

5 Beschreibung

Titel

Fourier-Transform-Spektrometer und Verfahren zum Betreiben eines Fourier-
Transform-Spektrometers

10

Stand der Technik

Die Erfindung geht aus von einer Vorrichtung oder einem Verfahren nach
Gattung der unabhängigen Ansprüche.

15

Aktuell wird an Möglichkeiten geforscht, ein miniaturisiertes Spektrometer
herzustellen, das je nach Anwendung Spektren im sichtbaren Bereich, im
Nahinfrarotbereich oder im mittleren Infrarotbereich aufnehmen kann. Ein
solches Spektrometer wäre insbesondere zum Einbau in Handgeräte wie
beispielsweise Smartphones zur chemischen Analyse interessant. Die Schriften
WO 2011093794 A1, WO 2015015493 A2 und EP 1882917 B1 beschreiben
Beispiele für derartige Spektrometer. Eine frühe, nicht miniaturisierte Form eines
statischen Fourier-Transform-Spektrometers wird von Zhang (Zhang et al., „A
static polarization imaging spectrometer based on a Savart polariscope“, Optics
Communications 203, 2002) in Form eines abbildenden Savart-Polariskops
vorgeschlagen, als Polarisationsbildgebungsspektrometer (Polarization Imaging
Spectrometer, PIS) bezeichnet und in nachfolgenden Veröffentlichungen
bezüglich des maximalen Akzeptanzwinkels verbessert.

20

25

30

Die US 7719677 B2 beschreibt ein Fourier-Transform-Spektrometer, das ein
Sagnac-Interferometer umfasst. Nach Durchgang durch das Sagnac-
Interferometer passiert das Licht ein Linsensystem, umfassend eine Sammellinse
und eine zylindrische Linse, und trifft anschließend auf ein 2D-Sensorarray.

35

Offenbarung der Erfindung

Vor diesem Hintergrund werden mit dem hier vorgestellten Ansatz ein Fourier-Transform-Spektrometer, ein Verfahren zum Betreiben eines Fourier-Transform-Spektrometers, weiterhin eine Vorrichtung, die dieses Verfahren verwendet,
5 sowie schließlich ein entsprechendes Computerprogramm gemäß den Hauptansprüchen vorgestellt. Durch die in den abhängigen Ansprüchen aufgeführten Maßnahmen sind vorteilhafte Weiterbildungen und Verbesserungen der im unabhängigen Anspruch angegebenen Vorrichtung möglich.

10 Es wird ein Fourier-Transform-Spektrometer mit einer Polariskopeinheit mit zumindest zwei doppelbrechenden Kristallen vorgestellt, wobei das Fourier-Transform-Spektrometer folgende Merkmalen aufweist:

eine Detektoreinheit zum Detektieren von Lichtstrahlen; und

15 eine zwischen der Polariskopeinheit und der Detektoreinheit angeordnete Linseneinheit, umfassend zumindest ein Linsenelement zum Lenken der Lichtstrahlen auf die Detektoreinheit, wobei die Linseneinheit eine mittels des Linsenelements veränderbare Brennweite aufweist, um das Fourier-Transform-Spektrometer zwischen unterschiedlichen Betriebsarten umschalten zu können.
20

Unter einem Fourier-Transform-Spektrometer, auch Fourier-Transform-Infrarotspektrometer, Fourier-Transformations-Infrarotspektrometer oder kurz FTIR-Spektrometer genannt, kann ein miniaturisiertes Spektrometer zur
25 Infrarotspektroskopie verstanden werden. Hierbei wird ein Spektrum nicht durch die direkte Messung der wellenlängenabhängigen Strahlungsintensität aufgenommen, sondern durch eine Fourier-Transformation eines gemessenen Interferogramms berechnet. Unter einer Polariskopeinheit kann ein Savart-Polariskop verstanden werden, auch Savart-Element genannt. Das
30 Interferogramm kann beispielsweise mittels der Detektoreinheit gemessen werden. Unter einer Linseneinheit kann ein Linsensystem, umfassend ein oder mehrere Linsenelemente, verstanden werden. Unter einem Linsenelement kann beispielsweise eine Sammel- oder Zerstreuungslinse verstanden werden. Das Linsenelement kann etwa verschiebbar in dem Fourier-Transform-Spektrometer
35 angeordnet sein. Je nach Ausführungsform kann es sich bei dem Linsenelement

- um eine Linse mit veränderbarer Brennweite, etwa eine Flüssigkristalllinse, eine Flüssiglinse oder eine Polymerlinse, handeln. Alternativ kann das Linsenelement eine feste Brennweite aufweisen. Beispielsweise kann die Linseneinheit eine mittels des Linsenelements zwischen zumindest einem ersten Brennweitenwert und einem zweiten Brennweitenwert veränderbare Brennweite aufweisen, um das Fourier-Transform-Spektrometer zwischen zumindest einer dem ersten Brennweitenwert zugeordneten ersten Betriebsart und einer dem zweiten Brennweitenwert zugeordneten zweiten Betriebsart umschalten zu können.
- Der hier vorgestellte Ansatz beruht auf der Erkenntnis, dass unter Verwendung eines beweglichen Linsensystems ein miniaturisiertes Fourier-Transform-Spektrometer geschaffen werden kann, das zwischen mehreren Betriebsarten umschaltbar ist.
- Der statische Aufbau eines Fourier-Transform-Spektrometers kann beispielsweise derart sein, dass für gegebene Komponenten und Geometrien eine erreichbare Auflösung für große Wellenlängen sowie eine kleinste noch messbare Wellenlänge (Sampling-Theorem) bestimmt werden. Demgegenüber schafft der hier vorgestellte Ansatz durch Verwendung einer modifizierten Abbildungsgeometrie ein deutlich flexibleres Spektrometer. Dieses kann beispielsweise in einem ersten Modus so betrieben werden, dass es auch bei sehr kleinen Wellenlängen noch messen kann, dafür allerdings eine reduzierte Auflösung bei großen Wellenlängen aufweist. In einem zweiten Modus kann das Spektrometer beispielsweise so betrieben werden, dass eine minimale messbare Wellenlänge größer ist als im ersten Modus, dafür allerdings im Bereich großer Wellenlängen eine bessere Auflösung erzielt wird. In einem dritten Modus kann das Spektrometer beispielsweise zusätzlich so betrieben werden, dass das Signal-zu-Rausch-Verhältnis optimiert wird.
- Gemäß einer Ausführungsform kann ein Abstand zwischen der Detektoreinheit und dem Linsenelement veränderbar sein. Dadurch kann gewährleistet werden, dass sich die Detektoreinheit bei einer Änderung der Brennweite des Linsenelements stets in der Brennebene befindet.

