



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2019 203 560.4**  
 (22) Anmeldetag: **15.03.2019**  
 (43) Offenlegungstag: **17.09.2020**

(51) Int Cl.: **G02B 21/06** (2006.01)  
**G02B 13/14** (2006.01)  
**G02B 17/08** (2006.01)  
**G02B 21/04** (2006.01)  
**G02B 21/24** (2006.01)  
**G01J 3/45** (2006.01)  
**G01N 21/35** (2014.01)

(71) Anmelder:  
**BRUKER OPTIK GMBH, 76275 Ettlingen, DE**

(74) Vertreter:  
**Kohler Schmid Möbus Patentanwälte  
 Partnerschaftsgesellschaft mbB, 70563 Stuttgart,  
 DE**

(72) Erfinder:  
**Harig, Roland, Dr., 76337 Waldbronn, DE;  
 Lüttjohann, Stephan, Dr., 76149 Karlsruhe, DE**

(56) Ermittelte Stand der Technik:

DE	00002230002	C2
DE	197 04 598	C1
DE	10 2012 200 851	B3
US	7 378 657	B2
US	7 440 095	B2
JP	H03- 41 328	A

**Bruker Optics Inc.: HYPERION Series - FT-IR  
 Microscopes. Billerica, MA, USA, 2009 (BOPT-  
 091109-1). - Firmenschrift**

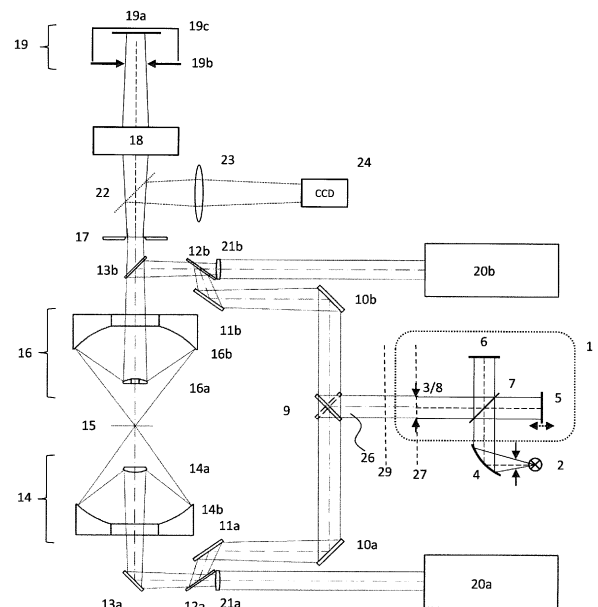
Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Der Inhalt dieser Schrift weicht von den am Anmeldetag eingereichten Unterlagen ab.

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

(54) Bezeichnung: **IR-Mikroskop**

(57) Zusammenfassung: Ein IR-Mikroskop mit einer IR-Lichtquelle (1) zur Erzeugung eines kollimierten IR-Eingangsstrahls (26), einem effektiv strahlbegrenzenden Element (8) in einer Blendenebene (27), einer Probenposition (15), einem IR-Detektor (19) mit einem IR-Sensor (19a), einer Detektorblende (19b), einer ersten optischen Einrichtung zum Fokussieren des kollimierten IR-Eingangsstrahls (26) auf die Probenposition (15), und einer zweiten optischen Einrichtung zur Abbildung der Probenposition (15) auf den IR-Sensor (19a), ist dadurch gekennzeichnet, dass sich das effektiv strahlbegrenzende Element (8) im kollimierten IR-Eingangsstrahl (26) befindet, und dass die erste optische Einrichtung und die zweite optische Einrichtung die Detektorblendenöffnung in eine Eingangsstrahlebene abbilden, wobei für die Fläche A1 des Bildes der Detektorblendenöffnung in der Eingangsstrahlebene und die Fläche A2 des Querschnitts des kollimierten IR-Eingangsstrahls (26) in der Eingangsstrahlebene gilt:  $0 < A1/A2 \leq 1$ . Mit dem erfindungsgemäßen IR Mikroskop kann sichergestellt werden, dass alle Sensorelemente eines Multi-Element-IR-Detektors nur Infrarotstrahlung aufnehmen, die aus der kollimierten IR-Quelle kommt. Gleichzeitig werden störende Effekte, wie Vignettierung und Streustrahlung vermieden.



## Beschreibung

### Hintergrund der Erfindung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein IR-Mikroskop mit einer IR-Lichtquelle zur Erzeugung eines kollimierten IR-Eingangsstrahls, einem effektiv strahlbegrenzenden Element in einer Blendenebene im kollimierten Eingangsstrahl, einer Probenposition zur Aufnahme einer Probe, einem IR-Detektor mit einem IR-Sensor, einer vor dem IR-Sensor angeordneten Detektorblende mit einer Detektorblendenöffnung, einer ersten optischen Einrichtung zum Fokussieren des aus der IR-Lichtquelle austretenden kollimierten IR-Eingangsstrahls auf die Probenposition, und einer zweiten optischen Einrichtung zur Abbildung der Probenposition auf den IR-Sensor, wobei die zweite optische Einrichtung ein Objektiv und eine Zwischenoptik umfasst.

**[0002]** Derartige IR Mikroskope sind beispielsweise bekannt aus [1], [2], [3], [4].

**[0003]** Mit Infrarot (IR) Mikroskopen können IR-Bilder und visuelle Bilder von einer zu untersuchenden Probe erzeugt werden, wobei die Messungen typischerweise sowohl in Transmission als auch in Reflexion erfolgen können. Hierzu können die Strahlengänge für infrarotes und sichtbares Licht zwischen Transmission und Reflexion umgeschaltet werden.

**[0004]** Die hier betrachteten IR Mikroskope machen es insbesondere möglich, mikroskopische Proben ortsaufgelöst spektral zu vermessen, d.h. man erhält für verschiedene Bereiche auf der mikroskopischen Probe ein Spektrum im infraroten Spektralbereich.

**[0005]** Das IR-Licht durchläuft hierzu ein Interferometer, bei dem durch eine Bewegung von einem oder mehreren Spiegeln die Länge der Interferometerarme zueinander variiert wird und dadurch das Infrarotlicht in Abhängigkeit von seiner Wellenlänge moduliert wird. Die Modulationsfrequenz ist dabei abhängig von der Wellenlänge, wobei jeder Wellenlänge eindeutig einer Modulationsfrequenz zugeordnet werden kann. Das so modulierte Infrarotlicht wird auf eine zu untersuchende Probe geleitet und das von der Probe ausgehende Licht wird über eine zweite optische Einrichtung auf einen Infrarotdetektor fokussiert.

**[0006]** Das vom Detektor empfangene modulierte Licht enthält alle spektralen Informationen der Probe. Der Detektor ist allerdings auch empfindlich auf IR-Licht aus der Umgebung, welches nicht moduliert ist. Gelangt dieses Licht auf den Detektor, trägt es nicht zum Informationsgewinn bei, es reduziert aber den dynamischen Bereich des Detektors.

**[0007]** Hinzu kommt ein weiterer Anteil von ungewünschtem Detektorsignal, der Dunkelstrom. Der Detektor wird daher im Allgemeinen gekühlt, damit Störsignale, die durch thermische Anregungen im Sensormaterial hervorgerufen werden können, möglichst klein gehalten werden. Der Detektor soll nach Möglichkeit nur Signale liefern, die durch die modulierte IR Strahlung hervorgerufen werden, welche von der Probe kommt.

**[0008]** Um Strahlung aus der Umgebung möglichst zu unterdrücken, enthält der Detektor eine Detektorblende.

**[0009]** Im Stand der Technik wird die Größe und Position der Detektorblende stets über die letzte Abbildungsoptik vor dem Detektor bestimmt. So wird in [3] beispielsweise die Detektorblende so dimensioniert, dass nur Strahlung von der vorgeschalteten Zwischenoptik durch die Detektorblende gelangen kann.

**[0010]** Bei Verwendung eines gekühlten IR Sensors, der von einem gekühlten Gehäuse (Strahlungsschild) umgeben ist, so dass Licht nur durch die ebenfalls gekühlte Detektorblende (Kaltblende) auf den Sensor gelangt, kann jedoch die Position und Größe der Detektorblende nicht beliebig dimensioniert werden, da sie innerhalb eines Dewars verbaut werden muss. Position und Größe der Detektorblende können damit im Allgemeinen nicht optimal auf die vorgeschaltete Zwischenoptik angepasst werden, sondern die vorangeschaltete Zwischenoptik muss so ausgelegt sein, dass die für die Messung gewünschte Strahlung durch die Detektorblende kommt, ungewünschte Strahlung (z.B. Umgebungsstrahlung) die Detektorblende aber nicht passieren kann. Die Zwischenoptik lenkt dazu die IR Strahlung in einem Konus mit dem halben Öffnungswinkel  $a/2$  Richtung Detektor und erzeugt ein Bild der Probenebene oder nachgeschalteter Zwischenbildebene der Probenebene auf dem IR Sensor. Das Verhältnis des Durchmessers der Eingangsapertur zum Abstand  $d$  der Detektorblende zum IR Sensor entspricht also der F-Zahl ( $F/\#$ ) der Zwischenoptik. Dieses Vorgehen ist durchaus geeignet für Einzelelementdetektoren, wie sie bspw. in [4] verwendet werden. Für ausgedehnte 1- oder 2-dimensionale Detektoren mit einer Vielzahl von Sensorelementen, wie sie bspw. in [1] und [3] verwendet werden, ist dieses Vorgehen aber nicht ausreichend: Die gekühlte Eingangsapertur kann zwar für den zentralen Bildpunkt auf dem Sensor gut eingestellt werden, Infrarotstrahlung, die zu Bildpunkten führt, die nicht zentral auf dem Sensor liegen, insbesondere an den Randbereichen, werden von der Detektorblende jedoch vignettiert. Wird nur die Detektorblende vergrößert, um die Vignettierung zu reduzieren, so gelangt auch Falschlicht, insbesondere Strahlung aus der ungekühlten Umgebung, welche kein Messsignal

enthält, auf den Sensor des Infrarotdetektors und verfälscht die Messungen.

