-Typ im Mikro-Referenz-Endreflektor-Array (564, 565) zumindest näherungsweise parallel zur Richtung der Quer-Achsen-Richtung (q) und dieser Querversatz  $\Delta q$  maximal gleich dem zehnten Teil oder kleiner der Brennweite dieses Referenzobjektivs (4, 42) oder dieses Objektivs (61, 62, 63, 64, 91) und mindestens gleich oder größer als der objektivbezogene Airy-Scheibchen-Radius für die Schwerpunktwellenlänge im detektierten räumlichen Interferogramm gemacht ist,
- entweder in der Brennebene (BER) des dem Hybrid-Retro-Referenz-Endreflektor (45, 46) zugeordneten Referenzobjektivs (4, 42)
- oder in der Brennebene (BER) eines sowohl dem Referenz- als auch dem Objektarm zugeordneten Objektivs (61, 62, 63, 64, 91)

und dem gerasterten Detektor (13) vorgeordnete optische Mittel (12, 121, 81, 82, 83) zur Einführung von Astigmatismus in den Detektionsstrahlengang, welche dem Objektiv (6, 61, 62, 63, 64, 66, 91) zur Abbildung des Objekts (71, 72, 73, 74) zugeordnet oder nachgeordnet sind.

10. Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie, insbesondere auch zur optischen Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial-domain-Ansatz (SD-OCT), insbesondere zur Materialmessung und auch Tumorzellen-Erkennung, zur Abstandsmessung, insbesondere auch zur Messung in Verbindung mit einer 3D-Koordinaten-Messmaschine, zur zwei- oder dreidimensionalen Profilmessung, Rauheits-, Welligkeits- und Ebenheitsmessung an technischen und biologischen Objekten, insbesondere dort auch zur Tumorzellen-Erkennung mittels Erfassung des 3D-Profiles von Zellen, und zur Schichtenmessung und dazu ein Zweistrahl-Interferometer mit Referenz- und Objektarm, insbesondere auch in Form eines Interferenzmikroskops, wobei im Referenzarm mindestens ein Endreflektor angeordnet ist, insbesondere in Frei-

strahlusbildung und insbesondere auch als Michelson-, Twyman-Green-, Mirau-, Linnik-, Hybrid-Linnik- oder Mach-Zehnder-Interferometer ausgebildet ist, die folgende Komponenten aufweist:

- entweder mindestens eine fein ausgebildete Punkt-Lichtquelle (**198**)
- oder eine fein ausgebildete Punkt-Lichtquellen-Matrix (**199**), ausgebildet mit einer Vielzahl von fein gebildeten Spots,
- ein der Lichtquelle (**198, 199**) nachfolgendes Lichtquellen-Objektiv (**2, 21**) zur zumindest näherungsweise beugungsbegrenzten Abbildung derselben oder der Spots derselben,
- ein das Objekt abbildendes Objektiv (**6, 61, 62, 63, 64, 66, 91**),
- ein Detektor-Objektiv (**11, 12, 62, 82, 91**), wobei das Objektiv, welches das Objekt (**71, 72, 73, 74**) abbildet, und das Detektor-Objektiv auch als ein einziges Objektiv (**62, 91**) ausgebildet sein können,
- ein gerasterter Detektor (**13**) mit Empfängerelementen für elektromagnetische Strahlung,
- und mindestens ein Digitalrechner mit einem Auswerteprogramm für detektierte Interferogramme zur schnellen Gewinnung von Informationen über das Objekt (**71, 72, 73, 74**),

gekennzeichnet dadurch,

dass

- entweder die fein ausgebildete Punkt-Lichtquelle (**198**) jeweils so fein ausgebildet ist,
  - oder die Spots der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix (**199**) jeweils so fein ausgebildet sind,
- dass diese für das nachfolgende Lichtquellen-Objektiv (**2, 21**) zumindest näherungsweise gleich oder unterhalb dessen beugungsbegrenzter Lateral-Auflösung ist/sind, welche durch numerische Apertur dieses Lichtquellen-Objektivs (**2, 21**) und der eingesetzten Lichtwellenlänge oder der eingesetzten Lichtwellenlängen der fein ausgebildeten Lichtquelle (**198**) oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix (**199**) bestimmt ist, und im Referenzarm (R) ein Voll-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektor-System (**471, 498**) mit einem Referenzobjektiv (**4, 42**) und mit Voll-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektoren (**481, 482, 566, 567**) in jeweils
- entweder einem Mikro-Endreflektor-Array (**491**) mit Voll-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektoren vom rotations-symmetrischen Linsen-Cat'eye-Typ (**481**)
  - oder einem Mikro-Endreflektor-Array (**492**) mit Voll-Retro-Mikro-Referenz-Endreflektoren vom rotationssymmetrischen Spiegel-Cat'eye-Typ (**482**)
  - oder einem Mikro-Tripelprimenspiegel-Endreflektor-Array (**568**) mit Mikro-Tripelprimenspiegel-Endreflektoren
  - oder einem Mikro-Hohl-Tripelreflektor-Array (**566**) mit Mikro-Tripelreflektor-Endreflektoren (**567**) angeordnet ist,
- und bei den Mikro-Endreflektoren (**481, 482, 567**) jeweils ein Querversatz  $\delta_q$  in der Brennebene des zugeordneten Referenzobjektivs (**4, 42**) besteht, der maximal gleich dem zehnten Teil oder kleiner der Brennweite des Referenzobjektivs (**4, 42**) und mindestens gleich oder größer als der objektivbezogene Airy-Scheibchen-Radius für die Schwerpunktwellenlänge im detektierten räumlichen Interferogramm gemacht ist und dem gerasterten Detektor (**13**) vorgeordnete optische Mittel (**12, 121, 81, 82, 83**) zur Einführung von Astigmatismus in den Detektionsstrahlengang, welche dem Objektiv (**6, 61, 62, 63, 64, 66, 91**) zur Abbildung des Objekts (**71, 72, 73, 74**) zugeordnet oder nachgeordnet sind.

11. Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie nach mindestens einem der Ansprüche 8 bis 10, gekennzeichnet dadurch, dass die Richtung der Längsachsen der Zylinder-Wellenfronten jeweils zumindest näherungsweise mit der Quer-Achsen-Richtung ( $q$ ) – im entfalteten Strahlengang des Zweistrahl-Interferometers – übereinstimmend gemacht ist und die Kippachse der mindestens einen Referenz-Zylinder-Wellenfront jeweils zumindest näherungsweise senkrecht zur Quer-Achsen-Richtung ( $q$ ) angeordnet ist.

12. Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie nach mindestens einem der Ansprüche 8 bis 11, gekennzeichnet dadurch, dass Rasterkonstante von gerasterter Lichtquelle (**191, 195, 197, 199**) und gerasterten Referenz-Endreflektor-Arrays (**491, 492, 493, 494, 564, 565, 566, 568**) bezogen auf die Brennebene des Tubusobjektivs (**9**) oder auf die Brennebene des objektabbildenden Objektivs (**6, 61, 62, 63, 64, 66, 67**), zumindest näherungsweise gleichgemacht ist.

13. Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie, insbesondere auch zur optischen Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial-domain-Ansatz (SD-OCT), insbesondere zur Materialmessung und auch Tumorzellen-Erkennung, zur Abstandsmessung, insbesondere auch zur Messung in Verbindung mit einer 3D-Koordinaten-Messmaschine, zur zwei- oder dreidimensionalen Profilmessung, Rauheits-, Welligkeits- und Ebenheitsmessung an technischen und biologischen Objekten, insbesondere dort auch zur Tumorzellen-Erkennung mittels Erfassung des 3D-Profiles von Zellen, und zur Schichtenmessung und dazu ein Zweistrahl-Interferometer mit Referenz- und Objektarm, insbesondere auch in Form eines Interferenzmikroskops, wobei im Referenzarm mindestens ein Endreflektor angeordnet ist, insbesondere in Frei-

strahlusbildung und insbesondere auch als Michelson-, modifiziertes Michelson-, Twyman-Green-, Mirau-, Linnik-, Hybrid-Linnik-, Mach-Zehnder-Interferometer oder auch als vielkanalige Interferometeranordnung ausgebildet ist, das zur Durchführung folgende Komponenten aufweist:

- entweder mindestens eine fein ausgebildete Punkt-Lichtquelle (**198**)
  - oder eine fein ausgebildete Punkt-Lichtquellen-Matrix (**199**), ausgebildet mit einer Vielzahl von fein gebildeten Spots,
  - mindestens ein der Lichtquelle (**198, 199**) nachfolgendes Lichtquellen-Objektiv (**2, 21**) zur zumindest näherungsweise beugungsbegrenzten Abbildung derselben oder der Spots derselben,
  - mindestens ein das Objekt abbildendes Objektiv (**6, 61, 62, 63, 64, 66, 91**),
  - mindestens ein Detektor-Objektiv (**11, 12, 62, 82, 91**), wobei das Objektiv, welches das Objekt (**71, 72, 73, 74**) abbildet, und das Detektor-Objektiv auch als ein einziges Objektiv (**62, 91**) ausgebildet sein können,
  - mindestens ein gerasterter Detektor (**13**) mit Empfängerelementen für elektromagnetische Strahlung,
  - und mindestens ein Digitalrechner mit einem Auswerteprogramm für detektierte Interferogramme zur schnellen Gewinnung von Informationen über das Objekt (**71, 72, 73, 74**),
- gekennzeichnet dadurch, dass

- entweder die fein ausgebildete Punkt-Lichtquelle (**198**) jeweils so fein ausgebildet ist,
- oder die Spots der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix (**199**) jeweils so fein ausgebildet sind, dass diese für das nachfolgende Lichtquellen-Objektiv (**2, 21**) zumindest näherungsweise gleich oder unterhalb dessen beugungsbegrenzter Lateral-Auflösung ist/sind, welche durch numerische Apertur dieses Lichtquellen-Objektivs (**2, 21**) und der eingesetzten Lichtwellenlänge oder der eingesetzten Lichtwellenlängen der fein ausgebildeten Lichtquelle (**198**) oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix (**199**) bestimmt ist, und Objektpunkte des Objekts mit optischen Mitteln
- bei optisch rauen Objekten mit zumindest näherungsweise beugungsbegrenzt scharf fokussierten Bildpunkten der Punkt-Lichtquelle (**198**) oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix (**199**) beleuchtet werden
- oder bei optisch glatten Objekten auch mit schwach defokussierten Bildpunkten der Punkt-Lichtquelle (**198**) oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix (**199**) beleuchtet werden

und nach der Strahlvereinigung mit optischen Mitteln eine geometrisch-optisch unscharfe Abbildung dieser beleuchteten Objektpunkte auf den Detektor (**13**) durchgeführt wird

und Licht von jedem Objektpunkt dabei einen Teilbereich mit einer Vielzahl von Detektorelementen des gerasterten Detektors (**13**) beleuchtet

und mit optischen Mitteln im Referenzarm R eine geometrisch-optisch unscharfe Abbildung von Punkten der Punkt-Lichtquelle (**198**) oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix (**199**) durchgeführt wird und Licht von jedem leuchtenden Punkt der Punkt-Lichtquelle (**198**) oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix (**199**) nach der Strahlvereinigung einen Teilbereich mit einer Vielzahl von Elementen des gerasterten Detektors (**13**) beleuchtet

und die Teilbereichsflächen auf dem gerasterten Detektor (**13**) von zueinander kohärenten Strahlenbündeln aus O und R zumindest näherungsweise zueinander zur Überdeckung gebracht werden

und mindestens ein räumliches Interferogramm von kohärenter Strahlung aus Referenzarm R und Objektarm O gebildet wird

und das Interferenzgebiet in der Lateralausdehnung mindestens 30% der maximalen Ausdehnung der beiden Teilbereichsflächen beträgt

und am Ausgang des Zweistrahl-Interferometers im Raum

- nach dem Tubusobjektiv (**9**)
  - oder einem zumindest näherungsweise fokussierenden Objektiv (**62, 91**)
  - oder einem zumindest näherungsweise fokussierenden Objektiv (**2**) aus dem Beleuchtungsstrahlengang, welches auch zur Detektion mitbenutzt wird,
  - sowohl Bildpunkte ( $A_r$ ) von der Punkt-Lichtquelle (**198**) oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix (**199**), die über den Referenzarm R abgebildet werden,
  - als auch Bildpunkte ( $A_o$ ) von der Punkt-Lichtquelle (**198**) oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix (**199**), die über Objektarm O abgebildet werden,
- und

– entweder bei optisch rauen Objekten zumindest näherungsweise beugungsbegrenzt scharf abgebildet werden

– oder bei optisch glatten Objekten auch schwach defokussiert abgebildet werden

und dabei diese Bildpunkte ( $A_r$ ,  $A_o$ ) zumindest in der Tiefe voneinander separiert gebildet werden und die Tiefenseparierung

$def_{r-o}$

im Minimum dabei den Betrag aufweist:

Halbe Schwerpunktwellenlänge ( $\lambda_{S}$ ) im detektierten Signal vom räumlichen Interferogramm dividiert

durch das Quadrat der effektiv genutzten numerischen Apertur

- entweder des Tubusobjektivs (**9**)
- oder des zumindest näherungsweise fokussierenden Objektivs (**62, 91**)
- oder des zumindest näherungsweise fokussierenden Objektivs (**2**) aus dem Beleuchtungsstrahlengang, welches auch zur Detektion mitbenutzt wird, und im Maximum dieser Betrag ( $\text{def}_{r-o}$ ) gleich der Brennweite
- entweder des Tubusobjektivs (**9**)
- oder des zumindest näherungsweise fokussierenden Objektivs (**62, 91**)
- oder des zumindest näherungsweise fokussierenden Objektivs (**2**) aus dem Beleuchtungsstrahlengang, welches auch zur Detektion mitbenutzt wird, ist.

14. Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie nach Anspruch 13, gekennzeichnet dadurch, dass die Tiefenseparierung ( $\text{def}_{r-o\_strich}$ ) von Foki ( $A_r$ ,  $A_o$ ) von Licht aus dem Referenzarm R und dem Objektarm O im Detektionsstrahlengang bei zumindest näherungsweise gleicher optischer Weglänge in den beiden Armen des Zweistrahl-Interferometers

- entweder durch Nutzung etwas unterschiedlicher Laufwege in unterschiedlich optisch dichten Medien im Referenz- und im Objektarm des Zweistrahl-Interferometers vorbestimmt gegeben ist
- oder die Separierung der Foki im Detektionsstrahlengang durch die Ausbildung schwach defokussierter Spots im Referenzarm auf dem Endreflektor vorbestimmt gegeben ist.

15. Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie nach Anspruch 13, gekennzeichnet dadurch, dass vor der Detektion eine Strahlformung mit Elementen (**841**) positiver oder negativer Brechkraft eines Arrays (**84**) durchgeführt wird, dessen Brenn-Ebenen zumindest näherungsweise in einer gemeinsamen Ebene liegen und diese Brennebenen mit der Detektionsebene des gerasterten Detektors **13** zusammenfallen oder zu dieser mittels einer optischen Transferstufe optisch konjugiert gemacht sind.

16. Verfahren zur robusten One-shot-Interferometrie nach Anspruch 13, gekennzeichnet dadurch, dass aus dem sphärischen Anteil im räumlichen Interferogramm die Ringordnungszahl bestimmt wird.

17. Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie, insbesondere auch zur optischen Kohärenz-Tomografie nach dem Spatial-domain-Ansatz (SD-OCT), insbesondere zur Materialmessung und auch Tumorzellen-Erkennung, zur Abstandsmessung, insbesondere auch zur Messung in Verbindung mit einer 3D-Koordinaten-Messmaschine, zur zwei- oder dreidimensionalen Profilmessung, Rauheits-, Welligkeits- und Ebenheitsmessung an technischen und biologischen Objekten, insbesondere dort auch zur Tumorzellen-Erkennung mittels Erfassung des 3D-Profiles von Zellen, und zur Schichtenmessung und dazu ein Zweistrahl-Interferometer mit Referenz- und Objektarm, insbesondere auch in Form eines Interferenzmikroskops, wobei im Referenzarm mindestens ein Endreflektor angeordnet ist, insbesondere in Freistrahlbildung und insbesondere auch als Michelson-, modifiziertes Michelson-, Twyman-Green-, Mirau-, Linnik-, Hybrid-Linnik-, Mach-Zehnder-Interferometer oder auch als vielkanalige Interferometeranordnung ausgebildet ist, die folgende Komponenten aufweist:

- entweder mindestens eine fein ausgebildete Punkt-Lichtquelle (**198**)
- oder eine fein ausgebildete Punkt-Lichtquellen-Matrix (**199**), ausgebildet mit einer Vielzahl von fein gebildeten Spots,
- mindestens ein der Lichtquelle (**198, 199**) nachfolgendes Lichtquellen-Objektiv (**2, 21**) zur zumindest näherungsweise beugungsbegrenzten Abbildung derselben oder der Spots derselben,
- mindestens ein das Objekt abbildendes Objektiv (**6, 61, 62, 63, 64, 66, 91**),
- mindestens ein Detektor-Objektiv (**11, 12, 62, 82, 91**), wobei das Objektiv, welches das Objekt (**71, 72, 73, 74**) abbildet, und das Detektor-Objektiv auch als ein einziges Objektiv (**62, 91**) ausgebildet sein können,
- mindestens ein gerasterter Detektor (**13**) mit Empfängerelementen für elektromagnetische Strahlung,
- und mindestens ein Digitalrechner mit einem Auswerteprogramm für detektierte Interferogramme zur schnellen Gewinnung von Informationen über das Objekt (**71, 72, 73, 74**), gekennzeichnet dadurch, dass
- entweder die fein ausgebildete Punkt-Lichtquelle (**198**) jeweils so fein ausgebildet ist,
- oder die Spots der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix (**199**) jeweils so fein ausgebildet sind, dass diese für das nachfolgende Lichtquellen-Objektiv (**2, 21**) zumindest näherungsweise gleich oder unterhalb dessen beugungsbegrenzter Lateral-Auflösung ist/sind, welche durch numerische Apertur dieses Licht-



quellen-Objektivs (**2, 21**) und der eingesetzten Lichtwellenlänge oder der eingesetzten Lichtwellenlängen der fein ausgebildeten Lichtquelle (**198**) oder der fein ausgebildeten Punkt-Lichtquellen-Matrix (**199**) bestimmt ist, und eine schwache Asymmetrie im Zweistrahl-Interferometer besteht, hervorgerufen

– entweder durch unterschiedliche Laufwege des Lichts in unterschiedlichen Materialien unterschiedlicher Brechkraft

– und/oder durch in den beiden Interferometerarmen R und O ungleich verteilte Brechkräfte optischer Komponenten

und/oder durch in den beiden Interferometerarmen ungleich in der Tiefe positionierte Komponenten mit Brechkraft

und entweder

– im Raum nach dem Tubusobjektiv (**9**)

– oder einem zumindest näherungsweise fokussierenden Objektiv (**62, 91**)

– oder dem zumindest näherungsweise fokussierenden Objektiv (**2**) aus dem Beleuchtungsstrahlengang auch zur Detektion mitbenutzt

zwei separierte Fokusebenen in der Tiefe bestehen, die zumindest näherungsweise um einen Betrag (Def\_strich) voneinander vorbestimmt separiert sind

und dieser Betrag (Def\_strich) mindestens oder größer als die

halbe Schwerpunktwellenlänge ( $\lambda_S$ ) im detektierten Signal vom räumlichen Interferogramm

dividiert durch das Quadrat der effektiv genutzten numerischen Apertur

– des Tubusobjektivs (**9**)

– oder des zumindest näherungsweise fokussierenden Objektivs (**62, 91**)

– oder des zumindest näherungsweise fokussierenden Objektivs (**2**) aus dem Beleuchtungsstrahlengang, welches auch zur Detektion mitbenutzt wird,

gemacht ist

und kleiner als die Brennweite des

– Tubusobjektivs (**9**)

– oder eines zumindest näherungsweise fokussierenden Objektivs (**62, 91**)

– oder des zumindest näherungsweise fokussierenden Objektivs (**2**) aus dem Beleuchtungsstrahlengang, welches auch zur Detektion mitbenutzt wird,

gemacht ist.

18. Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie nach Anspruch 17, gekennzeichnet dadurch, dass in der Bildebene des Zweistrahl-Interferometers in der Art einer Lichtfeld-Kamera oder Plenoptic-Kamera ein optisches Array (**84**) mit Elementen (**841**) positiver oder negativer Brechkraft angeordnet ist und jedem Paar, bestehend aus einem beugungsbegrenzten Bildspot aus dem Referenzarm R und dem Objektarm O, die jeweils kohärente Spots darstellen, mindestens eines dieser Elemente (**841**) positiver oder negativer Brechkraft zugeordnet ist.

19. Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie nach mindestens einem der Ansprüche 17 und 18, gekennzeichnet dadurch, dass das optische Array (**84**) mit Elementen (**841**) positiver oder negativer Brechkraft zumindest näherungsweise schwach gekrümmt ausgebildet ist.

20. Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie nach mindestens einem der Ansprüche 17 bis 19, gekennzeichnet dadurch, dass die Brennweite der Elemente (**841**) positiver oder negativer Brechkraft im Array (**84**) zumindest näherungsweise der vorbestimmten Tiefenseparierung (Def\_strich) entspricht.

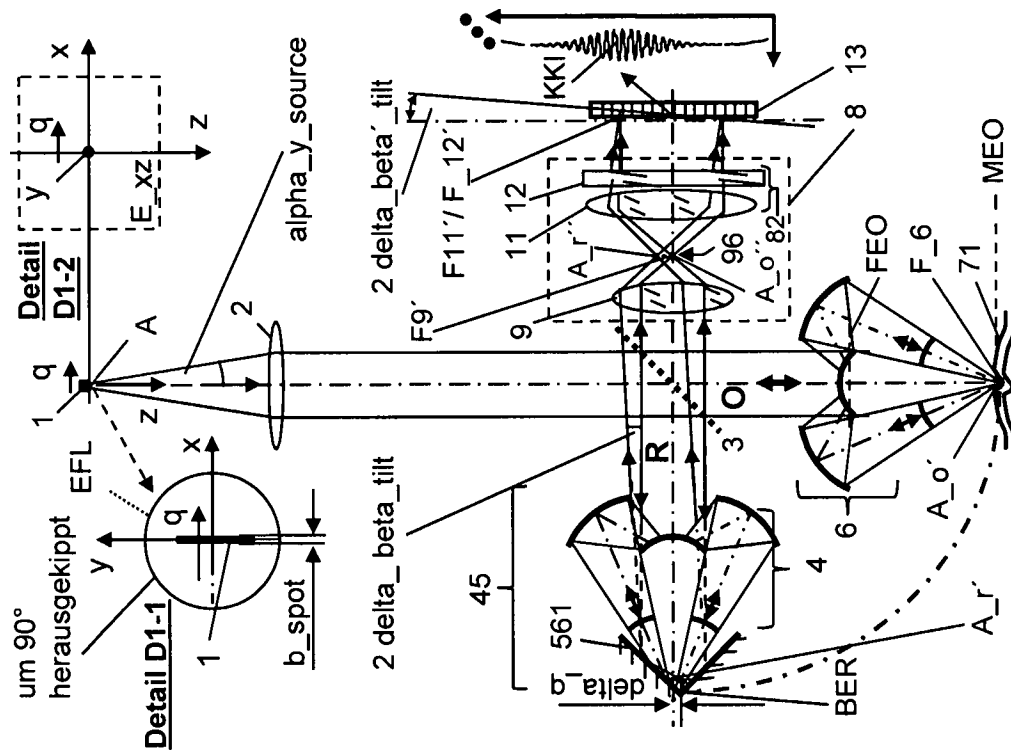
21. Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie nach mindestens einem der Ansprüche 17 bis 20, gekennzeichnet dadurch, dass sich die fokussierten Objektbildspots ( $A_o$ ) zumindest näherungsweise in der Pupille der Elemente (**841**) positiver oder negativer Brechkraft im Array (**84**) befinden.

22. Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie nach mindestens einem der Ansprüche 17 bis 21, gekennzeichnet dadurch, dass im Zweistrahl-Interferometer zumindest näherungsweise der optische Gangunterschied null besteht.