Gemäß einer weiteren Ausführungsform kann das Linsenelement eine veränderbare Brennweite aufweisen. Durch diese Ausführungsform wird eine einfache und präzise Veränderung der Brennweite der Linseneinheit ermöglicht.

5 Hierbei kann das Linsenelement als Flüssigkristalllinse, Flüssiglinse oder Polymerlinse oder als eine Kombination aus zumindest zwei der genannten Linsen ausgeführt sein. Dadurch kann die Brennweite der Linseneinheit durch Verwendung nur eines Linsenelements verändert werden.

10 Es ist ferner von Vorteil, wenn das Linsenelement aus zumindest zwei relativ zueinander verschiebbaren, je eine polynomielle Oberfläche aufweisenden Linsenteilen ausgeführt ist, auch als Alvarez- oder Lohmann-Linse bekannt. Auch durch diese Ausführungsform kann eine präzise Verstellung der Brennweite der Linseneinheit bei verhältnismäßig geringem Kostenaufwand gewährleistet
15 werden.

Die Linseneinheit kann gemäß einer weiteren Ausführungsform zumindest ein weiteres Linsenelement zum Lenken der Lichtstrahlen auf die Detektoreinheit aufweisen. Das Linsenelement kann zwischen dem weiteren Linsenelement und
20 der Detektoreinheit angeordnet sein. Das Linsenelement und das weitere Linsenelement können beispielsweise hintereinander in einem gemeinsamen Strahlengang zur Detektoreinheit angeordnet sein. Bei dem weiteren Linsenelement kann es sich beispielsweise wie beim Linsenelement um eine bewegliche Linse oder, zusätzlich oder alternativ, um eine Linse mit
25 veränderbarer Brennweite handeln. Durch diese Ausführungsform kann eine mehrfache Umlenkung oder Bündelung der Lichtstrahlen erreicht werden.

Es ist vorteilhaft, wenn ein Abstand zwischen dem Linsenelement und dem weiteren Linsenelement oder, zusätzlich oder alternativ, ein Abstand zwischen
30 der Detektoreinheit und dem weiteren Linsenelement veränderbar ist. Dadurch kann die Linseneinheit beispielsweise als parfokales oder varifokales Objektiv realisiert werden.

Das Linsenelement und das weitere Linsenelement können gemäß einer
35 weiteren Ausführungsform voneinander abweichende Brennweiten aufweisen.

Dadurch kann die Brennweite mit geringem Aufwand zwischen zwei festen Werten verändert werden.

5 Der hier vorgestellte Ansatz schafft zudem ein Verfahren zum Betreiben eines Fourier-Transform-Spektrometers gemäß einer der vorstehenden Ausführungsformen, wobei das Verfahren folgenden Schritt umfasst:

10 Verändern der Brennweite der Linseneinheit mittels des Linsenelements, um das Fourier-Transform-Spektrometer zwischen den unterschiedlichen Betriebsarten umzuschalten.

15 Gemäß einer Ausführungsform umfasst das Verfahren einen Schritt des Verfahrens der Linseneinheit und/oder der Detektoreinheit, sodass die Detektoreinheit in einer Brennebene der Linseneinheit steht.

Dieses Verfahren kann beispielsweise in Software oder Hardware oder in einer Mischform aus Software und Hardware, beispielsweise in einem Steuergerät, implementiert sein.

20 Der hier vorgestellte Ansatz schafft ferner eine Vorrichtung, die ausgebildet ist, um die Schritte einer Variante eines hier vorgestellten Verfahrens in entsprechenden Einrichtungen durchzuführen, anzusteuern bzw. umzusetzen. Auch durch diese Ausführungsvariante der Erfindung in Form einer Vorrichtung kann die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe schnell und effizient gelöst werden.

25 Hierzu kann die Vorrichtung zumindest eine Recheneinheit zum Verarbeiten von Signalen oder Daten, zumindest eine Speichereinheit zum Speichern von Signalen oder Daten, zumindest eine Schnittstelle zu einem Sensor oder einem Aktor zum Einlesen von Sensorsignalen von dem Sensor oder zum Ausgeben von Daten- oder Steuersignalen an den Aktor und/oder zumindest eine Kommunikationsschnittstelle zum Einlesen oder Ausgeben von Daten aufweisen, die in ein Kommunikationsprotokoll eingebettet sind. Die Recheneinheit kann beispielsweise ein Signalprozessor, ein Mikrocontroller oder dergleichen sein, wobei die Speichereinheit ein Flash-Speicher, ein EPROM oder eine

magnetische Speichereinheit sein kann. Die Kommunikationsschnittstelle kann ausgebildet sein, um Daten drahtlos und/oder leitungsgebunden einzulesen oder auszugeben, wobei eine Kommunikationsschnittstelle, die leitungsgebundene Daten einlesen oder ausgeben kann, diese Daten beispielsweise elektrisch oder optisch aus einer entsprechenden Datenübertragungsleitung einlesen oder in eine entsprechende Datenübertragungsleitung ausgeben kann.

