

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

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
8. Oktober 2015 (08.10.2015)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2015/149759 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

G01J 3/14 (2006.01) G01J 3/28 (2006.01)
G01J 3/22 (2006.01) A61B 5/00 (2006.01)
G01J 3/02 (2006.01) G01J 3/12 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2015/200066

(22) Internationales Anmeldedatum:
6. Februar 2015 (06.02.2015)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:

10 2014 206 061.3 31. März 2014 (31.03.2014) DE
10 2015 200 034.6
5. Januar 2015 (05.01.2015) DE

(71) Anmelder: MICRO-EPSILON OPTRONIC GMBH
[DE/DE]; Lessingstraße 14, 01465 Langebrück (DE).

(72) Erfinder: OTTO, Tobias; c/o MICRO-EPSILON
Optronic GmbH, Lessingstraße 14, 01465 Langebrück
(DE).

(74) Anwalt: ULLRICH & NAUMANN; Schneidmühlstraße
21, 69115 Heidelberg (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,
BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR,
KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG,
MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM,
PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC,
SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN,
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,
GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST,
SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG,
KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH,
CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE,
IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO,
RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM,
GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz
3)

(54) Title: SPECTROMETER

(54) Bezeichnung : SPEKTROMETER

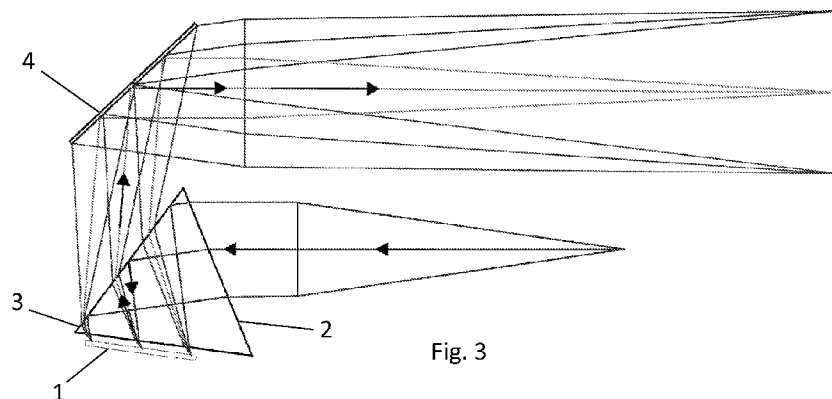


Fig. 3

(57) Abstract: The invention relates to a spectrometer comprising a combination of at least one grid (1) and at least one prism (2), characterised in that total reflexion is used to produce a compact spectrometer in at least one prism (2).

(57) Zusammenfassung: Ein Spektrometer, umfassend eine Kombination von mindestens einem Gitter (1) und mindestens einem Prisma (2), ist dadurch gekennzeichnet, dass zur Realisierung eines Kompaktspektrometers in mindestens einem Prisma (2) Totalreflexion genutzt wird.



WO 2015/149759 A1

SPEKTROMETER

Die Erfindung betrifft ein Spektrometer, umfassend eine Kombination von mindestens einem Gitter und mindestens einem Prisma.

5

Für die Analyse von breitbandigem Licht kombinieren klassische Weißlicht-Spektrometer wenigstens eine Kollimations-, eine Dispersions- und eine Fokussierungsoptik mit einem Detektor, welcher heutzutage üblicherweise als Zeilen- oder Matrixbildsensor ausgeführt ist, siehe Fig. 1. Alle Optiken bestehen wiederum aus jeweils mindestens einem Element. Als Kollimations- und Fokussierungselemente kommen üblicherweise Linsen zum Einsatz, andere Ausführungen sind allerdings ebenfalls bekannt. Für die Erzeugung der notwendigen Dispersion werden sowohl einzeln als auch in Kombination Prismen und Gitter verwendet.

10

15

Die Dispersionsoptik dient zur Erzeugung der Winkeldispersion D , d.h. zur Änderung der Ausbreitungsrichtung des Lichts in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Im Zusammenspiel mit der Fokussierungsoptik wird das so aufgespaltete Licht – Spektrum – an verschiedenen Orten auf dem Detektor abgebildet. Letzterer ermöglicht die Umwandlung des Intensitätsverlaufs über das abgebildete Spektrum in ein analoges Signal, indem der lineare Zusammenhang zwischen Lichtintensität und Fotostrom ausgenutzt wird. Das analoge Signal wird in vielen aktuellen Anwendungen digitalisiert, in ein Rechnersystem, z.B. PC, FPGA, etc., eingespeist und dort ausgewertet.

20

25

Die Abbildungscharakteristik des Spektrometers ist sehr stark von der Art und Anordnung der optischen Elemente abhängig. Betrachtet man zunächst nur die einfachsten optischen Aufbauten und dabei nur das zentrale dispersive Element, werden zwei Gattungen sichtbar: Prismen- und Gitterspektrometer. Im ersten Fall ist der Aufbau immer transmissiv, während in zweiten Fall auch reflexive Anordnungen möglich werden, siehe Fig. 2.

30

Die Winkeldispersion eines Prismenspektrometers resultiert aus der Wellenlängenabhängigkeit des Brechungsindex n des Prismenmaterials. Unter Anwendung des Snelliusschen Brechungsgesetzes und mit Prismen-Einfallswin-

kel α , zugehörigem Brechungswinkel γ , Prismen-Ausfallswinkel β , Wellenlänge λ sowie Prismawinkel ε ergeben sich für die Strahlablenkung am Prisma:

$$\sin(\beta) = n(\lambda) \sin\left(\varepsilon - \arcsin\left(\frac{\sin(\alpha)}{n(\lambda)}\right)\right)$$

Formel 1: Ablenkungsgleichung für ein Prisma

$$D = \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{\sin(\varepsilon)}{\cos(\gamma) \cos(\beta)} \frac{dn}{d\lambda}$$

5

Formel 2: Dispersionsgleichung für ein Prisma

Die Winkeldispersion eines Gitterspektrometers ergibt sich entsprechend der Gittergleichung und mit Ablenkwinkel β , Beugungsordnung μ sowie Gitterkonstante g zu:

$$D = \frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{\mu}{g \cos(\beta)}$$