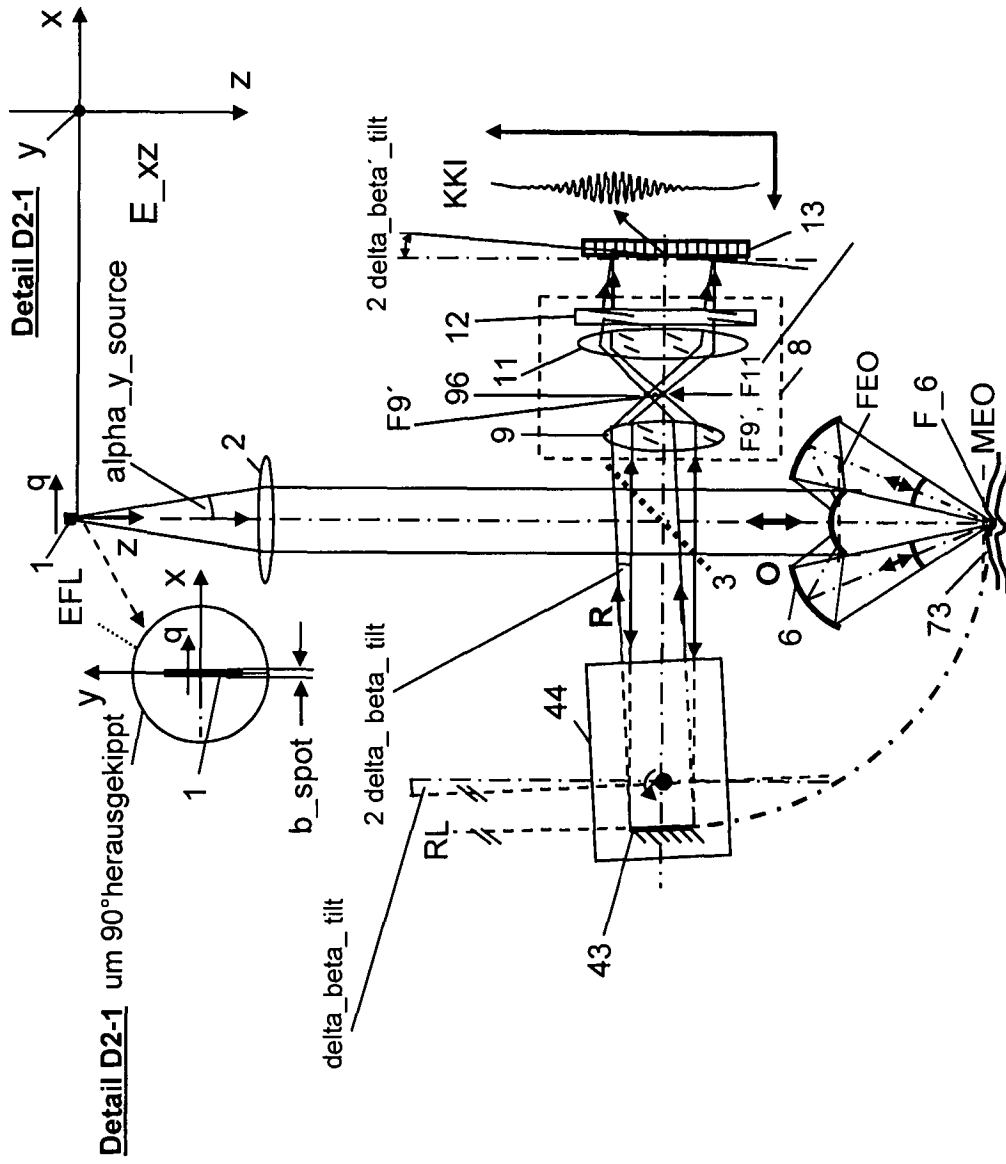
23. Anordnung zur robusten One-shot-Interferometrie nach mindestens einem der Ansprüche 17 bis 22, gekennzeichnet dadurch, dass das Array im Detektionsstrahlengang mit diffraktiven optischen Elementen auf der Basis eines schaltbaren räumlichen Lichtmodulators ausgebildet ist.

Es folgen 50 Seiten Zeichnungen

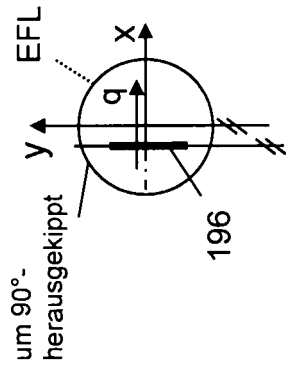
Anhängende Zeichnungen



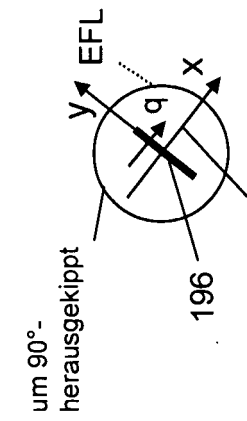
Figur 1



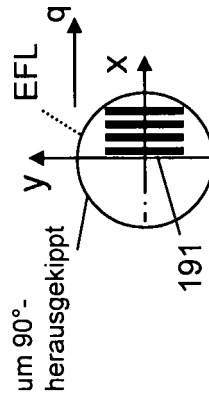
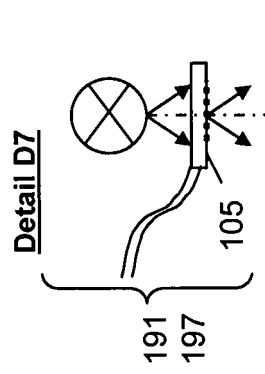
Figur 2



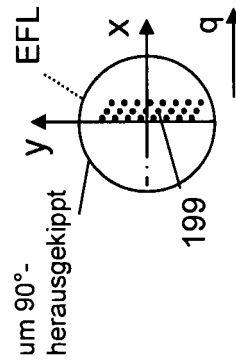
Figur 3



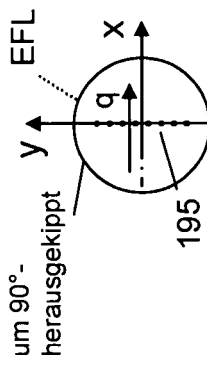
Figur 4



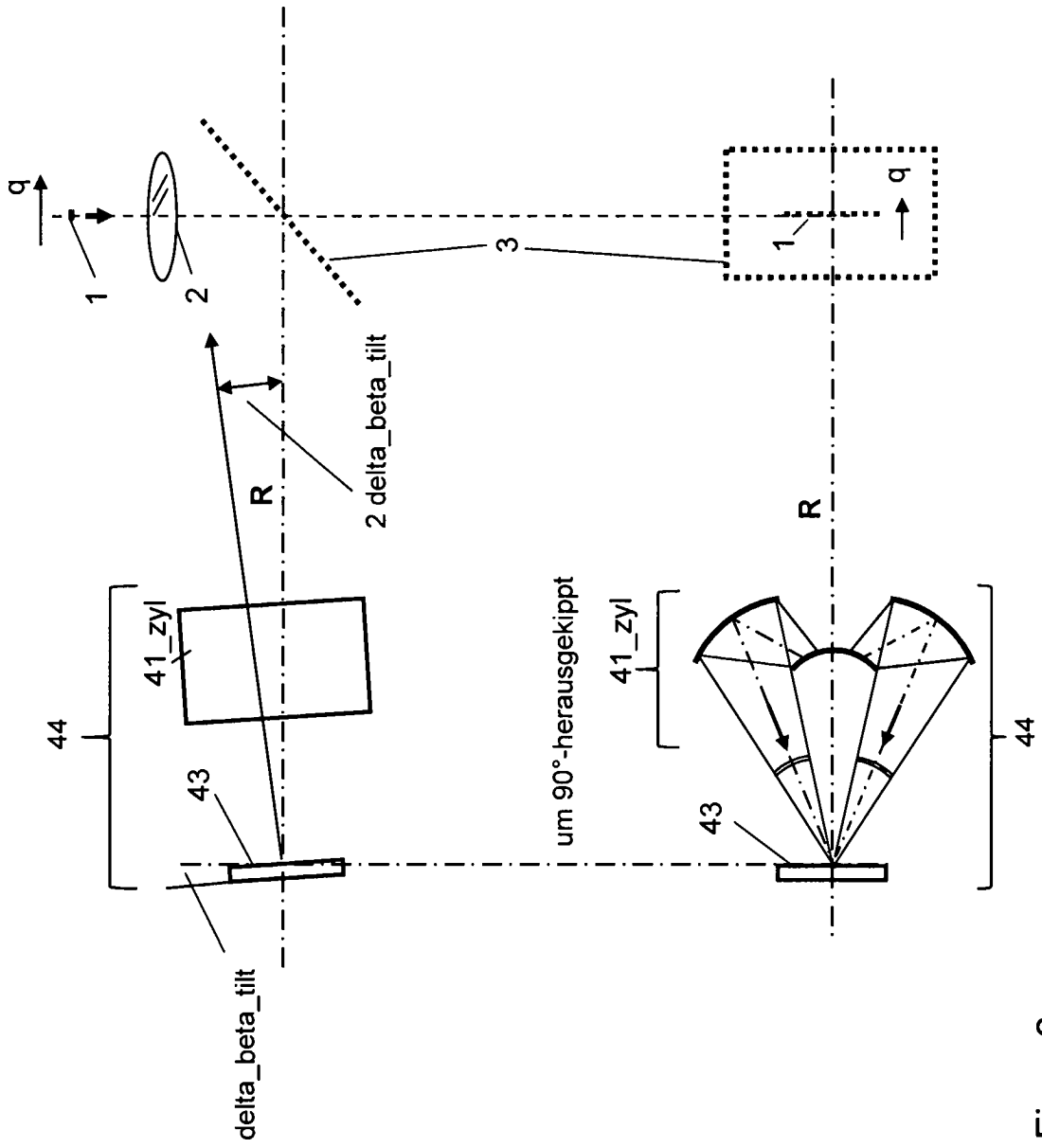
Figur 7



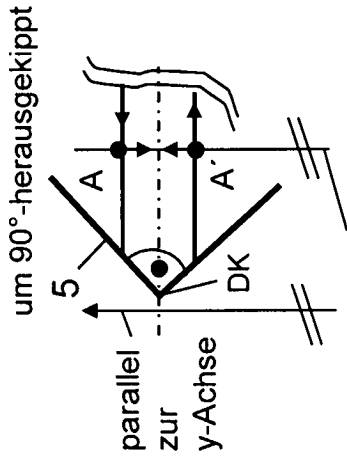
Figur 6



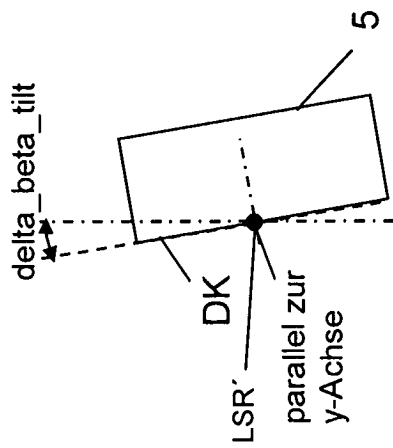
Figur 5



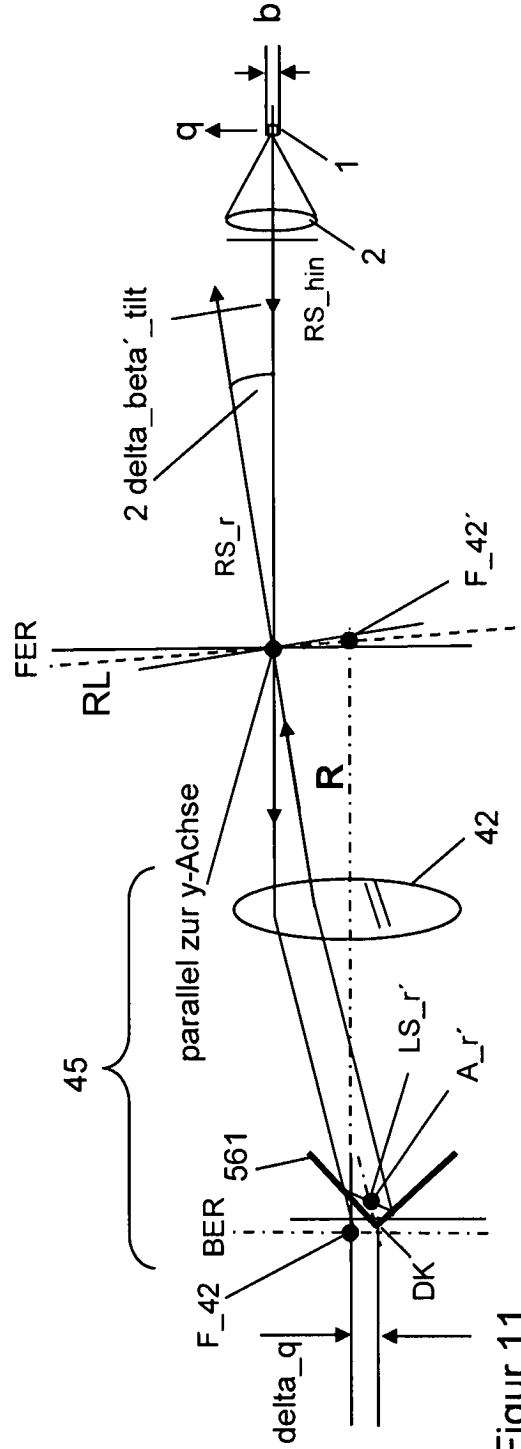
Figur 8



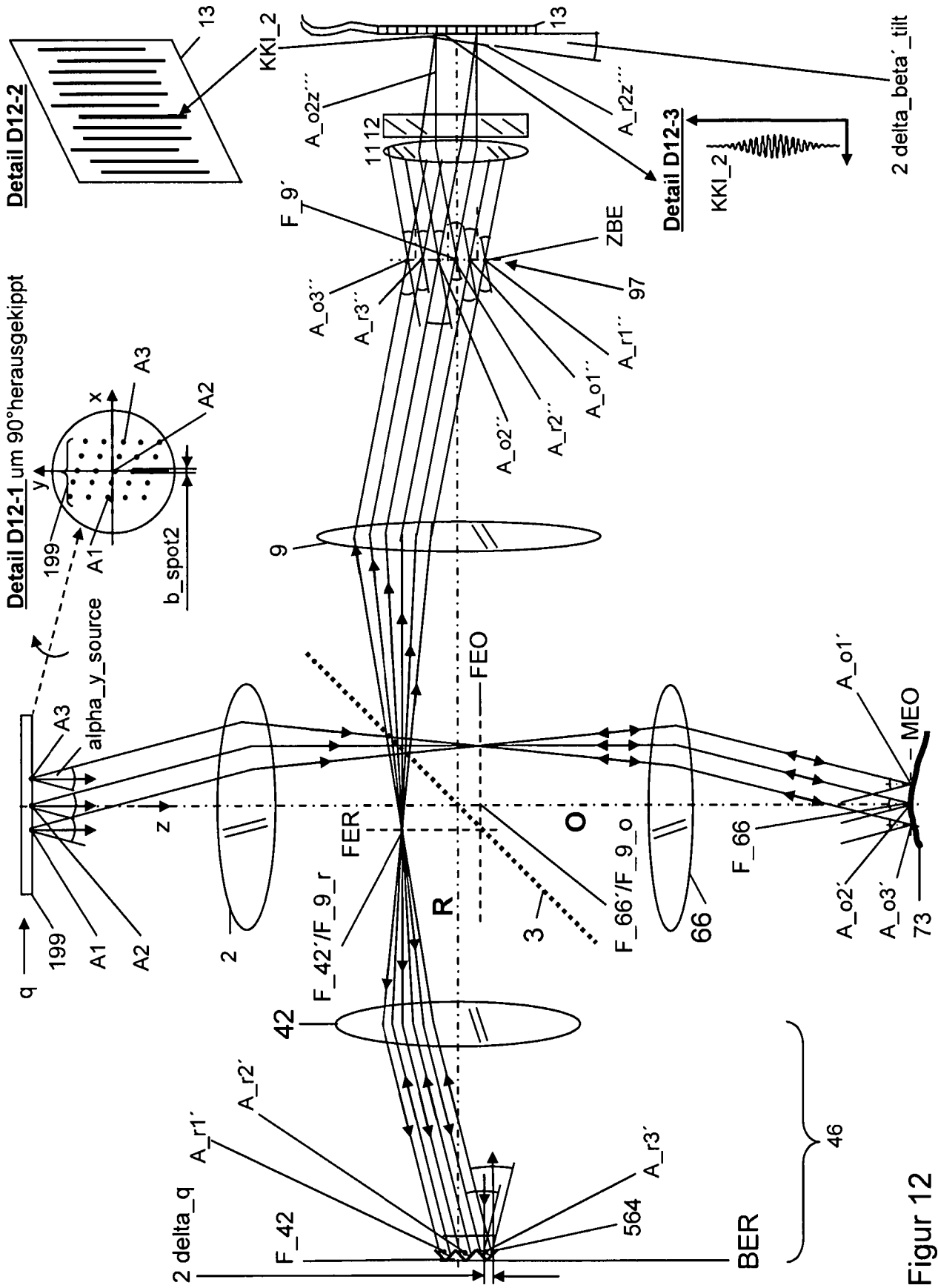
Figur 10



Figur 9



Figur 11



Figur 12

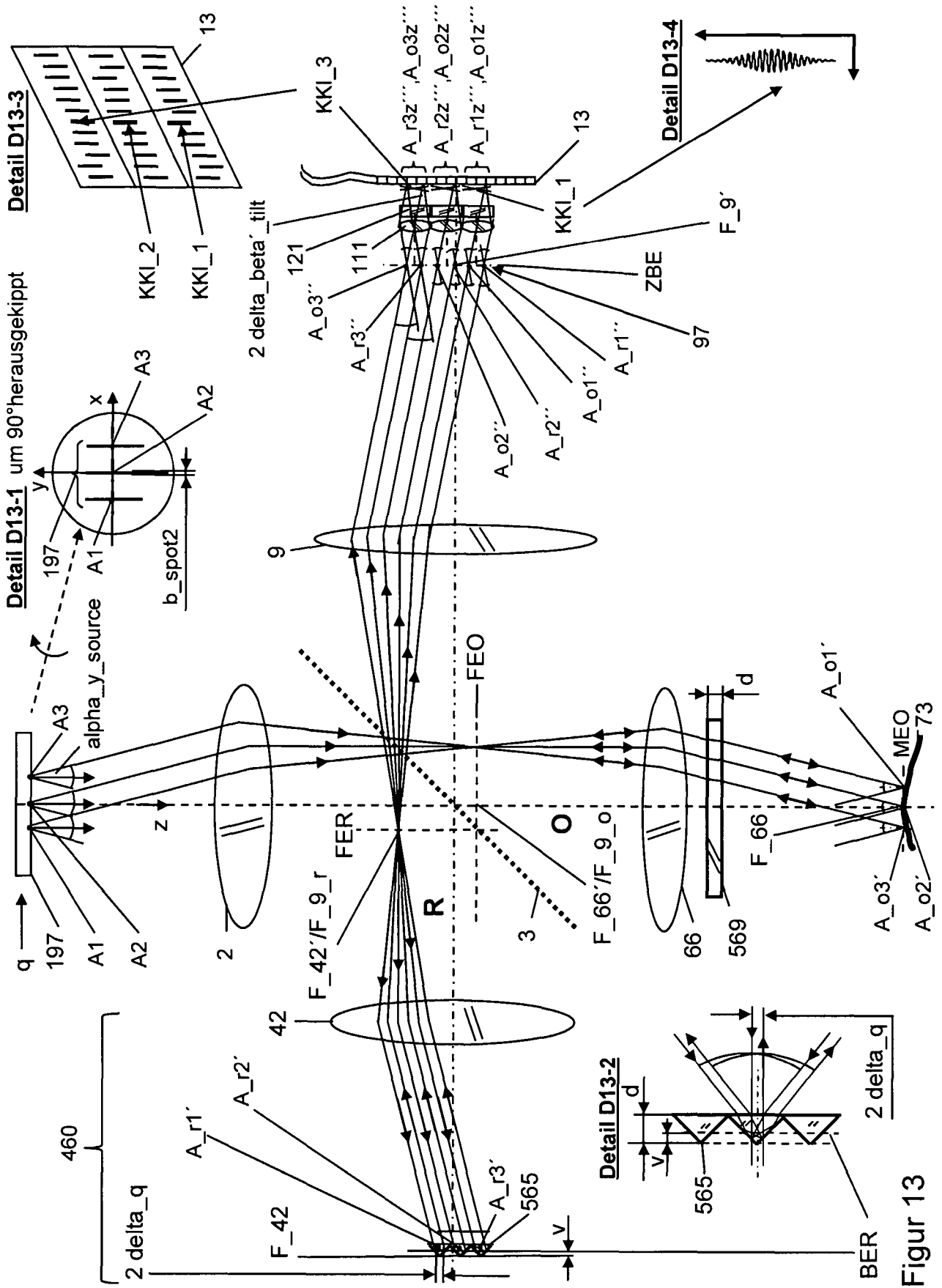
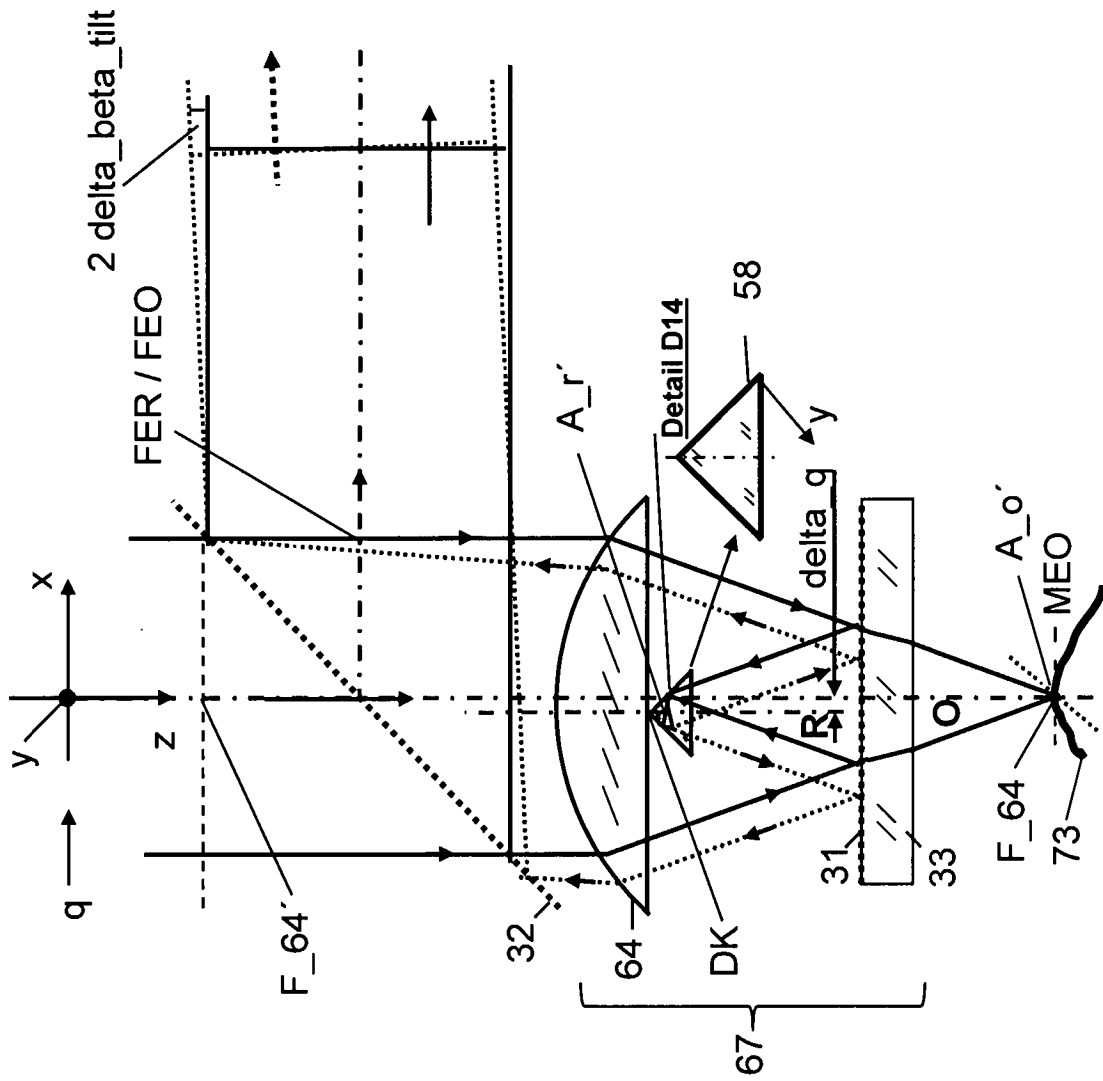