Unter einer Vorrichtung kann vorliegend ein elektrisches Gerät verstanden werden, das Sensorsignale verarbeitet und in Abhängigkeit davon Steuer- und/oder Datensignale ausgibt. Die Vorrichtung kann eine Schnittstelle aufweisen, die hard- und/oder softwaremäßig ausgebildet sein kann. Bei einer hardwaremäßigen Ausbildung können die Schnittstellen beispielsweise Teil eines sogenannten System-ASICs sein, der verschiedenste Funktionen der Vorrichtung beinhaltet. Es ist jedoch auch möglich, dass die Schnittstellen eigene, integrierte Schaltkreise sind oder zumindest teilweise aus diskreten Bauelementen bestehen. Bei einer softwaremäßigen Ausbildung können die Schnittstellen Softwaremodule sein, die beispielsweise auf einem Mikrocontroller neben anderen Softwaremodulen vorhanden sind.

Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in den Zeichnungen dargestellt und in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigt:

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines statisch abbildenden Savart-Polariskops nach Zhang;

Fig. 2 eine schematische Darstellung eines Fourier-Transform-Spektrometers gemäß einem Ausführungsbeispiel;

Fig. 3 eine schematische Darstellung einer ersten Betriebsart eines Fourier-Transform-Spektrometers gemäß einem Ausführungsbeispiel;

Fig. 4 eine schematische Darstellung einer zweiten Betriebsart eines Fourier-Transform-Spektrometers gemäß einem Ausführungsbeispiel;

Fig. 5 eine schematische Darstellung einer dritten Betriebsart eines Fourier-Transform-Spektrometers gemäß einem Ausführungsbeispiel;

Fig. 6 eine schematische Darstellung unterschiedlicher Stellungen von Linsenelementen einer Linseneinheit gemäß einem Ausführungsbeispiel;

Fig. 7 eine schematische Darstellung unterschiedlicher Stellungen von Linsenteilen eines Linsenelements gemäß einem Ausführungsbeispiel;

Fig. 8 ein Ablaufdiagramm eines Verfahrens gemäß einem Ausführungsbeispiel; und

Fig. 9 eine schematische Darstellung einer Vorrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel.

In der nachfolgenden Beschreibung günstiger Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung werden für die in den verschiedenen Figuren dargestellten und ähnlich wirkenden Elemente gleiche oder ähnliche Bezugszeichen verwendet, wobei auf eine wiederholte Beschreibung dieser Elemente verzichtet wird.

Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung eines statisch abbildenden Savart-Polariskops 100 nach Zhang. Dabei wird ein Gangunterschied zwischen zwei Strahlen mittels Doppelbrechung erzeugt. Es sind keine beweglichen Bauteile erforderlich, um den Gangunterschied zu erzeugen. Das Licht, das das Savart-Polariskop passiert, wird anschließend von einer Linse 102 auf einen Detektor 104 abgebildet. Das Bild auf dem Detektor 104 zeigt dann das abzubildende Objekt einschließlich einer Intensitätsvariation aufgrund der Interferenz. Im Betrieb wird das Polariskop kontrolliert mit einer bekannten Geschwindigkeit über ein zu vermessendes Objekt bewegt. Dabei wird kontinuierlich ein Bild aufgenommen, woraus für jeden Punkt des Objekts ein zugehöriges Interferogramm berechnet und anschließend fouriertransformiert werden kann.

Fig. 2 zeigt eine schematische Darstellung eines Fourier-Transform-Spektrometers 200 gemäß einem Ausführungsbeispiel, nachfolgend auch kurz

Spektrometer 200 genannt. Das Spektrometer 200 umfasst eine Detektoreinheit 202 zum Detektieren von Lichtstrahlen. Gegenüber der Detektoreinheit 202 ist eine Linseneinheit 204 angeordnet. Gemäß diesem Ausführungsbeispiel ist die Linseneinheit 204 als ein Linsensystem aus einem Linsenelement 206 und einem
5 zwischen dem Linsenelement 206 und der Detektoreinheit 202 angeordneten weiteren Linsenelement 208 zum Lenken der Lichtstrahlen auf die Detektoreinheit 202 realisiert. Beispielsweise weisen die beiden Linsenelemente 206, 208 unterschiedliche Brennweiten auf, wobei etwa das weitere Linsenelement 208 relativ zur Detektoreinheit 202 verschiebbar angeordnet ist.
10 So kann durch Verschieben des weiteren Linsenelements 208 die Brennweite der Linseneinheit 204 variiert werden, um das Spektrometer 200 in unterschiedliche Betriebsarten schalten zu können. Dabei sollte die Position der Detektoreinheit 202 in die neue Brennebene nachgeführt werden.

15 Alternativ weist die Linseneinheit 204 beispielsweise nur das Linsenelement 206 auf. In diesem Fall kann das Linsenelement 206 als eine Linse mit veränderbarer Brennweite, etwa als Flüssigkristall-, Flüssig- oder Polymerlinse, realisiert sein. Zusätzlich kann das Linsenelement 206 relativ zur Detektoreinheit 202 bewegbar angeordnet sein. Auch auf diese Weise kann eine flexible und präzise
20 Verstellung der Brennweite der Linseneinheit 204 gewährleistet werden.