10

Formel 3: Dispersionsgleichung für ein Gitter

Analysiert man Formel 2 und Formel 3 hinsichtlich der Dispersionscharakteristik, wird sehr schnell der nichtlineare Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Ablenkung deutlich. Bei Einsatz eines Gitters ist – entsprechend der gewählten Definition – ein linearer Zusammenhang zwischen Dispersion – und damit Abbildungsposition – und Wellenlänge nur in einem engen Bereich um $\beta = 0$ gegeben. Aufgrund der mehrfachen, nicht-linear eingehenden Parameter ist beim Einsatz eines Prismas die Auslegung für den linearen Zusammenhang zwischen Dispersion und Wellenlänge noch schwieriger. Durch geeignete Kombination optischer Komponenten lässt sich für das Gesamtsystem jedoch trotzdem eine annähernd lineare Abbildung hinsichtlich der Wellenlänge erzeugen, siehe z.B. US 6,661,513, Granger, 2003.

Je nach Anwendung ist ein lineares Dispersionsverhalten in Bezug auf die Wellenlänge jedoch nicht von Vorteil. Es existieren verschiedene Messverfahren, z.B.

25

konfokal-chromatische Abstandsmessung und weißlicht-interferometrische Verfahren, bei denen die Messgröße bzw. die zugrunde liegenden Signale naturgemäß nichtlinear in der Wellenlänge kodiert sind. Ist die Abbildung im Spektrometer nicht an diesen Zusammenhang angepasst, müssen die Signale vor der eigentlichen
5 Auswertung mehr oder weniger aufwendig umgerechnet werden. Dieser Zwischenschritt bringt zwei wesentliche Nachteile mit sich. Zum einen werden dafür zusätzliche Ressourcen benötigt und zum anderen nahezu immer zusätzliche Fehler induziert. Selbst bei erfolgreicher und fehlerfreier Reskalierung kann es zu Einschränkungen hinsichtlich der Messgrößen kommen. Ein prominentes Bei-
10 spiel dafür sind die weißlicht-interferometrischen Verfahren. Bei diesen wird die maximal messbare Frequenz bereits durch die Abbildung entsprechend dem Nyquist-Kriterium – und damit der größten Änderung der Kreiswellenzahl k benachbarter Detektorelemente – begrenzt. Eine nachträgliche Reskalierung kann daran nichts mehr ändern.

15 Verschiedene Erfindungen versuchen, dieses Problem analog zur Linearisierung in der Wellenlänge durch den Einsatz zusätzlicher optischer Komponenten bzw. durch die Kombination von Gittern und Prismen zu lösen. Ein früher Vorschlag ist durch W. A. Traub, "Constant-dispersion grism spectrometer for channeled
20 spectra", JOSA A, Vol. 7, Issue 9, pp. 1779-1791 (1990) beschrieben worden. Grundgedanke ist die Kombination eines Gitters und eines Prismas – Gitterprisma – und Nutzung des unterschiedlichen Dispersionsverhaltens zum Ausgleich der Nichtlinearitäten. Der Vorschlag basiert jedoch auf der Materialdispersion des Prismas, welche zumindest bei schwach dispersiven Prismen dem Effekt der Win-
25 keltransferfunktion des Gitters untergeordnet ist. Eine spätere Anwendung der Linearisierung in der Kreiswellenzahl wird in US 6,816,258, Hutchin, 2004 beschrieben. Diese Erfindung nutzt ein Transmissions-Gitter-Prisma für die Linearisierung, wobei das Gitter in verschiedene Seiten des Prismas integriert werden kann. US 7,929,134, Hu et al., 2011 ist ein Beispiel eines ähnlichen Auf-
30 baus, der jedoch auf der räumlichen Trennung von Gitter und Prisma basiert. US 2012024298, Saxer et al., 2012 beschreibt einen erweiterten Ansatz, der ebenfalls eine Linearisierung in der Kreiswellenzahl anstrebt. Zusätzlich wird dabei der Aufbau so flexibel gestaltet, dass eine Änderung der Spektrometereigen-
schaften während der Anwendung möglich wird.

Eine Mindestforderung für den zu erreichenden Grad der maximal verbleibenden Linearitätsabweichung eines k-linearen Spektrometers – 100%/m bei m Detektorelementen – wurde durch Gelikonov et al., "Linear-Wavenumber Spectrometer for High-Speed Spectral-Domain Optical Coherence Tomography", Optics and Spectroscopy, 2009, Vol. 106, No. 3, pp. 459–465 formuliert. Die Autoren verdeutlichen damit, dass die Schwierigkeit der Aufgabe unter anderem dadurch zunimmt, dass Detektoren mit einer größeren Anzahl von Detektorelementen – Pixeln – zum Einsatz kommen. Wurden in den oben beschriebenen Anwendungen anfangs noch 256 Elemente genutzt, waren es später 512 und aktuell sind 1024 oder 2048 Elemente keine Seltenheit mehr. In Zusammenspiel mit Lage und Breite des genutzten Wellenlängenbereichs kann die Forderung bezüglich der verbleibenden Nichtlinearität damit schnell wieder kritisch werden.