**[0011]** [1] offenbart ein IR-Mikroskop mit einem Multi-Element-Detektor, bei dem die Detektorblende auf einen Spiegel des Cassegrain-Objektivs der zweiten optischen Einrichtung abgebildet wird. Der Spiegel des Cassegrain-Objektivs bildet dabei das strahlbegrenzende Element der Apparatur. Aufgrund von der Strahlbegrenzung durch den Spiegel der zweiten optischen Einrichtung kommt es jedoch zu Streustrahlung an den Kanten des Spiegels, was die Qualität der Messung negativ beeinflusst.

#### Aufgabe der Erfindung

**[0012]** Es ist Aufgabe der Erfindung ein IR Mikroskop mit einem Multi-Element-IR-Detektor vorzuschlagen, bei dem alle Sensorelemente (Pixel) des IR Detektors nur modulierte Infrarotstrahlung aufnehmen, die aus der einer kollimierten IR-Quelle kommt und einen vom Benutzer definierten Bereich in der Probenebene ausleuchtet. Gleichzeitig sollen störende Effekte, wie Vignettierung und Streustrahlung vermieden werden.

#### Beschreibung der Erfindung

**[0013]** Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch ein IR Mikroskop gemäß Anspruch 1.

**[0014]** Gemäß der Erfindung befindet sich das effektiv strahlbegrenzende Element im kollimierten IR-Eingangsstrahl vor Eintritt in die erste optische Einrichtung. Erfindungsgemäß bilden die erste und die zweite optische Einrichtung die Detektorblendenöffnung der Detektorblende in eine Eingangsstrahlebene ab, wobei für die Fläche A1 des Bildes der Detektorblendenöffnung in der Eingangsstrahlebene und die Fläche A2 des Querschnitts des kollimierten IR-Eingangsstrahls in der Eingangsstrahlebene gilt:  $0 < A1/A2 \leq 1$ .

**[0015]** „Effektiv strahlbegrenzend“ ist ein Element, wenn innerhalb der Vorrichtung kein weiteres Element existiert, das den Querschnitt des IR-Strahls stärker begrenzt als das effektiv strahlbegrenzende Element. Das effektiv strahlbegrenzende Element definiert die Blendenebene (senkrecht zur optischen Achse der IR-Strahlung). Die Blendenebene befindet sich also am Ort der Strahlbegrenzung durch das effektiv strahlbegrenzende Element, z.B. am Ort einer effektiv strahlbegrenzenden Blende oder eines effektiv strahlbegrenzenden Spiegels.

**[0016]** Als IR-Eingangsstrahl wird das Licht der IR-Lichtquelle vor Eintritt in die erste optische Einrichtung bezeichnet. In dem Bereich, in dem der IR-Eingangsstrahl kollimiert ist, weist er vorzugsweise eine Divergenz von weniger als  $2^\circ$  auf.

**[0017]** Durch die erfindungsgemäße Begrenzung des Verhältnisses von Detektorblendenöffnung und Querschnitt des IR-Eingangsstrahls in der Eingangsstrahlebene wird vermieden, dass Licht aus den Außenbereichen (bspw. aufgrund von thermischer Strahlung aus der Umgebung), in den Detektor gelangt. Es wird also sichergestellt, dass ausschließlich Infrarotlicht, welches das strahlbegrenzende Element verlässt und einen definierten Bereich in der Probenebene ausleuchtet, auf den Detektor gelangt und alle Bildpunkte auf dem Detektor gleichermaßen, ohne Vignettierung ausgeleuchtet werden. Dabei ist die Angabe  $A1/A2 \leq 1$  so zu verstehen, dass kleine Abweichungen davon, die das Ergebnis der Messung nicht wesentlich beeinträchtigen als unter dieser Bedingung mitumfasst zu verstehen sind. Wesentlich beeinträchtigt ist die Messung beispielsweise, wenn das für die Messung zur Verfügung stehende Nutzsignal auf unter 70% des Nutzsignals mit der optimalen Einstellung fallen würde. In diesem Fall müsste die Messzeit schon mindestens verdoppelt werden, um ein vergleichbares Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu erlangen ( $70\% \times \sqrt{2} = 99\%$ ) wie mit der optimalen Einstellung.

**[0018]** Bei der Verwendung von konventionellen IR-Strahlungsquellen, wird vorzugsweise ein IR-Mikroskop verwendet, bei dem  $A1/A2 = 1$  gilt. Hierdurch wird einerseits vermieden, dass Umgebungslicht in den Detektor tritt und andererseits wird eine maximale Lichtausbeute gewährleistet. Dies ist die optimale Einstellung, wenn der Detektor nicht durch die Strahlungsquelle gesättigt wird. Es kann jedoch auch vorteilhaft sein, ein Verhältnis von  $A1/A2 < 1$  vorzusehen, insbesondere wenn eine sehr lichtstarke Strahlungsquelle (z.B. QC-Laser) verwendet wird, da hier bei Verwendung einer zu großen Detektorblendenöffnung die Gefahr besteht, dass der Detektor in Sättigung betrieben wird. Darüber hinaus sieht die Erfindung vor, dass sich das effektiv strahlbegrenzende Element sowie die Eingangsstrahlebene im kollimierten IR-Eingangsstrahl (also vor Eintritt in die erste optische Einrichtung) befinden. Der auf die Detektorblende abzubildende relevante Strahlquerschnitt wird also nicht durch die Zwischenoptik, sondern bereits vor der ersten optischen Einrichtung definiert. Dadurch, dass sich das strahlbegrenzende Element im kollimierten Eingangsstrahl befindet, also innerhalb eines Strahls, der nur eine sehr geringe Divergenz aufweist, besteht eine gewisse Flexibilität betreffend die Position der Eingangsstrahlebene, auf die die Detektorblende abgebildet wird, relativ zum effektiv strahlbegrenzenden Element. Darüber hinaus wird dadurch, dass sich das effektiv strahlbegrenzende Element im kollimierten Eingangsstrahl befindet, der Einfluss von an den Rändern des effektiv strahlbegrenzenden Elements auftretenden Streueffekte minimiert werden.

**[0019]** Vorzugsweise befindet sich die Eingangsstrahlebene im effektiv begrenzten Eingangsstrahl, also in der Blendenebene oder zwischen Blendenebene und erster optischer Einrichtung.

**[0020]** Wenn das Mikroskop in Transmission verwendet werden soll, umfasst die erste optische Einrichtung ein weiteres Objektiv (Kondensor) zum Fokussieren des IR-Eingangsstrahls auf die Probenposition. D.h. das Objektiv zum Fokussieren des IR-Eingangsstrahls auf die Probenposition ist nicht dasselbe Objektiv wie das zum Abbilden der Probenposition nach Bestrahlung der Probe.

**[0021]** Für eine Verwendung des IR Mikroskops in Reflexion umfasst die erste optische Einrichtung das Objektiv, das dazu eingerichtet ist, den IR-Eingangsstrahl auf die Probenposition zu fokussieren, und eine Strahlteileroptik, die dazu eingerichtet ist, den von der IR-Lichtquelle ausgehenden IR-Eingangsstrahl in das Objektiv einzukoppeln. Das Objektiv dient dabei sowohl zur Fokussierung des IR-Eingangsstrahls auf die Probe als auch zum Erzeugen eines Zwischenbildes mittels der von der Probe reflektierten Strahlung. Das Objektiv zum Fokussieren des IR-Eingangsstrahls auf die Probenposition kann in diesem Fall dasselbe Objektiv sein wie das zum Abbilden der Probenposition nach Bestrahlung der Probe

**[0022]** Im einfachsten Fall kann es sich bei der ersten optischen Einrichtung um ein unendlich korrigiertes Objektiv handeln. Wird als Objektiv ein endlich korrigiertes Objektiv verwendet, umfasst die erste optische Einrichtung darüber hinaus Spiegel, die den kollimierten Eingangsstrahl auf einen Zwischenfokus abbilden, welcher dann vom endlich korrigierten Objektiv auf die Probe abgebildet wird.

**[0023]** Bei beiden Objektiven kann es sich um Spiegelobjektive, refraktive Objektive oder katadioptrische Objektive handeln. Vorzugsweise sind die Objektive als Cassegrain Objektive mit zwei sphärischen Spiegeln ausgeführt.

**[0024]** Bei dem Detektor handelt es sich vorzugsweise um einen 2-dimensionalen Detektor mit einer Vielzahl von Detektorelementen (Pixel) in einer Sensorebene. Alternativ kann auch ein Zeilendetektor verwendet werden, bei dem die Detektorelemente entlang einer Geraden angeordnet sind.

**[0025]** Bei einer besonders bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen IR Mikroskops befinden sich die Detektorblende und der IR-Sensor innerhalb eines gemeinsamen Detektorgehäuses und sind in einem Abstand  $d$  voneinander entfernt angeordnet, wobei der Abstand  $d$  vorzugsweise maximal 50 mm beträgt. Die Abbildung der Probe und der Eingangsstrahlebene erfolgt dann erfindungsgemäß so, dass der Abstand des durch die Zwischenoptik er-

zeugten Bildes der Probe zu dem von der Zwischenoptik erzeugten Bild der Eingangsstrahlebene einen Abstand  $d$  aufweist.

**[0026]** Die Zwischenoptik weist eine effektive Brennweite  $f$  auf für die vorzugsweise gilt:

$$f = \frac{d \cdot x}{x \cdot m - d \mid m}$$

mit  $f$ : effektive Brennweite der Zwischenoptik

$x$ : Abstand zwischen dem Bild der Eingangstrahlebene, welches durch die erste optische Einrichtung und durch das Objektiv der zweiten optischen Einrichtung hervorgerufen wird, und dem Bild der Probe, welches durch das Objektiv der zweiten optischen Einrichtung hervorgerufen wird.

$d$ : Abstand zwischen Detektorblende (19b) und IR-Sensor (19a)

$m$ : Vergrößerungsfaktor der Zwischenoptik

**[0027]** Die Zwischenoptik kann mehrere abbildende optische Elemente umfassen, insbesondere Spiegel, die zusammen die effektive Brennweite  $f$  aufweisen.