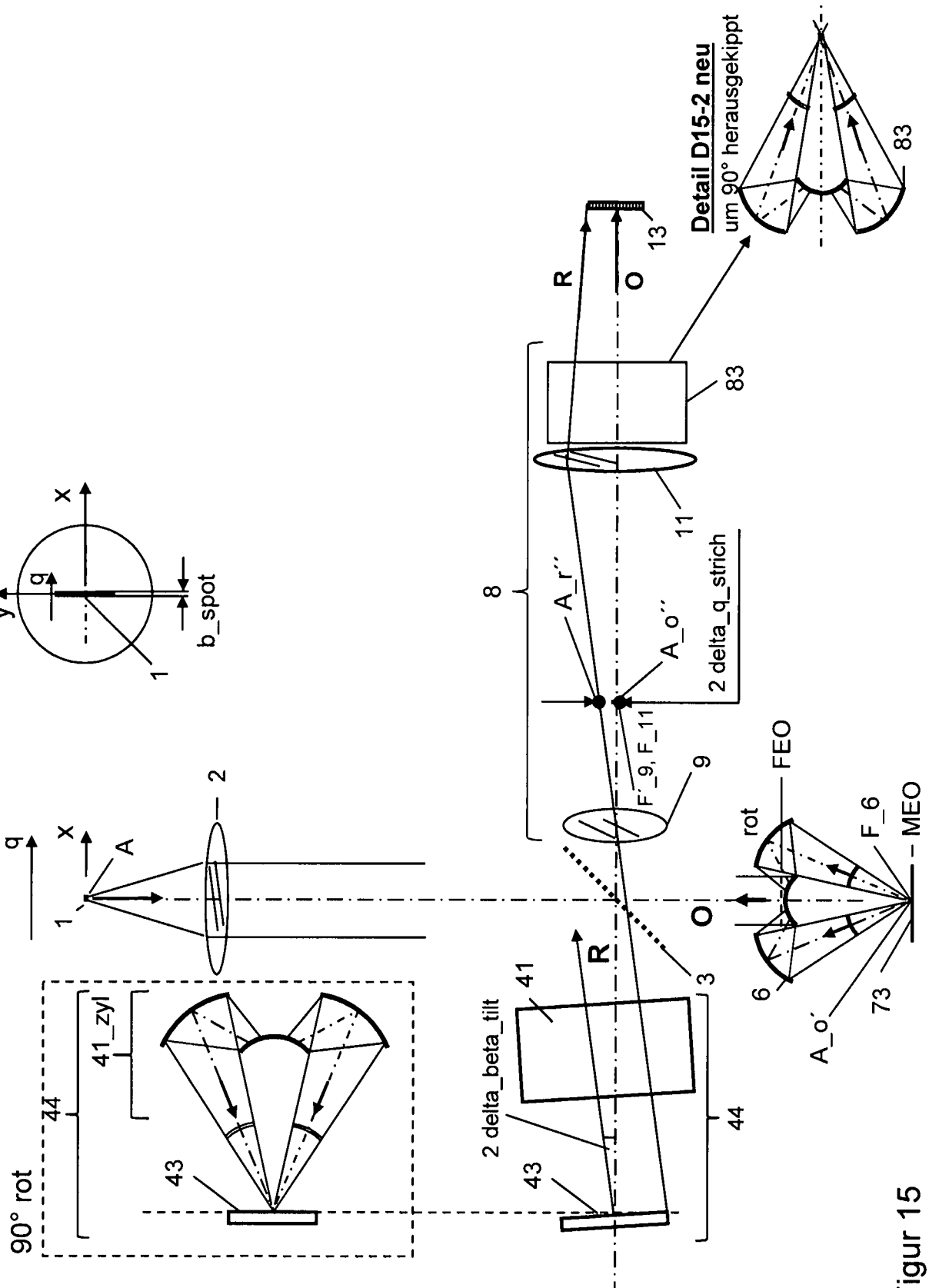
Figure 13



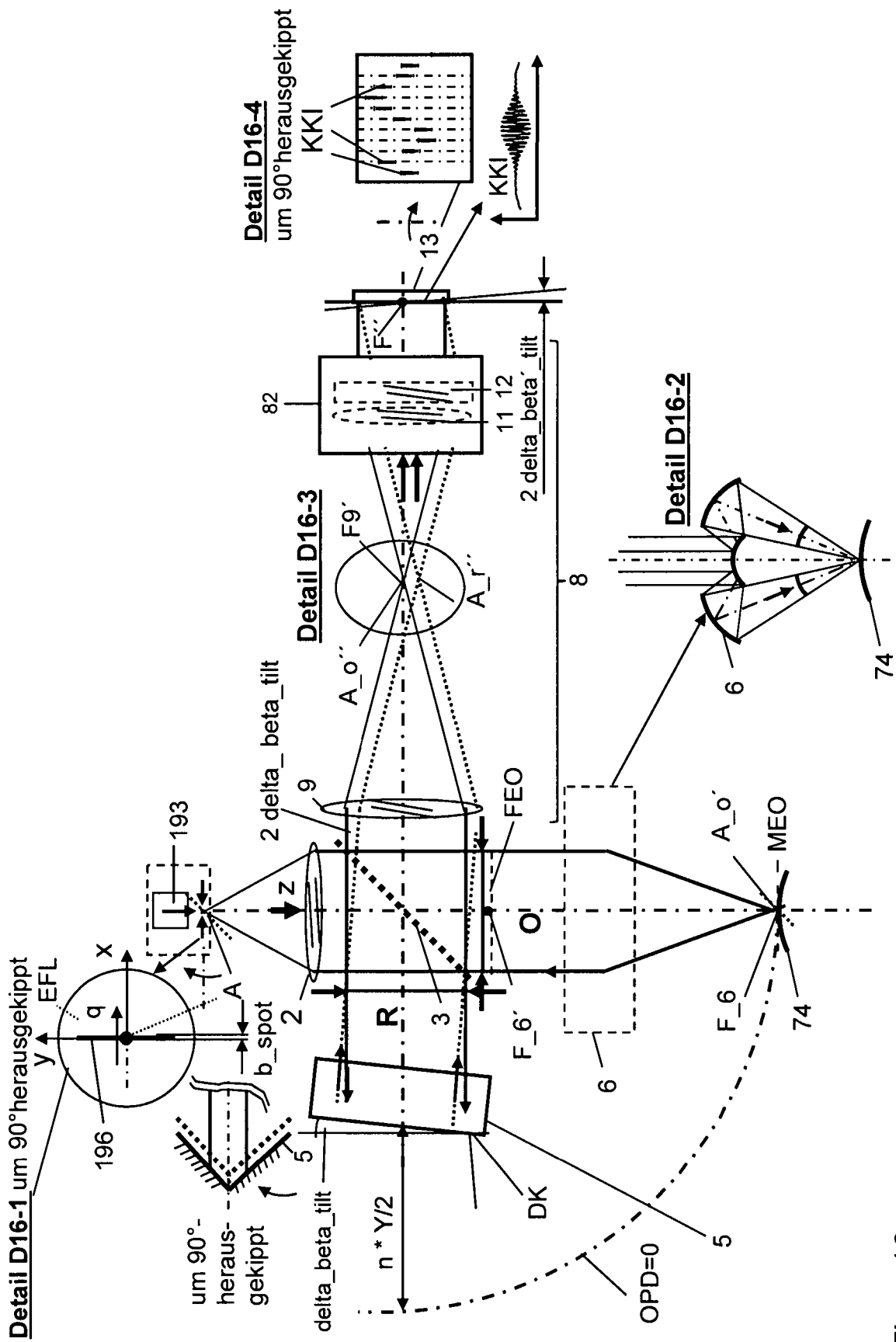


Figur 14

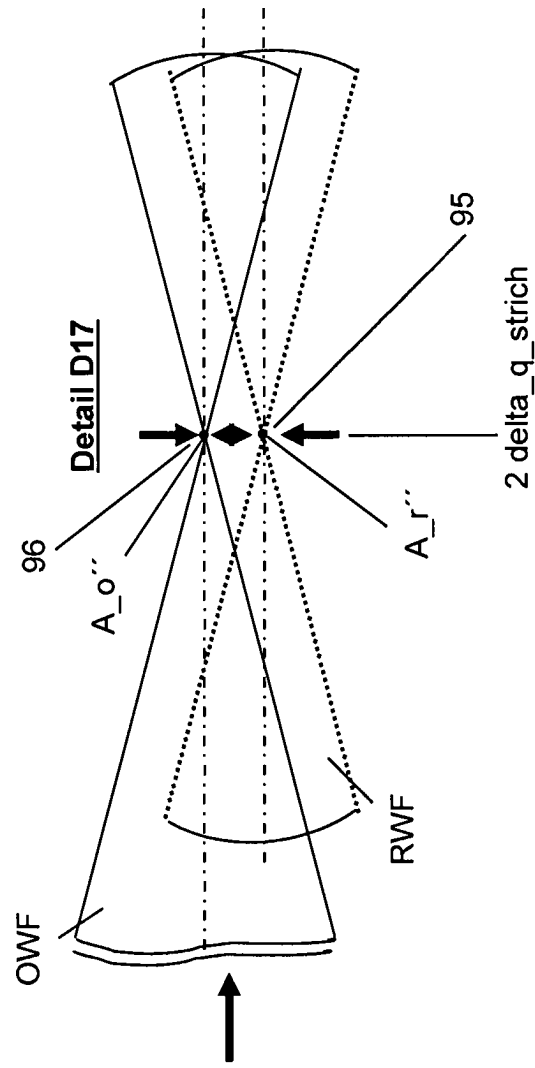
Detail D15-1 um 90°herausgekippt



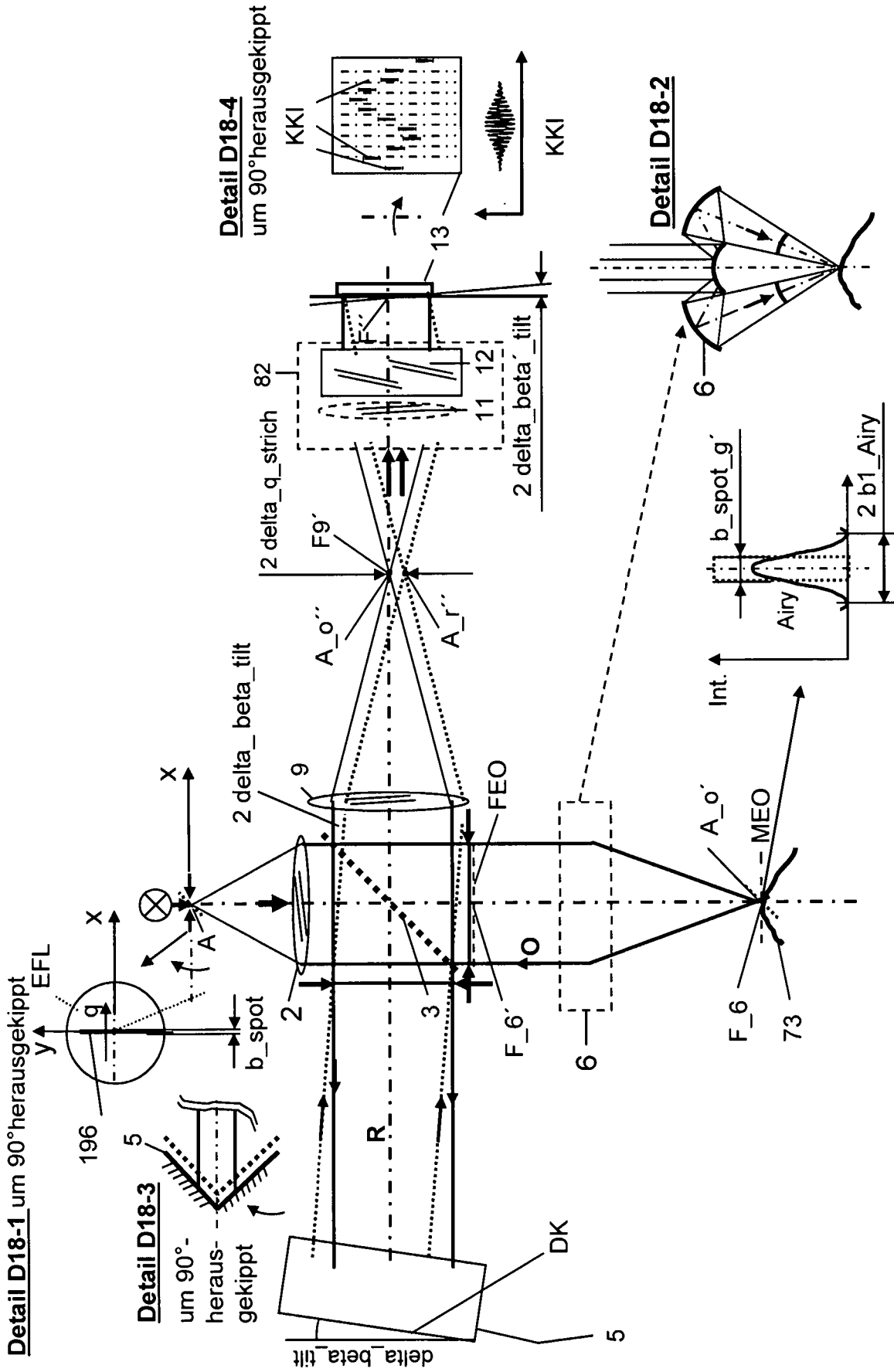
Figur 15



Figur 16

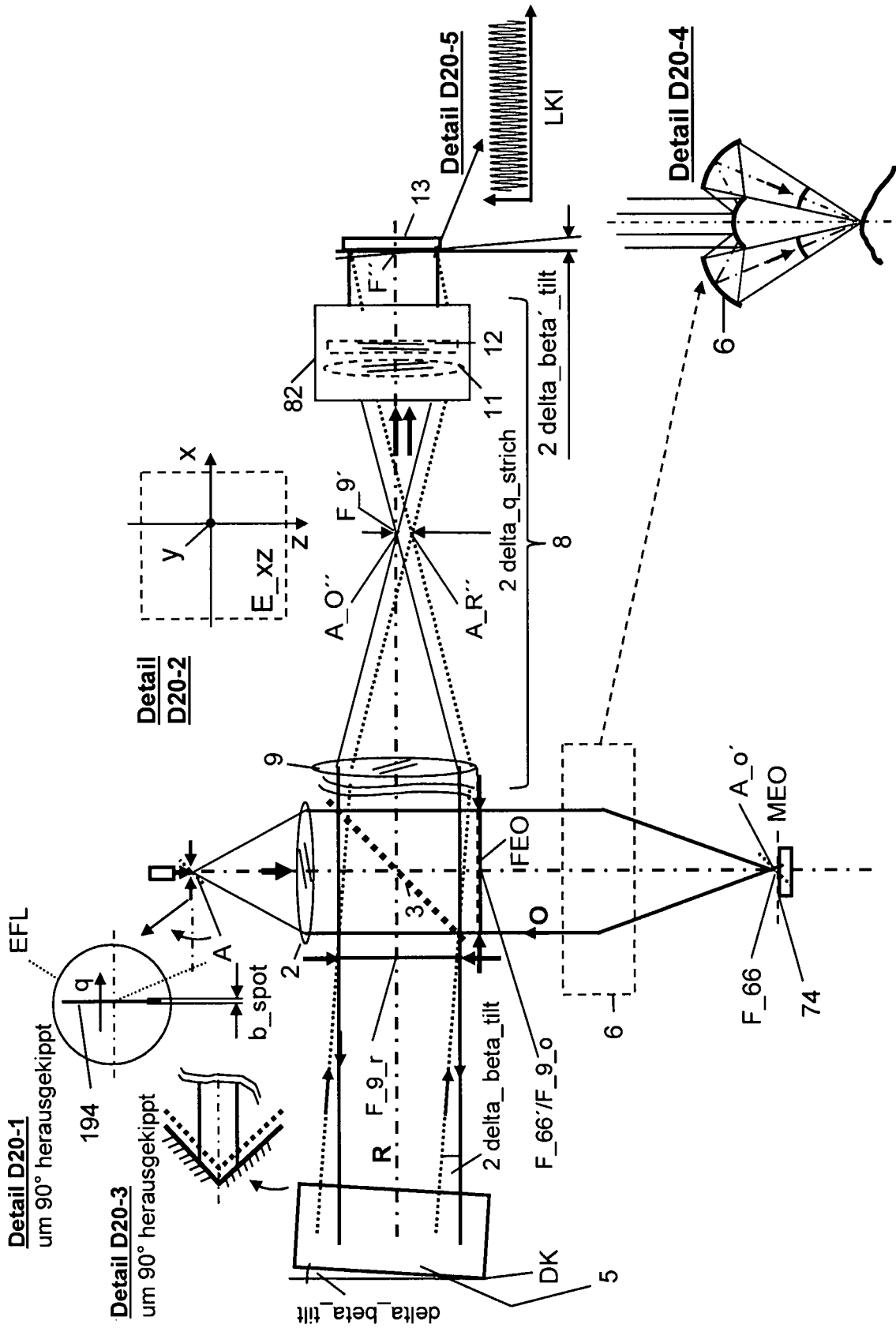


Figur 17

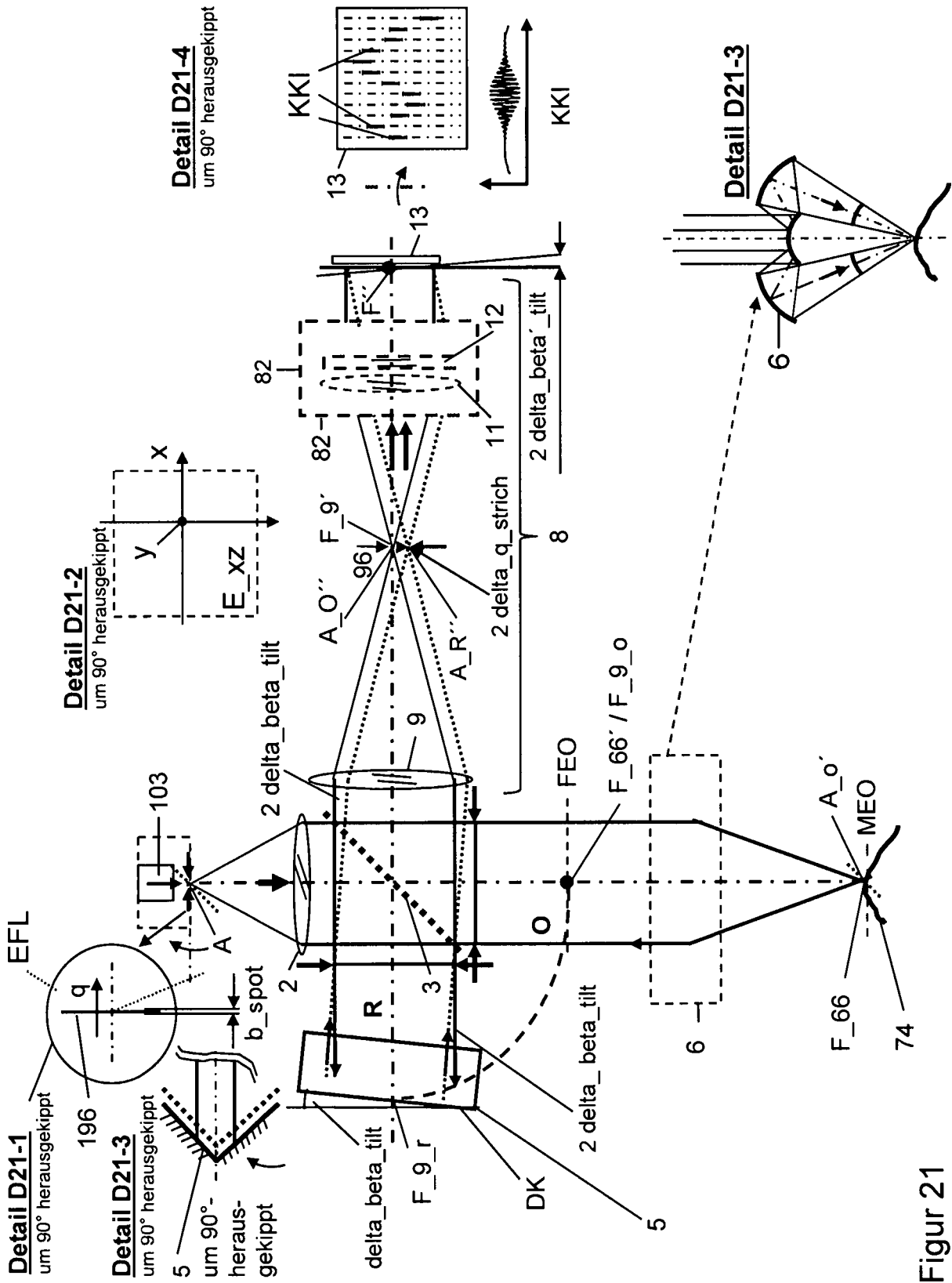


Figur 19

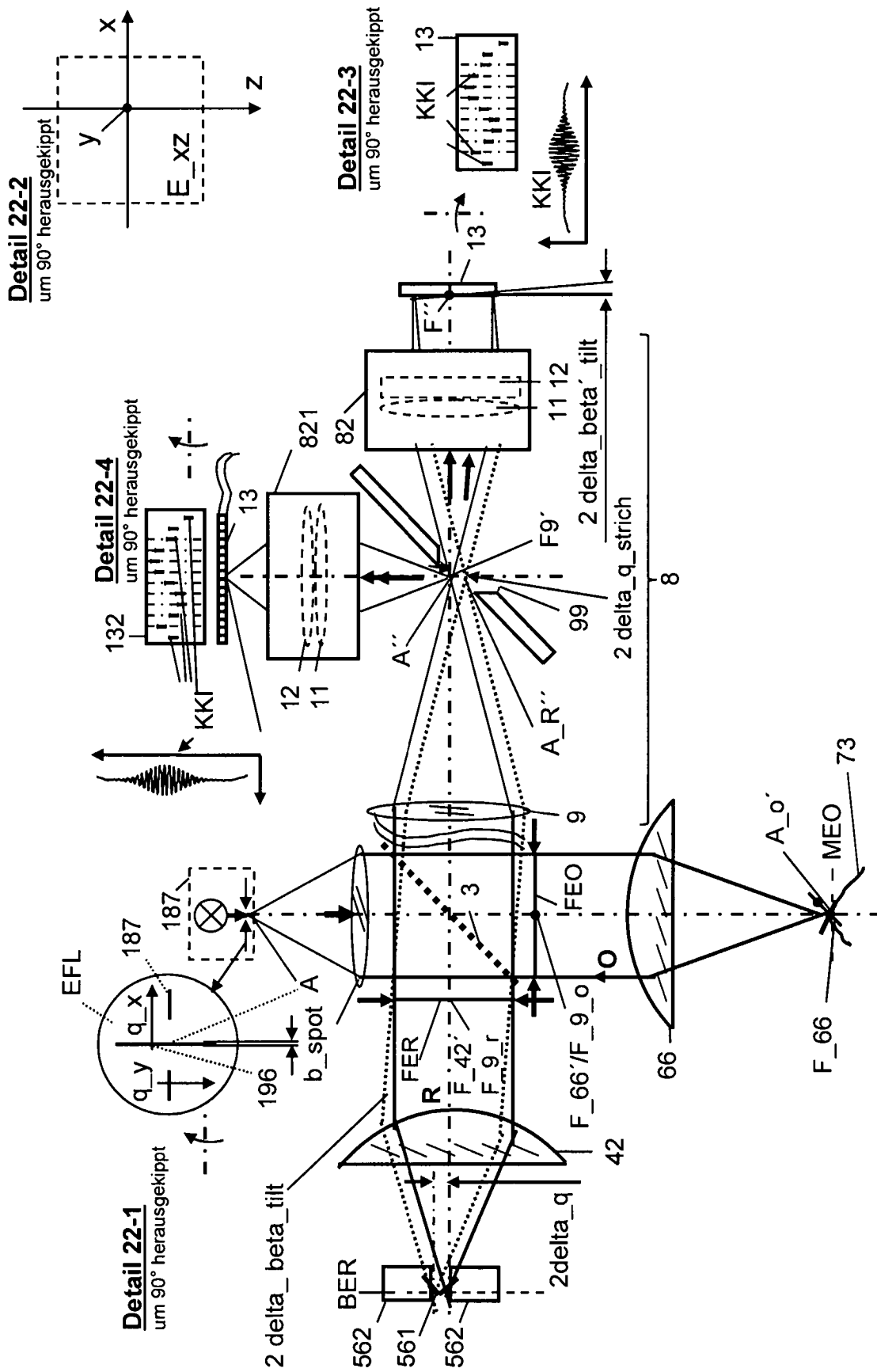
Figur 18



Figur 20



Figur 21



Figur 22



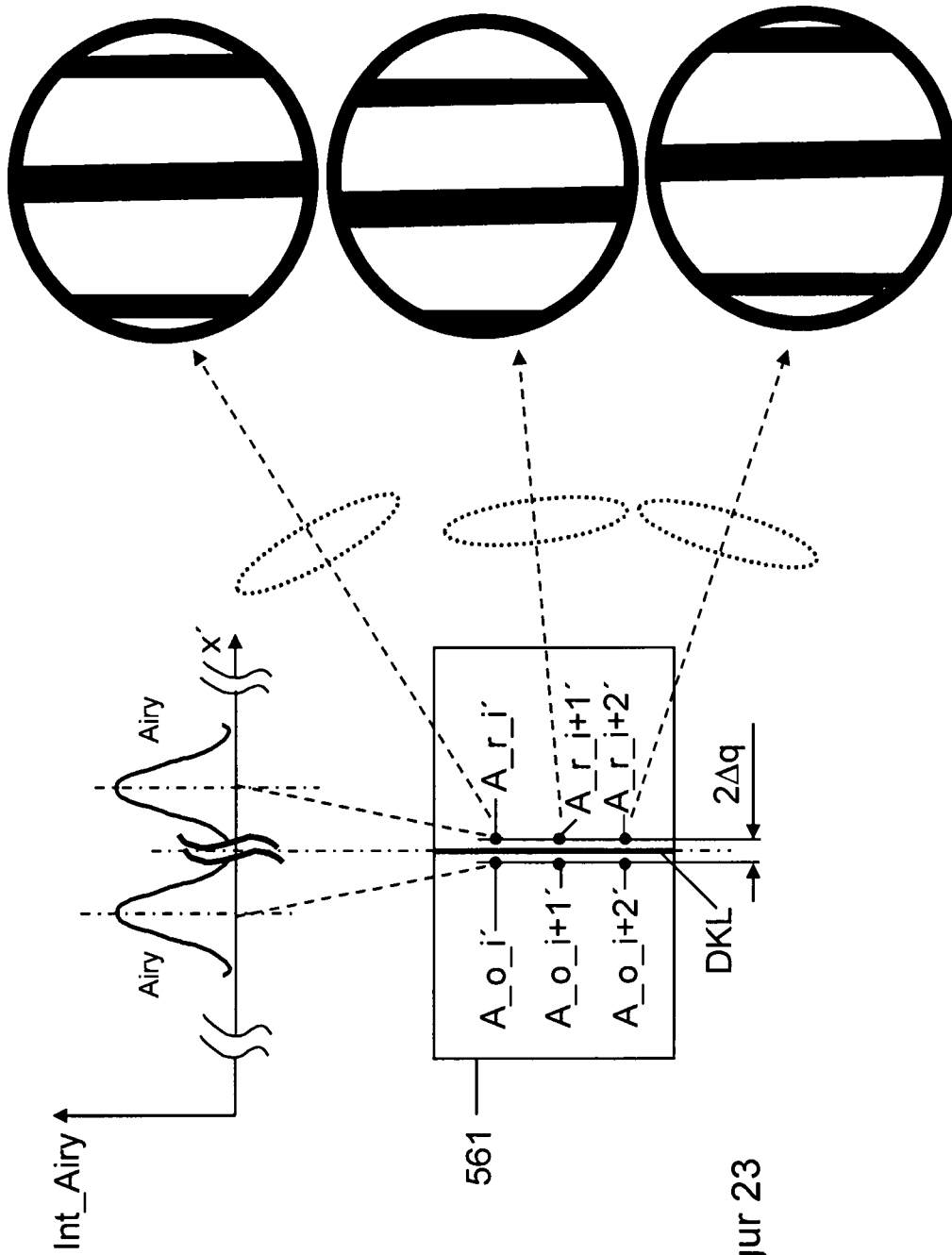


Figure 24

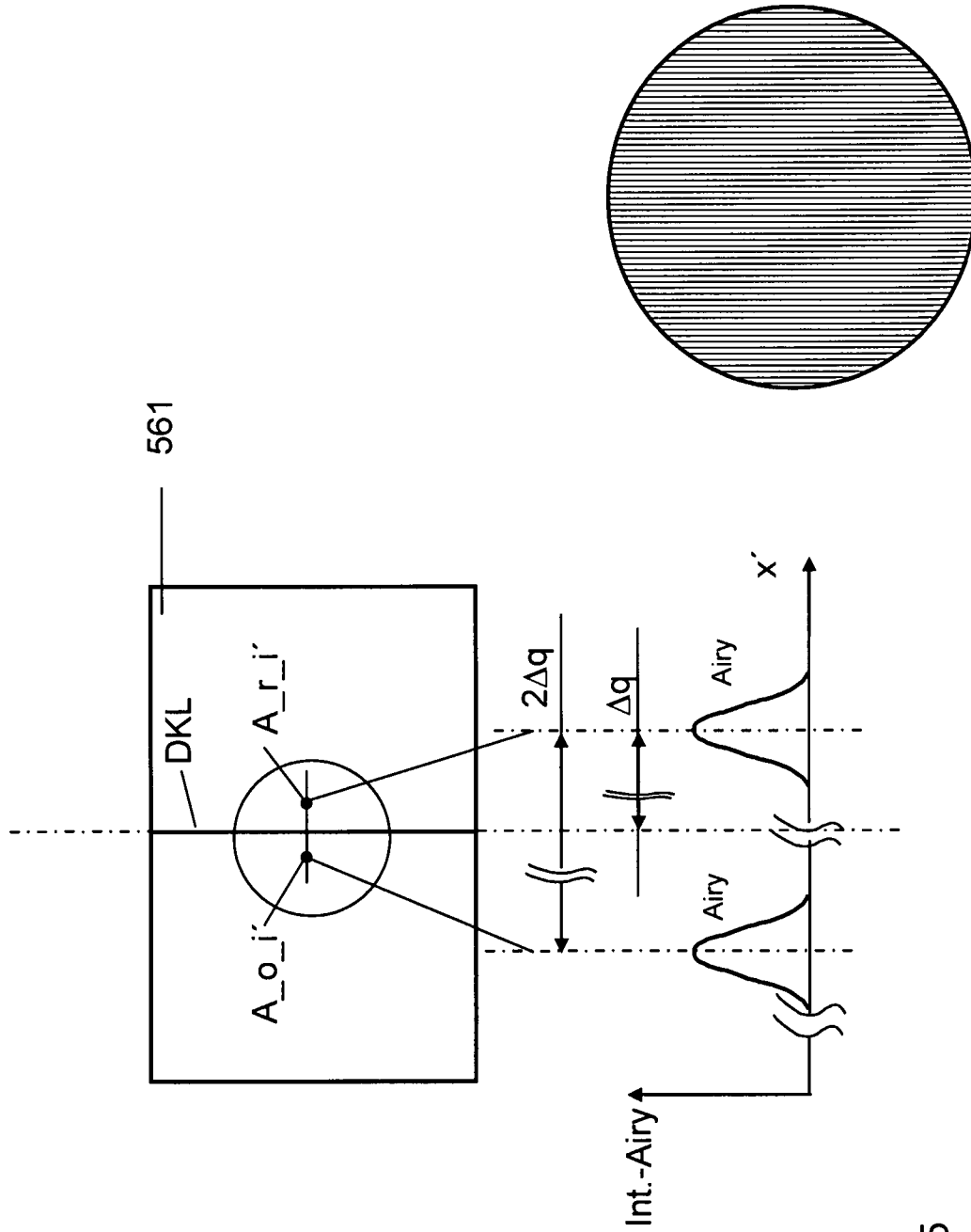
