



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2018 213 377.8**  
(22) Anmeldetag: **09.08.2018**  
(43) Offenlegungstag: **13.02.2020**

(51) Int Cl.: **G01J 3/10** (2006.01)  
**G01J 3/28** (2006.01)  
**F21V 9/32** (2018.01)

(71) Anmelder:  
**Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE**

(72) Erfinder:  
**Dinser, Martin, 70469 Stuttgart, DE; Husnik,  
Martin, 70176 Stuttgart, DE; Schmid, Marc, 70565  
Stuttgart, DE; Uhlich, Dominik, 48565 Steinfurt,  
DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2008 019 600	A1
US	2004 / 0 179 196	A1
US	2007 / 0 159 060	A1
US	2012 / 0 324 986	A1

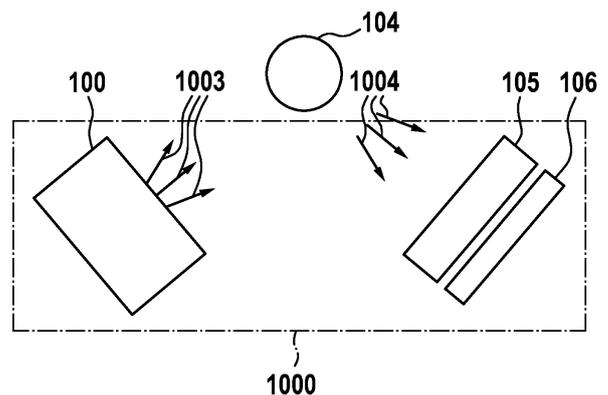
Rechercheantrag gemäß § 43 PatG ist gestellt.

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

(54) Bezeichnung: **Spektrometer und Verfahren zur Kalibrierung des Spektrometers**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft Spektrometer (1000), umfassend

- eine Beleuchtungseinrichtung (100) zur Beleuchtung eines spektrometrischen Messbereichs (104),
- eine Detektionseinheit (106) zur Detektion einer vom spektrometrischen Messbereich kommenden elektromagnetischen Strahlung (1004) und
- ein spektrales Element (105), welches im Strahlengang zwischen der Beleuchtungseinrichtung (100) und der Detektionseinheit (106) angeordnet ist, wobei die Beleuchtungseinrichtung (100)
- eine Leuchtdiode mit einer ersten Zentralwellenlänge umfasst, welche dazu eingerichtet ist eine erste elektromagnetische Strahlung mit einem ersten Spektrum zu emittieren, und
- ein lumineszierendes Element zur Wandlung eines ersten Anteils der ersten elektromagnetischen Strahlung mit dem ersten Spektrum in eine zweite elektromagnetische Strahlung mit einem zweiten Spektrum umfasst, wobei
- die erste Zentralwellenlänge 550 nm, 3000 nm oder einen Wert zwischen 550 nm und 3000 nm aufweist, und
- das erste Spektrum und das zweite Spektrum einen Überlapp aufweisen.



**Beschreibung**

## Stand der Technik

**[0001]** In US 2016/0091367 A1 ist eine Breitband-NIR (NIR= nah infrarot) Lichtquelle für Spektroskopie-Anwendungen beschrieben, welche eine blaue LED und ein lumineszierendes Element umfasst, wobei von der LED emittierte Strahlung nach Durchgang durch das lumineszierende Element eine Probe beleuchtet, welche spektroskopisch untersucht werden soll.

**[0002]** Für die konventionelle Beleuchtungstechnik werden heutzutage vermehrt „Light-Emitting Diodes“ (LEDs) in Kombination mit einem Leuchtmittel (Phosphor) eingesetzt. Üblicherweise emittiert die LED, als aktive Komponente, blaues Licht im Wellenlängenbereich von etwa 450 Nanometer (nm) bis 470 nm, mit einer Halbwertsbreite von ca. 30 nm bis 40 nm. Um das gewünschte weiße Licht zu generieren, wird beispielsweise auf die Oberfläche der LED ein passiver gelbemittierender Leuchtstoff, oft auch Phosphor genannt, beispielsweise bestehend aus Cer-dotiertem Yttrium-Aluminium-Granat (J. Li et al.: A new rare-earth-free hybrid phosphor for efficient solid-state lighting, ACS Jahrestagung Boston, 2015), appliziert. Das Leuchtmittel konvertiert das einfallende blaue Licht der LED teilweise in ein breites Gelblicht-Spektrum. Die Mischung des blauen Lichtes und des breiten Gelblicht-Spektrums wird schließlich als weißes Licht wahrgenommen. Blau emittierende LEDs stellen als Lieferant von hochenergetischem Licht die Grundlage für die sogenannte „Downconversion“ des Lichtes zu niedrigeren Energien im Leuchtmittel bereit.

**[0003]** Für Weißlicht-LEDs bzw. den entsprechenden Leuchtmitteln stehen in der Beleuchtungstechnik neben der Energie-Effizienz aktuell Kriterien wie die Farbqualität (repräsentiert durch Correlated Color Temperature und Color-Rendering Index) und die Farbtemperatur im Mittelpunkt. Die Farbqualität und die Farbtemperatur lassen sich flexibel anwendungsspezifisch anpassen und werden unter anderem von dem Verhältnis aus nicht-umgewandelten blauen Licht und konvertiertem Phosphor-Spektrum festgelegt.

**[0004]** Die Effizienz von modernen blauen LEDs liegt typischerweise bei etwa 70% und ist lediglich durch die Wärmeentwicklung limitiert. Zusätzliche Verluste durch Applikation eines Phosphors lassen sich hauptsächlich auf Wärmeverluste im Phosphor und auf den sog. Stokes-Verlust zurückführen.

**[0005]** Für Beleuchtungszwecke trägt das nicht konvertierte blaue Licht der LED zur Farbwirkung des Leuchtmittels bei. Bei Spektrometrieanwendungen

wird nur der von dem Leuchtmittel konvertierte Lichtanteil genutzt.

## Kern und Vorteile der Erfindung

**[0006]** Bei der Spektrometrie wird die zu analysierende Probe, d. h. der zu untersuchende spektrometrische Messbereich mit elektromagnetischer Strahlung aus einem breiten Wellenlängenspektrum bestrahlt. Je größer der zu untersuchende Wellenlängenbereich ist, desto besser sind üblicherweise die Ergebnisse und desto größer ist der Anwendungsbe- reich. Das vom spektrometrischen Messbereich kommende Spektrum wird aufgenommen und ausgewertet. Häufig werden Messungen mit Spektrometern in einem Wellenlängenintervall von etwa 600 nm bis 1100 nm durchgeführt.

**[0007]** Für die Spektrometrie werden breitbandige Lichtquellen verwendet, die den gesamten relevanten Spektralbereich, der bei der Messung berücksichtigt werden soll, mit möglichst konstanter Intensität bzw. möglichst konstanter Leistung abdecken. Insbesondere für tragbare Geräte, sogenannte Miniaturspektrometer, sind zudem hohe Effizienzen der Lichtquellen von großer Bedeutung.

**[0008]** Die Erfindung betrifft ein Spektrometer und Verfahren zur Kalibrierung des Spektrometers.

**[0009]** Ein Vorteil der Erfindung mit den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche ist, dass das für die spektrometrische Messung nutzbare Wellenlängenintervall erweitert werden kann und eine Wellenlängenkalibration und/oder eine Leistungskalibration auf einfache Weise realisiert werden kann.

**[0010]** Dies wird erreicht mit einem Spektrometer gemäß Anspruch 1, welches eine Beleuchtungseinrichtung zur Beleuchtung eines spektrometrischen Messbereichs, eine Detektionseinheit zur Detektion einer vom spektrometrischen Messbereich kommenden elektromagnetischen Strahlung und ein spektrales Element, welches im Strahlengang zwischen der Beleuchtungseinrichtung und der Detektionseinheit angeordnet ist, umfasst. Die Beleuchtungseinrichtung umfasst hierbei eine Leuchtdiode mit einer ersten Zentralwellenlänge, welche dazu eingerichtet ist, eine erste elektromagnetische Strahlung mit einem ersten Spektrum zu emittieren. Des Weiteren umfasst die Beleuchtungseinrichtung ein lumineszierendes Element zur Wandlung eines ersten Anteils der ersten elektromagnetischen Strahlung mit dem ersten Spektrum in eine zweite elektromagnetische Strahlung mit einem zweiten Spektrum. Das Spektrometer zeichnet sich dadurch aus, dass die erste Zentralwellenlänge der Leuchtdiode 550 Nanometern (nm) oder 3000 nm oder einen Wert zwischen 550 nm und 3000 nm aufweist, und dass das erste Spektrum und das zweite Spektrum einen Überlapp aufweisen.