**[0028]** Durch die erfindungsgemäße Wahl der effektiven Brennweite wird erreicht, dass eine Zwischenbildebene mit einer Vergrößerung  $m$  auf die Sensorebene abgebildet wird und gleichzeitig die Eingangstrahlebene auf die Detektorblende. Durch die Vergrößerung  $m$  kann die Größe des Bildes der Probe auf dem Detektor angepasst werden. Damit wird auch die Größe des Bildes der Eingangstrahlebene am Ort der Detektorblende beeinflusst. Die Größe der Detektorblende wird dann an die Größe des Bildes der Eingangstrahlebene am Ort der Detektorblende angepasst.

**[0029]** Idealerweise ist sowohl der Detektor als auch die Detektorblende gekühlt, um thermische Strahlung von Oberflächen auf den Detektor möglichst klein zu halten. Der IR-Sensor und die Detektorblende sind dann vorzugsweise in einem gekühlten Detektorgehäuse untergebracht, das für eine starke Reduzierung an Infrarotlicht sorgt, welches nicht vom Interferometer und von der Probe kommt. Bei einer solchen gemeinsamen Unterbringung des IR-Sensors und der Detektorblende in einem Detektorgehäuse, ist eine entsprechende Anpassung der Abbildungsverhältnisse durch die Zwischenoptik notwendig, da der Abstand zwischen Detektorblende und Detektorgehäuse nicht beliebig groß gewählt werden kann.

**[0030]** Bei einer speziellen Ausführungsform des erfindungsgemäßen IR-Mikroskops beträgt der Vergrößerungsfaktor  $m$  der Zwischenoptik 1. Die Zwischenoptik bewirkt also eine 1:1 Abbildung (2f Abbildung).

**[0031]** Eine besonders bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen IR Mikroskops sieht vor,

dass das effektiv strahlbegrenzende Element eine Ausgangsapertur der IR-Lichtquelle ist. Die Eingangsstrahlebene wird dann vorzugsweise am Ausgang, also in der Nähe der Ausgangsapertur der IR-Lichtquelle gewählt, bspw. an der Austrittspupille eines Michelson-Interferometers.

**[0032]** Bei einer anderen Ausführungsform sind das effektiv strahlbegrenzende Element und die Eingangsstrahlebene innerhalb der IR-Lichtquelle angeordnet. Das effektiv strahlbegrenzende Element kann bspw. eine Blende oder Spiegel innerhalb eines Interferometers, das als IR-Lichtquelle dient, sein. Insbesondere kann die Eingangsstrahlebene zwischen Eingangs- und Ausgangsöffnung eines Interferometers liegen.

**[0033]** Bei einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist die Eingangsstrahlebene die Blendenebene. Die Detektorblendenöffnung wird also in der Blendenebene abgebildet. Hierdurch kann eine einfache Anpassung der Detektorblende, der Zwischenoptik und des strahlbegrenzenden Elements aneinander erfolgen, da diese unabhängig von einer eventuell vorhandenen Divergenz des kollimierten Eingangsstrahls erfolgen kann.

**[0034]** Zwischenoptik kann beispielsweise ein Offner-Objektiv umfassen. Ein Offner-Objektiv umfasst zwei sphärische Spiegel, die eine astigmatismfreie Abbildung der Probe und der Eingangsstrahlebene innerhalb der Zwischenoptik erzeugen. Die Zwischenoptik kann zusätzlich zum Offner-Objektiv weitere sphärische Spiegel, asphärische Spiegel oder Toroid-Spiegel umfassen. Insbesondere kann das vom Offner-Objektiv erzeugte Bild durch einen asphärischen Spiegel oder Toroid-Spiegel auf den Detektor bzw. die Detektorblende abgebildet werden; oder das durch einen asphärischen Spiegel oder Toroid-Spiegel erzeugte Bild kann durch das Offner-Objektiv auf den Detektor bzw. die Detektorblende abgebildet werden. Ebenfalls ist eine Kombination mit refraktiven optischen Elementen (Linsen) denkbar.

**[0035]** Die IR-Lichtquelle des erfindungsgemäßen IR-Mikroskops kann ein Interferometer, ein Quantenkaskadenlaser (in diesem Fall ist die IR-Strahlungsquelle gleich der IR-Lichtquelle) oder ein FTIR-Spektrometer umfassen.

**[0036]** Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung und der Zeichnung. Ebenso können die vorstehend genannten und die noch weiter ausgeführten Merkmale erfindungsgemäß jeweils einzeln für sich oder zu mehreren in beliebigen Kombinationen Verwendung finden. Die gezeigten und beschriebenen Ausführungsformen sind nicht als abschließende Aufzählung zu verstehen, sondern haben vielmehr beispielhaften Charakter für die Schilderung der Erfindung.

## Figurenliste

**Fig. 1a** zeigt ein Mikroskop, das sowohl in Transmission als auch in Reflexion betrieben werden kann, mit einem Interferometer als IR-Lichtquelle und der Ausgangsapertur des Interferometers als effektiv strahlbegrenzendes Element.

**Fig. 1b** zeigt ein Mikroskop, das sowohl in Transmission als auch in Reflexion betrieben werden kann, mit einem Interferometer als IR-Lichtquelle, wobei das effektiv strahlbegrenzende Element das kollimierende Element ist.

**Fig. 2a** zeigt die Anpassung der Detektorblendengröße nach dem Stand der Technik unter der Annahme, dass die Zwischenoptik strahlbegrenzend ist. Die Einstellung ist nur für das zentrale Pixel optimiert.

**Fig. 2b** zeigt die Vignettierung der Randpixel, die auftritt, wenn die Detektorblende nur für das zentrale Pixel optimiert wird und das Blendenebenenbild 25 nicht mit der Detektorblende 19b zusammenfällt.

**Fig. 2c** zeigt die Reduzierung der Vignettierung der Randpixel wie sie in **Fig. 2b** dargestellt wurde, durch Vergrößerung der Detektorblende 19b unter Inkaufnahme von erhöhtem Umgebungslicht.

**Fig. 2d** zeigt für die Anordnung aus **Fig. 2c** den Strahlungskonus der IR-Strahlung aus der Strahlungsquelle und einen Strahlungskonus der Störstrahlung aus der Umgebung.

**Fig. 2e** zeigt Strahlenverläufe der IR-Strahlung zwischen Zwischenoptik und einem zentralen bzw. einem äußeren Sensorelement des IR-Sensors des IR-Mikroskops, wobei das strahlbegrenzende Element am Ort der Detektorblendenöffnung abgebildet wird und  $A1=A2$ .

**Fig. 3a** zeigt die Abhängigkeit des vom IR-Detektor detektierenden Gesamtsignals, des Nutzsignals und des Umgebungssignals von dem Verhältnis  $A1/A2$ .

**Fig. 3b** zeigt das Verhältnis von Nutzsignal zu Gesamtsignal multipliziert mit dem Nutzsignal als Funktion von dem Verhältnis  $A1/A2$ .

**Fig. 4** zeigt Strahlenverläufe der IR-Strahlung zwischen zweiter optischer Einrichtung und einem zentralen bzw. einem äußeren Sensorelement des IR-Sensors des IR-Mikroskops.

**Fig. 5** zeigt das IR-Mikroskop aus **Fig. 1** mit einer detaillierten Darstellung der Zwischenoptik.

**[0037]** Ein typischer Aufbau eines IR-Mikroskops, das sowohl in Transmission als auch in Reflexion verwendet werden kann, ist in **Fig. 1a** dargestellt. Zur Erzeugung des visuellen Bildes der Probe

in Reflexion wird das Licht einer visuellen Lichtquelle 20b über verschiedene optische Elemente 21b, 12b und 13b in ein Mikroskop-Objektiv 16 geleitet, welches das Licht auf eine Probenposition 15 fokussiert. Das reflektierte Licht der Probe wird dann wieder von dem Objektiv 16 aufgefangen und die Probe (bzw. ein ausgewählter Bereich der Probe) wird auf eine erste Zwischenbildebene 17 abgebildet. Diese Zwischenbildebene 17 wird dann wiederum über einen dichroitischen Spiegel 22 und eine Abbildungsoptik 23 auf eine CCD-Kamera 24 abgebildet.

**[0038]** In Transmission wird das visuelle Bild der Probe dadurch erzeugt, dass das sichtbare Licht einer Lichtquelle 20a über die optischen Elemente 21a, 12a und 13a in einen Kondensator (weiteres Objektiv 14) geleitet wird, von dem das Licht auf die Probenposition 15 fokussiert wird. Das transmittierte Licht durch die Probe wird dann vom Objektiv 16 auf die erste Zwischenbildebene 17 abgebildet. Diese Zwischenbildebene wird dann wiederum über einen dichroitischen Spiegel 22 und der Abbildungsoptik 23 auf die CCD-Kamera 24 abgebildet.

**[0039]** Für die spektrale Untersuchung der Probe mit Infrarotstrahlung wird das IR-Licht einer IR-Strahlungsquelle 2 durch ein Interferometer 1 moduliert. Das Licht der Strahlungsquelle 2 verlässt die Strahlungsquelle 2, wird über einen Spiegel 4 kollimiert und in das Interferometer 1 geleitet. Hier trifft das Licht auf einen Strahlteiler 7 und wird idealerweise zu 50% transmittiert und zu 50% reflektiert. Das transmittierte Infrarotlicht trifft dann auf einen festen Spiegel 6 und wird von diesem wieder Richtung Strahlteiler 7 zurückreflektiert. Das zuvor am Strahlteiler 7 reflektierte Licht trifft auf einen beweglichen Spiegel 5 und wird ebenfalls wieder zum Strahlteiler 7 zurückreflektiert. Beide Teilstrahlen werden am Strahlteiler 7 wiedervereinigt und verlassen das Interferometer 1 durch eine Ausgangsapertur 3 des Interferometers 1. Die Bewegung des beweglichen Spiegels 5 sorgt dafür, dass das Infrarotlicht moduliert wird. Neben den in **Fig. 1a** gezeigten klassischen Michelson-Interferometer können als IR-Lichtquelle 1 auch andere Interferometer-Typen eingesetzt werden, beispielsweise Interferometer mit zwei beweglichen Spiegeln, welche die Form von Retroreflektoren haben, wie beispielsweise aus [6] bekannt. Das moduliert Infrarotlicht verlässt das Interferometer 1 durch dessen Austrittsapertur 3 und wird mittels einer ersten optischen Einrichtung auf eine Probe in der Probenposition 15 fokussiert und leuchtet damit einen Bereich der Probe aus.