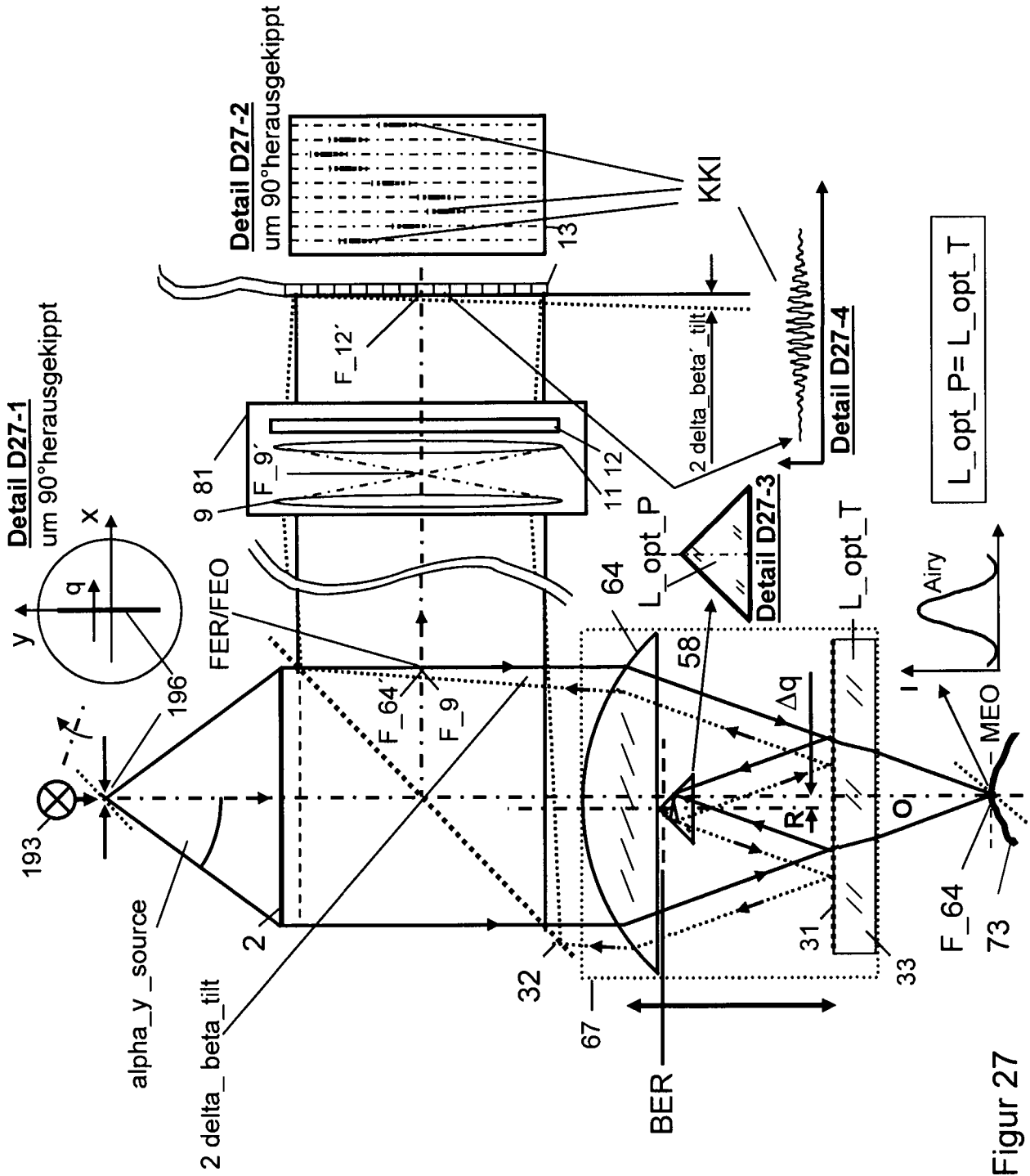
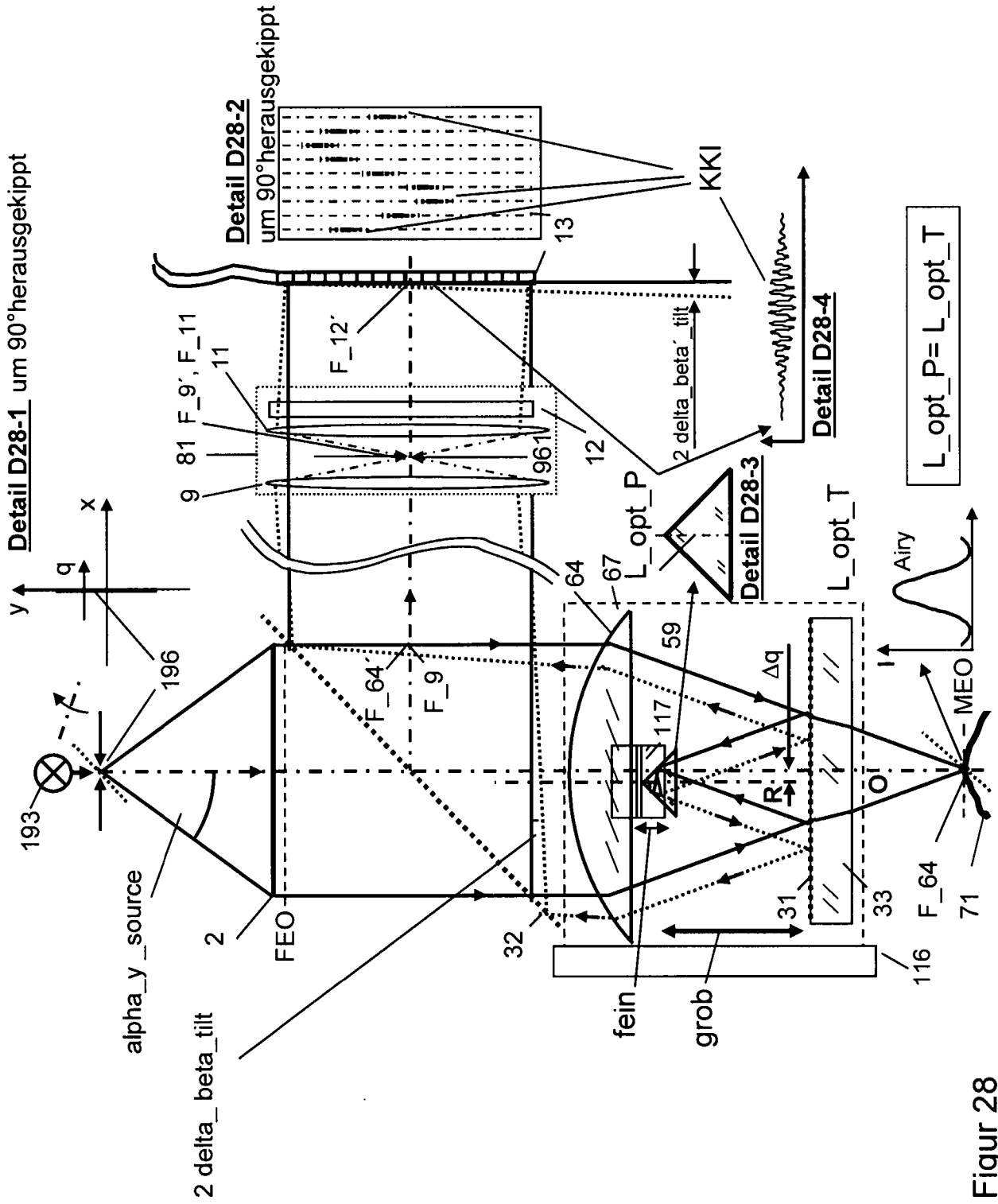


Figure 25

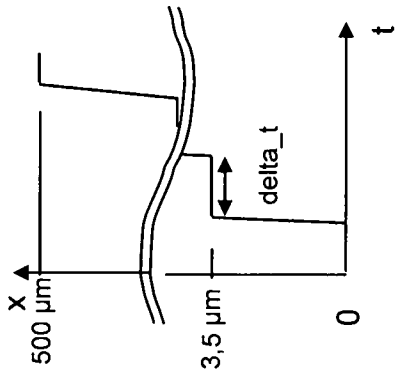
Figure 26



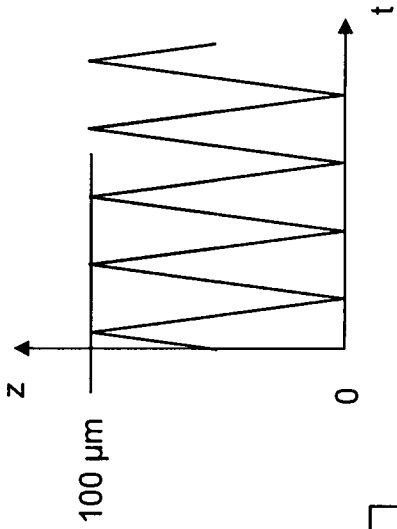
Figur 27



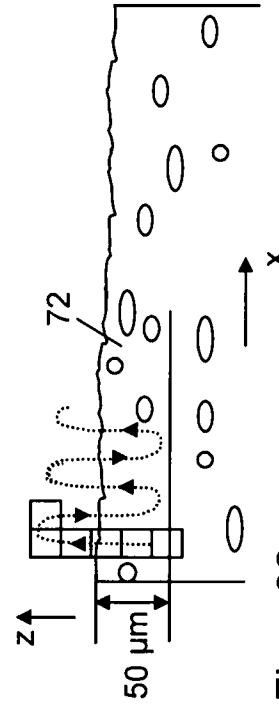
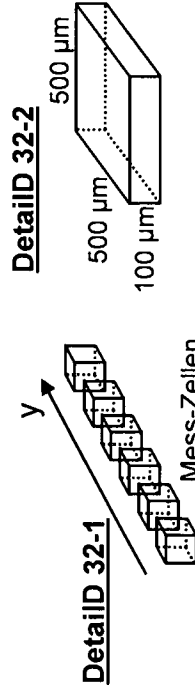
Figur 28



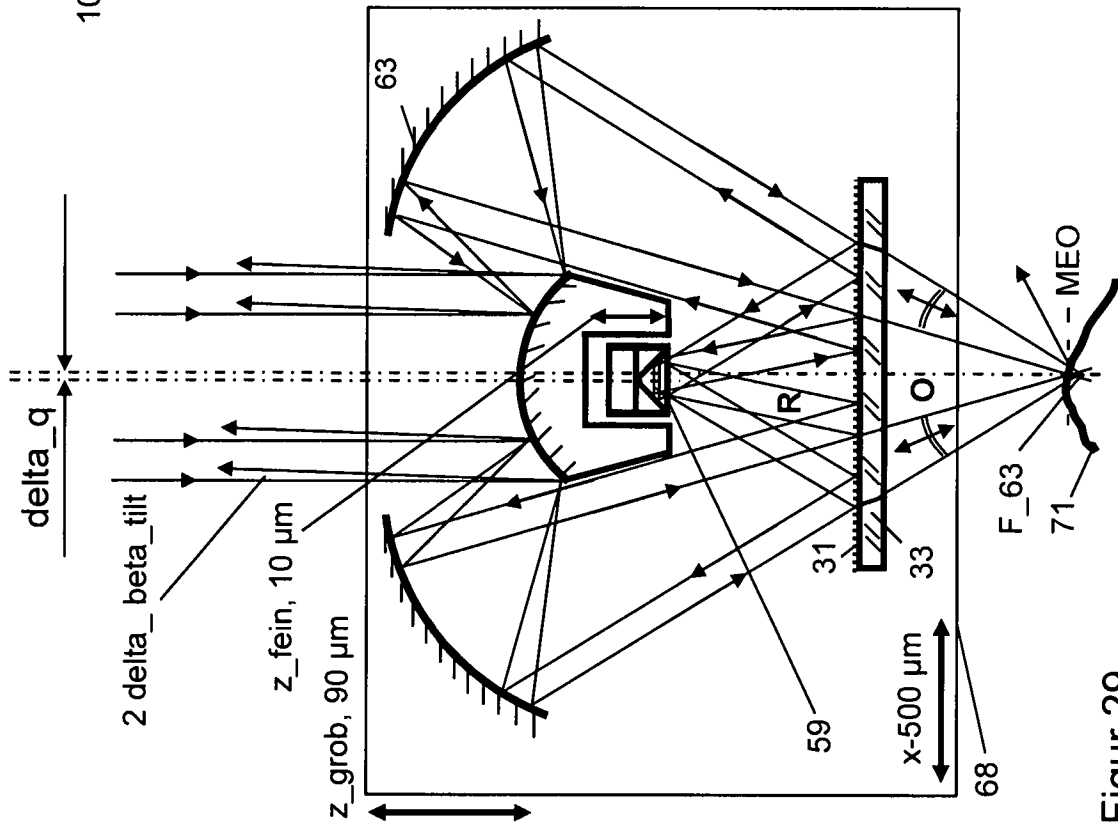
Figur 31



Figur 30



Figur 32



Figur 29

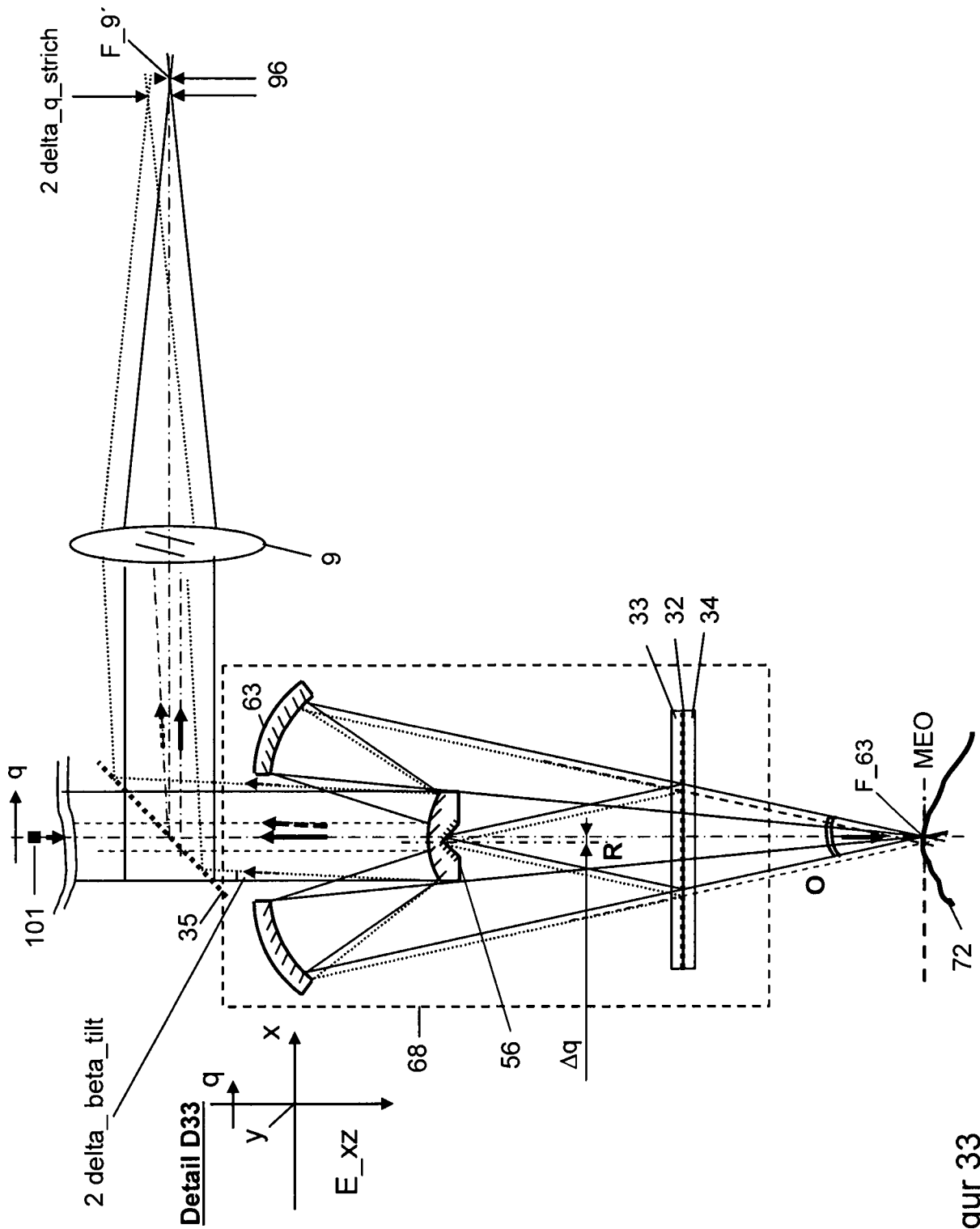
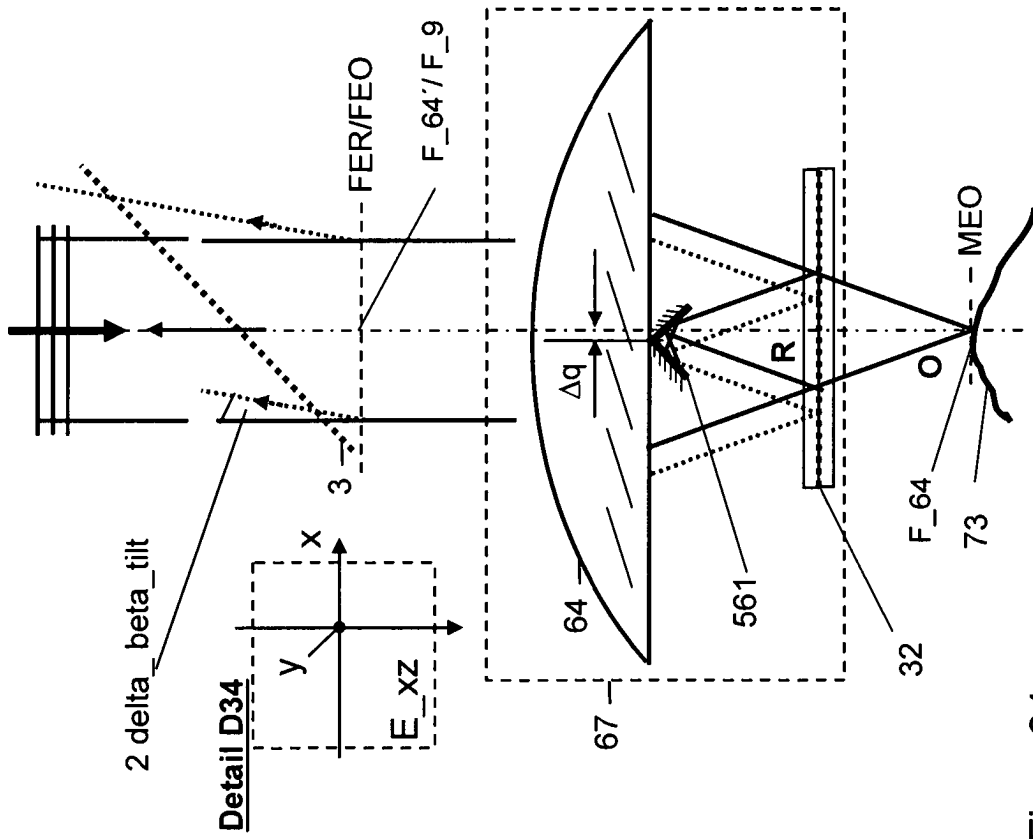
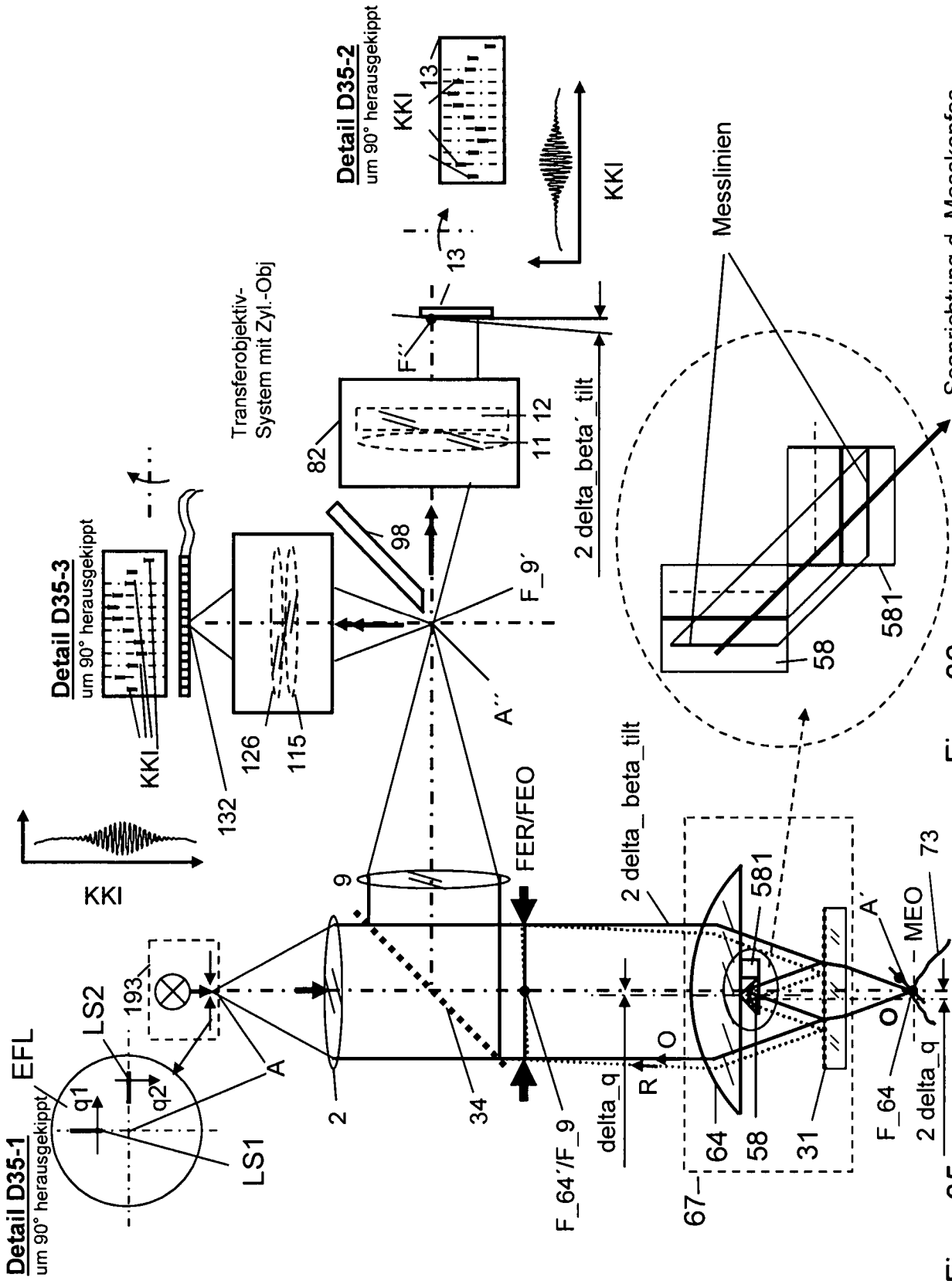