Die Analyse der Abbildungscharakteristik kann jedoch nur ein Teil der Gesamtbewertung eines Spektrometers sein. In vielen Anwendungen kommen noch weitere, nicht zu unterschätzende Bewertungsfaktoren hinzu. Während zumindest bei industriellen Anwendungen die Frage nach dem Preis des Systems sehr schnell eine Rolle spielt, sind andere Faktoren erst auf den zweiten Blick ersichtlich. Ein solcher Faktor ist die Effizienz des Spektrometers, d.h. welcher Anteil des ankommenden Lichts noch durch den Detektor aufgezeichnet wird. Dies bestimmt maßgeblich die notwendige Leistung der Lichtquelle bzw. – falls diese nicht beeinflussbar ist – die Sensitivität des Detektors. Beide Komponenten haben Einfluss auf Auslegung und Preis des Systems. Ein ebenfalls nicht zu unterschätzender Faktor ist durch den Platzbedarf des Systems gekennzeichnet. Gerade beim Einsatz mehrerer oder vieler Spektrometer darf diese Frage nicht unterschätzt werden. Bei klassischer Anordnung erhöhen die für die k-Linearisierung notwendigen optischen Zusatzelemente die Platzanforderungen in erheblichem Maße. Eine aktuelle Anwendung – US 8,102,537, Akishiba, 2012 – verzichtet zugunsten des Raumgewinns sogar vollständig auf die optische k-Linearisierung und führt die Korrektur durch Reskalierung des Spektrums durch. Dieses System, das deutlich auf industrielle Anwendung ausgelegt ist, unterstreicht sehr eindrucksvoll die Bedeutung der Spektrometereigenschaft Platzbedarf.

Die klassische Herangehensweise für die Optimierung der Gitter-Prisma-Kombinationen ist dadurch gekennzeichnet, dass im ersten Schritt mehr oder weniger vereinfachte Komponentengleichungen aufgestellt werden. Der Grad der Vereinfachungen wurde und wird je nach Verfügbarkeit der Informationen und unter Berücksichtigung der verfügbaren Rechenkapazitäten gewählt. Aus den Komponentengleichungen wird entsprechend der vorgesehenen Komponentenanzahl eine Systemgleichung ermittelt und zusammen mit den freien Parametern der Simulation bzw. Optimierung zugeführt. Aus dem Ergebnis dieses Vorgangs lassen sich anschließend die entsprechend der freien Parameter optimalen Werte ableiten. Diese Werte definieren insgesamt das globale Minimum hinsichtlich des Zielwertes, z.B. der verbleibenden Abweichung vom k-linearen Verlauf der Dispersion. In den meisten Fällen sind die bestimmten Werte nicht oder nur schwer realisierbar. Deshalb müssen abschließend noch real verfügbare Komponenten gefunden werden, deren Eigenschaften möglichst nahe an den bestimmten, optimalen Parametern liegen, siehe Gelikonov et al.; Hu et al., "Fourier domain optical coherence tomography with a linear-in-wavenumber spectrometer", Optics Letters, 2007, Vol. 32, No. 24, pp. 3525-3527.

Bei näherer Betrachtung der bekannten Anwendungen des klassischen Ansatzes wird deutlich, dass – nach Wissenstand der Autoren – bisher immer transmissive Aufbauten verfolgt wurden. Zwar wird der Einsatz von Reflexionsgittern nie ausgeschlossen, k-lineare Spektrometer mit Reflexionsgitter sind aber nicht bekannt. Der wesentliche Vorteil eines Transmissionsgitters liegt darin begründet, dass ein- und ausfallende Strahlen automatisch getrennt sind. Dadurch lassen sich die anderen optischen Komponenten ohne größeren Aufwand in Strahlrichtung davor bzw. dahinter positionieren. Nachteile müssen allerdings hinsichtlich ökonomischer Aspekte in Kauf genommen werden. Einerseits sind Transmissionsgitter – zumindest im Nahinfrarotbereich – vergleichsweise teuer und andererseits sind sie nur in wenigen Variationen hinsichtlich der technischen Parameter erhältlich. Im Gegensatz dazu sind Reflexionsgitter deutlich preiswerter und auch in breiter Palette erhältlich. Allerdings weisen sie nur dann eine gute Effizienz auf, wenn sie im bzw. nahe des Littrow-Modus betrieben werden. Dieser ist beim Reflexionsgitter gerade dadurch gekennzeichnet, dass ein- und ausfallende Strahlen übereinanderliegen. Die Trennung der Strahlen scheint im ersten Moment nur dadurch mög-

lich, dass man entweder deutlich vom Littrow-Modus abweicht oder einen zusätzlichen Strahlteiler einsetzt. Beide Ansätze wirken sich allerdings deutlich nachteilig auf die Effizienz des Spektrometers auf und haben kaum Bedeutung in der Praxis, siehe US 6,661,513, Granger, 2003; US 6,816,258, Hutchin, 2004; US 7,929,134, Hu et al., 2011.

Die der im Folgenden beschriebenen Erfindung zugrundeliegende Aufgabe lässt sich grob als Kombination der oben bereits beschriebenen Anforderungen und zusätzlichen Einschränkungen zusammenfassen. Es musste ein Weg gefunden werden, der es erlaubt, ein möglichst kompaktes Spektrometer zu entwerfen, welches die folgenden Bedingungen erfüllt. Zum Ersten sollte die k-Linearisierung bereits optisch erfolgen und dem von Gelikonov et al. formulierten Kriterium genügen. Dabei waren 2048 Detektorpixel vorzusehen. Zum Zweiten musste die Anzahl der notwendigen optischen Elemente minimiert werden. Des Weiteren sollten Platzbedarf und Justageaufwand minimiert und letztendlich auch die Komponentenkosten reduziert werden. Zusätzlich sollte der Gesamtaufbau möglichst robust gegen thermische Einflüsse ausgelegt werden.

Betrachtet man die gestellten Forderungen in ihrer Gesamtheit und im Zusammenspiel mit den bekannten Lösungsansätzen wird sehr schnell deutlich, dass sich einige Forderungen – insbesondere hohe Kompaktheit und ausreichende k-Linearisierung – scheinbar ausschließen oder zumindest doch ungünstig beeinflussen. Die hohe Zahl von sensitiven Elementen des Detektors verschärft diese Problematik weiter. Für die Lösung der gestellten Aufgabe musste deshalb in einigen Punkten deutlich von den bekannten Ansätzen abgewichen werden.

Die voranstehende Aufgabe wird durch ein Spektrometer mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst. Danach ist das Spektrometer derart ausgestaltet und weitergebildet, dass zur Realisierung eines Kompaktspektrometers in mindestens einem Prisma Totalreflexion genutzt wird.

Vorteilhafte Ausgestaltungen des Spektrometers sind in den Unteransprüchen beschrieben.