**[0011]** Das Emissionsspektrum der Beleuchtungseinrichtung des Spektrometers, welches zur Beleuchtung des spektrometrischen Messbereichs für die spektrometrische Messung verwendet werden kann, umfasst folglich vorteilhafterweise einen nicht-gewandelten zweiten Anteil der ersten elektromagnetischen Strahlung und die zweite elektromagnetische Strahlung mit dem zweiten Spektrum. Ein Vorteil ist, dass somit ein Spektrometer mit einer Beleuchtungseinrichtung bereitgestellt wird, wobei die Beleuchtungseinrichtung einen breiten Spektralbereich im nah-infraroten Wellenlängenbereich mit möglichst konstanter Leistung abdeckt, da das Spektrum der LED bereits vor der teilweisen Umwandlung durch das lumineszierende Element, für die Spektrometrie nutzbare Wellenlängenbereiche umfasst. Durch die hohe Intensität der von der Beleuchtungseinrichtung emittierten elektromagnetischen Strahlung kann ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR, engl. Signal to Noise Ratio) realisiert werden, wodurch die Sensitivität und die Genauigkeit des Spektrometers vorteilhafterweise erhöht werden kann. Des Weiteren trägt sowohl die von der Leuchtdiode emittierte elektromagnetische Strahlung, die durch das lumineszierende Element, d. h. das Leuchtmittel, aber nicht in Licht höherer Wellenlängen umgewandelt wird, als auch die von dem Leuchtmittel konvertierte zweite elektromagnetische Strahlung zum nutzbaren Wellenlängenbereich des Spektrometers bei. D. h. insbesondere, dass die von der Leuchtdiode emittierte elektromagnetische Strahlung, die durch das Leuchtmittel aber nicht in Licht höherer Wellenlängen umgewandelt wird, nach Auftreffen auf den spektrometrischen Messbereich noch eine ausreichend hohe Intensität aufweist, sodass sie von der Detektoreinheit erfasst werden kann und somit auch spektrale Informationen des spektrometrischen Messbereichs aus diesem Wellenlängenbereich zuverlässig detektiert und gegebenenfalls ausgewertet werden können. Dies ist insbesondere für Fourier-Transformations-Spektrometer vorteilhaft, da diese technikbedingt über einen großen Wellenlängenbereich einsetzbar sind. Vorteilhafterweise kann somit die Effizienz der Beleuchtungseinrichtung für Spektrometrie-anwendungen erhöht werden.

**[0012]** Durch den breiten nutzbaren Wellenlängenbereich des Spektrometers, bei dem sowohl das Emissionsspektrum der LED als auch das Emissionsspektrum des lumineszierenden Elements für die Spektrometrie nutzbar ist, ist insbesondere eine Material- bzw. Objekterkennung anhand der mit dem Spektrometer erfassten spektralen Daten mit einer hohen Zuverlässigkeit möglich und eine Messung von Konzentrationen von Inhaltsstoffen mit hoher Genauigkeit möglich.

**[0013]** Sehr hohe Lichtintensitäten können hinsichtlich der Augensicherheit ein Risiko darstellen. So kann das Auge durch thermische oder photochemi-

sche Effekte geschädigt werden. Der biologische Effekt auf das Auge und das Gefährdungspotential ist stark wellenlängenabhängig. Blaues Licht (Wellenlänge zwischen 400nm und 500nm) weist ein weit-aus höheres Gefährdungspotential hinsichtlich thermischer und photochemischer Augenschädigungen auf als Licht höherer Wellenlängen (z.B. rotes Licht bzw. NIR-Licht). Ein weiterer Vorteil liegt daher darin, dass das Spektrometer eine sichere Nutzung auch durch ungeschulte Benutzer ermöglicht.

**[0014]** In einer Ausführungsform kann die erste Zentralwellenlänge der Leuchtdiode 550 Nanometern (nm) oder 1000 nm oder einen Wert zwischen 550 nm und 1000 nm aufweisen. Alternativ kann die erste Zentralwellenlänge der Leuchtdiode 760 nm oder 2500 nm oder einen Wert zwischen 760 nm und 2500 nm aufweisen. Alternativ kann die erste Zentralwellenlänge der Leuchtdiode 610 nm oder 3000 nm oder einen Wert zwischen 610 nm und 3000 nm aufweisen. Alternativ kann die erste Zentralwellenlänge der Leuchtdiode 610 nm oder 1000 nm oder einen Wert zwischen 610 nm und 1000 nm aufweisen. Rot emittierende Leuchtdioden mit Zentralwellenlängen von etwa 625 nm bis 700 nm sind sehr effizient bei der Umwandlung von elektrischer Leistung in optische Leistung. Insbesondere GaAsbasierte Materialsysteme mit Zentralwellenlängen bis 1020 nm können wesentlich günstiger hergestellt werden als InGaAs-basierte Systeme, die für den Wellenlängenbereich größer 1020 nm eingesetzt werden müssten.

**[0015]** Bei der Leuchtdiode (LED) handelt es sich insbesondere um eine im roten oder nah-infraroten Wellenlängenbereich Licht emittierende LED. Der rote Wellenlängenbereich umfasst Wellenlängen zwischen 610 nm und 760 nm, inklusive 610 nm und 760 nm. Der nah-infraroten Wellenlängenbereich umfasst Wellenlängen von 760 nm bis 3000 nm, inklusive der Intervallgrenzen. Die Farbe einer LED hängt insbesondere von dem verwendeten Halbleitermaterial bzw. dem Bandabstand des Halbleitermaterials ab. Rote LEDs können beispielsweise Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs), Galliumphosphid (GaP), Galliumarsenidphosphid (GaAsP), Aluminiumgalliumindiumphosphid (AlGaInP), etc. umfassen. Nah-infraroten LEDs können beispielsweise Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs), Galliumarsenid (GaAs) etc. als Halbleitermaterial umfassen.

**[0016]** Das Spektrum einer LED kann meist in guter Näherung durch eine Gauß-Funktion beschrieben werden. Das Spektrum einer Leuchtdiode wird meist durch eine einzige Wellenlänge, beispielsweise eine Zentralwellenlänge der LED, ausgedrückt. Die Zentralwellenlänge beschreibt die Wellenlänge, welche in der Mitte zwischen zwei Punkten (Wellenlängen) mit einer spektralen Dichte von 50% des Peaks des Spektrums, d. h. 50% des Maximums des Spektrums, liegt. Für ein symmetrisches Spektrum entspricht die

Zentralwellenlänge gerade der Wellenlänge, bei der das Spektrum maximal ist.

**[0017]** Das lumineszierende Element kann eines oder mehrere Leuchtmittel umfassen. Beispiele für Leuchtmittel sind unter anderem in „Sunlight-activated longpersistent luminescence in the near-infrared from Cr<sup>3+</sup>-doped zinc gallogermanates“, (Pan et al., Nature Materials 11, 58-63 (2012)) beschrieben. Das lumineszierende Element ist durch die LED zur Emission elektromagnetischer Strahlung anregbar. Typische Phosphore basieren auf Granate, Silikate, Oxinitride bzw. Oxidnitride oder Nitride bzw. Carbonitride. Insbesondere ist das lumineszierende Element durch die LED zur Emission elektromagnetischer Strahlung im nah-infraroten Wellenlängenbereich, beispielsweise im Bereich von 550 nm bis 1100 nm, im Bereich von 1150 nm bis 1800 nm oder im Bereich von 850 nm bis 1700 nm anregbar. Ebenfalls kann in speziellen Ausführungsformen ein zusätzliches effizientes Leuchtmittel, das die Emission der LED etwas verbreitert und dessen Emissionsbereich sich vollständig im Anregungsbereich des NIR-Leuchtmittels befinden kann, eingesetzt werden.

**[0018]** Unter dem spektrometrischen Messbereich kann beispielsweise ein Objekt, welches mittels des Spektrometers bezüglich seiner spektralen Eigenschaften untersucht werden soll oder ein Ausschnitt eines Objekts verstanden werden, wobei das Objekt beispielsweise ein gasförmiges, flüssiges und/oder festes Medium umfassen kann. Das Objekt kann eine homogene oder eine heterogene Zusammensetzung aufweisen.

**[0019]** Spektrale Daten des spektrometrischen Messbereichs können erfasst werden, indem die vom spektrometrischen Messbereich kommende elektromagnetische Strahlung, d. h. beispielsweise die von dem spektrometrischen Messbereich emittierte, reflektierte, transmittierte und/ oder gestreute elektromagnetische Strahlung, von dem Spektrometer bzw. der Detektionseinheit des Spektrometers detektiert wird.

**[0020]** Die Beleuchtungseinrichtung und/oder die Detektionseinheit können das spektrale Element umfassen. Alternativ oder ergänzend kann das spektrale Element als separates Bauteil ausgeführt sein. Das spektrale Element kann im Strahlengang zwischen der Beleuchtungseinrichtung und dem spektrometrischen Messbereich angeordnet sein. Alternativ oder ergänzend kann das spektrale Element im Strahlengang zwischen dem spektrometrischen Messbereich und der Detektionseinheit angeordnet sein. Das spektrale Element kann beispielsweise eine durchstimmbare Fabry-Pérot Interferometer (FPI), doppelbrechende Kristalle und Polarisatoren, oder einen anderen wellenlängenselektiven Filter sowie optional optische Linsen, optische Aperturen, Mikrolin-

sen, Mikrolinsenarrays, Strahlteiler, Spiegel, Mikrospiegel, etc. umfassen. Das Spektrometer kann beispielsweise als ein statisches oder bewegliches Fourier-Transformationspektrometer oder als ein Fabry-Pérot Spektrometer ausgebildet sein.