Figure 33



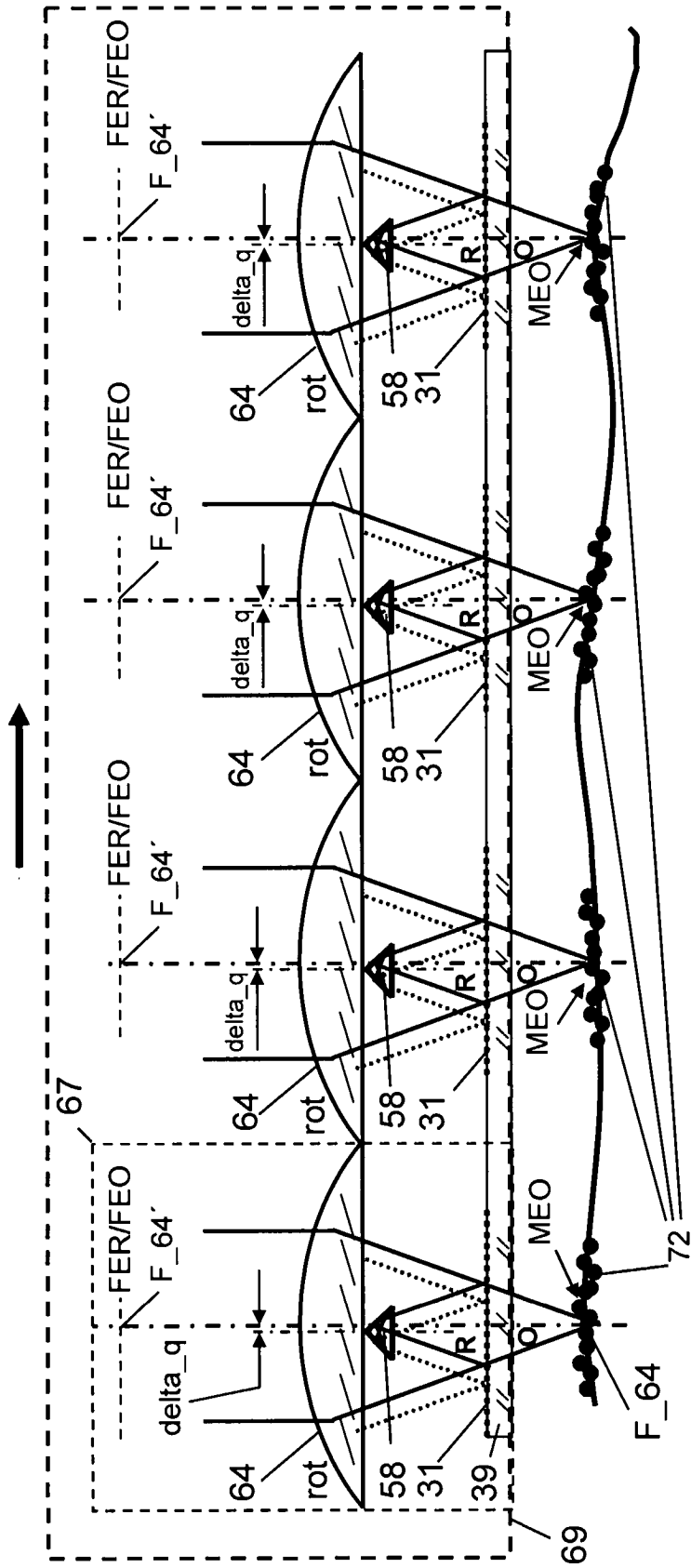
Figur 34



Figur 36

Figur 35





Figur 37

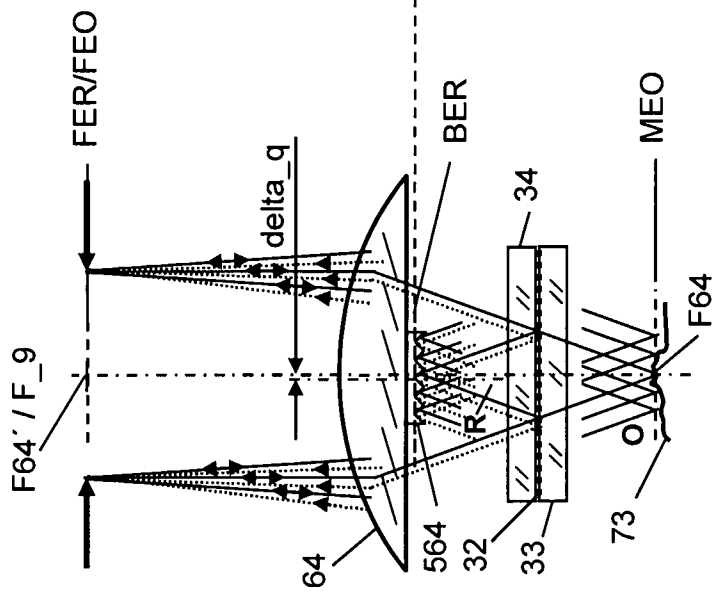


Figure 38

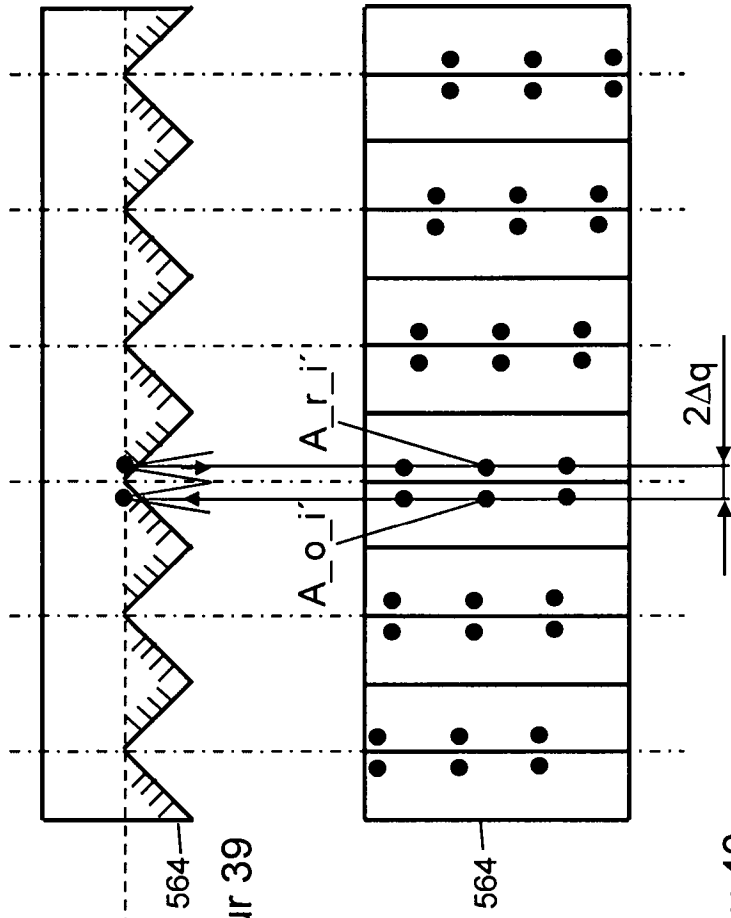
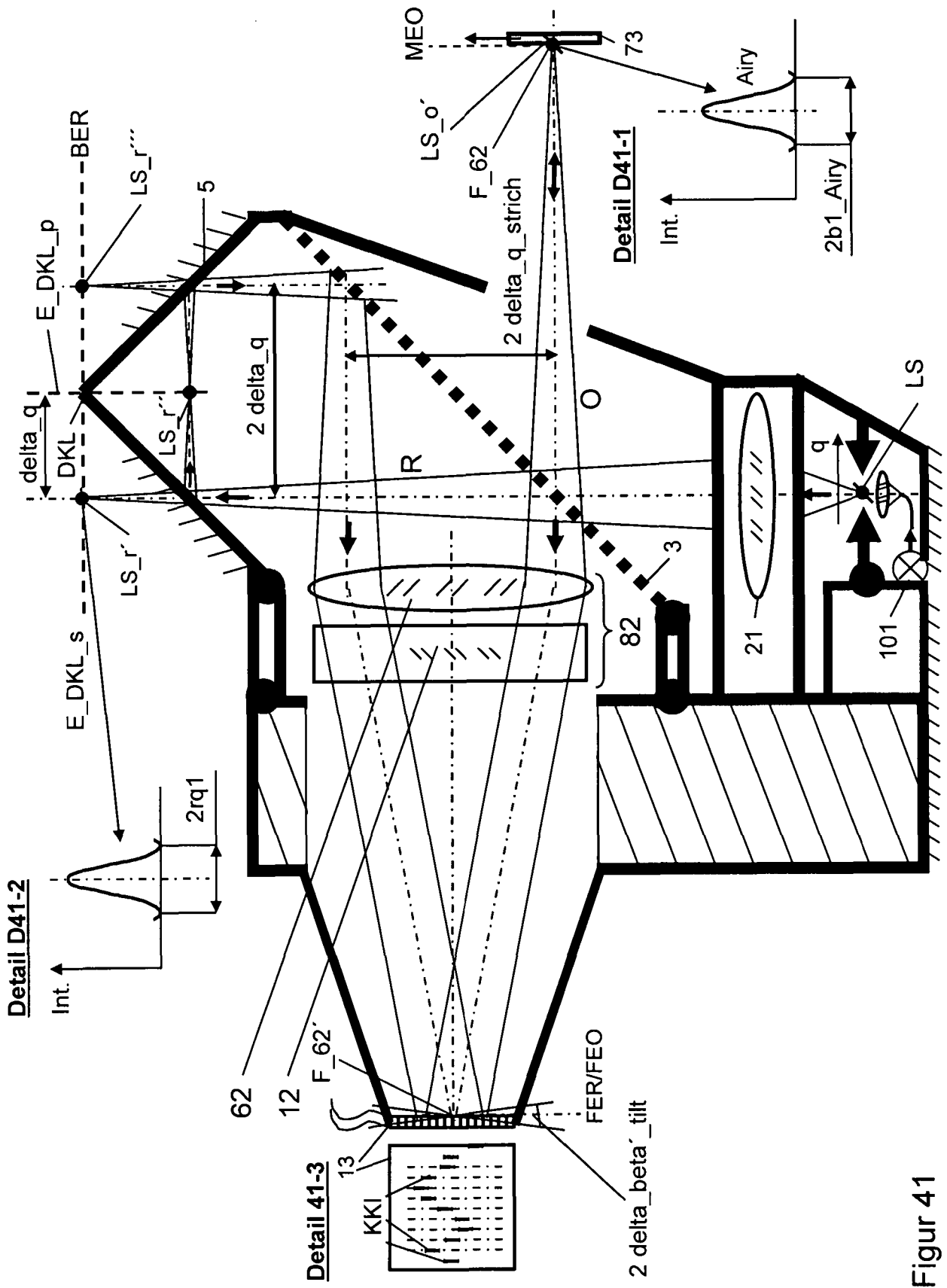
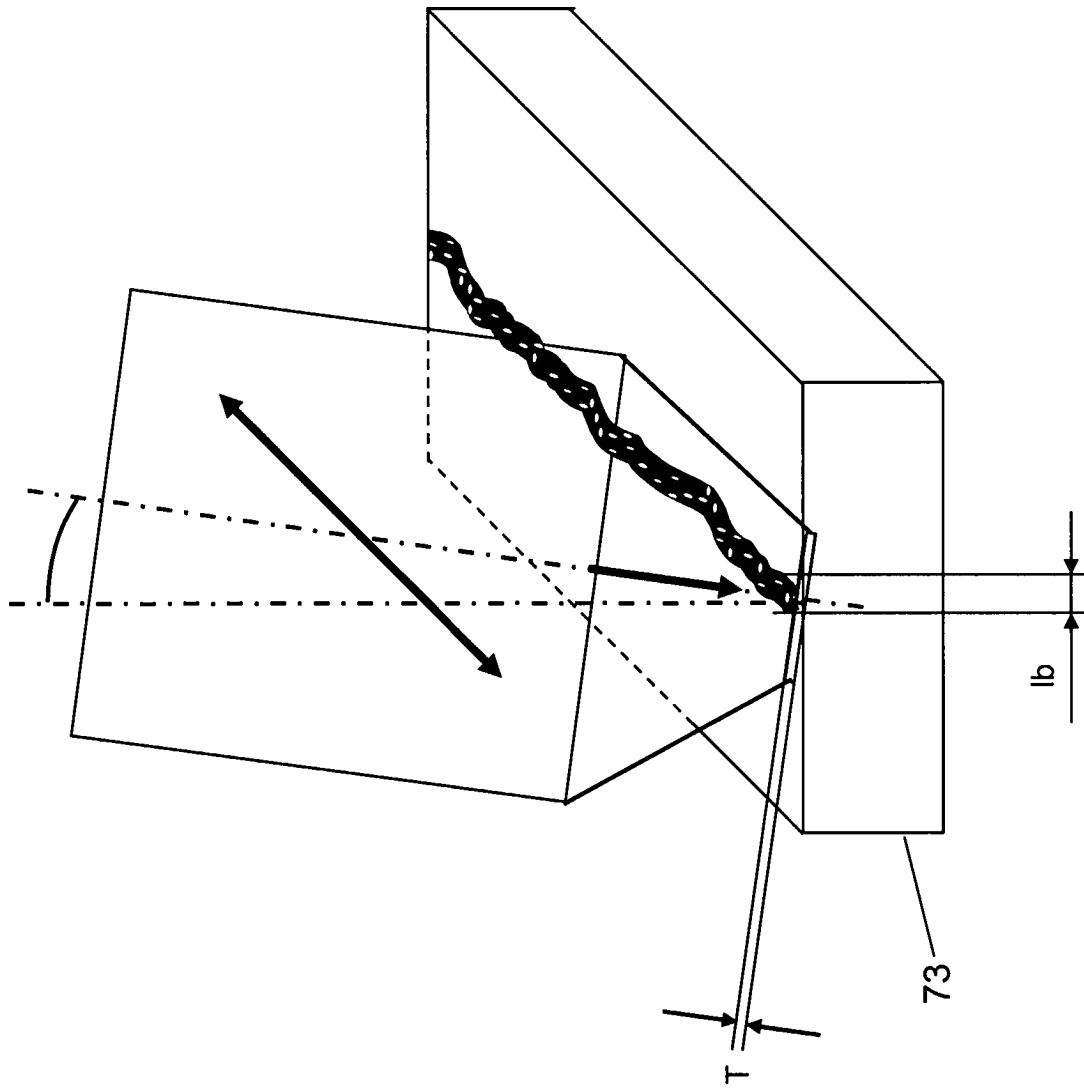