**[0040]** Die zwischen der Strahlungsquelle 2 und der ersten optischen Einrichtung verlaufende IR-Strahl wird als „Eingangsstrahl“ bezeichnet. Im vorliegenden Beispiel wird der Eingangsstrahl durch den Spiegel 4 kollimiert und verläuft im Interferometer 1 sowie

nach Austritt aus dem Interferometer 1 als kollimierter Eingangsstrahl 26.

**[0041]** Das in **Fig. 1a** gezeigte IR Mikroskop kann sowohl in Transmission als auch in Reflexion verwendet werden. Hierzu kann der Strahlengang für infrarotes Licht zwischen Transmission und Reflexion umgeschaltet werden.

**[0042]** Im Reflexionsmodus (IR-R) umfasst die erste optische Einrichtung das Objektiv 16 (hier: Cassegrain Objektiv mit zwei sphärischen Spiegeln 16a und 16b) sowie Spiegel 9, 10b, 11b, 12b und 13b. Die Spiegel 9, 10b, 11b, 12b und 13b leiten das vom Interferometer 1 modulierte Infrarotlicht in das Objektiv 16, welches das Infrarotlicht auf die Probenposition 15 fokussiert und einen Bereich der Probe ausleuchtet.

**[0043]** Im Transmissionsmodus (IR-T) umfasst die erste optische Einrichtung das weitere Objektiv 14, sowie Spiegel 9, 10a, 11a, 12a und 13a. Die Spiegel 9, 10a, 11a, 12a und 13a leiten das aus dem Interferometer austretende Licht in das weitere Objektiv 14, welches das Infrarotlicht auf die Probenposition 15 fokussiert und einen Bereich der Probe ausleuchtet. Das weitere Objektiv 14 kann ebenfalls als Cassegrain Objektiv mit zwei sphärischen Spiegeln 14a und 14b ausgeführt sein.

**[0044]** Es ist auch möglich, die Erfindung in IR Mikroskopen zu verwirklichen, die entweder nur für Transmissionsmessungen (in diesem Fall fehlen die mit b bezeichneten Komponenten) oder nur für Reflexionsmessungen (in diesem Fall fehlen die mit a bezeichneten Komponenten) vorgesehen sind.

**[0045]** Von der Probe ausgehendes (reflektiertes bzw. transmittiertes) Licht wird mittels einer zweiten optischen Einrichtung auf einen Infrarotdetektor 19 abgebildet. Die zweite optische Einrichtung umfasst dazu das Objektiv 16 sowie eine Zwischenoptik 18. Das Objektiv 16 bildet das von der Probe ausgehende Licht auf die erste Zwischenbildebene 17 ab. In der Zwischenbildebene 17 kann eine Feldblende eingebracht werden, die nur Licht aus einem ausgewählten Bereich der Probenposition 15 durchlässt und es somit möglich macht, einen Bereich auf der Probe, der untersucht werden soll, auszuwählen.

**[0046]** Die Zwischenoptik 18 bildet dann die erste Zwischenbildebene 17 auf den Infrarotdetektor 19 ab. Der Infrarotdetektor 19 ist vorzugsweise ein 2-dimensionaler Detektor mit einem IR-Sensor 19a mit einer Vielzahl von Detektorelementen (Pixel) in einer Sensorebene des IR-Sensor 19a. Alternativ kann auch ein Zeilendetektor verwendet werden, bei dem die Sensorelemente entlang einer Geraden angeordnet sind. Idealerweise ist der IR-Sensor 19a gekühlt, um thermische Anregungen in den Detektorelementen

möglichst klein zu halten. Im gezeigten Beispiel ist der IR-Sensor 19a in ein Detektorgehäuse 19c eingebaut, welches ebenfalls gekühlt ist. Das zu analysierende Licht fällt durch eine gekühlte Detektorblende 19b des Detektors 19 in das Detektorgehäuse 19c ein und erzeugt ein Bild der Probenposition 15 auf dem Sensor 19a.

**[0047]** Die Größe und Position der Detektorblende 19b bestimmt, aus welchen Bereichen Strahlung auf den Sensor 19a des Detektors 19 gelangen kann; sie bestimmt also das Sichtfeld des Detektors 19.

**[0048]** Der IR-Strahl wird durch ein effektiv begrenzendes Element 8 beschränkt. Dabei kann es sich um optische Elemente (bspw. des Interferometers) handeln. Gemäß der Erfindung befindet sich das effektiv strahlbegrenzende Element 8 im kollimierten Eingangsstrahl 26 und definiert eine Blendenebene 27. Die Öffnung/Apertur (im Falle einer Blende) bzw. die effektive Apertur (im Falle eines gekrümmten Spiegels) des strahlbegrenzenden Elements 8 bestimmt den Querschnitt des Eingangsstrahls in der Blendenebene 27. In **Fig. 1a** bildet die Ausgangsapertur 3 das effektiv strahlbegrenzende Element 8.

**[0049]** **Fig. 1b** zeigt eine andere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen IR Mikroskops, bei dem der kollimierende Spiegel 4, der den Beginn des kollimierten Eingangsstrahls festlegt und sich somit im kollimierten Eingangsstrahl befindet, das effektiv strahlbegrenzende Element 8 ist; d.h. in dem in **Fig. 1b** gezeigten Fall findet an der Ausgangsapertur 3 des Interferometers 1 keine Strahlbegrenzung mehr statt.

**[0050]** Darüber hinaus kann das effektiv strahlbegrenzende Element 8 bspw. auch durch den festen Spiegel 7, den beweglichen Spiegel 5 oder den Strahlteiler 7 definiert sein oder sich auch außerhalb des Interferometers 1 zwischen Interferometer und erster optischer Einrichtung befinden (nicht dargestellt).

**[0051]** Die Qualität des vom IR-Detektor detektierten Signals hängt von der Ausleuchtung des IR-Sensors mit dem aus dem Interferometer austretenden IR-Licht und von dem auf den Sensor auftreffenden Umgebungslicht ab. Erfindungsgemäß wird die Detektorblende 19b auf eine Eingangsstrahlebene 29 im kollimierten Eingangsstrahl 26 abgebildet. Der Zusammenhang zwischen Bildqualität, dem Verhältnis A1/A2 sowie der Positionen der Abbildung der Detektorblende wird im Folgenden beschrieben:

**[0052]** **Fig. 2a** zeigt den Infrarotdetektor 19 und die Zwischenoptik 18. Über die Zwischenoptik 18 wird ein Bild der Probe (durch Abbildung der Probenebene oder nachfolgender Zwischenbildebenen) auf den IR-Sensor 19a erzeugt. Im Stand der Technik wird

die Größe und Position der Detektorblende 19b so dimensioniert, dass nur der Strahlungskonus, welcher von der Zwischenoptik 18 vor dem Detektor 19 kommt, durch die Detektorblende 19b hindurchgelassen wird.

**[0053]** **Fig. 2b** zeigt Strahlenverläufe der IR-Strahlung zwischen Zwischenoptik 18 und dem zentralen bzw. einem äußeren Sensorelement des IR-Sensors 19b des IR Mikroskops für den Fall, dass das Bild vom Querschnitt des Eingangsstrahls in der Blendenebene (Blendenebenenbild 25) nicht mit der Größe und Position der Detektorblende 19b übereinstimmt. Dies hat im Fall von **Fig. 2b** die Folge, dass Strahlung auf einen Randpixel von der Detektorblende 19b vignettiert wird, da die Detektorblende 19b zu klein ist, um für alle Pixel die gesamte IR-Strahlung aufzunehmen, die vom Blendenebenenbild 25 ausgeht. Alle Strahlung, die vom Blendenebenenbild 25 ausgeht, stammt auch aus der kollimierten IR-Quelle.

**[0054]** **Fig. 2c** zeigt den gleichen Fall wie in **Fig. 2b**, nur dass die Detektorblende 19b derart vergrößert wurde, dass es zu keiner Vignettierung der IR-Strahlung mehr kommt, die vom Blendenebenenbild 25 ausgeht und die Randpixel erreicht. Die Vergrößerung der Detektorblende 19b hat aber auch Nachteile, da nun auch IR Strahlung auf die Pixel treffen kann, die nicht vom Blendenebenenbild 25 und damit aus der kollimierten IR-Quelle stammen. Es kann nun auch nicht nutzbare IR Strahlung aus der Umgebung auf den Detektor fallen.

**[0055]** **Fig. 2d** veranschaulicht diesen Sachverhalt. Nur die IR-Strahlung 30 des inneren weißen Konus läuft komplett durch das Blendenebenenbild 25 und kommt somit aus der kollimierten IR-Quelle. Die Strahlung in den schraffierten Bereichen 31 kommt nicht aus der kollimierten IR-Quelle, erreicht aber trotzdem den Sensor 19a.

**[0056]** **Fig. 2c** und **Fig. 2d** zeigen, dass es keine optimale Größe für die Detektorblende 19b gibt, solange das Blendenebenenbild 25 nicht mit der Detektorblende 19a zusammenfällt.

**[0057]** **Fig. 2e** zeigt den Fall, bei dem das Blendenebenenbild 25 mit der Detektorblende 19a zusammenfällt. In diesem Fall erreicht ausschließlich Licht, das von der kollimierten IR Quelle stammt und damit durch das Blendenebenenbild 25 läuft, den Detektor. Gleichzeitig wird das modulierte IR-Licht aus der kollimierten IR-Quelle für kein Pixel auf dem Sensor 13a vignettiert.