**[0021]** Die Beleuchtungseinrichtung, das spektrale Element und die Detektionseinheit des Spektrometers können beispielsweise in einer Transmissionsgeometrie oder in einer Reflexionsgeometrie angeordnet werden. Bei Transmissionsmessungen wird insbesondere elektromagnetische Strahlung erfasst, welche von dem zu untersuchenden spektrometrischen Messbereich transmittiert wurde, wobei die transmittierte elektromagnetische Strahlung spektrale Informationen über den spektrometrischen Messbereich aufweist. Die transmittierte elektromagnetische Strahlung kann mittels des spektralen Elements und der Detektionseinheit wellenlängenselektiv detektiert werden und Aufschluss über die spektrale Zusammensetzung des spektrometrischen Messbereichs geben. Die Beleuchtungseinrichtung und die Detektionseinheit sind hierbei bezüglich des spektrometrischen Messbereichs auf voneinander abgewandten Seiten angeordnet. Bei Reflexionsmessungen wird insbesondere elektromagnetische Strahlung, welche von dem zu untersuchenden spektrometrischen Messbereich reflektiert wurde, erfasst, wobei die reflektierte elektromagnetische Strahlung spektrale Informationen über den spektrometrischen Messbereich aufweist. Die reflektierte elektromagnetische Strahlung kann wellenlängenselektiv detektiert werden und Aufschluss über die spektrale Zusammensetzung des spektrometrischen Messbereichs geben. Hierbei sind die Beleuchtungseinrichtung und die Detektionseinheit bezüglich des spektrometrischen Messbereichs auf einer gemeinsamen Seite angeordnet, wobei die Detektionseinheit derart angeordnet ist, dass insbesondere die von der Beleuchtungseinrichtung kommende und vom spektrometrischen Messbereich reflektierte elektromagnetische Strahlung auf die Detektionseinheit trifft und von dieser erfasst werden kann.

**[0022]** Die Detektionseinheit kann in einer Ausführungsform ein Detektorelement oder ein Detektorarray, welches mehrere Detektorelemente umfasst, umfassen. Als Detektorelement kann ein Strahlungssensor beispielsweise basierend auf Silizium (Si), Germanium (Ge), Germanium auf Silizium, Indium-Gallium-Arsenid (InGaAs), Bleiselenit (PbSe) verwendet werden. Als Strahlungssensoren eignen sich beispielsweise auch Fotodioden oder Bolometer. Strahlungssensoren können in Abhängigkeit einer Eigenschaft der auf den Strahlungssensor auftreffenden elektromagnetischen Strahlung ein elektrisches Detektionssignal ausgeben, welches ein Maß für die Strahlungseigenschaft ist. Strahlungssensoren können beispielsweise eine Intensität oder eine Energieflussdichte der vom spektrometrischen Mess-

bereich kommenden elektromagnetischen Strahlung messen.

**[0023]** In einer Ausführungsform kann die Detektionseinheit dazu ausgebildet sein, das Detektionssignal der von dem spektrometrischen Messbereich kommenden elektromagnetischen Strahlung, welches die spektralen Daten umfasst, spektral auszuwerten. Die spektralen Daten können beispielsweise ein Spektrum oder Ausschnitte eines Spektrums umfassen. Beispielsweise können die spektralen Daten einen Intensitätsverlauf, welcher über die Wellenlänge, die Zeit oder über den Ort aufgetragen ist, oder einen Verlauf eines elektrischen Signals umfassen. Das Detektionssignal kann beispielsweise ein elektrisches Signal umfassen. Beispielsweise können spektrale Informationen mittels eines Computeralgorithmus und in einem Speicher hinterlegten Referenzdaten, beispielsweise Referenzspektren oder Ausschnitte von Referenzspektren, aus dem Detektionssignal ermittelt werden. Die spektrometrische Auswertung kann im Spektrometer, in einem mobilen Endgerät, welches das Spektrometer umfasst und/oder in einer bezüglich des Spektrometers extern angeordneten Auswerteeinheit, beispielsweise einer Cloud, erfolgen.

**[0024]** Das mobile Endgerät kann eine Recheneinheit, welche zur Verarbeitung von Signalen oder Daten eingerichtet ist, eine Speichereinheit, welche zum Speichern von Signalen oder Daten eingerichtet, eine Kommunikationsschnittstelle zum Einlesen und/oder Ausgeben von Daten und eine Anzeigeeinheit, welche dazu eingerichtet ist Informationen und/oder Messergebnisse anzuzeigen, umfassen. Die Recheneinheit kann beispielsweise einen Prozessor oder einen Mikrocontroller umfassen. Die Kommunikationsschnittstelle kann dazu ausgebildet sein, Daten drahtlos und/oder leitungsgebunden einzulesen oder auszugeben. Beispielsweise kann das mobile Endgerät ein Smartphone sein, in dessen Speichereinheit eine Software-Applikation (App) gespeichert werden kann oder wobei die App herunterladbar oder online verfügbar sein kann. Die App kann zur Durchführung einer Messung mittels des Spektrometers eingerichtet sein. Die Messergebnisse bzw. Ergebnisse einer spektrometrischen Auswertung der Messergebnisse können beispielsweise über eine Anzeigeeinheit des mobilen Endgeräts an den Benutzer ausgegeben werden. Mögliche Anzeigeeinheiten sind beispielsweise Displays oder Lautsprecher mittels derer optische, haptische oder akustische Ausgaben erfolgen können. Das Ergebnis der spektrometrischen Auswertung, d.h. eine spektrale Information des spektrometrischen Messbereichs, kann beispielsweise eine Information über eine chemische Zusammensetzung des spektrometrischen Messbereichs, ein Vorhandensein und/oder eine Konzentration mindestens eines chemischen Stoffs im spek-

trometrischen Messbereich oder eine Identifizierung des spektrometrischen Messbereichs sein.

**[0025]** In einer Ausführungsform zeichnet sich das Spektrometer dadurch aus, dass das lumineszierende Element auf der Leuchtdiode angeordnet ist. Insbesondere kann das lumineszierende Element als Schicht direkt auf der Leuchtdiode angeordnet sein. Ein Vorteil ist, dass somit ein sehr kompakter Aufbau des Spektrometers ermöglicht wird.

**[0026]** Alternativ oder ergänzend kann das lumineszierende Element als sogenannter „Remote Phosphor“ auf einem separaten Träger angeordnet sein. Ein Vorteil ist, dass somit eine gleichmäßige Ausleuchtung des spektrometrischen Messbereichs ermöglicht wird. Des Weiteren wird ein Aufheizen des lumineszierenden Elements, d. h. des „Phosphors“, reduziert, wodurch die spektrale Stabilität des lumineszierenden Elements erhöht werden kann. Somit kann ein zuverlässiges Spektrometer bereitgestellt werden. Der Träger kann beispielsweise eine Haltestruktur oder ein optisches Element, wie beispielsweise eine optische Linse, ein Diffusor oder ein gerichteter Diffusor umfassen. Ein gerichteter Diffusor ist ein Diffusor mit technisch angepasster Streucharakteristik.

**[0027]** Gemäß einer Ausführungsform kann das lumineszierende Element mindestens ein weiteres Leuchtmittel zur Wandlung des ersten Anteils der ersten elektromagnetischen Strahlung mit dem ersten Spektrum in eine dritte elektromagnetische Strahlung mit einem dritten Spektrum, umfassen und ein erstes Leuchtmittel zur Wandlung der dritten elektromagnetischen Strahlung mit dem dritten Spektrum in die zweite elektromagnetische Strahlung mit dem zweiten Spektrum umfassen. Ein Vorteil ist, dass somit das Emissionsspektrum der Beleuchtungseinrichtung weiter optimiert werden, sodass ein Spektrum mit einer möglichst konstanten Intensität bzw. Leistung über den für die spektrometrische Messung nutzbaren Wellenlängenbereich realisiert werden kann.

**[0028]** Gemäß einer Ausführungsform umfasst die Beleuchtungseinrichtung ein Gehäuse, in welchem die Leuchtdiode angeordnet ist. Insbesondere ist die Leuchtdiode in einem SMD-Gehäuse (SMD=Surface-mount device) angeordnet. Alternativ oder ergänzend kann an oder in dem Gehäuse, insbesondere SMD-Gehäuse, ein optisches Element angeordnet sein, welches die Lichtausbreitung beeinflusst. Das optische Element kann in einer Ausführungsform mindestens eines der nachfolgenden Bauteile und/oder mehrere gleichartige der nachfolgenden Bauteile umfassen: Diffusor, gerichteter Diffusor, Reflektor, Spiegel, Mikrospiegel, optische Linse. Ein Vorteil ist, dass somit die Lichtausbreitung der Beleuch-

tungseinrichtung für die Spektrometrie optimiert werden kann.

**[0029]** Gemäß einer Ausführungsform kann die Detektionseinheit eine Recheneinheit umfassen, welche dazu eingerichtet ist, mittels der vom spektrometrischen Messbereich kommenden elektromagnetischen Strahlung ein Spektrum zu erfassen und/oder eine spektrale Information des spektrometrischen Messbereichs zu bestimmen.