Beispielhaft ist das Spektrometer 200 in Fig. 2 als ein Mikrospektrometer auf Basis eines Savart-Polariskops mit beweglichem Linsensystem realisiert. Dabei ist der Linseneinheit 204 ein entsprechendes Savart-Element 210 vorgeschaltet,
25 auch Polariskopeinheit genannt. Zwischen dem Savart-Element 210 und der Linseneinheit 204 ist ein Analysator 212 angeordnet. Dem Savart-Element 210 ist wiederum ein Diffusor 214 vorgeschaltet. Zwischen dem Diffusor 214 und dem Savart-Element 210 sind ein Vorfilter 216 und ein Polarisator 218 angeordnet, wobei der Polarisator 218 zwischen dem Vorfilter 216 und dem Savart-Element
30 210 angeordnet ist. Der Vorfilter 216, insbesondere ein Langpassfilter, kann an jeder beliebigen Position vor der Detektoreinheit 202 stehen.

Je nach Ausführungsbeispiel ist das Savart-Element 210 beispielsweise folgendermaßen realisiert:

- aus zwei doppelbrechenden Kristallen gleichen Materials, wobei der erste Kristall und der zweite Kristall je eine optische Achse von 45 Grad zur Oberfläche aufweisen, wobei die Hauptebene des zweiten Kristalls im Vergleich zum ersten Kristall um 90 Grad gedreht ist;
- aus zwei doppelbrechenden Kristallen wie oben, wobei im zweiten Kristall die optische Achse unter einem anderen Winkel zur Oberfläche orientiert ist, die Hauptebene aber weiterhin um 90 Grad zum ersten Kristall rotiert ist;
- aus zwei identischen doppelbrechenden Kristallen, wobei zwischen den Kristallen eine achromatische Halbwellenplatte geschaltet ist und die optische Achse unter einem Winkel von 45 Grad zur Oberfläche steht und die Hauptebenen der beiden Kristalle parallel zueinander sind;
- aus vier doppelbrechenden Kristallen, wobei die ersten zwei Kristalle negativ doppelbrechend sind und die zweiten zwei Kristalle positiv doppelbrechend sind und die Kristalle ansonsten wie im ersten Fall angeordnet sind.

Fig. 3 zeigt eine schematische Darstellung einer ersten Betriebsart eines Fourier-Transform-Spektrometers 200 gemäß einem Ausführungsbeispiel, etwa eines vorangehend anhand von Fig. 2 beschriebenen Spektrometers. Gezeigt ist eine Betriebsart des Spektrometers 200, bei dem das Linsenelement 206 eine kleine Brennweite aufweist. Die Detektoreinheit 202 ist in einer Brennebene des Linsenelements 206 angeordnet. Rechts neben der Detektoreinheit 202 ist schematisch ein der ersten Betriebsart zugeordnetes und mittels der Detektoreinheit 202 aufgenommenes erstes Interferogramm 300 dargestellt. Bei dem Linsenelement 206 handelt es sich gemäß diesem Ausführungsbeispiel um eine Linse mit variabler Position und Brennweite. Ein horizontaler Abstand zwischen dem Linsenelement 206 und der Detektoreinheit 202 ist mit einem Doppelpfeil markiert.

Fig. 4 zeigt eine schematische Darstellung einer zweiten Betriebsart eines Fourier-Transform-Spektrometers 200 gemäß einem Ausführungsbeispiel. Dabei weist das Linsenelement 206 eine größere Brennweite als in Fig. 3 auf. Dementsprechend ist das Linsenelement 206 in einem größeren horizontalen

Abstand zur Detektoreinheit 202 als in Fig. 3 angeordnet. Rechts neben der Detektoreinheit 202 ist analog zu Fig. 3 schematisch ein der zweiten Betriebsart zugeordnetes und mittels der Detektoreinheit 102 aufgenommenes zweites Interferogramm 400 dargestellt, das eine Vergrößerung des ersten Interferogramms repräsentiert.

Fig. 5 zeigt eine schematische Darstellung einer dritten Betriebsart eines Fourier-Transform-Spektrometers 200 gemäß einem Ausführungsbeispiel. Im Unterschied zu den beiden Figuren 3 und 4 weist das Linsenelement 206 hier eine zwischen den Brennweiten der ersten und zweiten Betriebsart liegende mittlere Brennweite auf. Rechts neben der Detektoreinheit 202 ist ein entsprechendes drittes Interferogramm 500 dargestellt. Gezeigt ist die Verwendung der mittleren Brennweite bei einem Spektrum, bei dem die spektrale Intensitätsverteilung nur langsam über die Wellenlängen variiert, bei dem also keine scharfen Absorptionsdips oder sonstige scharfe spektrale Charakteristiken vorhanden sind. Dabei bringt ein Randbereich des dritten Interferogramms 500, in dem das Interferogramm um eine konstante Intensität herum rauscht, keine neue Information, sondern verschlechtert lediglich das Signal-zu-Rausch-Verhältnis des durch Fouriertransformation erhaltenen Spektrums.

Fig. 6 zeigt eine schematische Darstellung unterschiedlicher Stellungen von Linsenelementen 206, 208 einer Linseneinheit 204 gemäß einem Ausführungsbeispiel, etwa einer vorangehend anhand der Figuren 2 bis 5 beschriebenen Linseneinheit. Gezeigt ist ein Prinzip eines parfokalen Objektivs, bei dem zwei Linsen in Form der beiden Linsenelemente 206, 208 bewegt werden, um die Brennweite zu variieren und gleichzeitig eine Abbildung auf der Detektoreinheit 202 im Fokus zu halten.