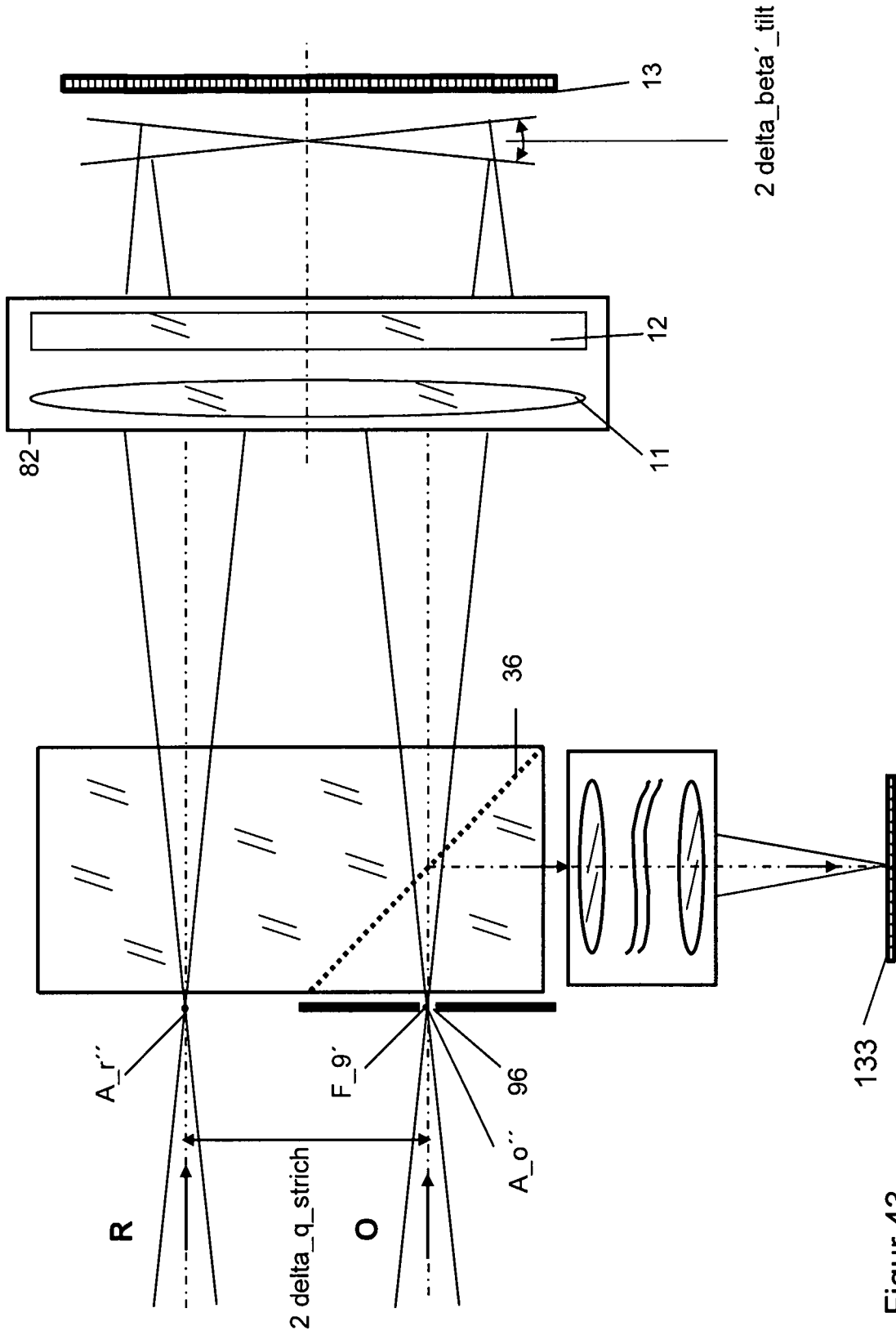
Figure 39

Figure 40

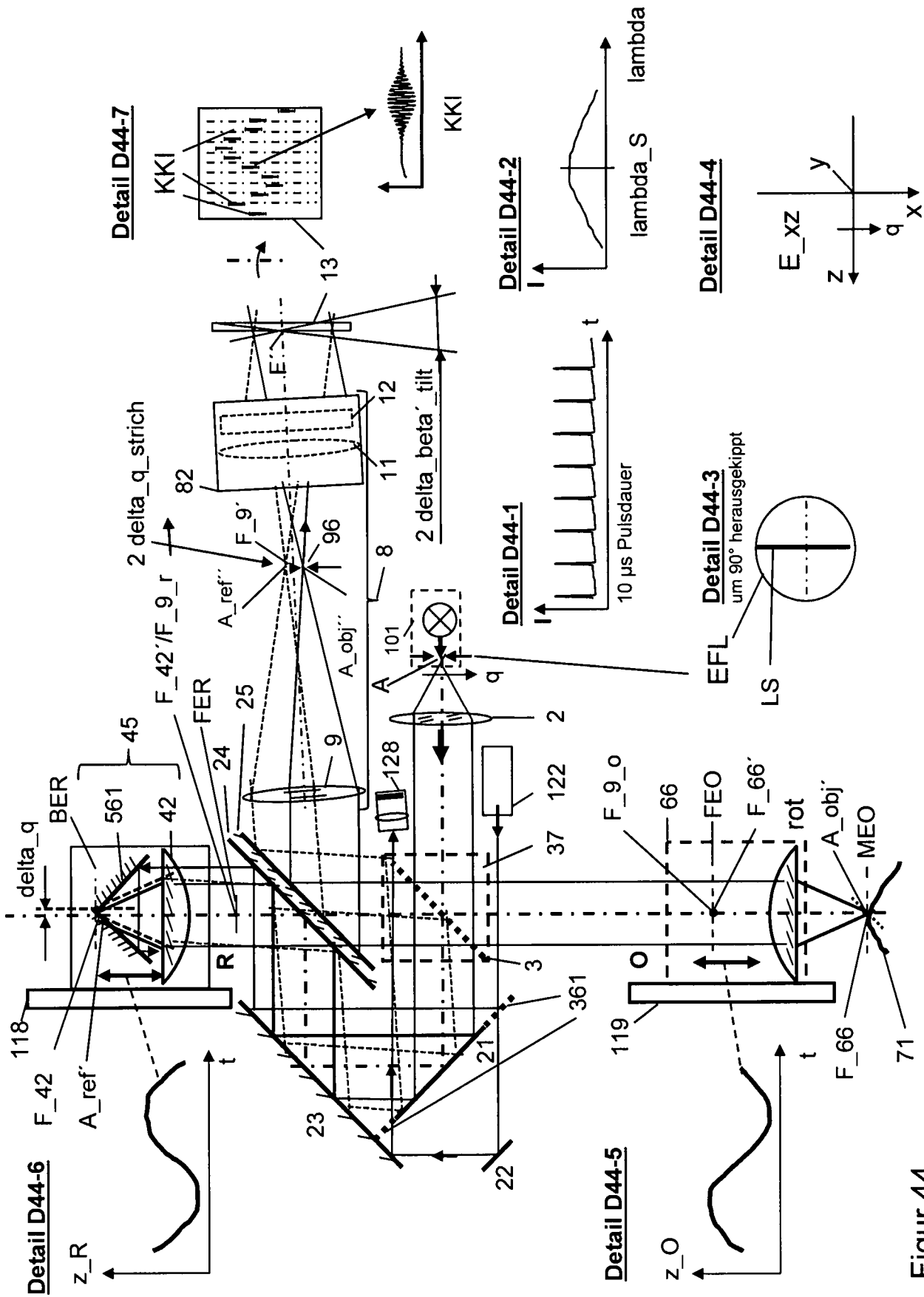




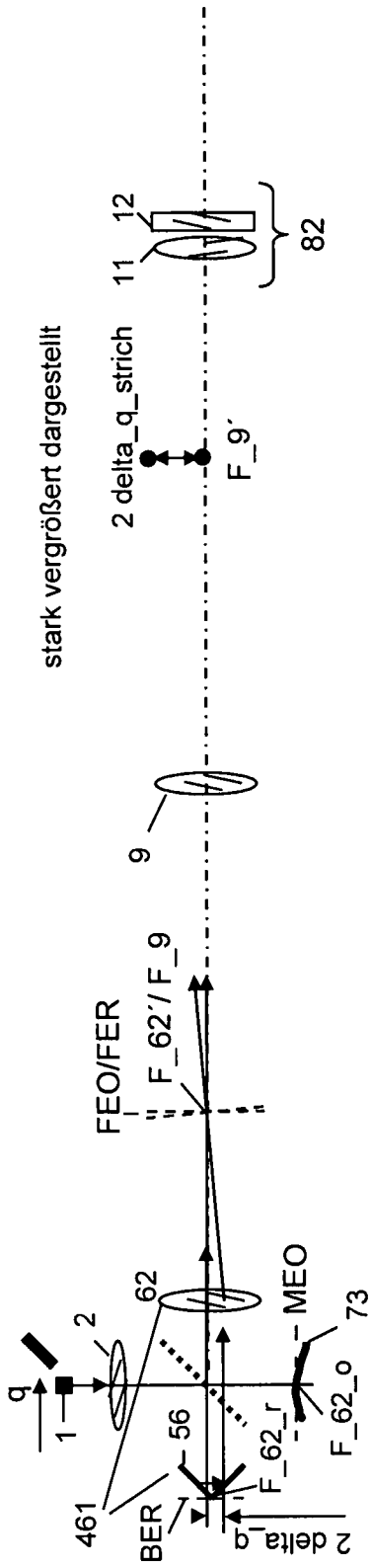
Figur 42



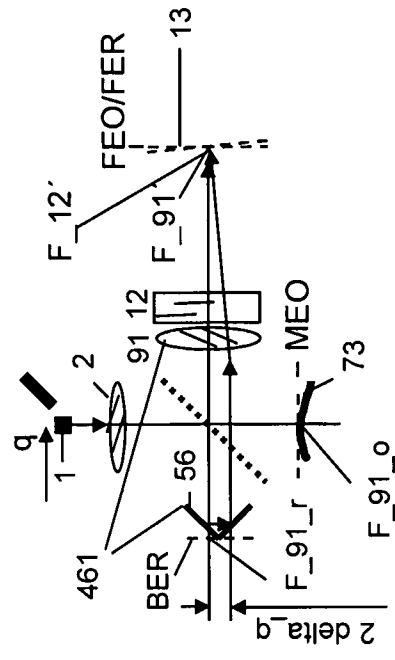
Figur 43



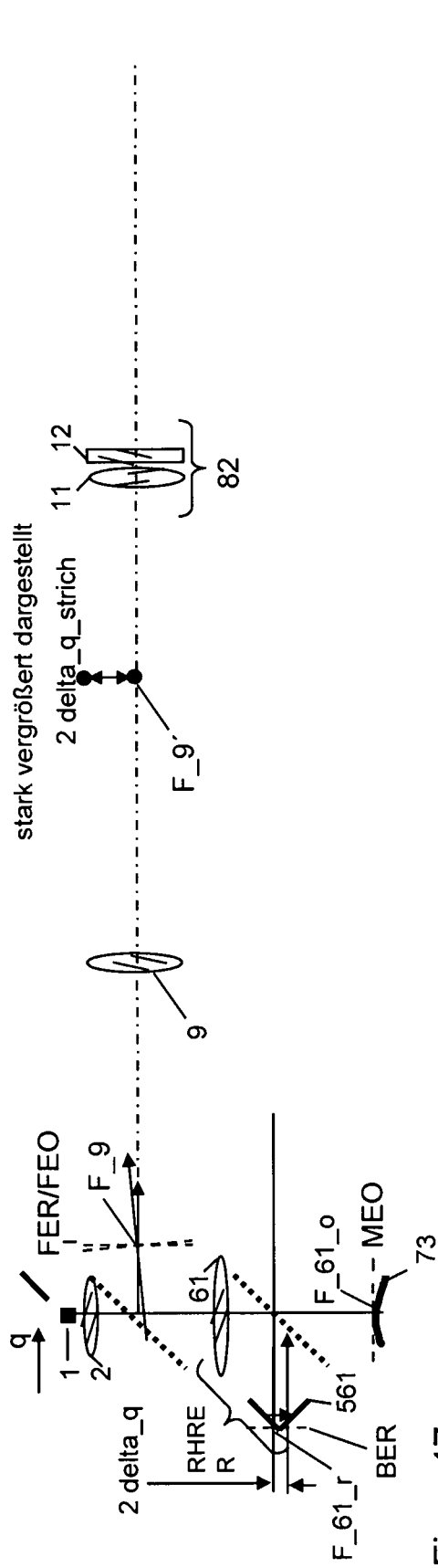
Figur 44



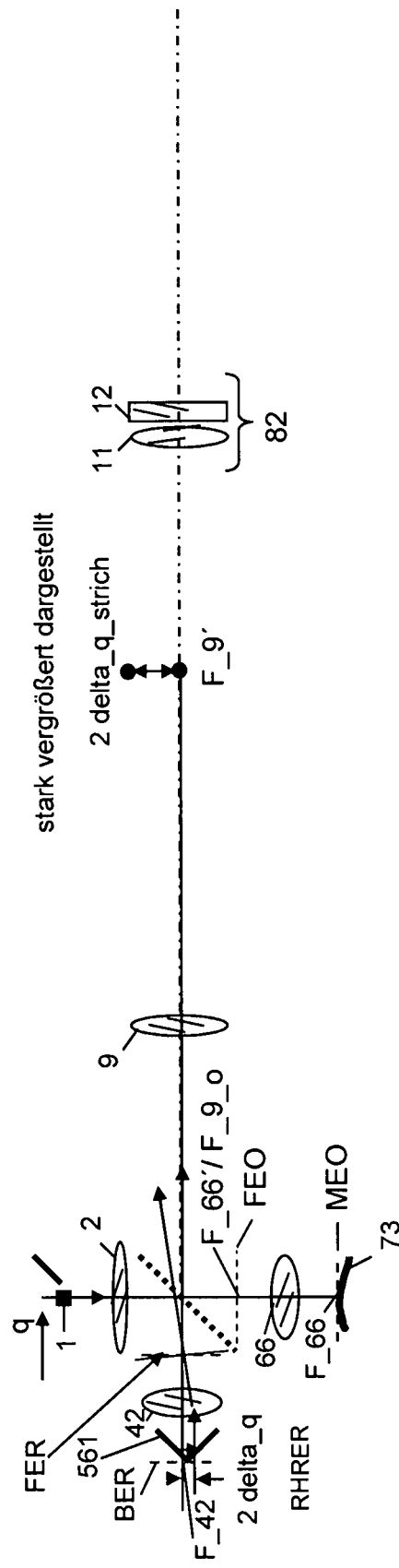
Figur 45



Figur 46

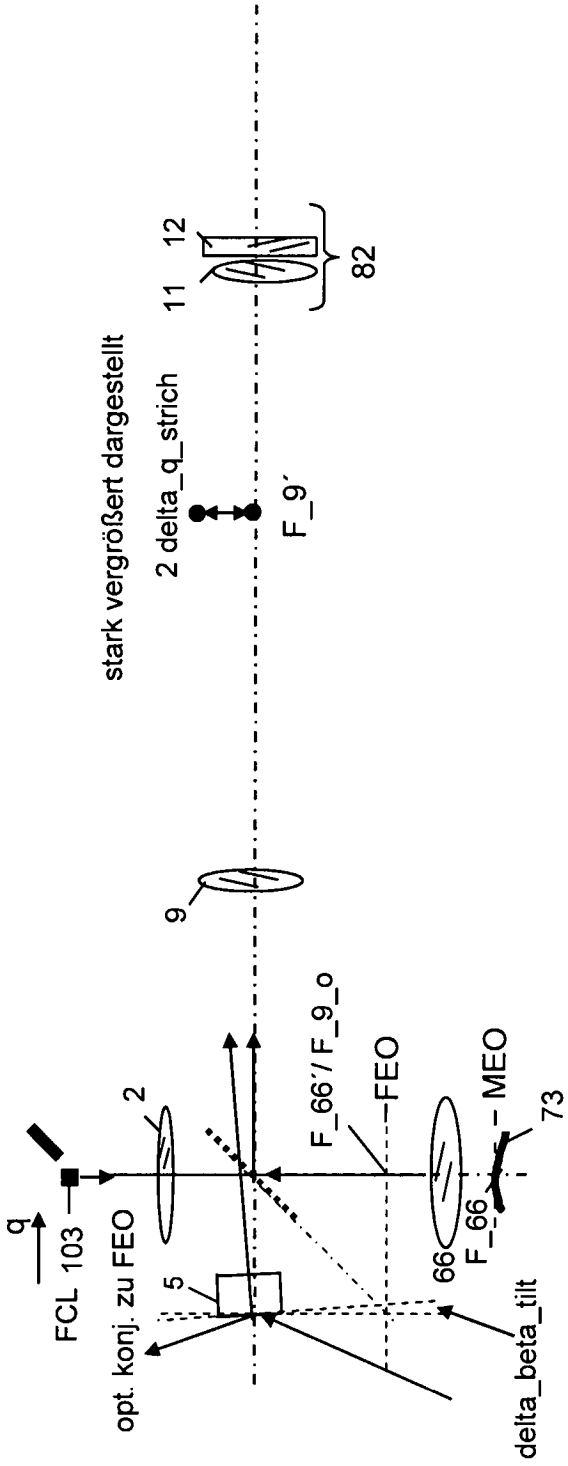


Figur 47

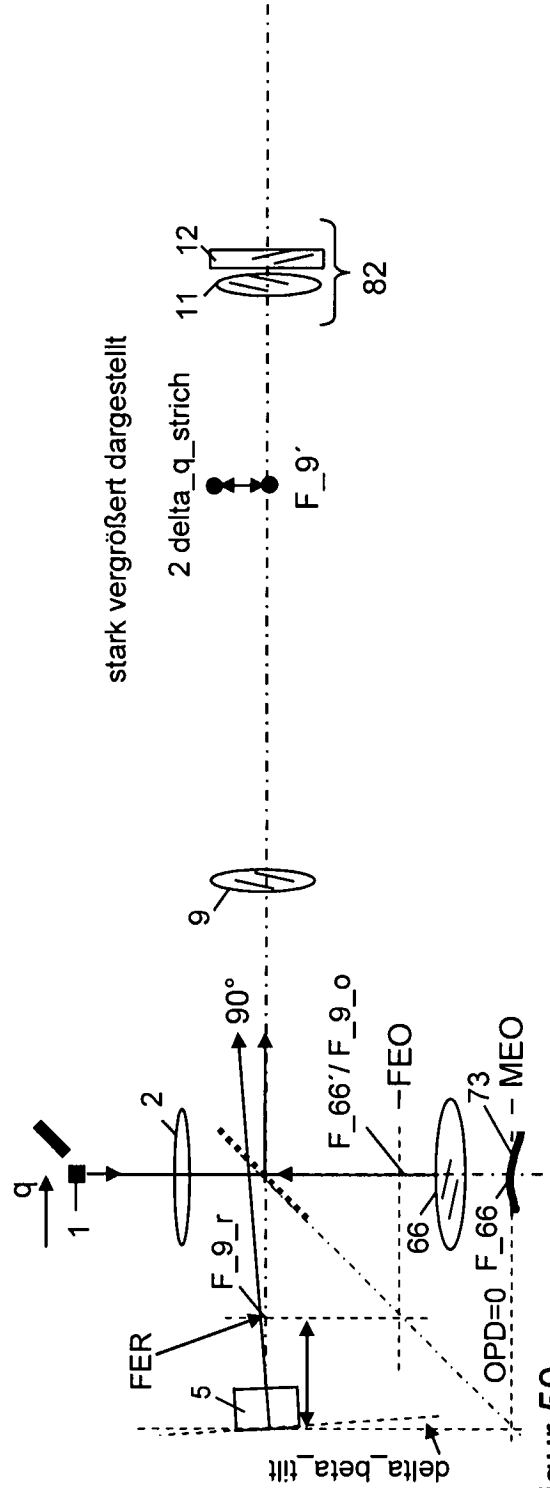


Figur 48

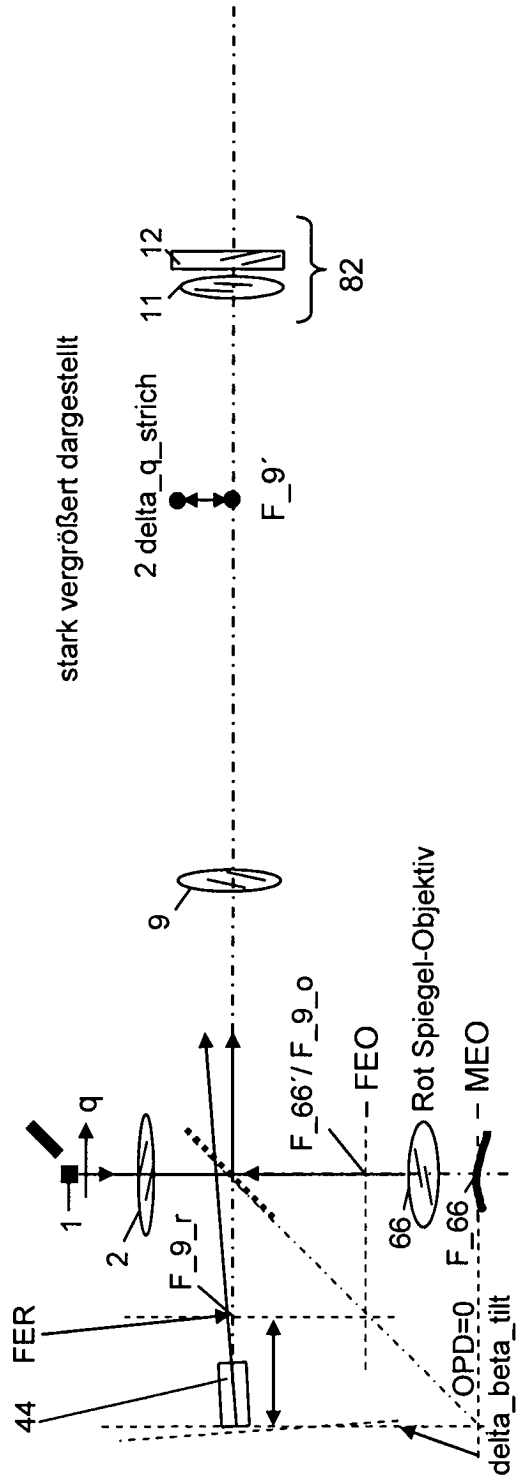




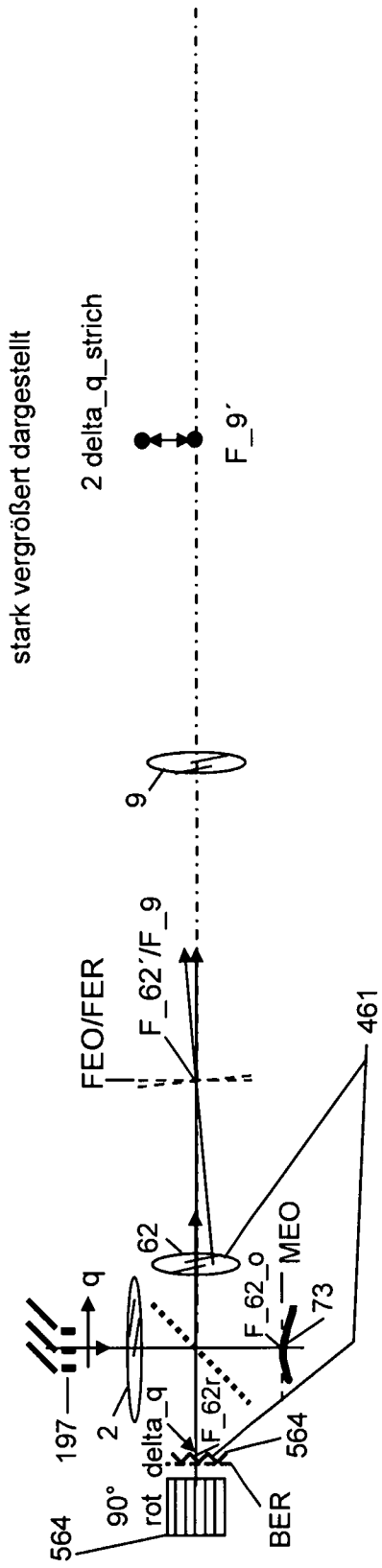
Figur 49