**[0030]** Gemäß einer Ausführungsform ist das Spektrometer ein Miniaturspektrometer. Das Miniaturspektrometer ist ein Spektrometer, welches Abmessungen im Zentimeterbereich, insbesondere im Bereich von weniger als 10 cm und mehr als 1 cm oder darunter aufweist. Beispielsweise ist das Miniaturspektrometer größer gleich  $1 \text{ cm}^3$  und kleiner gleich  $1000 \text{ cm}^3$ . Alternativ oder ergänzend kann das Miniaturspektrometer auch kleiner gleich  $1 \text{ cm}^3$  und größer gleich  $0,01 \text{ cm}^3$  sein. Alternativ oder ergänzend kann das Miniaturspektrometer auch kleiner gleich  $100 \text{ cm}^3$  und größer gleich  $0,01 \text{ cm}^3$  sein. Ein Vorteil ist, dass somit ein effizientes, kompaktes, transportables Spektrometer bereitgestellt werden kann.

**[0031]** Ein Verfahren zur Kalibrierung des Spektrometers zeichnet sich dadurch aus, dass die erste Zentralwellenlänge der Leuchtdiode als Referenz zur Wellenlängenkalibration der Detektionseinheit verwendet wird. Die Anregungswellenlänge, das heißt die erste Zentralwellenlänge der Leuchtdiode, kann als bekannt vorausgesetzt werden. Da die Detektionseinheit für elektromagnetische Strahlung im roten bzw. im nah-infraroten Wellenlängenbereich sensitiv ist und aufgrund dessen, dass die erste Zentralwellenlänge der LED ebenfalls in diesem Wellenlängenbereich liegt, aufweist, kann die Detektionseinheit die von der LED emittierte elektromagnetische Strahlung detektieren und dieser zur Wellenlängenkalibration die bekannte Wellenlänge zuordnen. Alternativ oder ergänzend zeichnet sich das Verfahren dadurch aus, dass die emittierte Intensität der Leuchtdiode zur Leistungskalibration als Leistungsreferenz für die spektrometrische Messung verwendet wird. Ein Vorteil neben den zum Spektrometer genannten Vorteilen ist, dass somit die Zuverlässigkeit der Messergebnisse des Spektrometers erhöht werden kann.

#### Figurenliste

**[0032]** Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in den Zeichnungen dargestellt und werden in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Gleiche Bezugszeichen in den Figuren bezeichnen gleiche oder gleichwirkende Elemente.

**[0033]** Es zeigen

**Fig. 1** zeigt einen Querschnitt einer Beleuchtungseinrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel,

**Fig. 2** zeigt einen Querschnitt einer Beleuchtungseinrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel,

**Fig. 3** zeigt ein erstes Spektrum einer Leuchtdiode gemäß einem Ausführungsbeispiel,

**Fig. 4** zeigt ein Anregungsspektrum einer Leuchtdiode und ein Emissionsspektrum eines Leuchtmittels, wobei das Anregungsspektrum und das Emissionsspektrum keinen Überlapp aufweisen,

**Fig. 5** zeigt eine Skizze eines ersten Spektrums einer Leuchtdiode und eines zweiten Spektrums eines lumineszierenden Elements in einem gemeinsamen Koordinatensystem gemäß einem Ausführungsbeispiel, wobei das erste Spektrum und das zweite Spektrum einen Überlapp aufweisen,

**Fig. 6** zeigt eine Skizze eines Emissionsspektrums einer

Beleuchtungseinrichtung gemäß einem Ausführungsbeispiel, wobei das erste Spektrum der Leuchtdiode und das zweite Spektrum des lumineszierenden Elements dem in **Fig. 5** gezeigten ersten Spektrum und dem in **Fig. 5** gezeigten zweiten Spektrum entsprechen,

**Fig. 7** zeigt ein Spektrometer in einer Reflexionsgeometrie gemäß einem Ausführungsbeispiel,

**Fig. 8** zeigt ein Spektrometer in einer Transmissionsgeometrie gemäß einem Ausführungsbeispiel und

**Fig. 9** zeigt ein Flussdiagramm eines Verfahrens zur Kalibrierung des Spektrometers gemäß einem Ausführungsbeispiel.

#### Ausführungsbeispiele der Erfindung

**[0034]** Ein Spektrometer **100** umfasst eine Beleuchtungseinrichtung **100** zur Beleuchtung eines spektrometrischen Messbereichs **104**, eine Detektionseinheit **106** zur Detektion einer vom spektrometrischen Messbereich kommenden elektromagnetischen Strahlung **1004** und ein spektrales Element **105**, welches im Strahlengang zwischen der Beleuchtungseinrichtung **100** und der Detektionseinheit **106** angeordnet ist.

**[0035]** **Fig. 1** zeigt einen Querschnitt der Beleuchtungseinrichtung **100** gemäß einem Ausführungsbeispiel. Auf einem Substrat **101** ist eine Leuchtdiode **102** angeordnet. In **Fig. 1** weist das Substrat **101** eine Vertiefung auf, in der die Leuchtdiode **102** angeordnet ist. Das lumineszierende Element **103** ist in der Vertiefung auf der Leuchtdiode **102** angeordnet.

Die Leuchtdiode **102** mit einer ersten Zentralwellenlänge **1001''** ist dazu eingerichtet, eine erste elektromagnetische Strahlung **1001** mit einem ersten Spektrum **2001** zu emittieren, wobei das erste Spektrum beispielsweise den in **Fig. 3** gezeigten gaußförmigen Verlauf aufweist. Die erste elektromagnetische Strahlung **1001** passiert das lumineszierende Element **103**, wobei das lumineszierende Element **103** zur Wandlung eines ersten Anteils **1001'** der ersten elektromagnetischen Strahlung **1001** in eine zweite elektromagnetische Strahlung **1002** mit einem zweiten Spektrum **2002** eingerichtet ist. Das heißt, das lumineszierende Element **103** umfasst mindestens ein Leuchtmittel, welches durch die erste elektromagnetische Strahlung **1001** zur Emission der zweiten elektromagnetischen Strahlung **1002** angeregt werden kann. In dem Leuchtmittel sind nicht alle Energiezustände von Ladungsträgern erlaubt. Deshalb spricht man oft auch von elektronischen Bändern oder Bandstrukturen, die definieren, welche Energien verschiedene Ladungsträger haben können und welche nicht. In diese Bandstrukturen können zusätzlich energetische Bänder oder Zustände durch gezieltes Einbringen fremder Atome (auch Aktivatoren genannt) erzeugt werden. Die grundsätzliche Wirkungsweise des lumineszierenden Elements **103** basiert auf dem physikalischen Prinzip der Lumineszenz. Die Lichterzeugung erfolgt hier durch die Anregung eines Elektrons mit der Energie der auf das lumineszierende Element **103** auftreffenden ersten elektromagnetischen Strahlung **1001**. Dadurch wird das Elektron von einem niedrigen Energiezustand (Valenzband) in einen höheren Energiezustand (erzeugt durch Aktivatoren) oder dem sogenannten Leitungsband transportiert. Auch wird durch diesen Vorgang ein Loch im Valenzband kreiert. Nach einer gewissen Zeit gibt das Elektron seine Energie unter Emission von Licht wieder ab und kehrt in das Valenzband zurück. Das zweite Spektrum **2002** der so umgewandelten zweiten elektromagnetischen Strahlung **1002** ist von der Bandstruktur des Leuchtmittels und von den Aktivatoren abhängig. Ein zweiter Anteil **1001''** der ersten elektromagnetischen Strahlung **1001** passiert das lumineszierende Element **103** ohne umgewandelt zu werden. Das Emissionsspektrum **1003** der Beleuchtungseinrichtung ergibt sich somit aus einer Überlagerung des Spektrums des nicht-gewandelten zweiten Anteils **1001''** der ersten elektromagnetischen Strahlung **1001** und des zweiten Spektrums **2002** des gewandelten ersten Anteils **1001'**, d. h. der zweiten elektromagnetischen Strahlung **1002**. Ein beispielhafter Verlauf des Emissionsspektrums **2004** der Beleuchtungseinrichtung **100** gemäß einem Ausführungsbeispiel ist in **Fig. 6** dargestellt.

**[0036]** Alternativ zu dem in **Fig. 1** gezeigten Ausführungsbeispiel kann die Leuchtdiode **102** auch auf einem Substrat ohne Vertiefung angeordnet werden und das lumineszierende Element **103**, welches als Leuchtmittel der Beleuchtungseinrichtung wirkt, kann

auf die Leuchtdiode **102**, beispielsweise als Schicht oder Beschichtung, aufgebracht sein.

**[0037]** Ein Unterschied zwischen dem in **Fig. 1** gezeigten Ausführungsbeispiel und dem in **Fig. 2** gezeigten Ausführungsbeispiel liegt darin, dass das lumineszierende Element **103** in der **Fig. 1** direkt auf der Leuchtdiode **102** angeordnet ist, während das lumineszierende Element **103** in der **Fig. 2** als sogenannter „Remote Phosphor“ auf einem separaten Träger **101'** angeordnet ist. In dem in **Fig. 2** gezeigten Ausführungsbeispiel wird das lumineszierende Element **103** von dem Träger **101'** beabstandet zu der Leuchtdiode **102** gehalten. Der Träger **101'** hält das lumineszierende Element **103** in einem Abstand über dem Substrat **101**. Die Leuchtdiode **103** ist auf dem Substrat **101** zwischen lumineszierendem Element **103** und Substrat **101** angeordnet.

