

(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  
07. Dezember 2017 (07.12.2017)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
WO 2017/207681 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:  
G01N 21/21 (2006.01) G01N 21/25 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2017/063248

(22) Internationales Anmeldedatum:  
01. Juni 2017 (01.06.2017)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
10 2016 209 723.7  
02. Juni 2016 (02.06.2016) DE

(71) Anmelder: FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V. [DE/DE]; Hansastraße 27c, 80686 München (DE).

(72) Erfinder: HARTRUMPF, Matthias; Hertzstraße 164b, 76187 Karlsruhe (DE). NEGARA, Christian; Domstraße 81, 50668 Köln (DE).

(74) Anwalt: PFENNING, MEINIG & PARTNER MBB; Theresienhöhe 11a, 80339 München (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, DE, DJ, 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, KH, KN, KP, KR, KW, 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.

(54) Title: CONFIGURABLE RETRO-REFLECTIVE SENSOR SYSTEM FOR THE IMPROVED CHARACTERIZATION OF THE PROPERTIES OF A SAMPLE, CORRESPONDING METHOD AND CORRESPONDING USE

(54) Bezeichnung: KONFIGURIERBARES RETROREFLEX-SENSORSYSTEM ZUR VERBESSERTEN CHARAKTERISIERUNG DER EIGENSCHAFTEN EINER PROBE, ENTSPRECHENDES VERFAHREN UND ENTSPRECHENDE VERWENDUNG

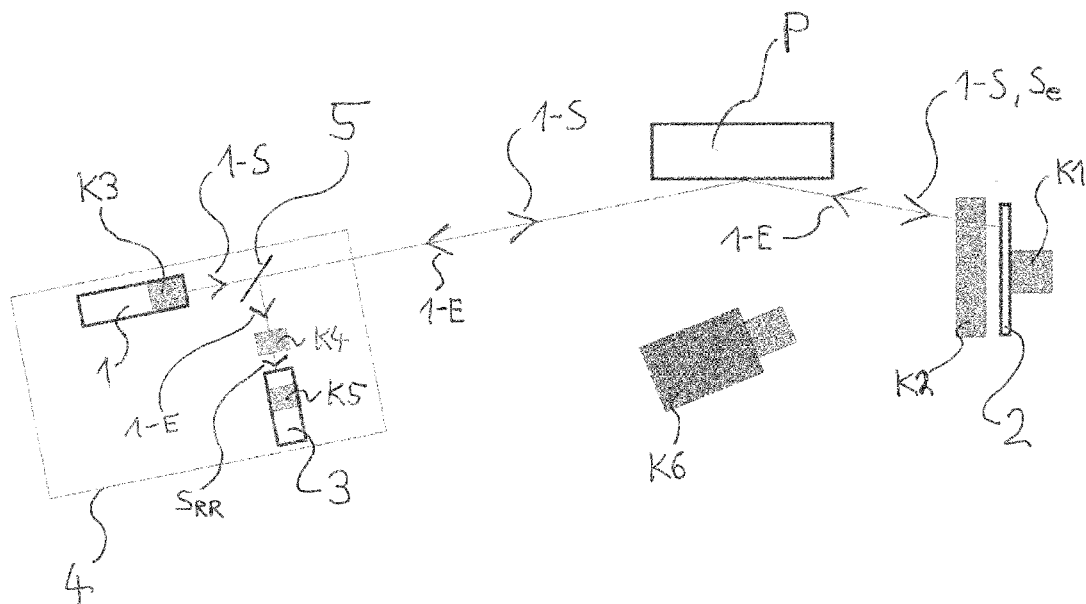


Fig. 2

(57) Abstract: The invention relates to a retro-reflector-based sensor system for optically characterizing a sample (P), comprising an emitter (1) for irradiating the sample (P) positioned in the emission beam path (1-S); a retro-reflector (2) which is positioned in the emission beam path (1-S) behind the sample (P) in such a way that, in the emission beam path (1-S), it reflects incident radiation ( $S_e$ ) coming from the sample (P) in the reception beam path (1-E) back to the sample (P), wherein the emitter (1), the sample (P) and the retro-reflector (2) are



WO 2017/207681 A2

**(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:**

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)

---

positioned in such a manner that radiation reflected back from the retro-reflector (2) in the reception beam path (1-E) is incident again to the sample (P) and is transmitted back from the latter (P) in the direction of the emitter (1); and comprising a receiver (3) which is positioned in the reception beam path (1-E) in such a way that it detects radiation ( $S_{RR}$ ) reflected back from the retro-reflector (2) and being incident again to the sample (P) and reflected back from the latter (P) in the direction of the emitter (1). The measuring values can be obtained and evaluated on the basis of the radiation (SRR) detected by the receiver (3) for optically characterizing the sample (P), wherein one or a plurality of configuration means (K1 to K6) is/are provided, by means of which an improved extraction and/or evaluation of the measuring values is/are ensured, for improved optical characterization of the sample (P).