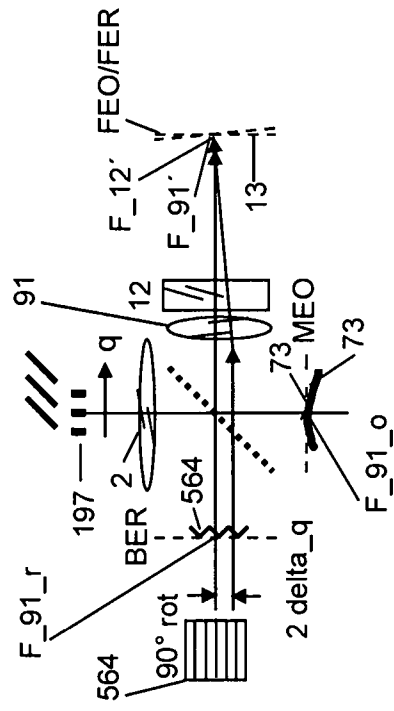
Figur 50



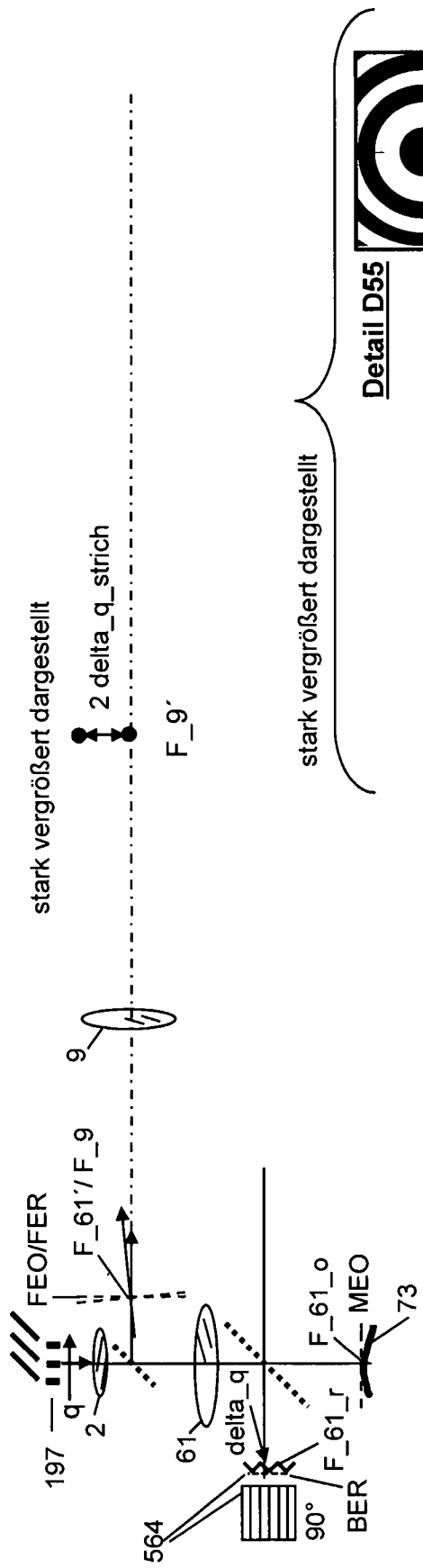
Figur 51



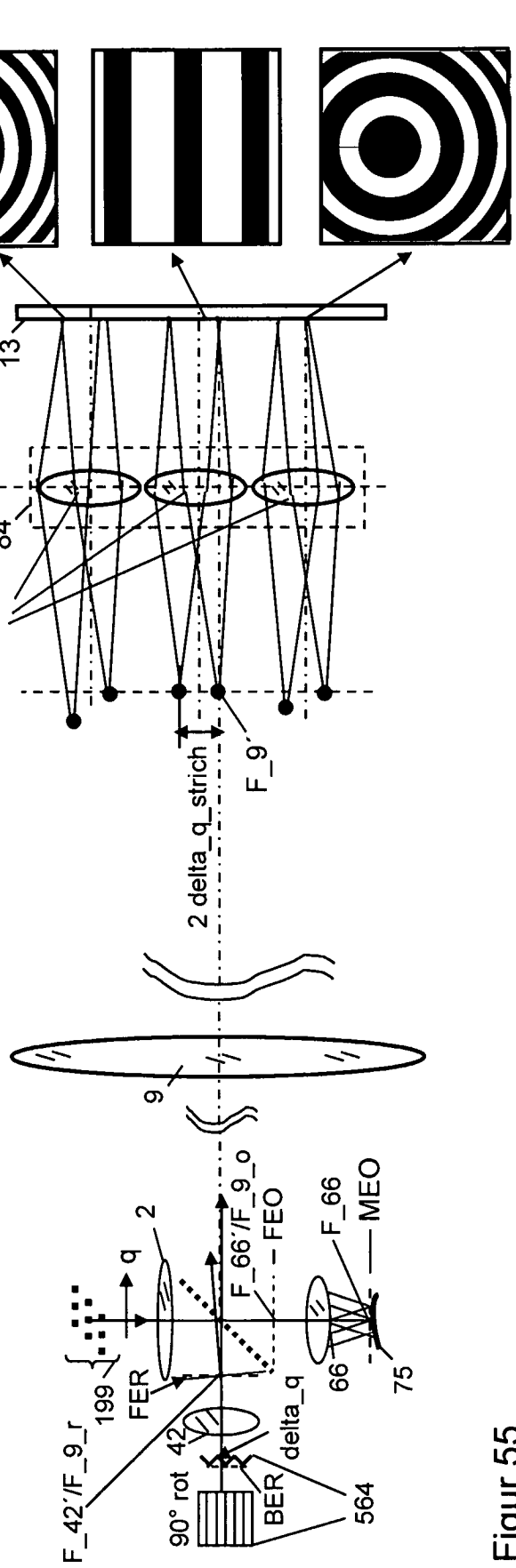
Figur 52



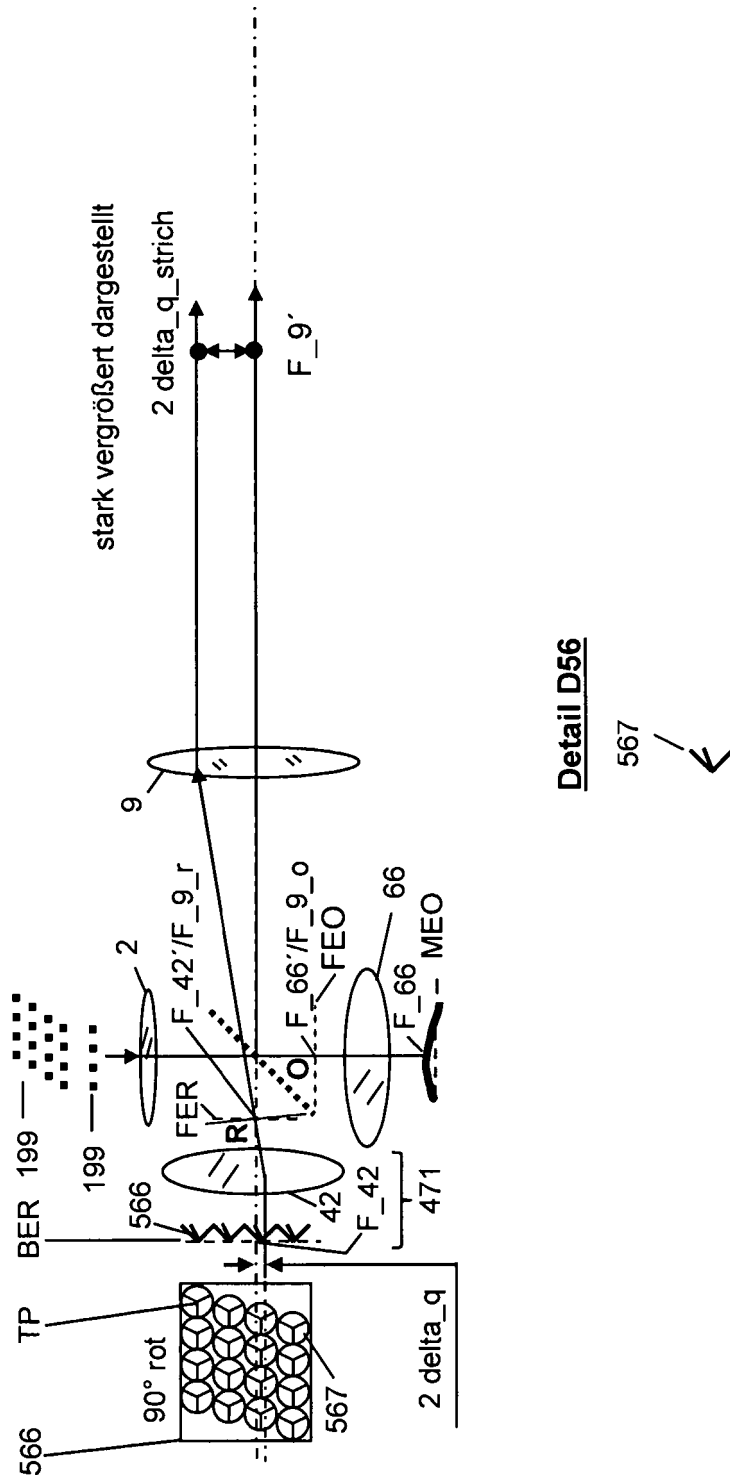
Figur 53



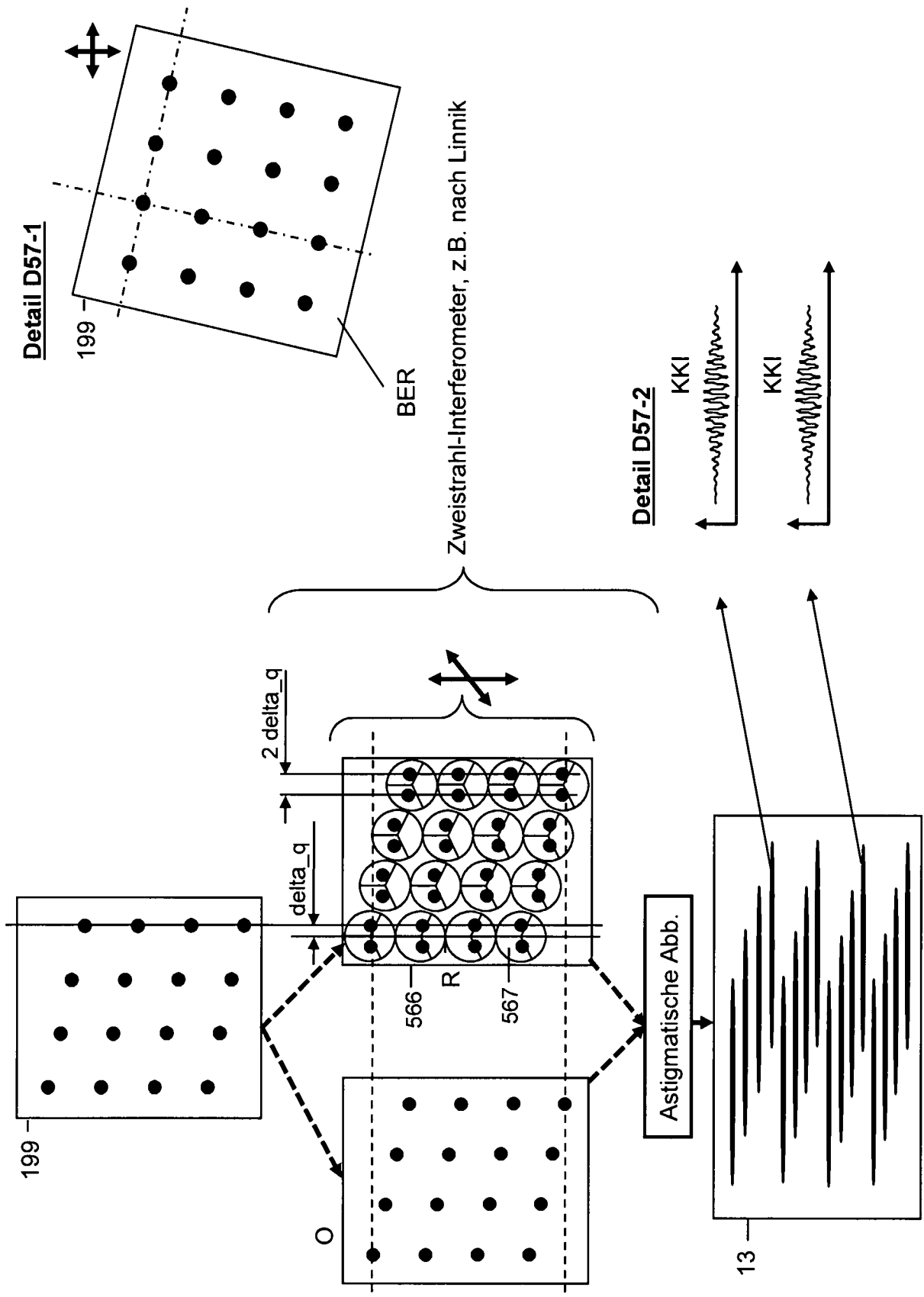
Figur 54



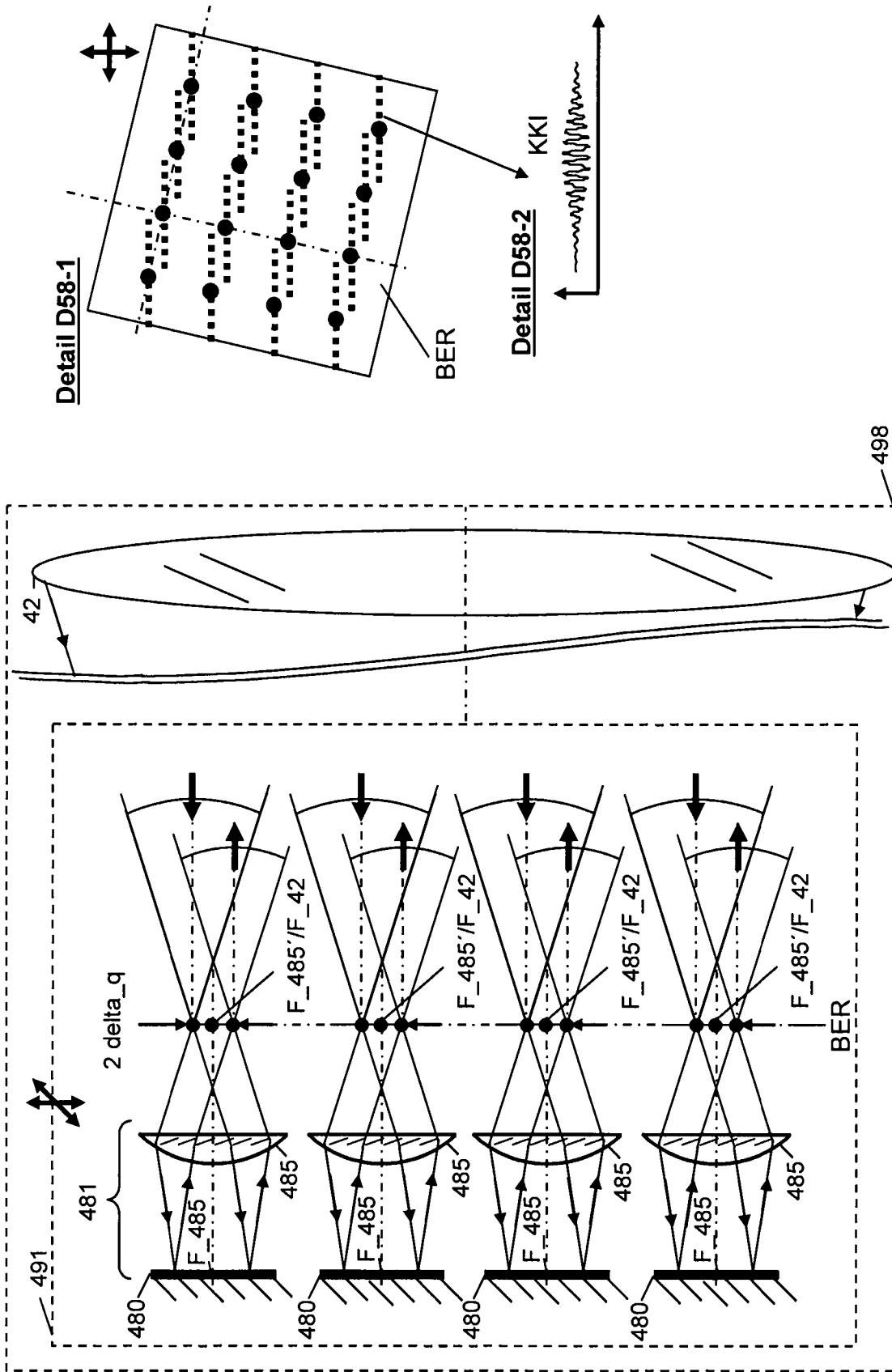
Figur 55



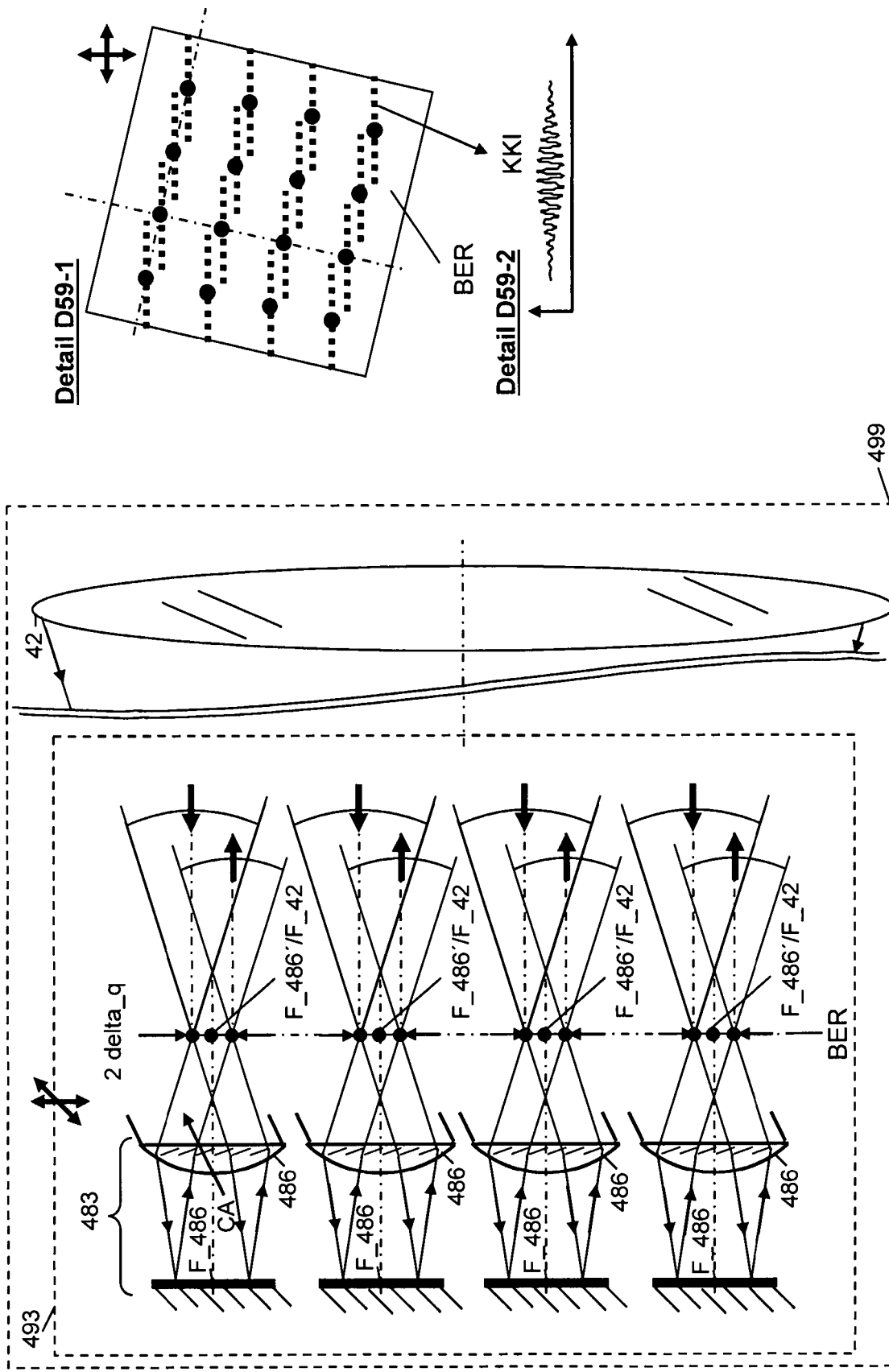
Figur 56



Figur 57

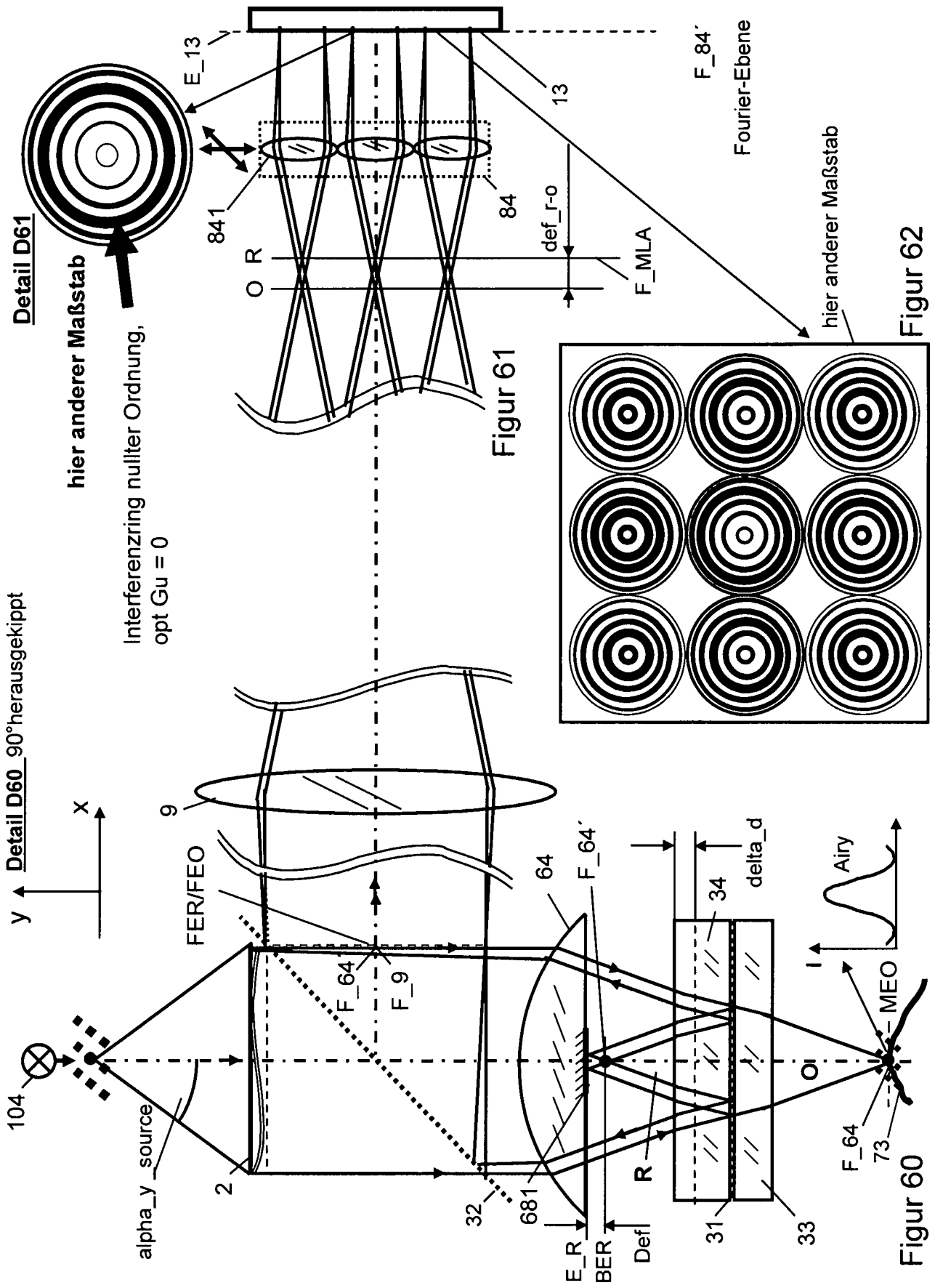


Figur 58



Figur 59

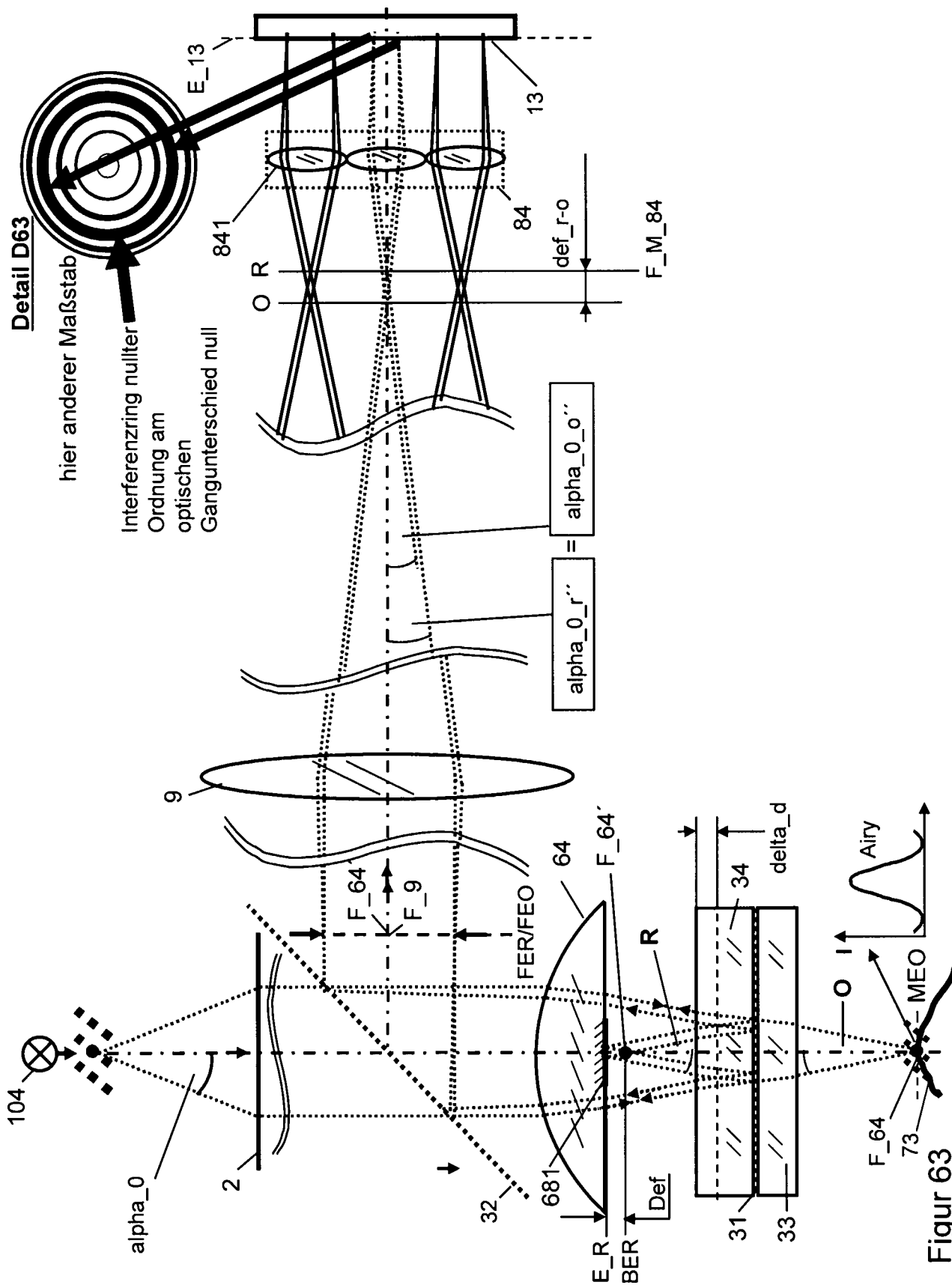




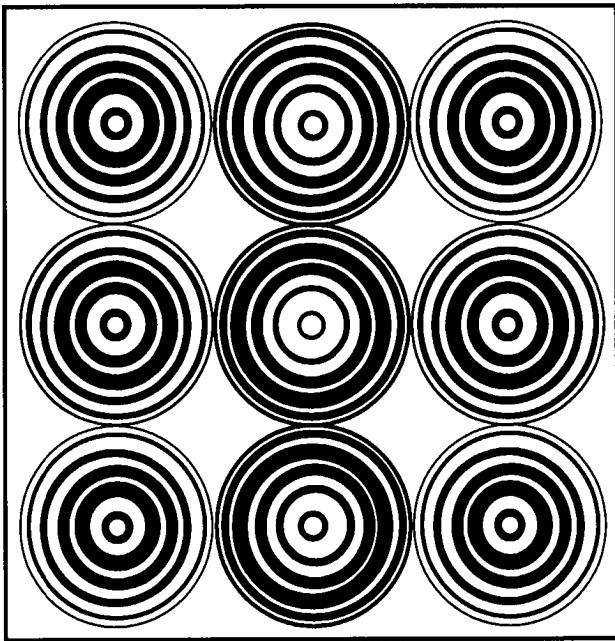