**[0038]** Beispielsweise kann die Leuchtdiode **103** in einem Gehäuse, beispielsweise einem SMD-Gehäuse angeordnet sein. Ebenfalls am SMD-Gehäuse kann mindestens ein optisches Element (z. B. Diffusor, gerichteter Diffusor, Reflektor, Spiegel, Mikroskopspiegel, optische Linse) das die Lichtausbreitung beeinflusst und/oder manipuliert befestigt sein. Das lumineszierende Element **103** ist üblicherweise auf der Leuchtdiode **103** aufgebracht, wie beispielsweise in **Fig. 1** gezeigt, als „Remote Phosphor“ auf einem separaten Träger **101'** angeordnet, wie beispielsweise in **Fig. 2** gezeigt, oder kann z.B. auch auf dem optischen Element angeordnet oder aufgebracht sein.

**[0039]** Alternativ oder ergänzend können auf dem Gehäuse oder im Strahlengang zwischen dem LED-Gehäuse und dem spektrometrischen Messbereich noch weitere optische Elemente angebracht sein. Beispielsweise kann mit einem Diffusor oder gerichtetem Diffusor oder einer (weiteren) optischen Linse die Lichtausbreitung der Lichtquelle für die Spektrometrie optimiert werden.

**[0040]** In **Fig. 3** ist gemäß einem Ausführungsbeispiel das erste Spektrum **2001**, d. h. ein Emissionsspektrum der Leuchtdiode **102**, bevor ein Anteil der ersten elektromagnetischen Strahlung **1001** durch das lumineszierende Element **103** gewandelt wird, skizziert. Auf der x-Achse **200** ist die Wellenlänge aufgetragen, auf der y-Achse **201** ist die Intensität bzw. spektrale Strahlendichte aufgetragen. Das erste Spektrum **2001** weist hierbei einen Verlauf ähnlich einer Gauß-Funktion auf. Das Spektrum **2001** von Leuchtdioden wird meist durch eine einzige Wellenlänge, beispielsweise eine Zentralwellenlänge **1001''** der Leuchtdiode **102**, ausgedrückt. Die Zentralwellenlänge **1001''** beschreibt dabei die Wellenlänge, welche in der Mitte zwischen zwei Punkten (Wellenlängen) mit einer spektralen Dichte von 50% des Peaks des Spektrums, d. h. 50% des Maximums des Spektrums, liegt. Für ein symmetrisches Spek-

trum, wie das in **Fig. 3** gezeigte erste Spektrum **2001**, entspricht die Zentralwellenlänge **1001"** gerade der Wellenlänge, bei der das Spektrum maximal ist.

**[0041]** In **Fig. 4** ist ein Anregungsspektrum **20** einer Leuchtdiode und ein Emissionsspektrum **2002** eines Leuchtmittels skizziert, wie dies im Stand der Technik beschrieben ist, wobei das Anregungsspektrum und das Emissionsspektrum keinen Überlapp aufweisen. Das hier verwendete Leuchtmittel wird mit blauem Licht (Zentralwellenlänge **10'** von beispielsweise 460 nm, 490 nm oder einen Wert zwischen 460 nm und 490 nm) angeregt und emittiert dann elektromagnetische Strahlung im nah-infrarot-Bereich, insbesondere im Bereich von 700 nm bis 1050 nm. Ein Teil des blauen Lichts wird nicht gewandelt und bleibt daher im Emissionsspektrum einer Beleuchtungseinrichtung mit einer blauen LED und dem in diesem Beispiel aus dem Stand der Technik beschriebenen Leuchtmittel erhalten, wobei dieser Lichtanteil außerhalb des Wellenlängenintervalls **2000**, welches bei einer spektrometrischen Messung üblicherweise erfasst wird, liegt.

**[0042]** In **Fig. 5** sind beispielhaft das erste Spektrum **2001**, d. h. ein Emissionsspektrum der Leuchtdiode **102**, welches als Anregungsspektrum für das lumineszierende Element **103** wirkt, und das zweite Spektrum **2002**, welches das Emissionsspektrum des lumineszierenden Element **103** nach Anregung durch die erste elektromagnetische Strahlung **1001'** beschreibt, in einem gemeinsamen Koordinatensystem, gemäß einem Ausführungsbeispiel skizziert. Auf der x-Achse **200** ist die Wellenlänge aufgetragen, auf der y-Achse **201** ist die Intensität bzw. spektrale Strahlendichte aufgetragen. Auf der x-Achse ist ein Wellenlängenbereich **2000** eingetragen, welcher für die Spektrometrie nutzbar ist. Typische Wellenlängenintervalle, innerhalb derer ein signifikanter Photostrom generiert wird, sind für Silizium-basierte Photodetektoren 400 nm bis 1100 nm, für Indium-Gallium-Arsenid-( $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ ) basierte Photodetektoren 600 nm oder 900 nm bis 1700 nm und für Indium-Gallium-Arsenid-( $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ; mit  $x > 0.53$ ) basierte Photodetektoren 900 nm bis maximal 2600 nm. Die erste Zentralwellenlänge **1001"** der Leuchtdiode **102** liegt hierbei im Wellenlängenintervall **2000**, welches für die Spektrometrie nutzbar ist. Wie in **Fig. 5** dargestellt, weisen das erste Spektrum **2001** und das zweite Spektrum **2002** einen Überlapp **2000'** auf. Dadurch ist es insbesondere möglich, zusätzlich zum Emissionsspektrum **2002** des lumineszierenden Elements **103** auch das Spektrum der Leuchtdiode **102** für die Spektrometrie zu verwenden. Der Kurvenverlauf des zweiten Spektrums **2002** hängt insbesondere von der chemischen Zusammensetzung des lumineszierenden Elements **103** ab.

**[0043]** Das Spektrometer **1000** umfasst die Beleuchtungseinrichtung **100**, wobei die Leuchtdiode **102** ge-

mäß einem Ausführungsbeispiel die erste Zentralwellenlänge mit einem Wert von 630 nm aufweist und wobei ein nah-infrarot-Phosphor als lumineszierendes Element **103** verwendet wird, welches die zweite elektromagnetische Strahlung **1002** mit dem zweiten Spektrum **2002** mit Wellenlängen im Bereich von 700 nm bis 1100 nm emittiert. Typische Phosphore basieren beispielsweise auf Granate, Silikate, Oxinitride bzw. Oxicarbinitride oder Nitride bzw. Carbonitride. Das Emissionsspektrum **2004** der Beleuchtungseinrichtung **100** umfasst in diesem Ausführungsbeispiel elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen im Intervall von 600 nm bis 1100 nm. Das gesamte Emissionsspektrum **2004** liegt somit im für die Spektrometrie nutzbaren Wellenlängenintervall **2000**, und weist in diesem Wellenlängenbereich eine näherungsweise konstante Leistung auf, insbesondere wird elektromagnetische Strahlung aller im nutzbaren Wellenlängenintervall **2000** Wellenlängen mit ausreichender Leistung auf ein Objekt, welches spektrometrisch untersucht werden soll, gerichtet, sodass die Zuverlässigkeit der Messergebnisse der Detektionseinheit **106** für die Wellenlängen des Wellenlängenintervalls **2000** erhöht werden kann.

**[0044]** Die erste Zentralwellenlänge **1001"** der Leuchtdiode **103** kann beispielsweise **550** Nanometern (nm) oder 1000 nm oder einen Wert zwischen 550 nm und 1000 nm aufweisen. Alternativ kann die erste Zentralwellenlänge **1001"** der Leuchtdiode **102** 760 nm oder 2500 nm oder einen Wert zwischen 780 nm und 2500 nm aufweisen. Alternativ kann die erste Zentralwellenlänge **1001"** der Leuchtdiode **102** 610 nm oder 3000 nm oder einen Wert zwischen 610 nm und 3000 nm aufweisen. Alternativ kann die erste Zentralwellenlänge **1001"** der Leuchtdiode **102** 610 nm oder 1000 nm oder einen Wert zwischen 610 nm und 1000 nm aufweisen. Alternativ kann die erste Zentralwellenlänge **1001"** 580 nm, 630 nm, 800 nm oder 1200 nm betragen.

**[0045]** In einem weiteren Ausführungsbeispiel weist die Leuchtdiode **102** der Beleuchtungseinrichtung **100** des Spektrometers **1000** die erste Zentralwellenlänge **1001"** mit einem Wert von 1200 nm auf und das lumineszierende Element **103** umfasst ein Leuchtmittel, welches die zweite elektromagnetische Strahlung **1002** mit dem zweiten Spektrum **2002** mit Wellenlängen im Bereich von 1280 nm bis 1800 nm emittiert. Somit umfasst das Emissionsspektrum **2004** der Beleuchtungseinrichtung **100** in diesem Ausführungsbeispiel Wellenlängen von 1150 nm bis 1800 nm. Das gesamte Emissionsspektrum **2004** liegt somit im für die Spektrometrie nutzbaren Wellenlängenintervall **2000**, und weist in diesem Wellenlängenbereich eine näherungsweise konstante Leistung auf, insbesondere wird elektromagnetische Strahlung aller im nutzbaren Wellenlängenintervall **2000** Wellenlängen mit ausreichender Leistung auf ein Objekt, welches spektrometrisch untersucht werden soll, gerichtet,

sodass die Zuverlässigkeit der Messergebnisse der Detektionseinheit **106** für die Wellenlängen des Wellenlängenintervalls **2000** erhöht werden kann.