Gezeigt sind eine erste Stellung 600, eine zweite Stellung 602 und eine dritte Stellung 604 der Linseneinheit 204. Gemäß diesem Ausführungsbeispiel umfasst die Linseneinheit 204 zusätzlich zu den beiden Linsenelementen 206, 208 ein erstes Zusatzlinsenelement 606 und ein zweites Zusatzlinsenelement 608, wobei die beiden Zusatzlinsenelemente 606, 608 zwischen dem weiteren Linsenelement 208 und der Detektoreinheit 202 angeordnet sind und das weitere Linsenelement 208 zwischen dem Linsenelement 206 und dem ersten

Zusatzlinsenelement 606 angeordnet ist. Beispielhaft sind das Linsenelement 206 sowie die beiden Zusatzsensorelemente 606, 608 als bikonvexe Sammellinsen ausgeformt, während das weitere Linsenelement 208 als bikonkave Zerstreuungslinse ausgeformt ist.

5

In der ersten Stellung 600 befindet sich das weitere Linsenelement 208 beispielhaft mittig zwischen dem Linsenelement 206 und dem ersten Zusatzlinsenelement 606. In der zweiten Stellung 602 ist das weitere Linsenelement 208 an das Linsenelement 206 herangerückt, sodass ein Abstand zwischen den beiden Linsenelementen 206, 208 geringer ist als ein Abstand zwischen dem weiteren Linsenelement 208 und dem ersten Zusatzlinsenelement 606. Zusätzlich wurde ein Abstand zwischen dem Linsenelement 206 und der Detektoreinheit 202 durch Verschieben des Linsenelements 206 in Richtung der Detektoreinheit 202 im Vergleich zur ersten Stellung 600 geringfügig vergrößert.

10

In der dritten Stellung 604 ist das weitere Linsenelement 208 an das erste Zusatzlinsenelement 606 herangerückt, sodass nun der Abstand zwischen den beiden Linsenelementen 206, 208 größer ist als der Abstand zwischen dem weiteren Linsenelement 208 und dem ersten Zusatzlinsenelement 606.

15

Zusätzlich wurde der Abstand zwischen dem Linsenelement 206 und der Detektoreinheit 202 durch Verschieben des Linsenelements 206 in Richtung der Detektoreinheit 202 im Vergleich zur ersten Stellung 600 geringfügig verkleinert.

20

Fig. 7 zeigt eine schematische Darstellung unterschiedlicher Stellungen von Linsenteilen 700, 702 eines Linsenelements 206 gemäß einem Ausführungsbeispiel, etwa eines Linsenelements 206, wie es vorangehend anhand der Figuren 2 bis 6 beschrieben ist. Gemäß diesem Ausführungsbeispiel ist das Linsenelement 206 als eine sogenannte Alvarez-Linse realisiert, d. h. als eine Linse aus einem ersten Linsenteil 700 und einem zweiten Linsenteil 702, wobei die beiden Linsenteile 700, 702 je eine polynomielle Oberfläche aufweisen. Die polynomiellen Oberflächen der beiden Linsenteile 700, 702 sind einander gegenüberliegend und je nach Ausführungsbeispiel aneinander angrenzend oder beabstandet zueinander angeordnet. Zusätzlich sind die beiden Linsenteile 700, 702 lateral zueinander verschiebbar. Die beiden Linsenteile 700, 702 sind je in einer neutralen Position 704, einer Position 706 mit negativer Gesamtbrechkraft oder einer Position 708 mit positiver Brechkraft gezeigt.

25

30

35

In einer ersten Konfiguration 710 laufen Lichtstrahlen von links nach rechts innerhalb einer Bildebene. Eine zweite Konfiguration 702 repräsentiert eine innere kubische Oberflächenkonfiguration des Linsenelements 206 [Quelle: Sergio Barbero, "The Alvarez and Lohmann refractive lenses revisited", Opt. Express 17, 9376-9390 (2009)].

Fig. 8 zeigt ein Ablaufdiagramm eines Verfahrens 800 gemäß einem Ausführungsbeispiel. Das Verfahren 800 zum Betreiben eines Fourier-Transform-Spektrometers, etwa eines vorangehend anhand der Figuren 2 bis 7 beschriebenen Spektrometers, umfasst einen Schritt 810, in dem die Brennweite der Linseneinheit mittels des Linsenelements verändert wird, um das Fourier-Transform-Spektrometer zwischen den unterschiedlichen Betriebsarten umzuschalten. Gemäß einem Ausführungsbeispiel erfolgt in einem weiteren Schritt ein Verfahren der Linseneinheit und/oder der Detektoreinheit, sodass die Detektoreinheit in einer Brennebene der Linseneinheit steht.

Fig. 9 zeigt eine schematische Darstellung einer Vorrichtung 900 gemäß einem Ausführungsbeispiel. Die Vorrichtung 900 kann beispielsweise zur Durchführung eines Verfahrens, wie es vorangehend anhand von Fig. 8 beschrieben ist, verwendet werden. Die Vorrichtung 900 weist eine Veränderungseinheit 910 auf, die ausgebildet ist, um die Brennweite der Linseneinheit durch Ansteuern des Linsenelements zu verändern. Hierzu gibt die Veränderungseinheit 910 ein entsprechendes Ansteuersignal 912 an das Linsenelement oder einen mit dem Linsenelement gekoppelten Aktor aus.

Nachfolgend werden verschiedene Ausführungsbeispiele des hier vorgestellten Ansatzes nochmals mit anderen Worten beschrieben.