Dabei kann als Gitter ein Reflexionsgitter verwendet werden.

An der durch die Totalreflexion gekennzeichneten Seite des Prismas kann eine Aufteilung der ein- und ausfallenden Strahlen des Gitters möglich werden.

5

In weiter vorteilhafter Weise kann der Winkel zwischen Reflexionsgitter und Prisma für die weitere Optimierung der Spektrometercharakteristik genutzt werden.

10

In weiter vorteilhafter Weise kann die Spektrometercharakteristik linear in der Kreiswellenzahl sein.

15

Bei einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung kann das Spektrometer den dispersionsbedingten nichtlinearen Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Fokuspunkt eines konfokal-chromatisch arbeitenden Messsystems so kompensieren, dass die Gesamtcharakteristik linear im Objektabstand wird.

20

In weiter vorteilhafter Weise kann die Spektrometercharakteristik linear in der Wellenlänge sein.

Bei einer konkreten Ausführungsform können das Prisma und das Gitter derart relativ zueinander positioniert sein, dass das Prisma von einem Lichtstrahl zweimal durchlaufen wird.

25

Im Hinblick auf eine besonders sichere und genaue Messung kann das Gitter derart positioniert oder orientiert sein, dass es im Littrow-Modus betreibbar ist.

30

In weiter vorteilhafter Weise kann eine für die Fokussierung von Lichtstrahlen auf einen Detektor eingesetzte Linsenordnung für eine Justierung der k-Linearitäten mit einbezogen werden.

In weiter vorteilhafter Weise kann in dem Spektrometer eine Faltung von Strahlengängen, vorzugsweise mittels eines Faltungsspiegels, realisiert sein.

Die Entwicklung des erfindungsgemäßen Spektrometers hatte ihren Ausgangspunkt zunächst im klassischen Ansatz, d.h. in der Suche nach einer günstigen Gitter-Prisma-Kombination, welche die hohen Anforderungen an die gestellte k-Linearität erfüllen kann. Nahezu zwangsläufig findet man die Lösungen nur in der

5 Nähe des globalen Optimums sinnvoller Anordnungen, welche unter anderem auch durch einen nicht unerheblichen Winkel zwischen Gitter und Prismenfläche gekennzeichnet sind. Wie oben beschrieben, wird man typischerweise einen Aufbau mit einem Transmissionsgitter wählen. Entsprechend der erforderlichen Strahlführung für die spektrale Aufspaltung ergeben sich dadurch erhebliche optische

10 Abstände zwischen den beteiligten Komponenten. Eine Reduktion der geometrischen Abstände ist dementsprechend nur mit Hilfe zusätzlicher optischer Komponenten, beispielsweise Faltungsspiegel, möglich und folglich einer Lösung der Aufgabenstellung abträglich. Die Erfindung überwindet die genannten Herausforderungen durch Einführung zweier wesentlicher Änderungen. Zum Ersten

15 wird das Transmissions- durch ein Reflexionsgitter ersetzt und das Prisma so positioniert, dass es zweimal durchlaufen werden kann. Dabei wird der scharf definierte Einsatzpunkt der Totalreflexion an einer Prismainnenseite genutzt, um eine Trennung zwischen den auf dem Gitter ein- und auslaufenden Strahlverläufen zu gewährleisten. In Folge dessen kann das Reflexionsgitter so orientiert werden,

20 dass es im Littrow-Modus betrieben wird und keine relevanten Einbußen in der Effizienz entstehen. Das Prisma, welches nach dem Gitter in erfindungsgemäßer Ausprägung zum zweiten Mal durchlaufen wird, kann folglich sehr nahe bis einschließlich mit Kontakt zum Gitter positioniert werden. Zum Zweiten wird das für die Refokussierung ohnehin benötigte Linsensystem in die Optimierung der k-Linearität mit einbezogen. Dieser Schritt wird notwendig, da der Einsatz der Reflexionsgitter-Prisma-Anordnung zwar eine sehr effiziente und kompakte Strahlführung ermöglicht, nach klassischer Betrachtung – Gelikonov et al. – aber allein nicht mehr den Anforderungen an die k-Linearität genügt. Der von der Hauptanordnung nicht aufgebrachte Anteil der notwendigen Linearisierung wird daher durch den

25 gezielten Einsatz von Verzeichnungseffekten der Refokussierungslinsen übernommen.

30

Es gibt nun verschiedene Möglichkeiten, die Lehre der vorliegenden Erfindung in vorteilhafter Weise auszugestalten und weiterzubilden. Dazu ist einerseits auf die

nachgeordneten Ansprüche, andererseits auf die nachfolgende Erläuterung von Ausführungsbeispielen der erfindungsgemäßen Lehre anhand der Zeichnung zu verweisen. In Verbindung mit der Erläuterung der bevorzugten Ausführungsbeispiele der erfindungsgemäßen Lehre anhand der Zeichnung werden auch im Allgemeinen bevorzugte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Lehre erläutert. In der Zeichnung zeigen

Fig. 1 in einer schematischen Darstellung ein herkömmliches Spektrometer,

Fig. 2 in einer schematischen Darstellung typische Strahlenverläufe bei einem Prisma und einem Gitter und

Fig. 3 in einer schematischen Darstellung ein Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Spektrometers.

Fig. 1 zeigt in einer schematischen Darstellung ein herkömmliches Spektrometerlayout mit einer Kollimations-, einer Dispersions- und einer Fokussierungsoptik mit einem Detektor und einer Lichtquelle.

Fig. 2 zeigt in einer schematischen Darstellung Strahlenverläufe in einem Prisma und bei einem Gitter mit den entsprechenden Winkelbeziehungen einfallender und ausfallender Strahlen.