**[0046]** In einer weiteren Ausprägungsform des Spektrometers **1000** kann eine Leuchtdiode **102** mit 800 nm als erste Zentralwellenlänge verwendet werden. Das lumineszierende Element **103** kann mehrere Leuchtmittel umfassen, die in Summe die zweite elektromagnetische Strahlung **1002** mit dem zweiten Spektrum **2002** mit Wellenlängen im Bereich von 850 bis 1700 nm emittieren.

**[0047]** In Fig. 6 ist eine Skizze des Emissionsspektrums **2004** der Beleuchtungseinrichtung **100** gemäß einem Ausführungsbeispiel gezeigt, wobei das erste Spektrum **2001** der Leuchtdiode **102** und das zweite Spektrum **2002** des lumineszierenden Elements **103** dem in Fig. 5 gezeigten ersten Spektrum **2001** und dem in Fig. 5 gezeigten zweiten Spektrum **2002** entsprechen. Auf der x-Achse **200** ist die Wellenlänge aufgetragen, auf der y-Achse **201** ist die Intensität bzw. spektrale Strahlendichte aufgetragen. Der Kurvenverlauf hängt im Allgemeinen von der chemischen Zusammensetzung des lumineszierenden Elements **103** und der verwendeten Leuchtdiode **102**, insbesondere der ersten Zentralwellenlänge **1001** der Leuchtdiode **102** ab. Das Emissionsspektrums **2004** der Beleuchtungseinrichtung **100** ergibt sich aus einer Überlagerung der Spektren des nicht-gewandelten zweiten Anteils **1001** der ersten elektromagnetischen Strahlung **1001** und der von dem lumineszierenden Element **103** emittierten zweiten elektromagnetischen Strahlung **1002**.

**[0048]** Fig. 7 zeigt ein Ausführungsbeispiel, in dem das Spektrometer **1000** im Querschnitt dargestellt ist und in einer Reflexionsgeometrie angeordnet ist. Die Beleuchtungseinrichtung **100**, welche beispielsweise den gleichen Aufbau wie die in Fig. 1 oder Fig. 2 gezeigte Beleuchtungseinrichtung **100** aufweist, und die Detektionseinheit **106** sind bei der Reflexionsgeometrie bezüglich des spektrometrischen Messbereichs **104** auf einer gemeinsamen Seite angeordnet, wobei die Detektionseinheit **106** derart angeordnet ist, dass insbesondere die von der Beleuchtungseinrichtung **100** emittierte **1003** und vom spektrometrischen Messbereich **104** reflektierte elektromagnetische Strahlung **1004** auf die Detektionseinheit **106** trifft und von dieser erfasst werden kann. Die Detektionseinheit **106** kann beispielsweise ein Detektorelement oder ein Detektorarray, welches mehrere Detektorelemente umfasst, umfassen. Als Detektorelement kann ein Strahlungssensor beispielsweise basierend auf Silizium (Si), Germanium (Ge), Germanium auf Silizium, Indium-Gallium-Arsenid (InGaAs), Bleiselenit (PbSe) verwendet werden. Als Strahlungssensoren eignen sich beispielsweise auch Fotodioden oder Bolometer. Strahlungssensoren können in Abhängigkeit einer Eigen-

schaft der auf den Strahlungssensor auftreffenden elektromagnetischen Strahlung ein elektrisches Detektionssignal ausgeben, welches ein Maß für die Strahlungseigenschaft ist. Strahlungssensoren können beispielsweise eine Intensität oder eine Energieflussdichte der vom spektrometrischen Messbereich kommenden elektromagnetischen Strahlung messen. Das spektrale Element **105** ist in Fig. 7 als separates Bauteil im Strahlengang zwischen dem spektrometrischen Messbereich **105** und der Detektionseinheit **106** angeordnet. In einem Ausführungsbeispiel kann die Detektionseinheit **106** oder die Beleuchtungseinrichtung **100** das spektrale Element **105** umfassen oder es kann das spektrale Element **105** im Strahlengang zwischen der Beleuchtungseinrichtung **100** und dem Messbereich **104** angeordnet sein.

**[0049]** Fig. 8 zeigt ein Ausführungsbeispiel, in dem das Spektrometer **1000** im Querschnitt dargestellt ist und in einer Transmissionsgeometrie angeordnet ist. Die Beleuchtungseinrichtung **100**, welche beispielsweise den gleichen Aufbau wie die in Fig. 1 oder Fig. 2 gezeigte Beleuchtungseinrichtung **100** aufweist, und die Detektionseinheit **106** sind bezüglich des spektrometrischen Messbereichs **104** auf voneinander abgewandten Seiten des spektrometrischen Messbereichs **104** angeordnet. D. h. der spektrometrische Messbereich **104** ist zwischen der Beleuchtungseinrichtung **100** und der Detektionseinheit **106** angeordnet. Das spektrale Element **105** kann, wie vorstehend zu Fig. 7 beschrieben, als Teil der Beleuchtungseinrichtung **100** oder als Teil der Detektionseinheit **106** ausgebildet sein, oder als separates Bauteil im Strahlengang zwischen Beleuchtungseinrichtung **100** und spektrometrischem Messbereich **104** angeordnet sein.

**[0050]** Das spektrale Element **105** kann beispielsweise eine durchstimmbares Fabry-Pérot Interferometer (FPI), doppelbrechende Kristalle und Polarisatoren, oder einen anderen wellenlängenselektiven Filter sowie optional optische Linsen, optische Aperturen, Mikrolinsen, Mikrolinsenarrays, Strahlteiler, Spiegel, Mikrospiegel, etc. umfassen. Das Spektrometer **1000** kann beispielsweise als ein statisches oder bewegliches Fourier-Transformationspektrometer oder als ein Fabry-Pérot Spektrometer ausgebildet sein. Die Beleuchtungseinrichtung **100**, das spektrale Element **105** und die Detektionseinheit **106** können in einem gemeinsamen Gehäuse angeordnet sein. Beispielsweise kann das Spektrometer **1000** als tragbares Gerät ausgebildet sein. Beispielsweise kann das Spektrometer **1000** als Miniaturspektrometer ausgebildet sein. In einem Ausführungsbeispiel kann das Spektrometer **1000** in ein mobiles Endgerät, wie beispielsweise ein Smartphone, integriert sein.

**[0051]** In Fig. 9 ist ein Flussdiagramm eines Verfahrens **300** zur Kalibrierung des Spektrometers **1000**

dargestellt. Das Spektrometer umfasst beispielsweise die in **Fig. 1** oder **Fig. 2** gezeigte Beleuchtungseinrichtung **100**. Das bekannte Emissionsspektrum der Leuchtdiode **102** kann zur Kalibrierung des Spektrometers **100** verwendet werden, da die Detektionseinheit aufgrund der Wahl der ersten Zentralwellenlänge sensitiv auf die erste elektromagnetische Strahlung **1001**, die von der Leuchtdiode emittiert wird, ist. Das Verfahren kann eine Wellenlängenkalibration **301** und/oder eine Leistungskalibration **302** umfassen. In dem in **Fig. 9** dargestellten Verfahren **300** ist sowohl die Wellenlängenkalibration **301** als auch die Leistungskalibration **302** im Flussdiagramm dargestellt. Bei der Wellenlängenkalibration **301** wird ausgenutzt, dass die erste Zentralwellenlänge **1001"** der Leuchtdiode **102** bekannt ist. Bei der Wellenlängenkalibration erfasst die Detektionseinheit **106** die erste elektromagnetische Strahlung **1001'** mit dem ersten Spektrum **2002**, wobei der Zentralwellenlänge des erfassten Spektrums der Wert der bekannten ersten Zentralwellenlänge **1001"** zugeordnet wird. Beispielsweise kann somit ein Referenzdatensatz **301'** erzeugt werden, welcher auf das Messergebnis der spektrometrischen Messung angewandt werden kann. Bei der Leistungskalibrierung **302** wird die emittierte Intensität der Leuchtdiode **102** als Leistungsreferenz **302'** für die spektrometrische Messung verwendet. Hierzu wird das gemessene Spektrum hinsichtlich der vom untersuchten Objekt reflektierten LED-Intensität ausgewertet. Beispielsweise kann die gemessene LED-Intensität mit einer in der Elektronik hinterlegten 100% Reflexion abgeglichen werden, so dass ein Absolutwert der reflektierten Intensität für diese Wellenlänge resultiert. In einem weiteren Beispiel kann die während einer Testbelichtung gemessene LED-Intensität verwendet werden um eine Sättigung der Photodiode bei der nachfolgenden Messung zu verhindern. In einem weiteren Beispiel wird das Spektrum mehrfach aufgenommen, so dass die Veränderung der LED-Intensität den Schluss auf eine veränderte Messbedingung (z.B. Änderung des Messabstandes, des Messwinkels, des untersuchten Objektes o.ä.) zulässt.