Im Kern nutzt der hier vorgestellte Ansatz aus, dass mittels eines beweglichen Linsensystems in Form der Linseneinheit 204 eine Vergrößerung eines Interferogramms auf der Detektoreinheit 202, etwa einem Detektor(array) eines Savart-Polariskops, variabel einstellbar ist. Da die Abmessungen der Detektoreinheit 202 sowie die Größe oder der Abstand der Pixel fix sind, werden eine Abtastrate des Interferogramms, eine maximale abbildbare Phasendifferenz

sowie ein Anteil der Detektoreinheit 202, auf dem derjenige Teil des Interferogramms abgebildet wird, dessen Oszillationen noch vom Detektorrauschen unterschieden werden können, durch die Vergrößerung des Interferogramms direkt bestimmt. Dadurch werden wiederum in gleicher Reihenfolge eine minimale messbare Wellenlänge ohne Aliasing-Probleme (in Kombination mit einem optischen Langpass-Vorfilter), eine erreichbare Auflösung und ein erreichbares Signal-zu-Rausch-Verhältnis bestimmt.

Der Vorteil des hier vorgestellten Ansatzes besteht somit darin, dass je nach gewünschtem Messszenario eine der oben genannten Größen optimiert werden kann oder ein auf die Messsituation abgestimmter Trade-Off eingestellt werden kann.

Insbesondere wenn die Größe des Detektors aufgrund dessen Preises ein limitierendes Kriterium darstellt, ist es vorteilhaft, wenn mit einem kleinen Detektor eine breite Funktionalität in Bezug auf Auflösung und kleinste messbare Wellenlänge realisiert werden kann.

Wie in Fig. 2 gezeigt, kann der Strahlengang des Spektrometers 200 um einen optionalen Vorfilter 216 ergänzt werden, der prinzipiell auch an einer anderen Position, allerdings vor der Detektoreinheit 202, angeordnet sein kann. Die Fokussieroptik ist durch ein Linsensystem aus mindestens zwei beweglichen Linsen in Form der Linsenelemente 206, 208 gebildet.

Das bewegliche Linsensystem aus mindestens zwei Linsen mit fester Brennweite kann auch als eine effektive bewegliche Linse mit variabler Brennweite angesehen werden. Wie in den Figuren 3 und 4 gezeigt, kann dadurch eine Vergrößerung oder eine Streckung bzw. eine Verkleinerung oder Stauchung des Interferogramms auf der Detektoreinheit 202 erreicht werden.

Beim Savart-Polariskop wird jedem Einfallswinkel eine bestimmte Phasendifferenz zwischen den beiden aufgespaltenen Strahlen zugeordnet. Die beiden in den Figuren 3 und 4 gezeigten kollimierten Strahlenbündel (ein Strahl repräsentiert dabei jeweils die Summe aus den durch das Polariskop aufgespaltenen Strahlen) führen also aufgrund der Linsenabbildung zum

gleichen Intensitätsfleck auf der Detektoreinheit 202. Da der Auftreffpunkt auf der Detektoreinheit 202 bei einer großen Brennweite weiter außen liegt, wird durch die Verwendung der höheren Brennweite ein Strecken des Interferogramms erreicht.

5

Das Interferogramm ist eine kontinuierliche Funktion des Einfallswinkels, die durch die Detektoreinheit 202 an diskreten Punkten, also für diskrete Phasendifferenzen, abgetastet wird. Die örtliche Abtastfrequenz ist durch die Größe oder den gegenseitigen Abstand der Pixel der Detektoreinheit 202 bestimmt. Die Abtastfrequenz des Interferogramms ist also durch die Größe der Pixel und die Vergrößerung des Interferogramms auf der Detektoreinheit 202 bestimmt. Je stärker die Vergrößerung, d. h. je größer die Brennweite, desto dichter liegen die Abtastpunkte im Interferogramm, d. h., desto größer ist die Abtastfrequenz.

10

15

Das Abtasttheorem besagt, dass die Abtastfrequenz mindestens doppelt so groß wie die größte im abzutastenden Signal vorkommende Frequenzkomponente sein sollte. Wenn dies nicht der Fall ist, kommt es zu sogenannten Aliasing-Effekten, die das Signal verfälschen, vergleichbar etwa mit den Felgen eines fahrenden Autos in einem Film, die sich rückwärts zu drehen scheinen. Falls im abzutastenden Signal Frequenzkomponenten vorhanden sind, die das Abtasttheorem verletzen würden, sollten diese vor dem Abtasten herausgefiltert werden.

20

25

Da im Fall eines Fourier-Transform-Spektrometers kurze hochfrequente Wellenlängen im Interferenzmuster zu hochfrequenten Oszillationen führen, sollte dementsprechend mittels eines Langpassfilters Licht, das zu kurzwellig ist, um das zugehörige Interferogramm schnell genug abtasten zu können, herausgefiltert werden.

30

Die Auflösung eines Fourier-Transform-Spektrometers bei einer gegebenen Wellenlänge λ_0 ist ungefähr $FWHM \approx \frac{\lambda_0^2}{\Delta_{\max}}$, wobei $\Delta_{\max}$ die maximale optische Weglängendifferenz ist, die im Interferogramm aufgenommen wurde. Die Auflösung wird also für große Wellenlängen schlechter. Das liegt daran, dass die

Auflösung nur in Wellenzahlen oder Frequenzen, jedoch nicht in Wellenlängen konstant ist. Beim Fourier-Transform-Spektrometer ist die maximale optische Weglängendifferenz neben der Dicke des doppelbrechenden Kristalls und dem Brechzahlkontrast im doppelbrechenden Kristall zwischen ordentlichem und außerordentlichem Strahl bestimmt durch die Größe der Detektoreinheit 202 im Zusammenhang mit der Linsenabbildung und dem maximal nutzbaren Einfallswinkel. Die Figuren 3 und 4 zeigen somit, wie sich die Wahl der Brennweite auf die kleinste abtastbare Wellenlänge und die Auflösung auswirkt.