Fig. 3 zeigt in einer schematischen Darstellung ein Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Spektrometers. Zusammengefasst trifft hierbei das kollimierte, einfallende Strahlenbündel mit einem definierten Winkel auf die erste Prismenfläche, so dass es nach einer ersten Strecke im Prisma 2 an der zweiten Prismenfläche 3 noch sicher mit Totalreflexion reflektiert wird. Nach einer zweiten Strecke im Prisma 2 treten die Strahlen an der dritten Seitenfläche aus und fallen auf das Reflexionsgitter 1. Hier werden die Lichtstrahlen des Bündels entsprechend der jeweiligen Wellenlänge gebeugt und fallen unter einem vom vorherigen Ausfallswinkel verschiedenen Winkel wieder auf die dritte Seitenfläche des Pris-

mas 2. Nach einer dritten Strecke im Prisma 2 treten die Strahlen an der zweiten Prismenfläche 3 wieder aus. Anschließend wird das finale Linsensystem durchlaufen, das die Strahlenbündel entsprechend ihrer Wellenlänge auf den Detektor fokussiert. Insgesamt sorgt die Anordnung Gitter-Prisma zunächst für eine noch ungenügende k-Linearisierung und erst im Zusammenspiel mit der Fokussierungsoptik ist eine entsprechend gute Korrektur möglich.

Im Hinblick auf höhere Kompaktheit entsteht ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Aufbaus auch durch die im Vergleich zu herkömmlichen Kombinationen von Gitter und Prisma, siehe beispielsweise US 6,661,513, US 6,816,258, US 7,929,134, etc., deutlich geringeren geometrischen Abstände der einzelnen Komponenten. Diese resultieren unter anderem daraus, dass notwendige optische Wege in der Gitter-Prisma-Kombination übereinander liegen. Durch die geringeren notwendigen Abstände werden auch die notwendigen Größen von Folgeelementen positiv beeinflusst. Insgesamt werden so selbst beim Einsatz von Katalogkomponenten kleinere optische Komponenten, z.B. Linsen, benötigt. Diese können üblicherweise günstiger beschafft werden, was die Gesamtkosten des Spektrometers reduziert.

Die Kompaktheit oder Form des Spektrometers lässt sich zusätzlich zu den bisher beschriebenen Eigenschaften der Erfindung durch geeignete Faltung der Strahlengänge weiter erhöhen oder anpassen. Fig. 3 beinhaltet zur Demonstration exemplarisch einen Faltungsspiegel 4.

In praktischer Hinsicht konnte bei der Ausarbeitung und Umsetzung der Erfindung von einem bekannten System ausgegangen werden, mit dem im Folgenden der Vergleich durchgeführt wird. Das zugehörige Spektrometer wurde für die Abbildung auf 2048 Pixel ausgelegt und besitzt inklusive Gehäuse eine Höhe von rund 9cm bei einer Grundfläche von rund 340cm². Die Abbildung erfolgt linear in der Kreiswellenzahl. Das zugrundeliegende optische System basiert auf der räumlich getrennten Kombination von Transmissionsgitter und Prima und wurde bereits größenoptimiert. Das entsprechend der oben beschriebenen Erfindung neu entwickelte System benötigt für eine gleichwertige Abbildung auf 2048 Pixel bei einer reduzierten Grundfläche von rund 130cm² nur noch eine Höhe von rund 4cm. Dies

entspricht einer Reduktion auf <20% des Ausgangsvolumens, wobei der Vergleich aufgrund der unterschiedlichen Form der Grundflächen vorsichtig interpretiert werden muss.

- 5 Obwohl die bevorzugte Umsetzung der Erfindung ein kompaktes Spektrometer mit linearer Charakteristik bezüglich der Kreiswellenzahl vorstellt, ist die Erfindung jedoch nicht auf diesen Anwendungsfall begrenzt. Eine weitere Ausprägung der Erfindung kann so ausfallen, dass die Linearität nicht in der Kreiswellenzahl sondern in der Wellenlänge entsteht. Das kann zwar prinzipiell auch direkt durch den Einsatz eines geeigneten Gitters erreicht werden, unterliegt dann allerdings den bereits genannten Einschränkungen hinsichtlich der Linearitätsabweichung und der notwendigen Ein- und Ausstrahlwinkel. Für die Reduktion der Linearitätsabweichung werden nach Stand der Technik üblicherweise optische Zusatzelemente, z.B. Prismen, verwendet, die einfach durchstrahlt werden. Unter Nutzung des erfindungsgemäßen Aufbaus, d.h. Nutzung der Totalreflexion im Prisma und mehrfache Durchstrahlung, lassen sich auch hier deutlich kompaktere Spektrometer konstruieren. Wie bereits oben beschrieben, werden sich häufig zusätzlich auch Vorteile hinsichtlich der Komponentenpalette als auch des Preises ergeben.
- 10
- 15
- 20 Obwohl bei der Kombination von Gitter und Prisma üblicherweise die Linearität bezüglich der Kreiswellenzahl oder der Wellenlänge angestrebt wird, ist dies nicht bei allen Anwendungen sinnvoll. Ein bekanntes Beispiel sind konfokal-chromatische Messsysteme, deren Abstandskennlinie weder in der Wellenlänge noch in der Kreiswellenzahl linear ist. Üblicherweise werden bei solchen Systemen Spektrometer verwendet, die eine annähernd lineare Wellenlängencharakteristik aufweisen. Dazu werden meist einfache Aufbauten aus Reflexions- oder Transmissionsgitter in Kombination mit Abbildungsoptiken genutzt. Mit einer günstigeren Spektrometercharakteristik lässt sich jedoch auch hier der Aufwand der Nachverarbeitung deutlich verringern. Gleichzeitig erhöht sich oft auch die Aussagequalität, z.B. in Form einer reduzierten Linearitätsabweichung der Messwerte.
- 25
- 30

Für die Erzeugung einer linearen Charakteristik bezüglich des Objektabstands müssten die Spektrometer konfokal-chromatischer Systeme allerdings anders aufgebaut werden. Eine lineare Charakteristik hinsichtlich der Kreiswellenzahl wäre

dem oben beschriebenen Ansatz – linear in der Wellenlänge – bereits deutlich überlegen, stellt jedoch noch nicht die optimale Konfiguration dar. Vielmehr müsste die Nichtlinearität des Dispersionsverhaltens im Messkopf entsprechend des genutzten Wellenlängenbereichs berücksichtigt und durch geeignete Auslegung des Dispersionsverhaltens im Spektrometer ausgeglichen werden. Nach
5
aktuellem Wissensstand der Autoren existiert am Markt kein System, das diesen Ansatz verfolgt. Dies liegt vermutlich in den Kosten für die notwendigen Zusatzkomponenten sowie den sich ergebenden größeren Spektrometern begründet. Möglicherweise ist aber auch einfach das Kosten-Nutzen-Verhältnis noch nicht
10
akzeptabel. Durch Anwendung des erfindungsgemäßen Aufbaus lässt sich dieses Verhältnis weiter verbessern.