**[0058]** Für eine optimale Ausleuchtung ohne Vignettierung und gleichzeitiger Unterdrückung von Umgebungslicht muss also das Blendenebenenbild mit der Detektorblende übereinstimmen. Umgekehrt argumentiert müssen die Zwischenoptik und die Größe

der Detektorblende so angepasst werden, dass das Bild der Detektorblende mit dem Querschnitt des Eingangsstrahls in der Blendenebene übereinstimmt.

**[0059]** Die Abhängigkeit des vom IR Detektor detektierenden Gesamtsignals, Nutzsignals und Umgebungssignals von dem Verhältnis der Fläche A1 des Bildes der Detektorblendenöffnung in der Eingangsstrahlebene zur Fläche A2 des Querschnitts des kollimierten IR-Eingangsstrahls in der Eingangsstrahlebene ist in **Fig. 3a** grafisch dargestellt. Bei einer optimalen Einstellung muss darauf geachtet werden, dass der Detektor nicht sättigt. Idealerweise ist daher das Verhältnis von Nutzsignal zu Gesamtsignal möglichst hoch. Im Bereich von  $0 \leq A1/A2 \leq 1$  ist das Verhältnis von Nutzsignal zu Gesamtsignal aber konstant gleich 1. Es ist aber gleichzeitig von Vorteil, wenn das absolute Nutzsignal hoch ist. Daher zeigt **Fig. 3b** das Verhältnis von Nutzsignal zu Gesamtsignal multipliziert mit dem Nutzsignal als Funktion von A1/A2. Man sieht deutlich, dass das Verhältnis von Nutzsignal zu Gesamtsignal multipliziert mit dem Nutzsignal für das Verhältnis A1/A2=1 maximal ist, wobei der Abfall bei kleineren Verhältnissen A1/A2<1 auf die Abschattung aufgrund einer gegenüber dem abzubildenden Strahlquerschnitt kleineren Detektorblende und der Abfall bei größeren Verhältnissen A1/A2>1 auf den Beitrag von Streulicht aus der Umgebung (Umgebungssignal) zurückzuführen ist.

**[0060]** Gemäß der vorliegenden Erfindung wird die Detektorblende 19b durch die erste und zweite optische Einrichtung auf eine Eingangsstrahlebene abgebildet, die sich im kollimierten Eingangsstrahl befindet, und zwar so, dass die Fläche A1 des Bildes der Detektorblende 19b in der Eingangsstrahlebene maximal so groß ist wie die Fläche des Querschnitts des kollimierten Eingangsstrahls in der Eingangsstrahlebene. Dadurch wird vermieden, dass Umgebungslicht in den Detektor 19 gelangt. Erfindungsgemäß ist also die Öffnung der Detektorblende 19b auf den Strahlquerschnitt des kollimierten Eingangsstrahls in der Eingangsebene abgestimmt. Im Idealfall wird die Detektorblende 19b auf die Blendenebene (also auf das effektiv strahlbegrenzende Element 8) abgebildet. Blendenebene und Eingangsstrahlebene fallen in diesem Fall also zusammen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Öffnung des strahlbegrenzenden Elements 8 und somit der Strahlquerschnitt des kollimierten Eingangsstrahls in der Blendenebene auf die Detektorblende 19b abgebildet wird (Blendenebenen-Bild 25 befindet sich dann in der Ebene der Detektorblende 19b), wie in **Fig. 2e** gezeigt. Die Detektorblende 19b, die zweite optische Einrichtung 16,18 und das effektiv strahlbegrenzende Element 8 können dann unabhängig von der Divergenz des Eingangsstrahls aufeinander abgestimmt werden, so dass der gewünschte Querschnitt des Eingangsstrahls in den Detektor 19 gelangt. In Kombination mit der Bedingung, dass die Fläche A1 des Bildes

des der Öffnung der Detektorblenden 19b in der Eingangsstrahlebene kleiner oder gleich der Fläche A2 des Querschnitts des kollimierten IR-Eingangsstrahls 26 in der Eingangsstrahlebene ist, wird sichergestellt, dass ausschließlich das IR-Licht des kollimierten Eingangsstrahls 26 durch die Detektorblende 19b gelangt. In dem in **Fig. 2e** gezeigten Beispiel ist A1=A2, so dass sämtliches Licht des IR-Strahls der Eingangsstrahlebene zu dem IR-Sensor 19a gelangt.

**[0061]** Gemäß der Erfindung müssen Eingangsstrahlebene 29 und Blendenebene 27 nicht unbedingt übereinstimmen, solange sowohl Eingangsstrahlebene 29 als auch Blendenebene 27 sich im kollimierten Eingangsstrahl 26 befinden und die Bedingung  $A1 \leq A2$  erfüllt ist. Da sich der Querschnitt des Eingangsstrahls 26 im kollimierten Bereich nicht oder nur geringfügig ändert, wird bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung immer ein Strahlquerschnitt auf die Detektorblende 19b abgebildet, der gleich oder nahezu gleich dem Strahlquerschnitt in der Blendenebene 27 ist, so dass in erster Näherung der am Ort des strahlbegrenzenden Elements herrschender Strahlquerschnitt als Strahlquerschnitt in der Eingangsstrahlebene 27 angenommen werden und zur Bestimmung der Größe der Detektorblende 19b herangezogen werden kann. Die Positionierung des strahlbegrenzenden Elements 8 kann daher innerhalb des kollimierten Eingangsstrahls 26 relativ frei gewählt werden, ohne die Qualität der Messung wesentlich zu beeinflussen. Dies vereinfacht auch die Auslegung der Zwischenoptik 18. Gleichzeitig besteht jedoch auch die Möglichkeit durch Wahl des Verhältnisses von Öffnung der Detektorblende 19b und Strahlbegrenzung, eine gewünschte Abschattung zu realisieren, bspw. wenn eine sehr lichtstarke Lichtquelle 2 verwendet wird (z.B. ein Quantenkaskadenlaser), die den IR-Sensor 19a ohne Abschattung sättigen und die Messungen dadurch unbrauchbar machen würden.

**[0062]** Die erfindungsgemäße Vorrichtung bietet daher eine hohe Flexibilität in der Art und Positionierung der Strahlbegrenzung mit maximaler Lichtausbeute und Minimierung von Störeinflüssen.

**[0063]** Für die Auslegung der Zwischenoptik 18 ist insbesondere die effektive Brennweite f der Zwischenoptik 18 relevant. Diese ist abhängig vom Abstand d zwischen Detektorblende 19b und IR-Sensor 19a und dem Abstand x zwischen dem Bild 28 der Eingangsstrahlebene (welches durch die erste optische Einrichtung und durch das Objektiv 16 der zweiten optischen Einrichtung hervorgerufen wird), und dem Bild der Probe in der Zwischenbildebene 17, welches durch das Objektiv 16 der zweiten optischen Einrichtung hervorgerufen wird (**Fig. 4**):

$$f = \frac{d \cdot x}{x \cdot m - d \mid m} \text{,,}$$



so dass einerseits die in der Probenposition 15 angeordnete Probe auf den IR-Sensor 19a und andererseits die im kollimierten Eingangsstrahl befindliche Eingangsstrahlebene auf die Detektorblende 19b abgebildet wird.

**[0064] Fig. 5** zeigt, wie die Zwischenoptik 18 beispielsweise ausgeführt sein kann. Die Zwischenoptik 18 umfasst hier ein 1fach Objektiv nach Offner [5], das eine astigmatismfreie **Abb. 18d** des Zwischenbildes 17 über zwei sphärischen Spiegel 18a und 18b erzeugt. Ein Planspiegel 18c dient lediglich zur Strahlumlenkung. Das 1fach Objektiv nach Offner dient dazu, ein Bild der Probe an einem Ort im Mikroskop zu erzeugen, in dessen Umgebung ausreichend Platz für den gekühlten Flächendetektor 19 vorhanden ist. Der IR Detektor 19 wird üblicherweise über einen Dewar mit flüssigem Stickstoff gekühlt. Alternative Systeme haben beispielsweise Stirling Kühler zur Erzeugung der benötigten tiefen Temperaturen am Sensorelement. Alle diese Detektoren brauchen vergleichsweise viel Platz. Zudem muss im Falle des Dewars die Einfüllöffnung für den flüssigen Stickstoff von außen zugänglich sein. Das 1fach Objektiv nach Offner erzeugt neben dem Bild der Probe 18d auch ein Bild 18g der Eingangsstrahlebene 29. Eine nachgeschaltete Optik mit Planspiegel 18e zur Strahlumlenkung und Spiegel 18f ist so konfiguriert, dass ein Bild von dem Probenbild 18d auf dem Sensor 19a des Detektors 19 erzeugt und gleichzeitig ein Bild vom Eingangsstrahlebenen-Bild 18g auf die Kaltblende 19b des Detektors 19 erzeugt wird. Hierzu wird die Brennweite  $f$  des Spiegels 18f zunächst über

die oben beschriebene Gleichung  $f = \frac{d \cdot x}{x \cdot m - d | m}$  ermittelt. Da der Spiegel 18f eine Off-Axis-Abbildung macht, ist es zum einen von Vorteil, den Ablenkwinkel möglichst klein zu halten, zum andern ist die Verwendung eines toroidalen Spiegels mit Brennweiten  $f$  und  $f$  statt eines sphärischen Spiegels mit ermittelter Brennweite  $f$  für die Bildqualität von Vorteil,  $f$  lässt sich aus  $f$  und dem Ablenkwinkel ermitteln. Dieser toroidale Spiegel kann im Folgenden noch leicht in seiner Form verändert werden. Hier können durch Raytracing Programme (z.B. Zemax) optimale Oberflächenformen ermittelt werden, die zu einer optimierten Bildqualität auf dem Sensor des Detektors führen. Die Oberfläche des Spiegels 18f weicht dann leicht von der idealen toroidalen Form ab, es entsteht ein toroidähnlicher Spiegel. Das Licht, das vom Spiegel 18f kommt, passiert ein Fenster 19d des Detektors, erzeugt ein Bild der Eingangsstrahlebene 29 an der Detektorblende 19b und ein Bild der Probe auf dem Sensor 19a des Detektors 19.