Für eine kleine Brennweite kann somit eine große optische Weglängendifferenz auf der Detektoreinheit 202 abgebildet werden, sodass eine hohe Auflösung erzielt werden kann. Dabei kann jedoch das Interferogramm aufgrund der festen Pixelgröße nur mit einer geringen Rate abgetastet werden, wodurch die kleinste abtastbare Wellenlänge vergrößert wird. Falls im zu vermessenden Spektrum kürzere Wellenlängenanteile vorhanden sind, sollten diese mittels eines optischen Vorfilters herausgefiltert werden, da sie sonst die Auswertung massiv stören können.

Für eine große Brennweite wird nur eine kleine optische Weglängendifferenz auf der Detektoreinheit 202 abgebildet, sodass die Auflösung verringert wird. Dieser Bereich des Interferogramms kann jedoch feiner abgetastet werden, sodass auch kürzere Wellenlängen ausgewertet werden können. Je nach zu vermessenem Spektrum kann für diesen Modus ein Langpassfilter mit kürzerer Passwellenlänge erforderlich sein, worauf jedoch verzichtet werden kann, falls im zu vermessenden Licht keine entsprechenden Wellenlängenanteile vorhanden sind.

Natürlich gibt es auch zwischen diesen beiden Extremen sinnvolle Abbildungsmodi oder Brennweiten. Für ein zu vermessendes Spektrum mit breiten Features, d. h. für ein Spektrum, das sich über einen großen Wellenlängenbereich erstreckt, fällt das Interferogramm außerhalb des Zentralbereichs schnell auf null ab. Die detektierte Signalstärke ist dann schnell nicht mehr vom Rauschen der Detektorpixel zu unterscheiden. Eine Aufnahme oder Auswertung des Interferogramms in einem größeren Bereich als dem nennbar von null verschiedenen Signal führt dann nicht mehr zu einer

Verbesserung des Signals, da das Signal-zu-Rausch-Verhältnis abnimmt. In diesem Sinne kann eine Aufnahme wie in Fig. 5 gezeigt ungünstig sein. Stattdessen sollte das Interferogramm mit einer etwas größeren Brennweite so auf die Detektoreinheit 202 vergrößert werden, dass der Bereich auflösbarer Oszillationen gerade die gesamte Detektorfläche bedeckt. Dadurch wird bei maximalem Signal-zu-Rausch-Verhältnis maximal fein abgetastet.

Die Vorteile dieser verschiedenen Modi können in einem Fourier-Transform-Spektrometer variabel eingesetzt werden, wenn die Brennweite der Linse variiert werden kann und gleichzeitig sichergestellt ist, dass die Detektoreinheit 202 in der Brennebene der Linseneinheit 204 steht. Dies lässt sich mittels eines beweglichen Linsensystems erzielen. Solche Zoomobjektive existieren in unterschiedlichen Ausführungen, deren Grundprinzip darauf beruht, dass zwei Linsen mit den Brennweiten f_1 und f_2 und einem gegenseitigen Abstand d eine gemeinsame Brennweite f gemäß der Gleichung $1/f = 1/f_1 + 1/f_2 - d/(f_1 \cdot f_2)$ besitzen oder durch die Brechkraft $\Phi = 1/f$ ausgedrückt: $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - d \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2$. Das Prinzip eines solchen Linsenzooms ist in Fig. 6 dargestellt. Die ersten drei Linsen 206, 208, 606 bilden ein so genanntes afokales Zoomsystem (afokal, da ein kollimierter Strahl das System wiederum als kollimierter Strahl verlässt). Wird nun die mittlere Linse 208 bewegt, so ändert sich die Vergrößerung des afokalen Zooms. Die Fokusslänge, bei einem Linsensystem effektive Fokusslänge genannt, ändert sich dabei. Die effektive Fokusslänge ist der Abstand zwischen einer Bildebene und einem Schnittpunkt eines imaginär verlängerten, von links einlaufenden Randstrahls mit einem dazugehörigen, auf die Bildebene fokussierten Strahl (beide Strahlen sind durch eine gestrichelte, schwarze Linie dargestellt). Neben der mittleren Linse 208 des Zoomsystems wird auch noch die erste Linse 206 leicht bewegt, um die ansonsten auftretende Verschiebung der Bildebene zu kompensieren, was auch als parfokales Objektiv bezeichnet werden kann. Dies erfolgt entweder durch zwei separate Motoren oder durch einen einzigen Motor, der die mittlere Linse 208 linear bewegt, und eine mechanische Verbindung mit einer entsprechenden, im Allgemeinen nichtlinearen Übersetzung zur Repositionierung der ersten Linse 206. Auf dem beschriebenen Prinzip beruhen zum Beispiel Objektive, die bei Filmaufnahmen verwendet werden, wo ein Zoomen erforderlich ist, bei dem die Abbildung stets scharf bleibt. Wenn die Erhaltung der Abbildungsschärfe nicht kritisch ist, wird

beispielsweise nur die mittlere Linse 208 verschoben. Danach sollte das gesamte Linsensystem nachgefahren werden, um erneut zu fokussieren, was auch als varifokales Objektiv bezeichnet werden kann. Bei Smartphones können derartige Objektive beispielsweise mithilfe von Schwingspulen bewegt werden. Darüber hinaus kann die Bewegung der Linsen beispielsweise durch Verwendung von Formgedächtnislegierungen, Piezomotoren oder Piezo-MEMS oder MEMS-Aktuatoren realisiert werden.