Je nachdem, wie komplex die Dispersionskorrektur im Spektrometer ausgelegt wird, kann es hilfreich sein, den direkten Kontakt bzw. die Integration von Gitter und Prisma aufzulösen. Dadurch kann ein Winkel zwischen Gitter und Prisma eingefügt werden, ohne die grundlegende Eigenschaft Totalreflexion im Prisma zu opfern. Der zusätzliche Winkel erweitert die Freiheitsgrade bei der Optimierung der Linearitätsabweichung zu Kosten eines höheren Justageaufwands.

Neben den bereits beschriebenen Ausführungen der Erfindung lässt sich der Ansatz auch überall dort verwenden, wo bisher Gitter-Prisma-Kombinationen mit einfacher Durchstrahlung eingesetzt wurden. Preis und Größe von Spektrometern spielen bei industriellen Anwendungen häufig eine große Rolle. Zwar werden bestehende Systeme nicht angepasst werden, bei der Neuentwicklung von industriellen
20
Spektrometern bietet die Erfindung in dieser Hinsicht jedoch deutliche Vorteile.

Hinsichtlich weiterer vorteilhafter Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Spektrometers wird zur Vermeidung von Wiederholungen auf den allgemeinen Teil der Beschreibung sowie auf die beigefügten Ansprüche verwiesen.

Schließlich sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die voranstehend beschriebenen Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen Spektrometers lediglich zur Erörterung der beanspruchten Lehre dienen, diese jedoch nicht auf die Ausführungsbeispiele einschränken.

Bezugszeichenliste

- | | |
|---|-----------------------------|
| 1 | Gitter, Reflexionsgitter |
| 2 | Prisma |
| 3 | Seite, zweite Prismenfläche |
| 4 | Faltungsspiegel |

Ansprüche

- 5 1. Spektrometer, umfassend eine Kombination von mindestens einem Gitter (1) und mindestens einem Prisma (2), d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass zur Realisierung eines Kompaktspektrometers in mindestens einem Prisma (2) Totalreflexion genutzt wird.
- 10 2. Spektrometer nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als Gitter (1) ein Reflexionsgitter (1) verwendet wird.
- 15 3. Spektrometer nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass an der durch die Totalreflexion gekennzeichneten Seite (3) des Prismas (2) eine Aufteilung der ein- und ausfallenden Strahlen des Gitters (1) möglich wird.
4. Spektrometer nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Winkel zwischen Reflexionsgitter und Prisma (2) für die weitere Optimierung der Spektrometercharakteristik genutzt wird.
- 20 5. Spektrometer nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Spektrometercharakteristik linear in der Kreiswellenzahl ist.
- 25 6. Spektrometer nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass das Spektrometer den dispersionsbedingten nichtlinearen Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Fokuspunkt eines konfokal-chromatisch arbeitenden Messsystems so kompensiert, dass die Gesamtcharakteristik linear im Objektabstand wird.
- 30 7. Spektrometer nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Spektrometercharakteristik linear in der Wellenlänge ist.
8. Spektrometer nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass das Prisma (2) und das Gitter (1) derart relativ zueinander positioniert sind, dass das Prisma (2) von einem Lichtstrahl zweimal durchlaufen wird.

9. Spektrometer nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass das Gitter (1) derart positioniert oder orientiert ist, dass es im Littrow-Modus betreibbar ist.
- 5 10. Spektrometer nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass eine für die Fokussierung von Lichtstrahlen auf einen Detektor eingesetzte Linsenordnung für eine Justierung der k-Linearitäten mit einbezogen wird.
- 10 11. Spektrometer nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass in dem Spektrometer eine Faltung von Strahlengängen, vorzugsweise mittels eines Faltungsspiegels (4), realisiert ist.