**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 2016/0091367 A1 [0001]

### Patentansprüche

1. Spektrometer (1000), umfassend
  - eine Beleuchtungseinrichtung (100) zur Beleuchtung eines spektrometrischen Messbereichs (104),
  - eine Detektionseinheit (106) zur Detektion einer vom spektrometrischen Messbereich kommenden elektromagnetischen Strahlung (1004) und
  - ein spektrales Element (105), welches im Strahlengang zwischen der Beleuchtungseinrichtung (100) und der Detektionseinheit (106) angeordnet ist, wobei die Beleuchtungseinrichtung (100)
    - eine Leuchtdiode (102) mit einer ersten Zentralwellenlänge (1001") umfasst, welche dazu eingerichtet ist eine erste elektromagnetische Strahlung (1001) mit einem ersten Spektrum (2001) zu emittieren, und
    - ein lumineszierendes Element (103) zur Wandlung eines ersten Anteils (1001') der ersten elektromagnetischen Strahlung (1001) mit dem ersten Spektrum (2001) in eine zweite elektromagnetische Strahlung (1002) mit einem zweiten Spektrum (2002) umfasst, **dadurch gekennzeichnet**,
      - dass die erste Zentralwellenlänge (1001") 550 nm, 3000 nm oder einen Wert zwischen 550 nm und 3000 nm aufweist, und
      - dass das erste Spektrum (2001) und das zweite Spektrum (2002) einen Überlapp (2000') aufweisen.
2. Spektrometer (1000) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das lumineszierende Element (103) im Strahlengang der Leuchtdiode (102) angeordnet ist.
3. Spektrometer (1000) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das lumineszierende Element (103)
  - mindestens ein weiteres Leuchtmittel zur Wandlung des ersten Anteils (1001') der ersten elektromagnetischen Strahlung (1001) mit dem ersten Spektrum (2001) in eine dritte elektromagnetische Strahlung mit einem dritten Spektrum, und
  - ein erstes Leuchtmittel zur Wandlung der dritten elektromagnetischen Strahlung mit dem dritten Spektrum in die zweite elektromagnetische Strahlung (1002) mit dem zweiten Spektrum (2002) aufweist.
4. Spektrometer (1000) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das lumineszierende Element (103) als Beschichtung auf der Leuchtdiode (102) aufgebracht ist.
5. Spektrometer (1000) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das lumineszierende Element (103) auf einem Träger (101') oder auf einem optischen Element aufgebracht ist.
6. Spektrometer (1000) nach einem der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Be-

leuchtungseinrichtung (100) ein Gehäuse umfasst, in welchem die Leuchtdiode (102) angeordnet ist.

7. Spektrometer (1000) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Beleuchtungseinrichtung (100) mindestens ein optisches Element zur Einstellung einer Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung aufweist.

8. Spektrometer (1000) nach einem der Ansprüche 5 oder 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass das optische Element mindestens eines der nachfolgenden Bauteile umfasst: Diffusor, gerichteter Diffusor, Reflektor, Spiegel, Mikroskopspiegel, optische Linse.

9. Spektrometer (1000) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Detektionseinheit (106) eine Recheneinheit umfasst, welche dazu eingerichtet ist mittels der vom spektrometrischen Messbereich kommenden elektromagnetischen Strahlung (1004) ein Spektrum und/oder eine spektrale Information des spektrometrischen Messbereichs (104) zu bestimmen.

10. Spektrometer (1000) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Zentralwellenlänge (1001") 550 nm, 1800 nm oder einen Wert zwischen 550 nm und 1800 nm aufweist.

11. Spektrometer (1000) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Spektrometer (1000) ein Miniaturspektrometer ist.

12. Verfahren zur Kalibrierung des Spektrometers (1000) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Zentralwellenlänge (1001") der Leuchtdiode (102) als Referenz zur Wellenlängenkalibration (301) der Detektionseinheit (106) verwendet wird und/oder zur Leistungskalibration (302) die emittierte Intensität der Leuchtdiode (102) als Leistungsreferenz für die spektrometrische Messung verwendet wird.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

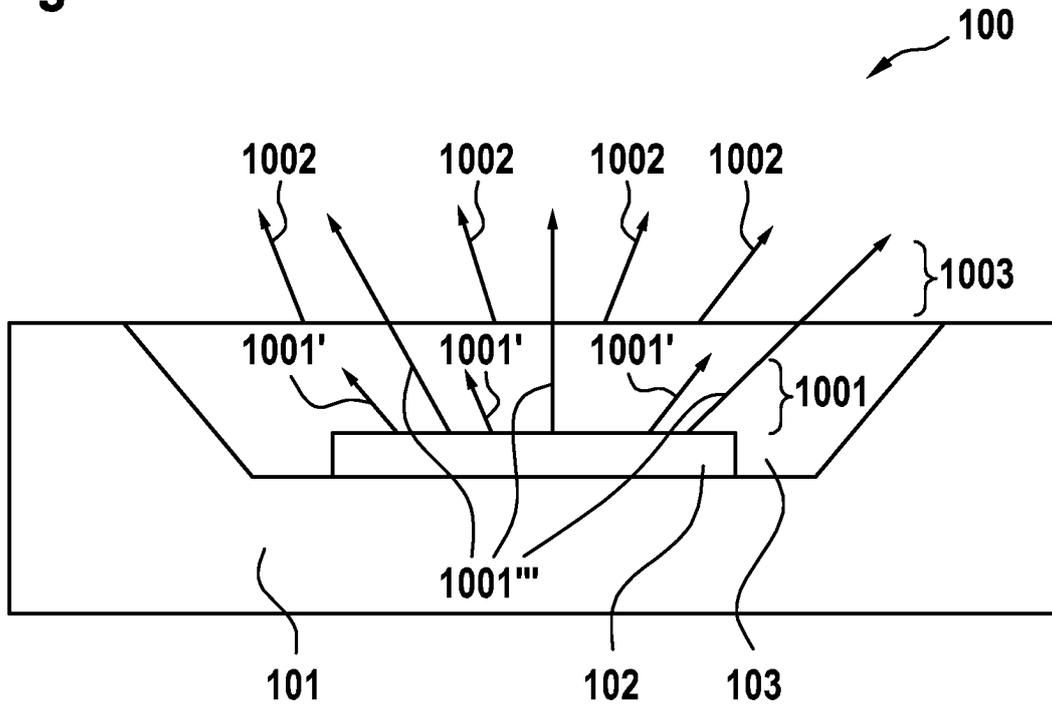
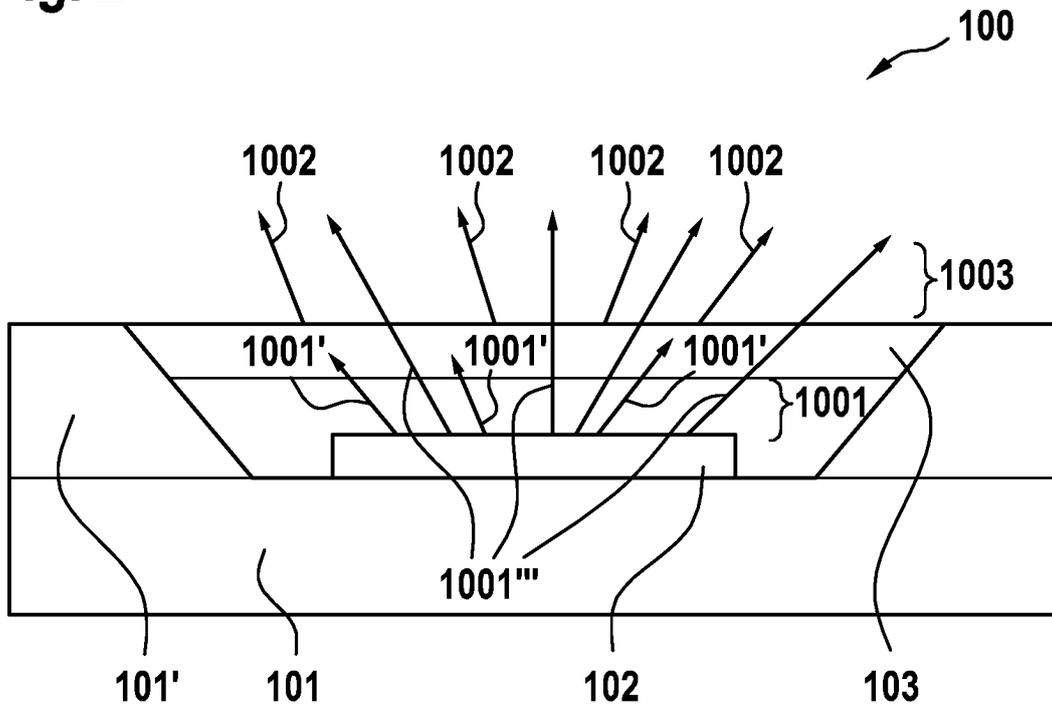
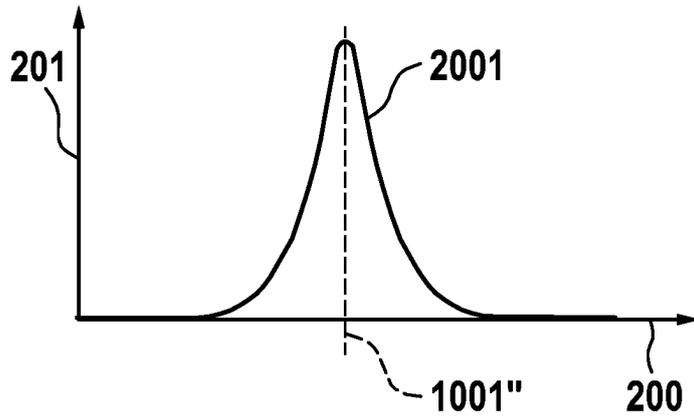