## Literaturliste

- [1] US 7,440,095
- [2] DE 10 2012 200 851 B3
- [3] US 7,378,657 B2
- [4] Bruker Optik GmbH „HYPERION Series: FTIR Microscopes“
- [5] DE 2 230 002 C2
- [6] DE 19 704 598 C1

## Bezugszeichenliste

- |          |   |
|----------|---|
| 1        | IR-Lichtquelle / Interferometer               |
| 2        | Strahlungsquelle                              |
| 3        | Ausgangsapertur des Interferometers 1         |
| 4        | Spiegel des Interferometers 1                 |
| 5        | beweglicher Spiegel des Interferometers 1     |
| 6        | fester Spiegel des Interferometers 1          |
| 7        | Strahlteiler des Interferometers 1            |
| 8        | effektiv strahlbegrenzendes Element           |
| 9        | Spiegel                                       |
| 10a      | Spiegel für Messung in Transmission           |
| 10b      | Spiegel für Messung in Reflexion              |
| 11a      | Spiegel für Messung in Transmission           |
| 11b      | Spiegel für Messung in Reflexion              |
| 12a      | optisches Element für Messung in Transmission |
| 12b      | optisches Element für Messung in Reflexion    |
| 13a      | optisches Element für Messung in Transmission |
| 13b      | Strahlteileroptik                             |
| 14       | Kondensor/weiteres Objektiv                   |
| 15       | Probenposition                                |
| 16       | Objektiv                                      |
| 17       | erste Zwischenbildebene                       |
| 18       | Zwischenoptik                                 |
| 18a, 18b | Offner-Objektiv/sphärische Spiegel            |
| 18c      | Planspiegel                                   |
| 18d      | Bild der Probe in Zwischenoptik 18            |

- 18e** Planspiegel
- 18f** Spiegel
- 18g** Bild der Probe in Eingangsstrahlebene in Zwischenoptik 18
- 19** IR-Detektor
- 19a** IR-Sensor
- 19b** Detektorblende
- 19c** Detektorgehäuses
- 20** visuelle Lichtquelle für Messung in Transmission
- 20b** visuelle Lichtquelle für Messung in Reflexion
- 21a** optisches Element für Messung in Transmission
- 21b** optisches Element für Messung in Reflexion
- 22** dichroitischer Spiegel
- 23** Abbildungsoptik
- 24** CCD-Kamera
- 25** Bild der Blendenebene
- 26** kollimierter Eingangsstrahl
- 27** Blendenebene
- 28** Bild der Eingangsstrahlebene vor Zwischenoptik 18
- 29** Eingangsstrahlebene

**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**

- US 7440095 [0064]
- DE 102012200851 B3 [0064]
- US 7378657 B2 [0064]
- DE 2230002 C2 [0064]
- DE 19704598 C1 [0064]

## Patentansprüche

1. IR-Mikroskop mit einer IR-Lichtquelle (1) zur Erzeugung eines kollimierten IR-Eingangsstrahls (26), einem effektiv strahlbegrenzenden Element (8) in einer Blendenebene (27) im kollimierten Eingangsstrahl, einer Probenposition (15) zur Aufnahme einer Probe, einem IR-Detektor (19) mit einem IR-Sensor (19a), einer vor dem IR-Sensor (19a) angeordneten Detektorblende (19b) mit einer Detektorblendenöffnung, einer ersten optischen Einrichtung zum Fokussieren des aus der IR-Lichtquelle (1) austretenden kollimierten IR-Eingangsstrahls (26) auf die Probenposition (15), und einer zweiten optischen Einrichtung zur Abbildung der Probenposition (15) auf den IR-Sensor (19a), wobei die zweite optische Einrichtung ein Objektiv (16) und eine Zwischenoptik (18) umfasst. **dadurch gekennzeichnet**, dass sich das effektiv strahlbegrenzende Element (8) im kollimierten IR-Eingangsstrahl (26) vor Eintritt in die erste optische Einrichtung befindet, und dass die erste optische Einrichtung und die zweite optische Einrichtung die Detektorblendenöffnung der Detektorblende (19b) in eine Eingangsstrahlebene abbilden, wobei für die Fläche A1 des Bildes der Detektorblendenöffnung in der Eingangsstrahlebene und die Fläche A2 des Querschnitts des kollimierten IR-Eingangsstrahls (26) in der Eingangsstrahlebene gilt:

$$0 < A1 / A2 \leq 1.$$

2. IR-Mikroskop nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste optische Einrichtung ein weiteres Objektiv (14) zum Fokussieren des IR-Eingangsstrahls auf die Probenposition umfasst.

3. IR-Mikroskop nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste optische Einrichtung das Objektiv (16), das dazu eingerichtet ist, den IR-Eingangsstrahl (26) auf die Probenposition (15) zu fokussieren, und eine Strahlteileroptik (13b), die dazu eingerichtet ist, den von der IR-Lichtquelle (1) ausgehenden IR-Eingangsstrahl (26) in das Objektiv (16) einzukoppeln, umfasst.

4. IR-Mikroskop nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich die Detektorblende (19b) und der IR-Sensor (19a) innerhalb eines gemeinsamen Detektorgehäuses (19c) befinden und in einem Abstand d voneinander entfernt angeordnet sind, wobei der Abstand d vorzugsweise maximal 50 mm beträgt.

5. IR-Mikroskop nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Zwi-

schenoptik (18) eine effektive Brennweite f aufweist für die gilt:

$$f = \frac{d \cdot x}{x \cdot m - d \mid m}$$

mit f: effektive Brennweite der Zwischenoptik  
x: Abstand zwischen dem Bild der Eingangsstrahlebene, welches durch die erste optische Einrichtung und durch das Objektiv (16) der zweiten optischen Einrichtung hervorgerufen wird, und dem Bild der Probe, welches durch das Objektiv (16) der zweiten optischen Einrichtung hervorgerufen wird.

d: Abstand zwischen Detektorblende (19b) und IR-Sensor (19a)

m: Vergrößerungsfaktor der Zwischenoptik (18)

6. IR-Mikroskop nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Vergrößerungsfaktor m der Zwischenoptik (18) m=1 beträgt.

7. IR-Mikroskop nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass das effektiv strahlbegrenzende Element (8) eine Ausgangsapertur (3) der IR-Lichtquelle (1) ist.

8. IR-Mikroskop nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass das effektiv strahlbegrenzende Element (8) und die Eingangsstrahlebene innerhalb der kollimierten IR-Lichtquelle (1) angeordnet sind.

9. IR-Mikroskop nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Eingangsstrahlebene die Blendenebene (27) ist.

10. IR-Mikroskop nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Zwischenoptik (18) ein Offner-Objektiv (18a, 18b) umfasst.

11. IR-Mikroskop nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die IR-Lichtquelle ein Interferometer (1), ein Quantenkaskadenlaser oder ein FTIR-Spektrometer umfasst.