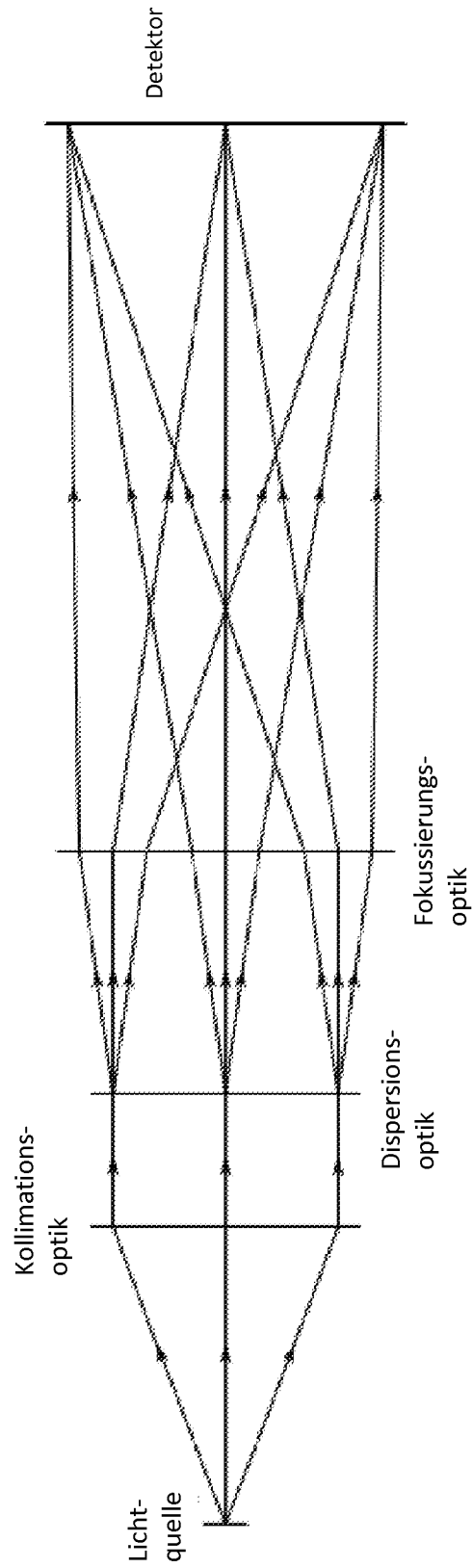


Fig. 1

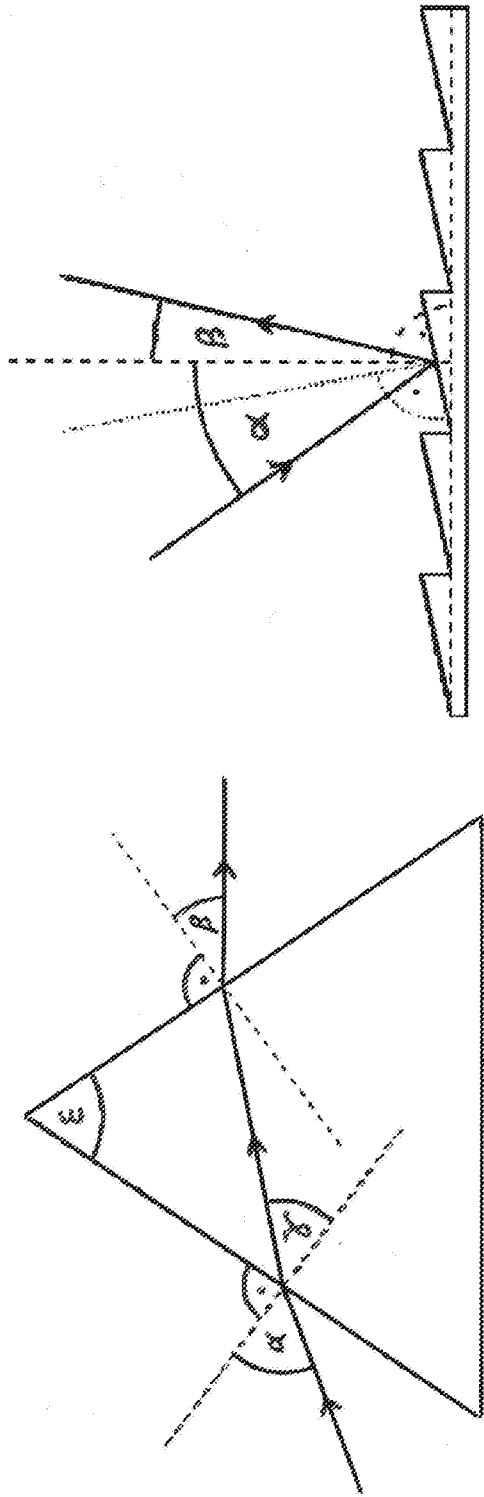


Fig. 2

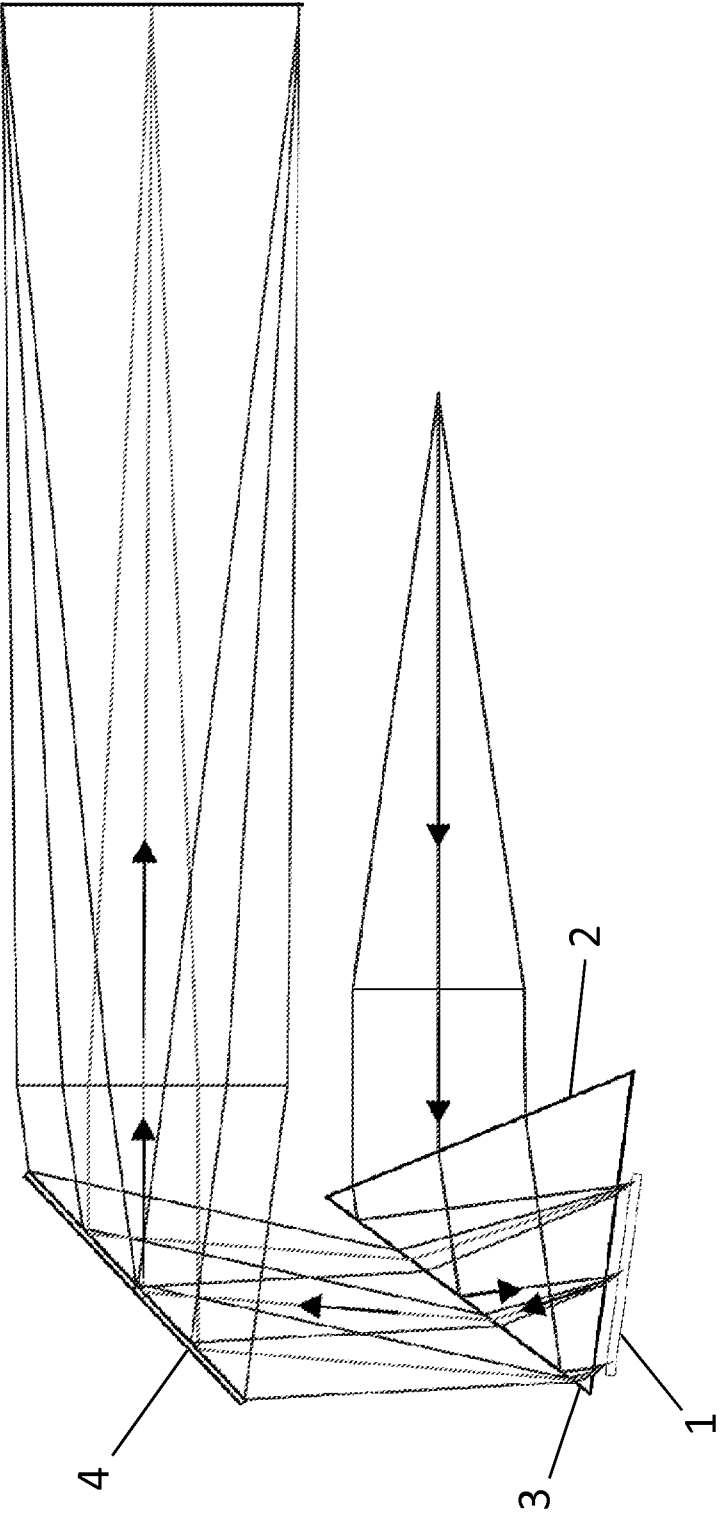


Fig. 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/DE2015/200066

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER INV. G01J3/14 G01J3/22 G01J3/02 G01J3/28 A61B5/00 G01J3/12 ADD. According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G01J A61B Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 2010/014082 A1 (LOECKLIN EBERHARD [DE]) 21 January 2010 (2010-01-21)	1-4,8-11
A	paragraphs [0003], [0046] - [0060]; figures 5,6	5-7
X	US 2012/188541 A1 (DEMMEER DAVID R [CA] ET AL) 26 July 2012 (2012-07-26)	1
A	paragraphs [0025] - [0036]; figure 4c	5-7
A	US 2012/242988 A1 (SAXER CHRISTOPHER [US] ET AL) 27 September 2012 (2012-09-27)	5-7
A	paragraphs [0060] - [0077]; figures 4,6,7,9,10,12	5-7
A	WO 01/95542 A2 (LIGHTCHIP INC [US]) 13 December 2001 (2001-12-13)	5-7
	figure 2	
	-/--	
☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.		
* Special categories of cited documents : "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 3 June 2015		Date of mailing of the international search report 17/06/2015
Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Authorized officer Hambach, Dirk

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/DE2015/200066

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	V. M. GELIKONOV ET AL: "Linear-wavenumber spectrometer for high-speed spectral-domain optical coherence tomography", OPTICS AND SPECTROSCOPY, vol. 106, no. 3, 1 March 2009 (2009-03-01), pages 459-465, XP055028933, ISSN: 0030-400X, DOI: 10.1134/S0030400X09030242 cited in the application pages 461-462; figure 2 -----	5-7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/DE2015/200066

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2010014082	A1	21-01-2010	NONE
US 2012188541	A1	26-07-2012	NONE
US 2012242988	A1	27-09-2012	EP 2689220 A1 29-01-2014 US 2012242988 A1 27-09-2012 US 2014313509 A1 23-10-2014 WO 2012129466 A1 27-09-2012
WO 0195542	A2	13-12-2001	AU 7513301 A 17-12-2001 CA 2410929 A1 13-12-2001 EP 1350350 A2 08-10-2003 US 6556297 B1 29-04-2003 WO 0195542 A2 13-12-2001

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES		
INV.	G01J3/14	G01J3/22
	G01J3/12	G01J3/02