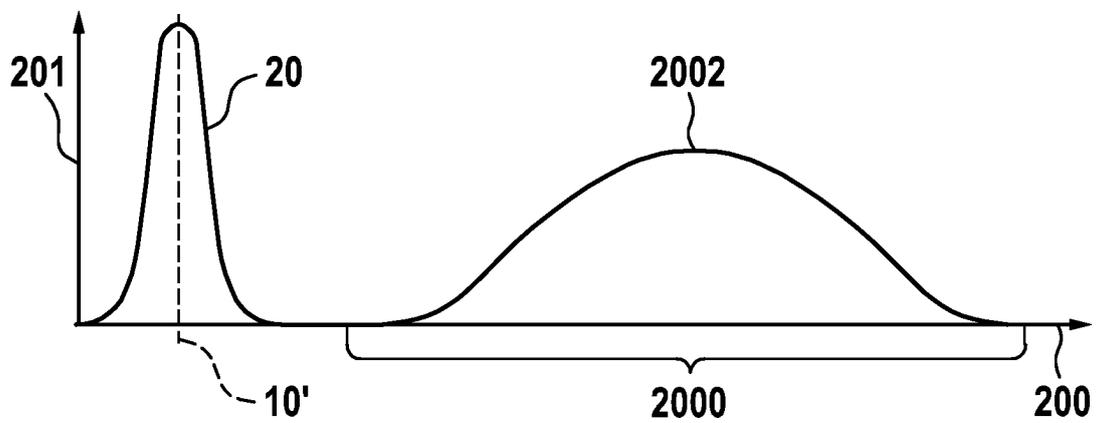
Fig. 2



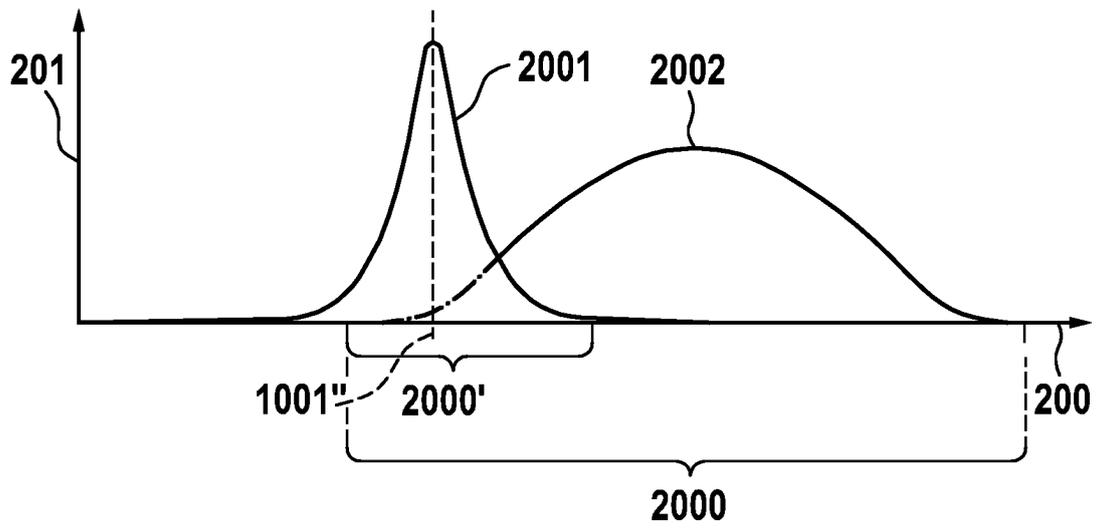
**Fig. 3**



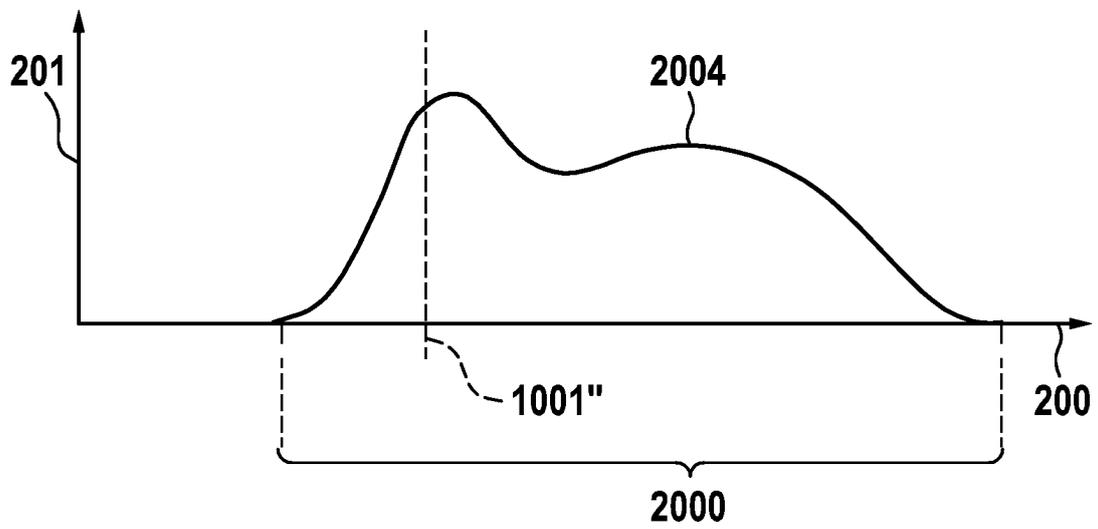
**Fig. 4**



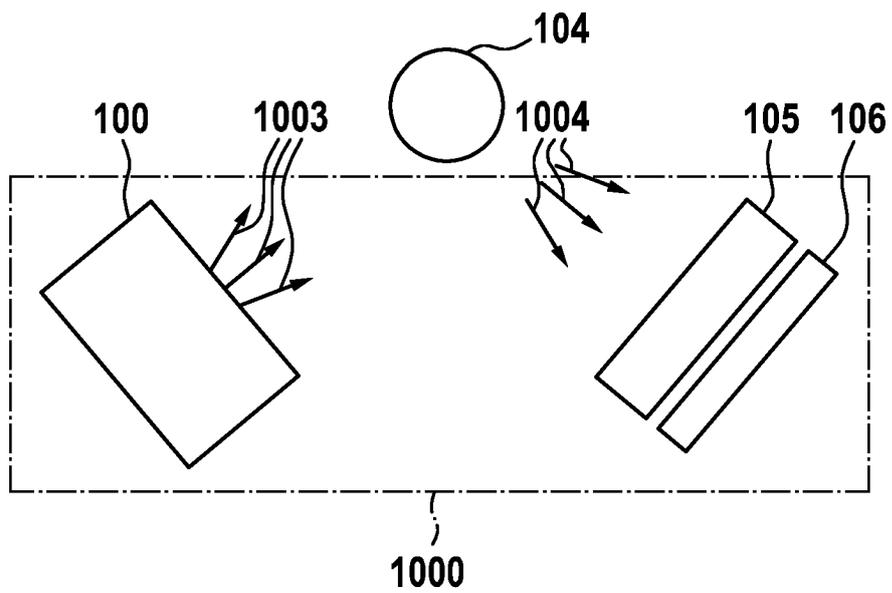
**Fig. 5**



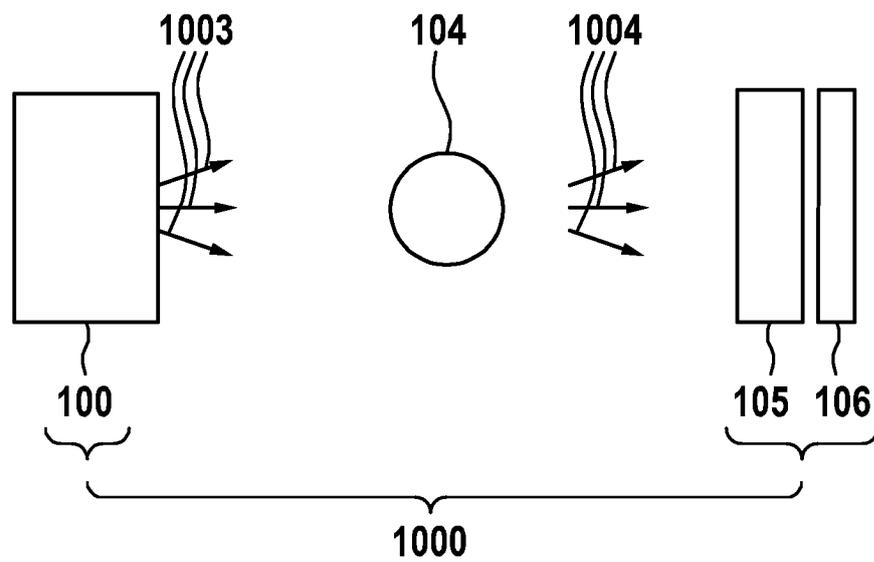
**Fig. 6**



**Fig. 7**



**Fig. 8**



**Fig. 9**