Alternativ zu einem System aus verschiebbaren Linsen können auch einzelne Linsen mit variabler Brennweite verwendet werden, wie zum Beispiel Flüssigkristalllinsen, LCoS-Linsen, bei denen eine Phasenretardation durch die doppelbrechende Eigenschaft von Flüssigkristallen erreicht wird, Flüssiglinsen mit einer Flüssigkeitsmembran, deren Form durch eine angelegte Spannung und deren Oberflächenspannung verändert werden kann, oder Polymerlinsen, deren Form durch eine äußere elektrische Spannung geändert werden kann, etwa als Polymervolumen oder als Membranen. Darüber hinaus können varifokale Linsen, die auf dem sogenannten Alvarez-Prinzip beruhen, auch Alvarez- oder Lohmann-Linsen genannt, verwendet werden, wie dies in Fig. 7 gezeigt ist. Eine solche Linse umfasst zwei Elemente 700, 702 mit kubischer Phasenretardation, die bei transversaler Verschiebung ihre Brennweite ändern. Dabei weist die jeweilige Oberfläche der Elemente die Form eines Polynoms dritten Grades auf.

Zusätzlich kann für jede Einstellung der Linsenbrennweite ein dazugehöriges Langpassfilter verwendet werden, das sicherstellt, dass das Abtasttheorem nicht verletzt wird. In einem einfachen Ausführungsbeispiel mit nur zwei Linseneinstellungen erfolgt dies etwa mittels einer von Hand vor ein Savart-Element schiebbaren Filterkappe. Für mehrere Linseneinstellungen kann das Filter auch als Filterrad realisiert sein. Alternativ kann auch ein durchstimmbarer Langpassfilter verwendet werden.

Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel ist das Linsensystem nicht durchstimmbar, sondern weist zwei oder mehr separate Linsen mit unterschiedlichen Brennweiten auf, die auf zwei oder mehr unterschiedliche Detektoren in unterschiedlichen Abständen abbilden. In diesem Fall sollte für jeden Abbildungspfad ein entsprechender Vorfilter verwendet werden.

5

Umfasst ein Ausführungsbeispiel eine „und/oder“-Verknüpfung zwischen einem ersten Merkmal und einem zweiten Merkmal, so ist dies so zu lesen, dass das Ausführungsbeispiel gemäß einer Ausführungsform sowohl das erste Merkmal als auch das zweite Merkmal und gemäß einer weiteren Ausführungsform entweder nur das erste Merkmal oder nur das zweite Merkmal aufweist.

Ansprüche

5

1. Fourier-Transform-Spektrometer (200) mit einer Polariskopeinheit (210), umfassend zumindest zwei doppelbrechende Kristalle, wobei das Fourier-Transform-Spektrometer (200) folgende Merkmale aufweist:

10

eine Detektoreinheit (202) zum Detektieren von Lichtstrahlen; und

15

eine zwischen der Polariskopeinheit (210) und der Detektoreinheit (202) angeordnete Linseneinheit (204), umfassend zumindest ein Linsenelement (206) zum Lenken der Lichtstrahlen auf die Detektoreinheit (202), wobei die Linseneinheit (204) eine mittels des Linsenelements (206) veränderbare Brennweite aufweist, um das Fourier-Transform-Spektrometer (200) zwischen unterschiedlichen Betriebsarten umschalten zu können.

20

2. Fourier-Transform-Spektrometer (200) gemäß Anspruch 1, bei dem ein Abstand zwischen der Detektoreinheit (202) und dem Linsenelement (206) veränderbar ist.

25

3. Fourier-Transform-Spektrometer (200) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, bei dem das Linsenelement (206) eine veränderbare Brennweite aufweist.

30

4. Fourier-Transform-Spektrometer (200) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, bei dem das Linsenelement (206) als Flüssigkristalllinse und/oder Flüssiglinse und/oder Polymerlinse ausgeführt ist.

5. Fourier-Transform-Spektrometer (200) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, bei dem das Linsenelement (206) aus

zumindest zwei relativ zueinander verschiebbaren, je eine polynomielle Oberfläche aufweisenden Linsenteilen (700, 702) ausgeführt ist.

- 5 6. Fourier-Transform-Spektrometer (200) gemäß einem der vorangegangenen Ansprüche, bei dem die Linseneinheit (204) zumindest ein weiteres Linsenelement (208) zum Lenken der Lichtstrahlen auf die Detektoreinheit (202) aufweist, wobei das Linsenelement (206) zwischen dem weiteren Linsenelement (208) und der Detektoreinheit (202) angeordnet ist.
- 10 7. Fourier-Transform-Spektrometer (200) gemäß Anspruch 6, bei dem ein Abstand zwischen dem Linsenelement (206) und dem weiteren Linsenelement (208) und/oder zwischen der Detektoreinheit (202) und dem weiteren Linsenelement (208) veränderbar ist.
- 15 8. Fourier-Transform-Spektrometer (200) gemäß Anspruch 6 oder 7, bei dem das Linsenelement (206) und das weitere Linsenelement (208) voneinander abweichende Brennweiten aufweisen.
- 20 9. Verfahren (800) zum Betreiben eines Fourier-Transform-Spektrometers (200) gemäß einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei das Verfahren (800) folgenden Schritt umfasst:

25 Verändern (810) der Brennweite der Linseneinheit (204) mittels des Linsenelements (206), um das Fourier-Transform-Spektrometer (200) zwischen den unterschiedlichen Betriebsarten umzuschalten.
- 30 10. Verfahren (800) gemäß Anspruch 9, mit einem Schritt des Verfahrens der Linseneinheit (204) und/oder der Detektoreinheit (202), sodass die Detektoreinheit (202) in einer Brennebene der Linseneinheit (204) steht.
- 35 11. Vorrichtung (900) mit einer Einheit (910), die ausgebildet ist, um das Verfahren (800) gemäß Anspruch 9 oder 10 auszuführen und/oder anzusteuern.