		G01J3/28
		A61B5/00
ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE		
Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)		
G01J A61B		
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)		
EPO-Internal, WPI Data		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 2010/014082 A1 (LOECKLIN EBERHARD [DE]) 21. Januar 2010 (2010-01-21)	1-4,8-11
A	Absätze [0003], [0046] - [0060]; Abbildungen 5,6	5-7
X	US 2012/188541 A1 (DEMMEER DAVID R [CA] ET AL) 26. Juli 2012 (2012-07-26)	1
	Absätze [0025] - [0036]; Abbildung 4c	
A	US 2012/242988 A1 (SAXER CHRISTOPHER [US] ET AL) 27. September 2012 (2012-09-27)	5-7
	Absätze [0060] - [0077]; Abbildungen 4,6,7,9,10,12	
A	WO 01/95542 A2 (LIGHTCHIP INC [US]) 13. Dezember 2001 (2001-12-13)	5-7
	Abbildung 2	
	-/-	
☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
3. Juni 2015		17/06/2015
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter Hambach, Dirk

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	V. M. GELIKONOV ET AL: "Linear-wavenumber spectrometer for high-speed spectral-domain optical coherence tomography", OPTICS AND SPECTROSCOPY, Bd. 106, Nr. 3, 1. März 2009 (2009-03-01), Seiten 459-465, XP055028933, ISSN: 0030-400X, DOI: 10.1134/S0030400X09030242 in der Anmeldung erwähnt Seiten 461-462; Abbildung 2 -----	5-7

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE2015/200066

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2010014082	A1	21-01-2010	KEINE	

US 2012188541	A1	26-07-2012	KEINE	

US 2012242988	A1	27-09-2012	EP 2689220 A1	29-01-2014
			US 2012242988 A1	27-09-2012
			US 2014313509 A1	23-10-2014
			WO 2012129466 A1	27-09-2012

WO 0195542	A2	13-12-2001	AU 7513301 A	17-12-2001
			CA 2410929 A1	13-12-2001
			EP 1350350 A2	08-10-2003
			US 6556297 B1	29-04-2003
			WO 0195542 A2	13-12-2001

专利名称(译)	光谱仪		
公开(公告)号	EP2943760A1	公开(公告)日	2015-11-18
申请号	EP2015714403	申请日	2015-02-06
[标]申请(专利权)人(译)	微 - 埃普西龙光电股份有限公司		
申请(专利权)人(译)	MICRO-EPSILON光电GMBH		
当前申请(专利权)人(译)	MICRO-EPSILON光电GMBH		
[标]发明人	OTTO TOBIAS		
发明人	OTTO, TOBIAS		
IPC分类号	G01J3/14 G01J3/22 G01J3/02 G01J3/28 A61B5/00 G01J3/12 G01J3/18		
优先权	102014206061 2014-03-31 DE 102015200034 2015-01-05 DE		
其他公开文献	EP2943760B1		
外部链接	Espacenet		

摘要(译)

本发明涉及一种光谱仪，包括至少一个栅格（1）和至少一个棱镜（2）的组合，其特征在于，全反射用于在至少一个棱镜（2）中产生紧凑的光谱仪。