Es folgen 8 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

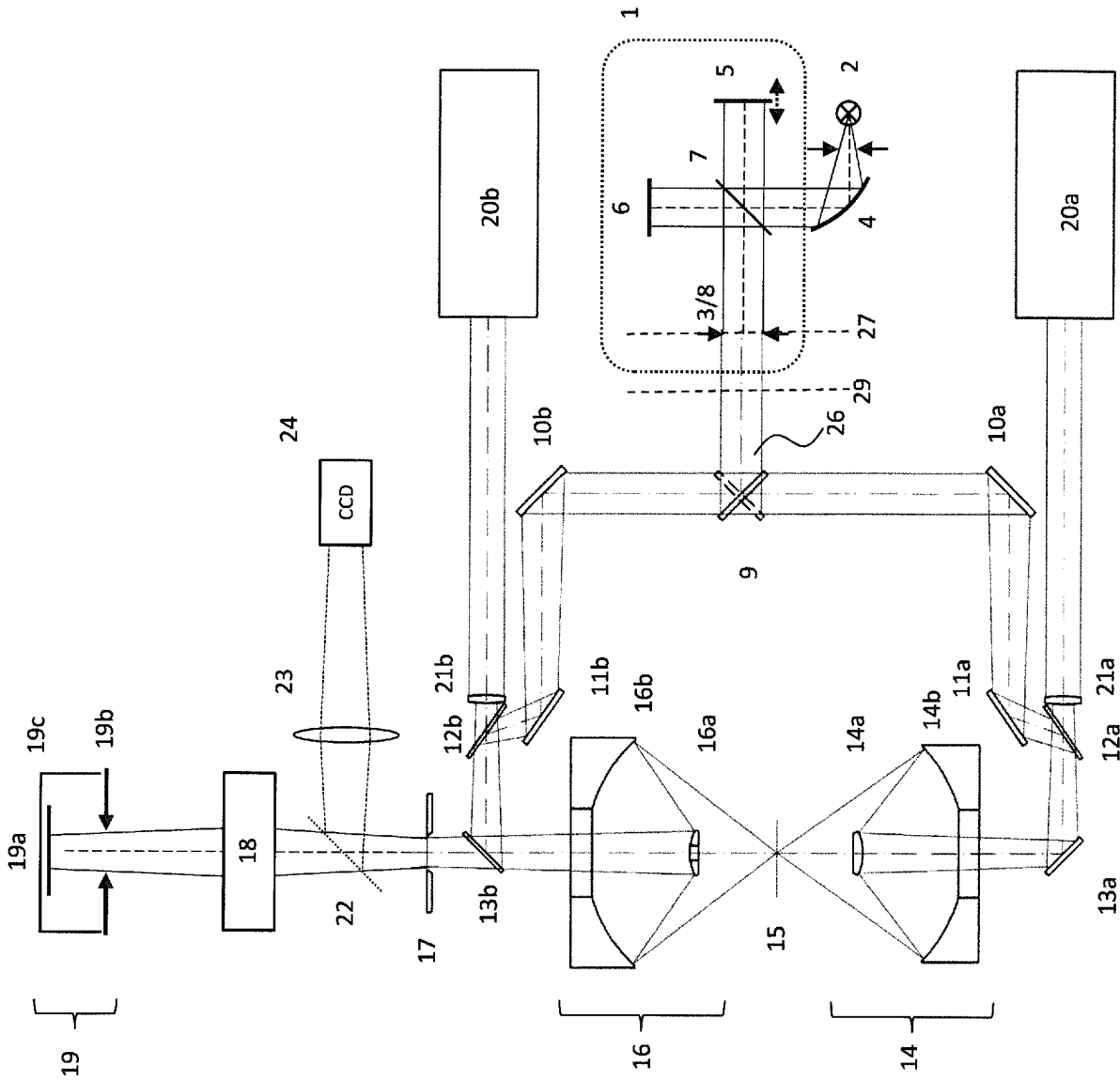


Fig. 1a

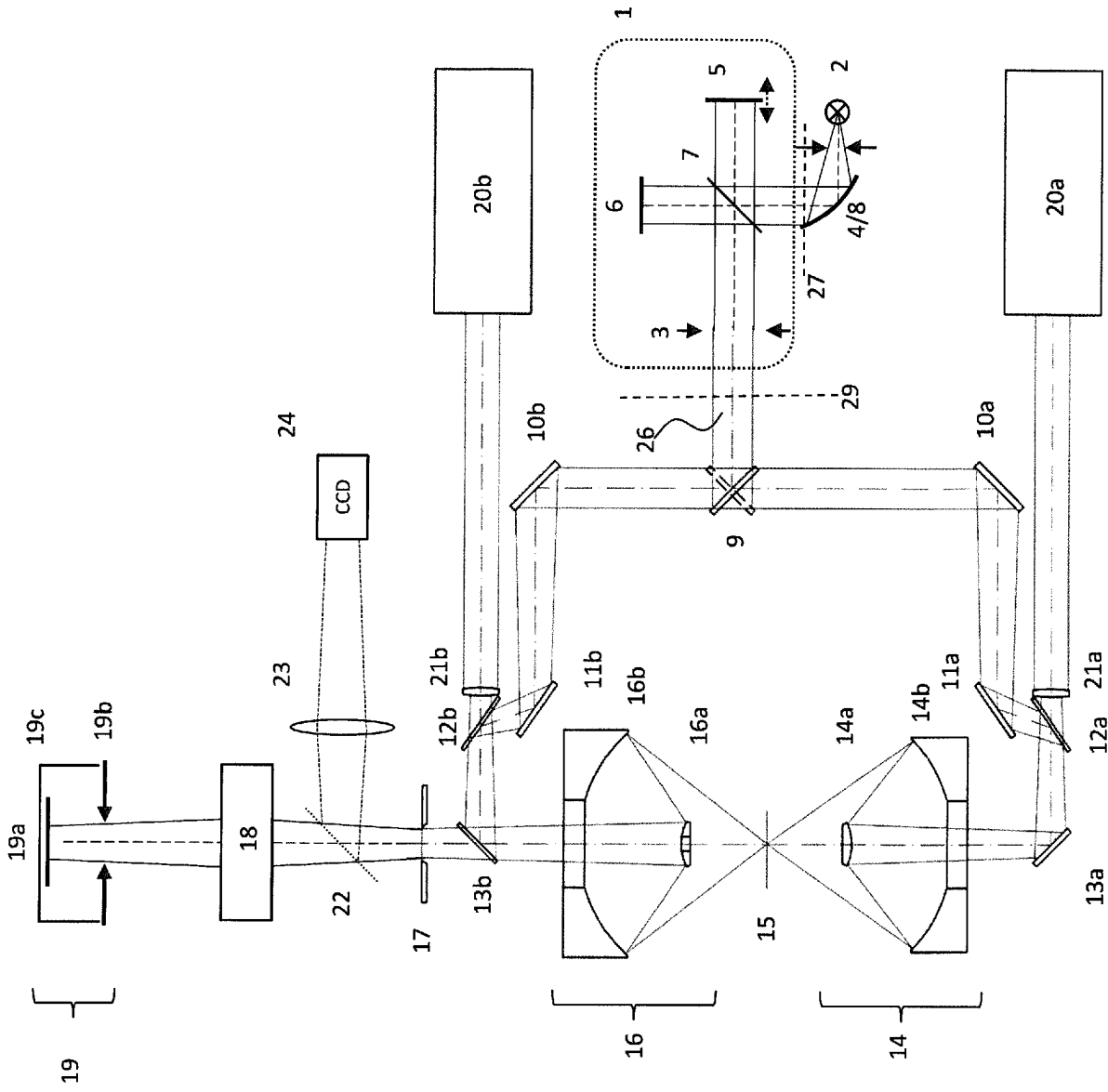


Fig. 1b

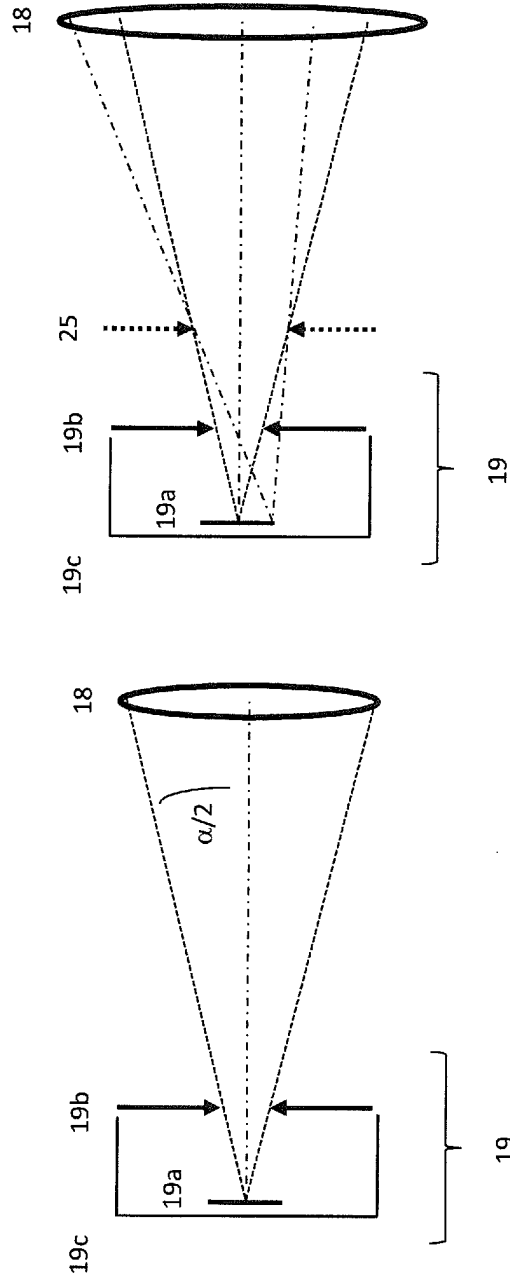


Fig. 2b

Fig. 2a

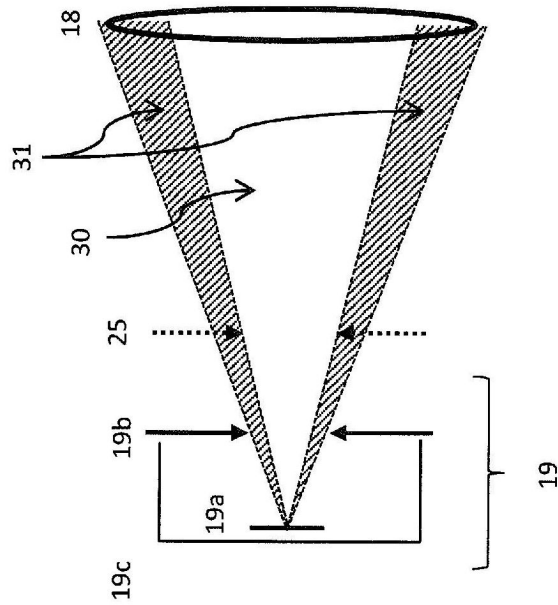


Fig. 2d