Figur 61

Figur 62

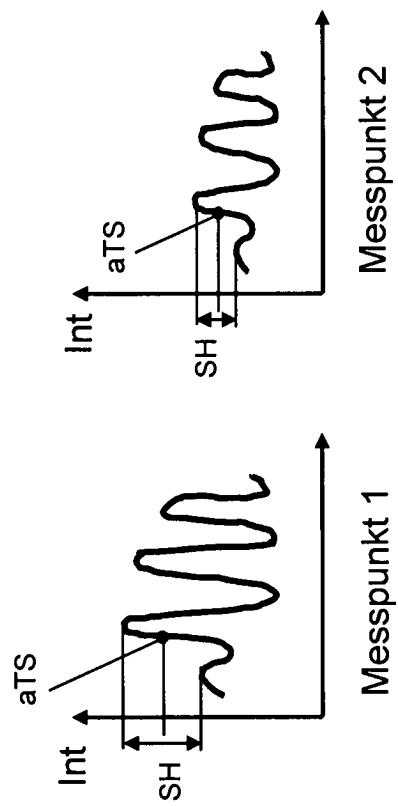
Figur 60



Figur 63

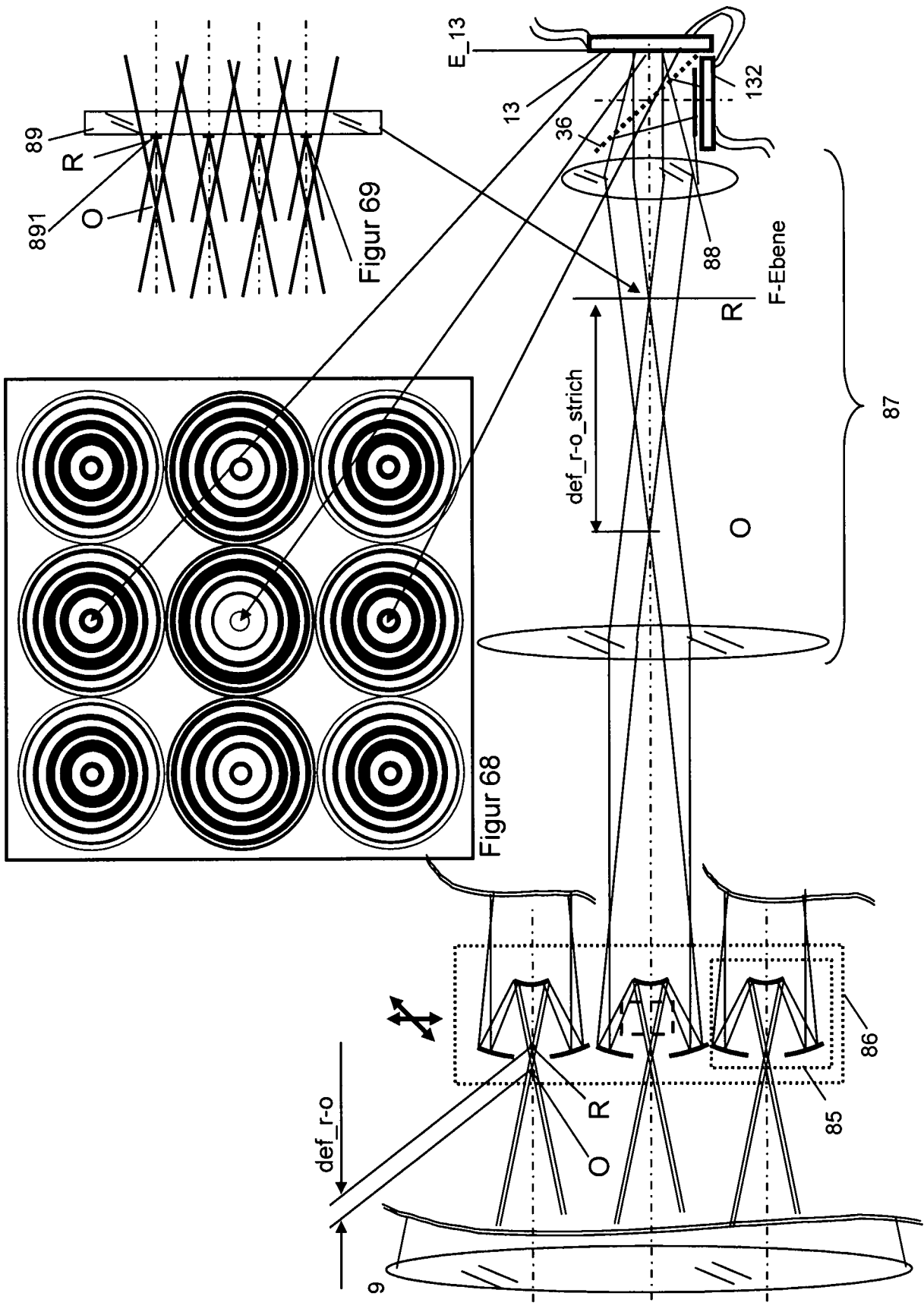


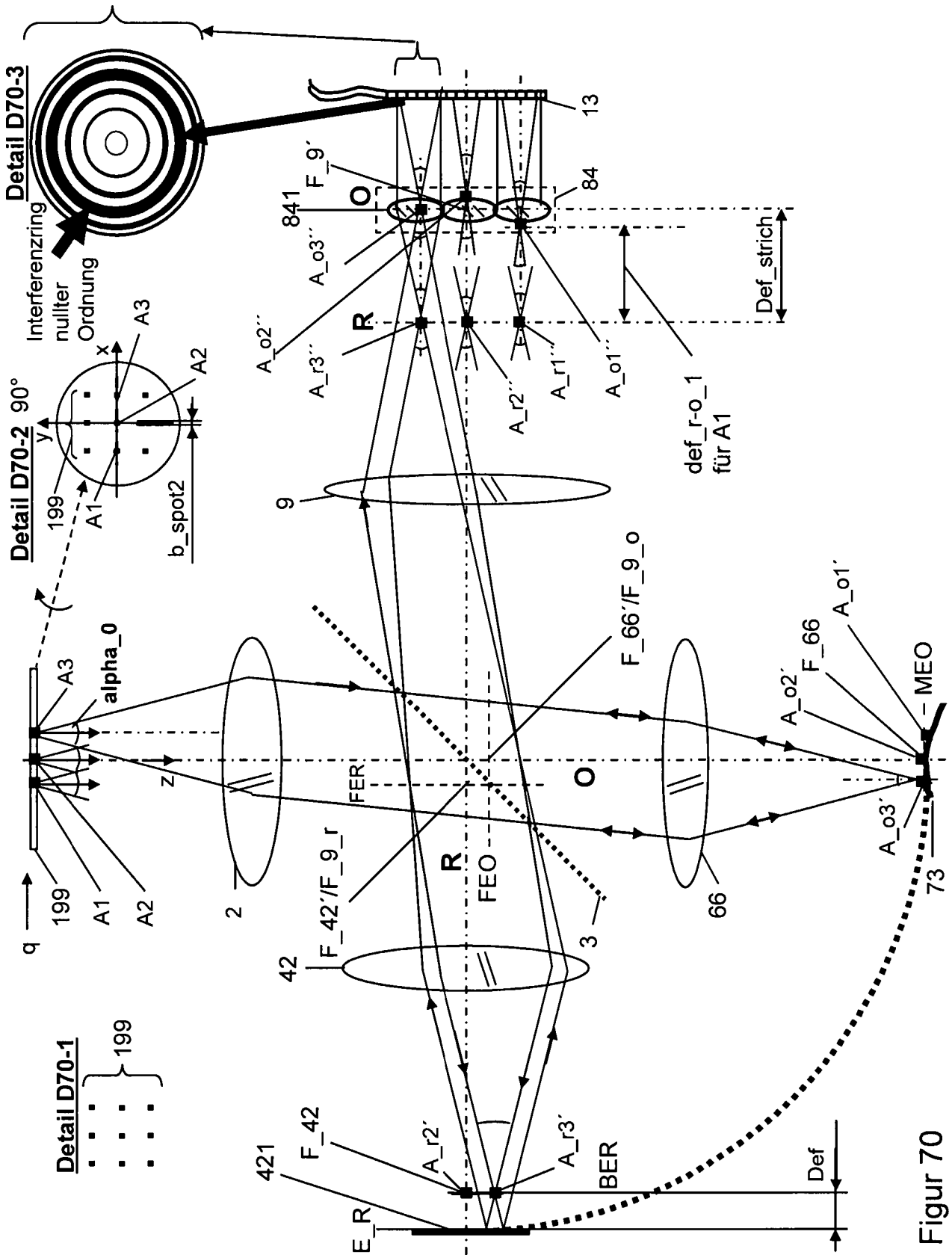
Figur 64



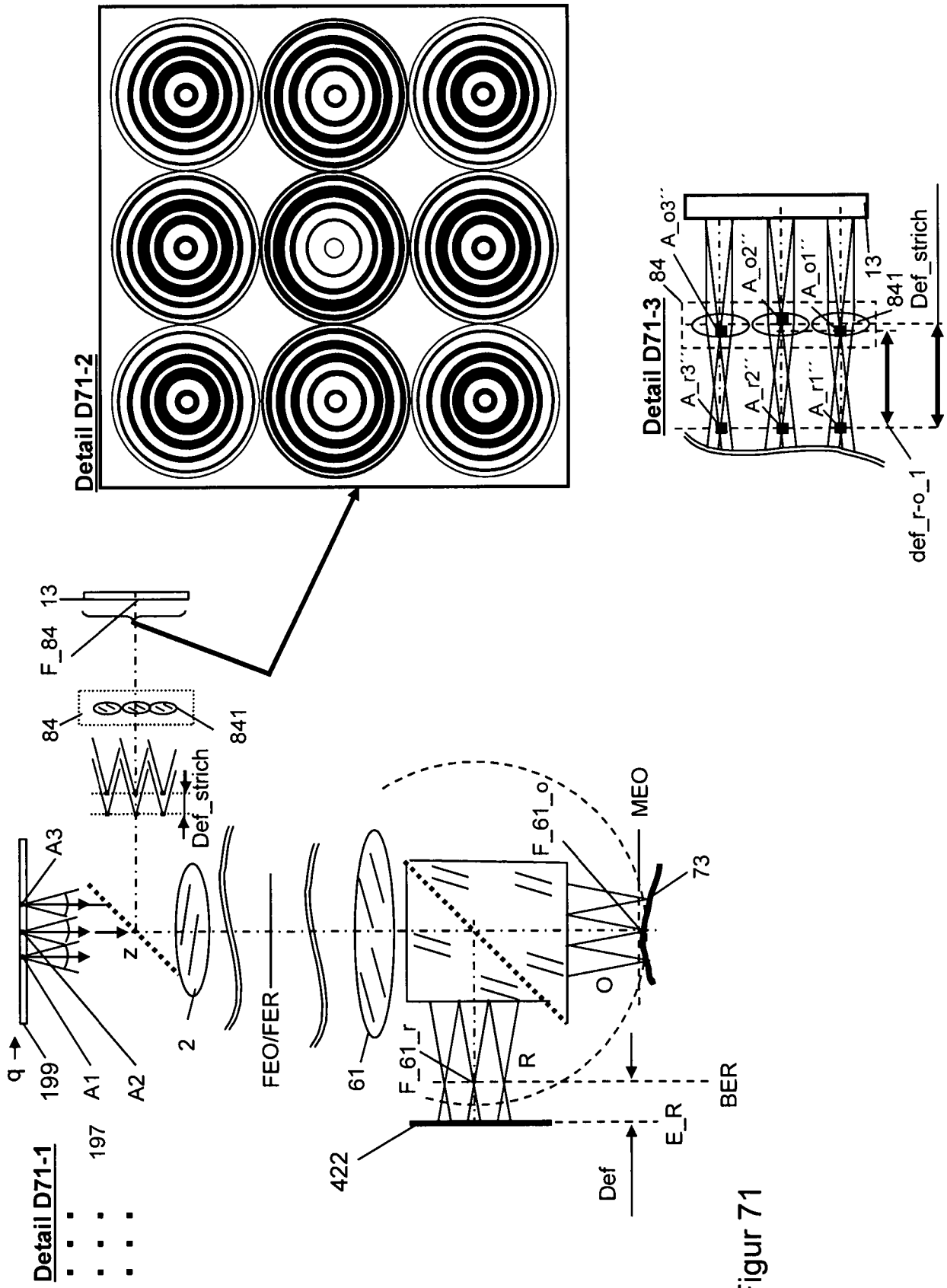
Figur 65

Figur 66

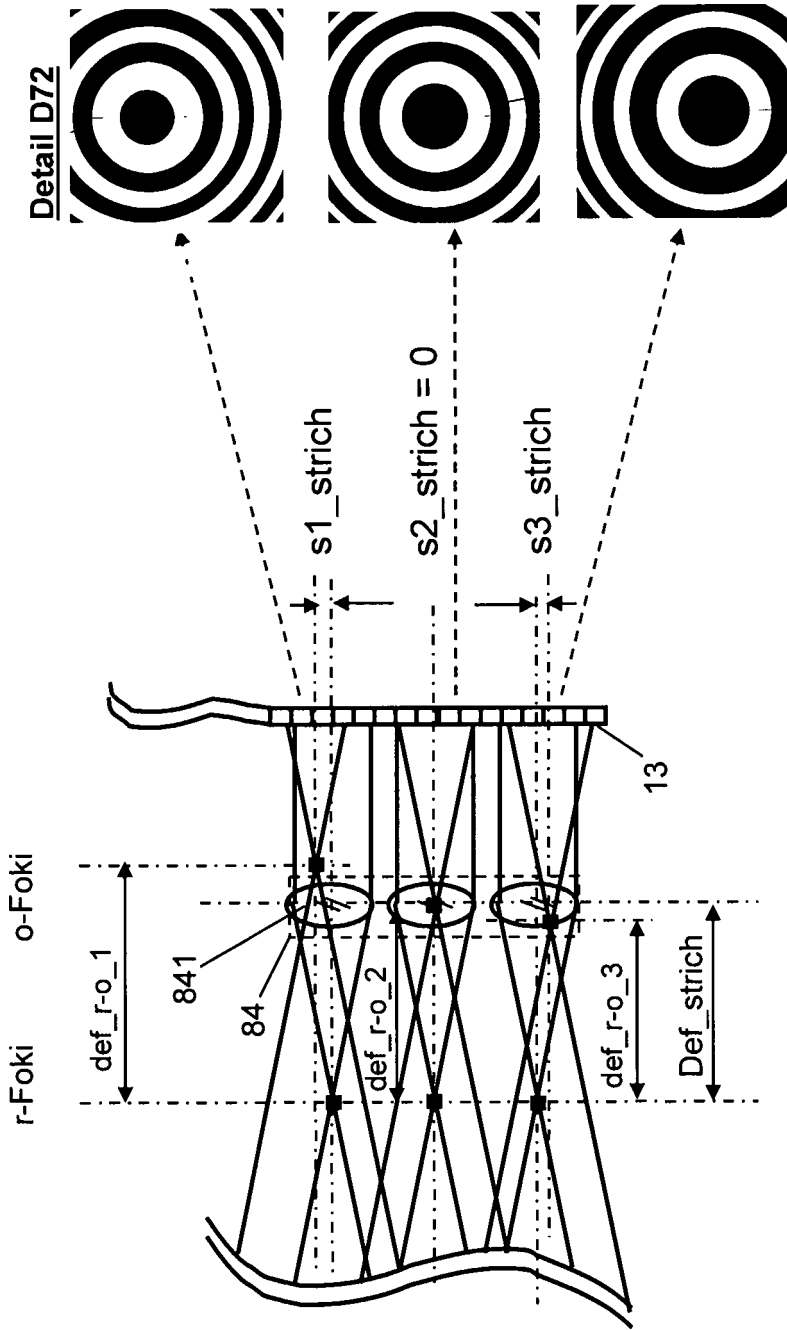




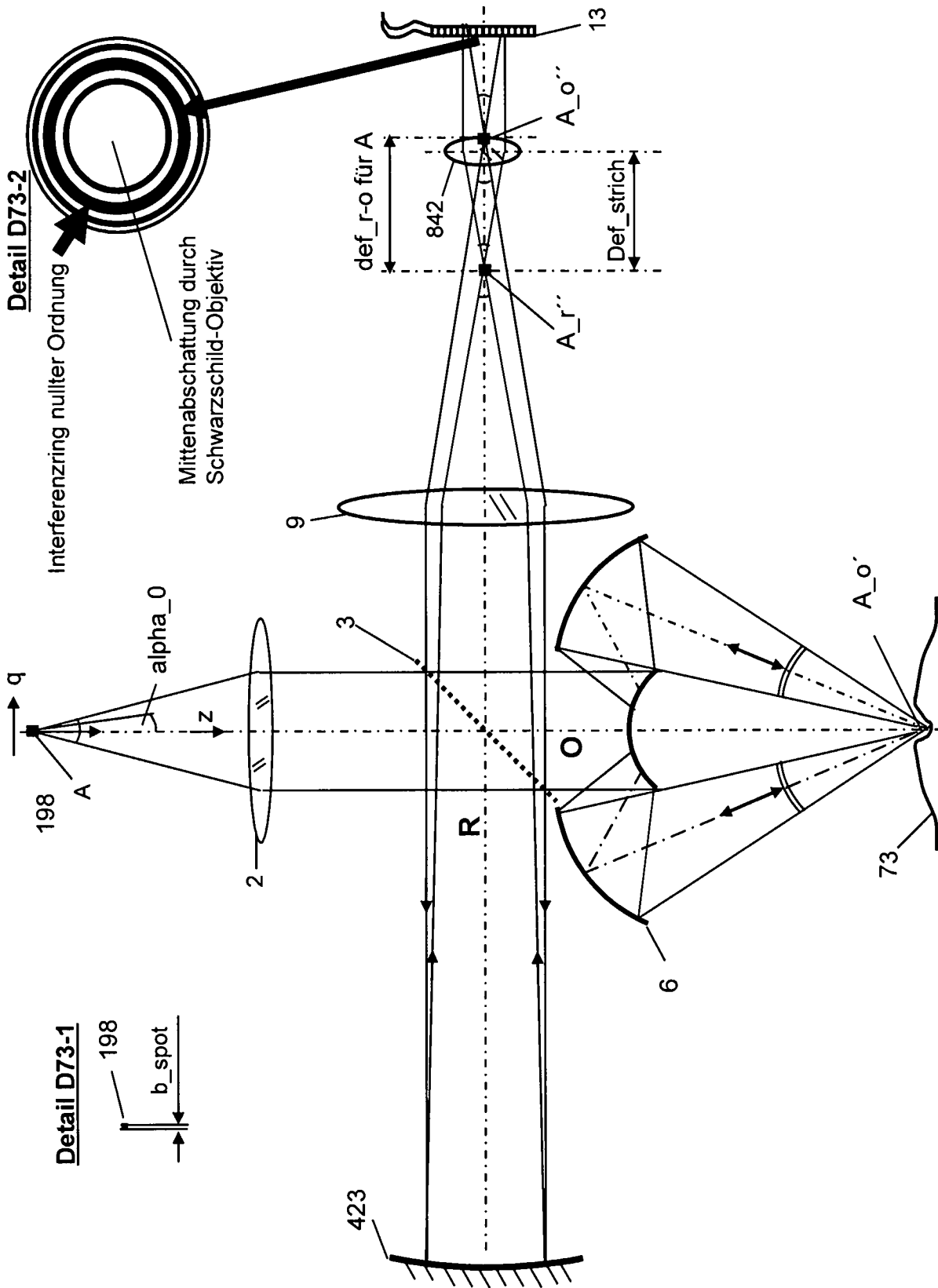
Figur 70



Figur 71

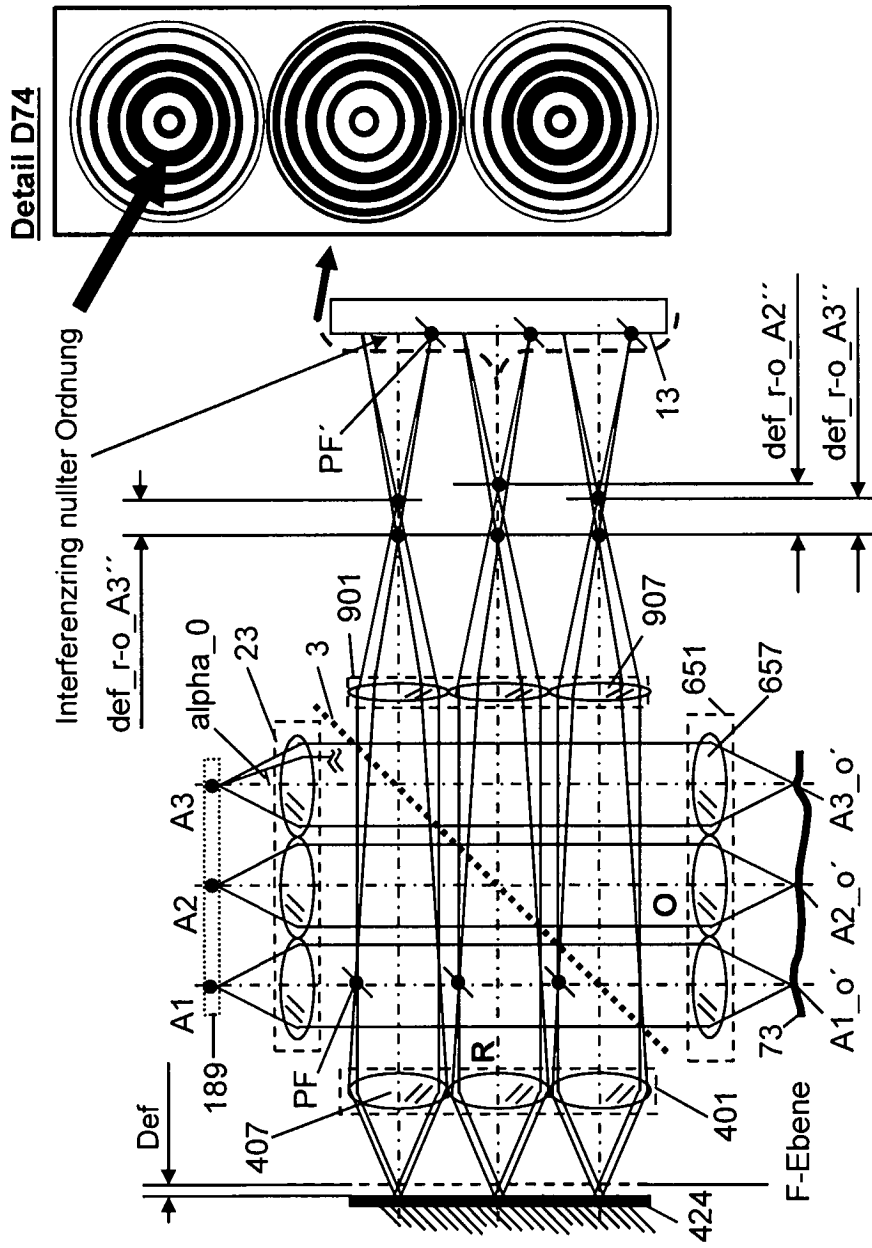


Figur 72

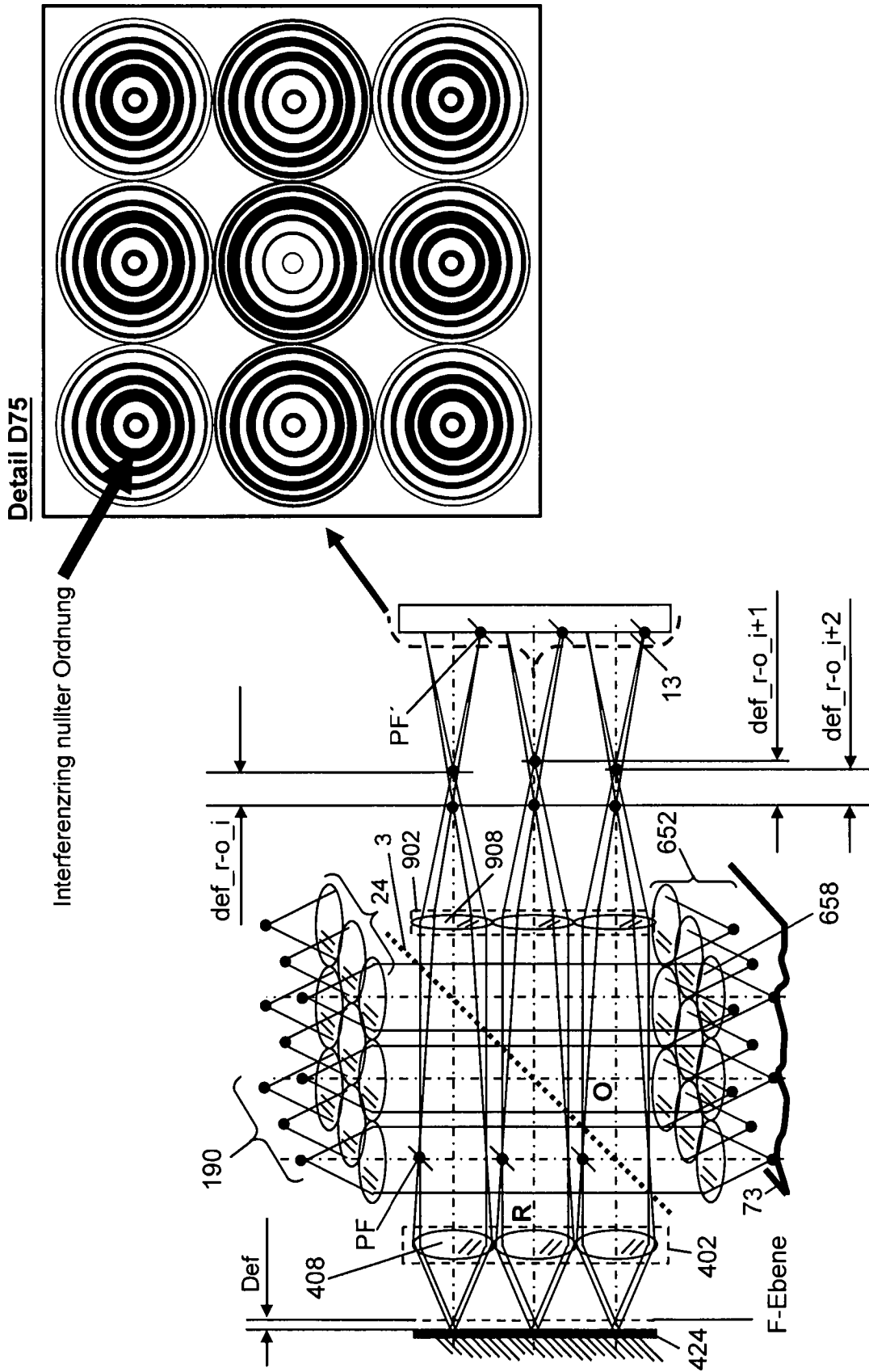


Figur 73





Figur 74



Figur 75

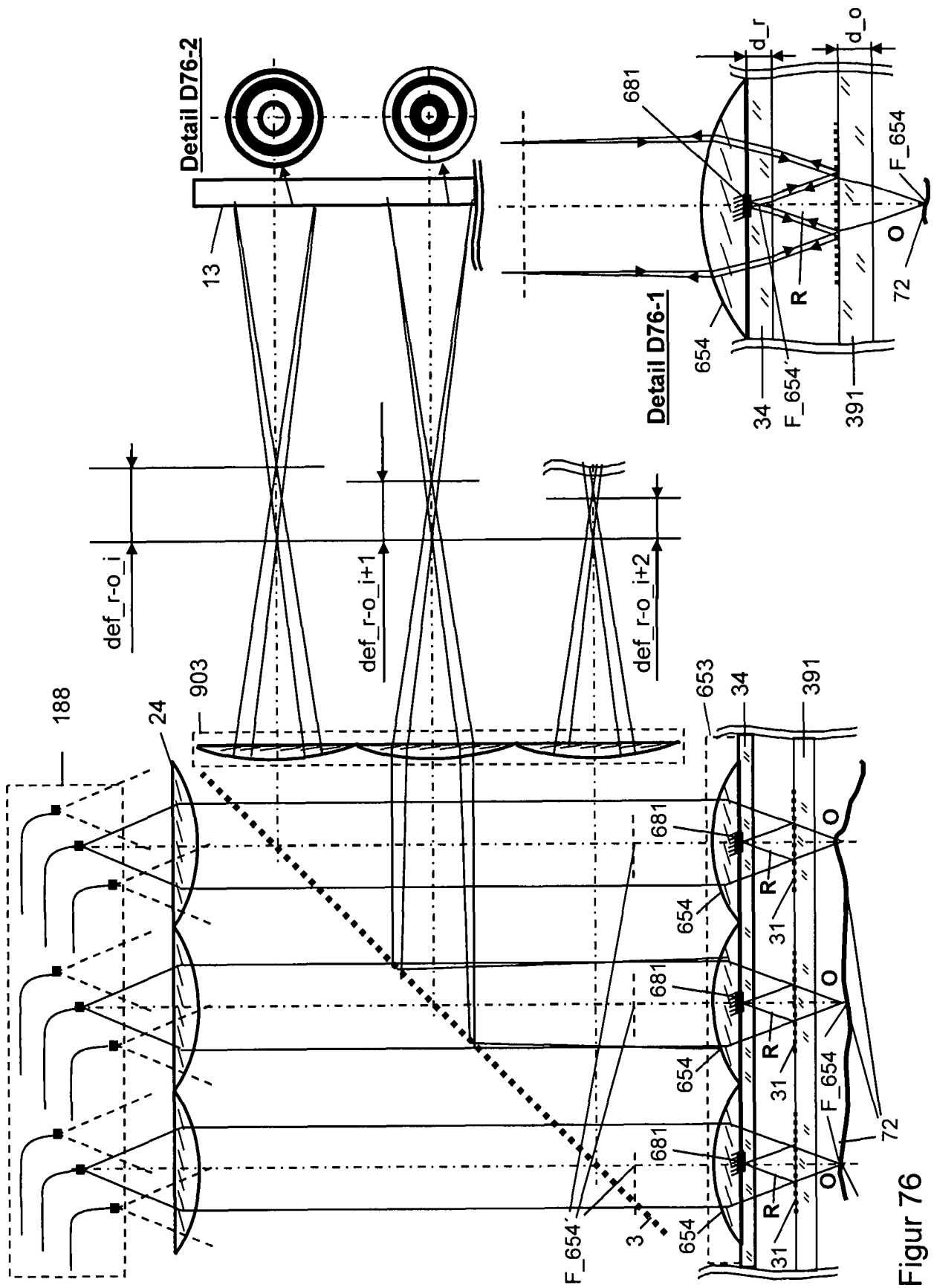


Figure 76