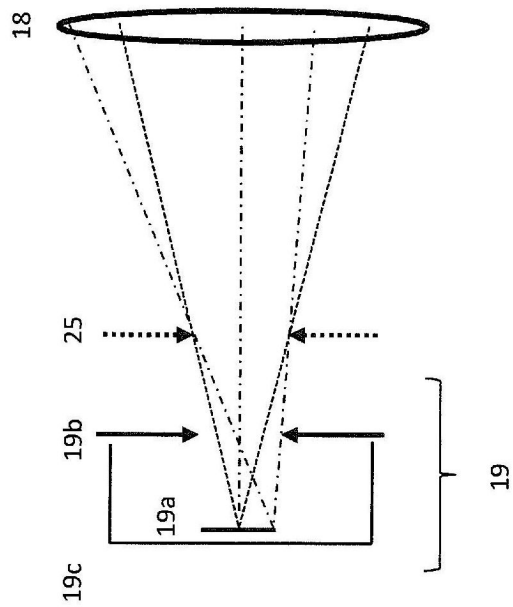


Fig. 2c



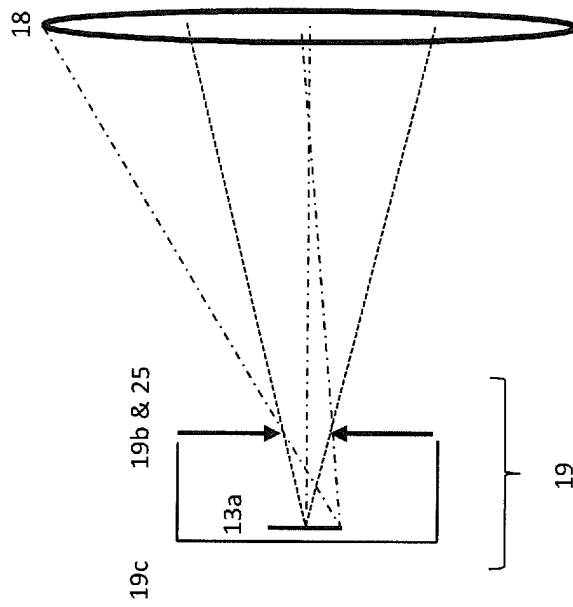


Fig. 2e

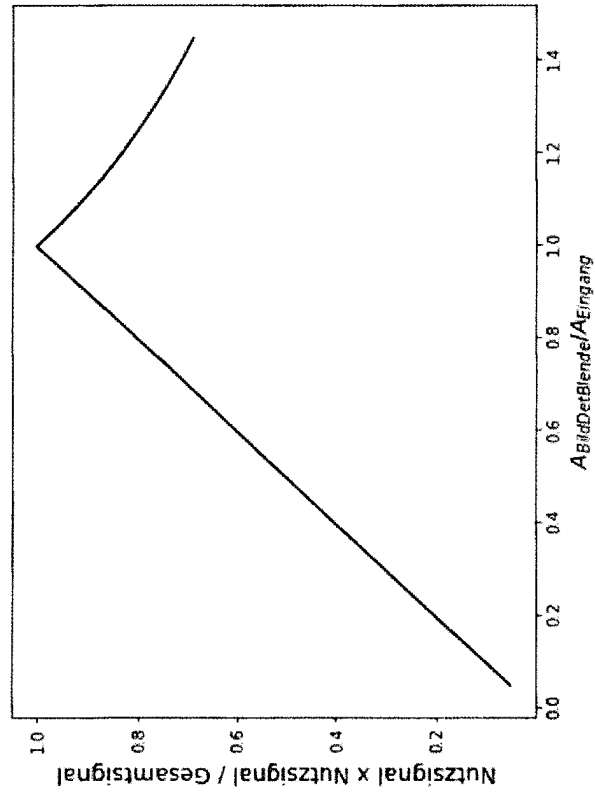


Fig. 3b

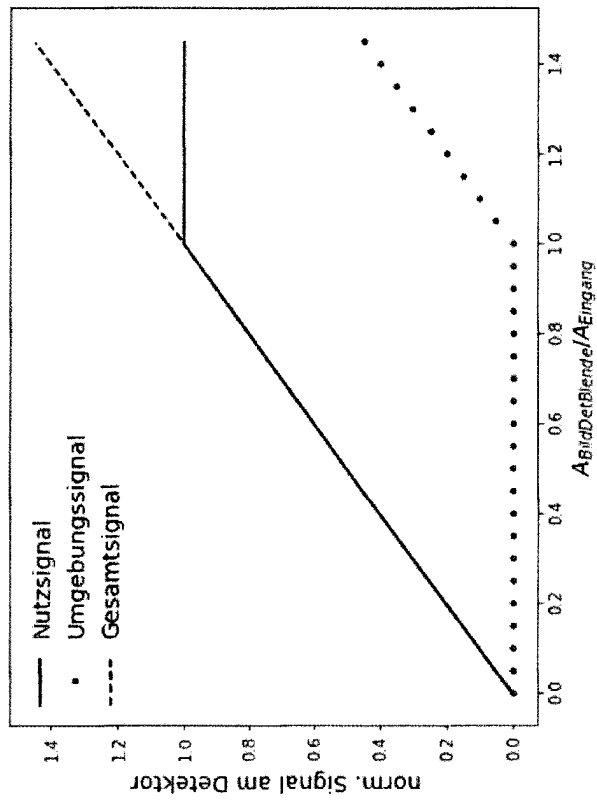


Fig. 3a

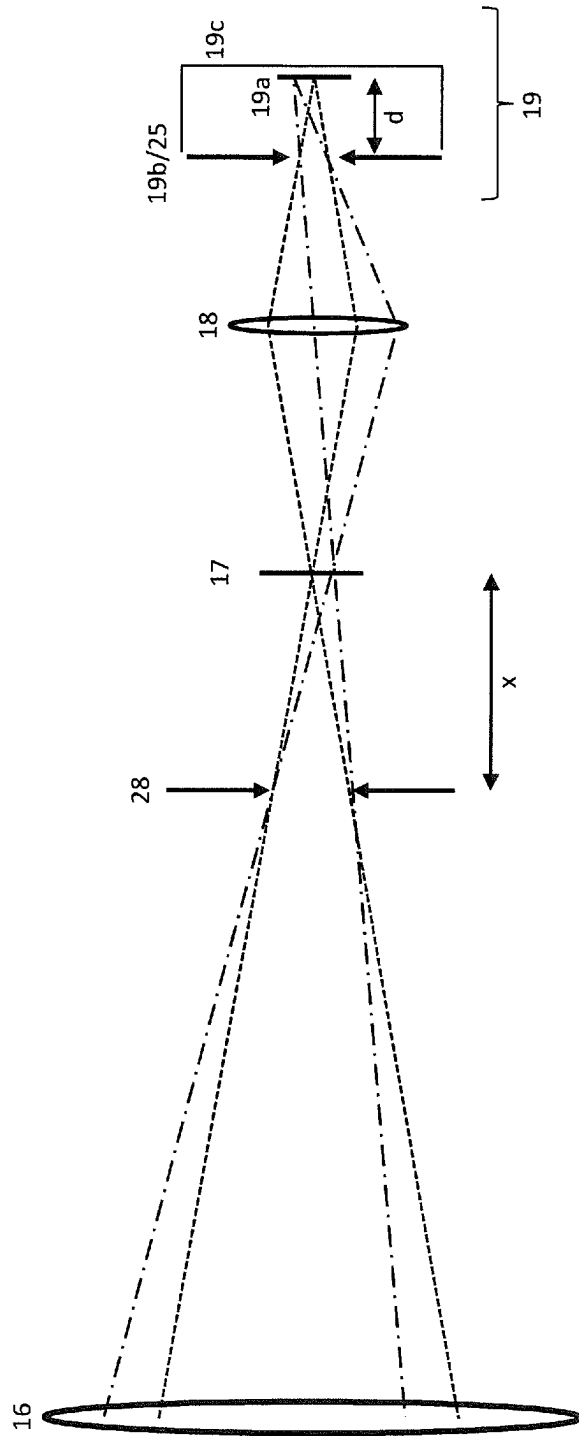


Fig. 4

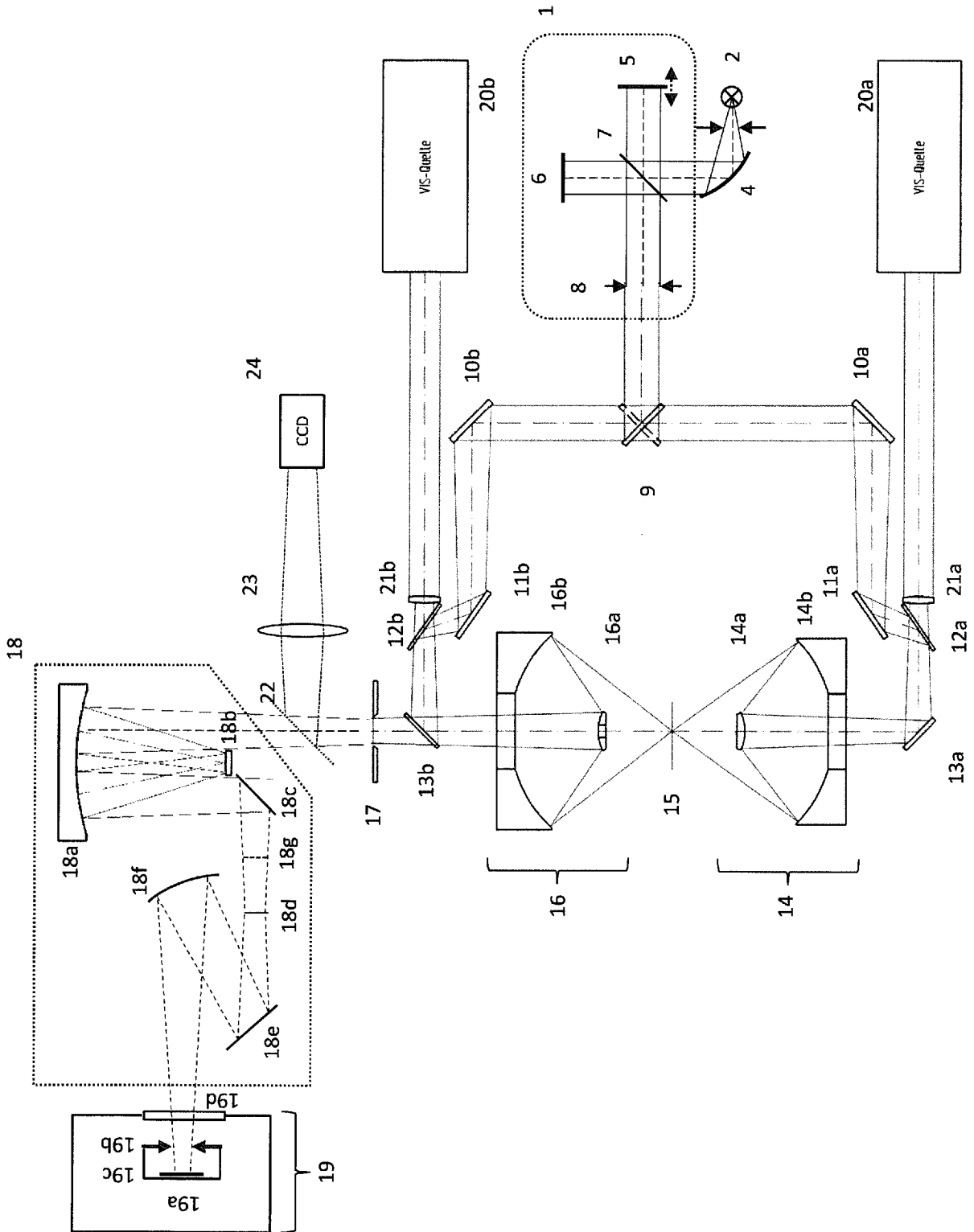


Fig. 5