**(57) Zusammenfassung:** Retroreflektorbasiertes Sensorsystem zum optischen Charakterisieren einer Probe (P) mit einem Sender (1) zum Bestrahlen der im Senderstrahlengang (1-S) positionierten Probe (P), einem Retroreflektor (2), der im Senderstrahlengang (1-S) hinter der Probe (P) so positioniert ist, dass er im Senderstrahlengang (1-S) von der Probe (P) herkommend auf ihn einfallende Strahlung ( $S_c$ ) im Empfangsstrahlengang (1-E) auf die Probe (P) zurückreflektiert, wobei der Sender (1), die Probe (P) und der Retroreflektor (2) so positioniert sind, dass im Empfangsstrahlengang (1-E) vom Retroreflektor (2) zurückreflektierte Strahlung erneut auf die Probe (P) einfällt und von letzterer (P) in Richtung zum Sender (1) hin zurückgestrahlt wird, und einem Empfänger (3), der im Empfangsstrahlengang (1-E) so positioniert ist, dass er vom Retroreflektor (2) zurückreflektierte, erneut auf die Probe (P) eingefallene und von letzterer (P) in Richtung zum Sender (1) hin zurückgestrahlte Strahlung ( $S_{RR}$ ) detektiert, wobei aus der vom Empfänger (3) detektierten Strahlung (SRR) Messwerte gewinn- und auswertbar sind zum optischen Charakterisieren der Probe (P), und wobei ein oder mehrere Konfigurationsmittel (K1 bis K6) vorgesehen ist/sind, mittels dessen/derer eine verbesserte Gewinnung und/oder Auswertung der Messwerte ermöglicht ist/sind, zum verbesserten optischen Charakterisieren der Probe (P).

**Konfigurierbares Retroreflex-Sensorsystem zur verbesserten Charakterisierung der Eigenschaften einer Probe, entsprechendes Verfahren und entsprechende Verwendung**

5           **I. Der Stand der Technik**

10           Nachfolgend werden bereits einige auch für die Erfindungsbeschreibung verwendeten Bezugszeichen eingeführt; im Rahmen der gesamten Beschreibung werden somit für identische bzw. sich entsprechende Teile der beschriebenen Systeme identische Bezugszeichen verwendet.

15           Retroreflex-Sensorsystems (alternativ auch als Retroreflex-Sensoren sowie abgekürzt auch als Sensoren bezeichnet) bzw. entsprechende Anordnungen gemäß dem Stand der Technik (vergleiche [STT1], [STT2] und [STT3]) sind grundsätzlich wie in Figur 1 gezeigt aufgebaut:

Ein Sender 1 beleuchtet die Probe P. Das auf die Probe auftreffende Licht gelangt entweder durch die Probe (Transmission) oder nach einer Reflexion an der Probe auf den Retroreflektor 2 und wird von dort auf dem gleichen Weg oder mit einem Strahlversatz in Richtung Sender 1 zurückreflektiert. Dabei ist es für das Funktionsprinzip des Sensors meist unerheblich, ob es durch den Reflektor zu einer Aufweitung der rückreflektierten Strahlen kommt, wie es zum Beispiel von Folienreflektoren bekannt ist. Der Empfänger 3 detektiert und analysiert die zurückreflektierte Strahlung. Er wird nachfolgend alternativ auch als Detektor bezeichnet. Sofern der Strahlversatz oder die Aufweitung des zurückreflektierten Lichtes es erlauben, kann der Empfänger neben dem Sender angeordnet sein (vgl. Figur 1a). Dies ist insbesondere dann möglich, wenn der Retroreflektor 2 zu einem definierten Strahlversatz führt oder nicht ideal ist und die auf ihn auftreffende Strahlung in einem Kegel zurückreflektiert. Andernfalls wird die zurückreflektierte Strahlung über einen Strahlteiler 5 zwischen Sender und Probe in Richtung Empfänger umgelenkt (vgl. Figur 1b). In den meisten Ausführungsformen sind Sender und Empfänger in ein und dasselbe Gehäuse 4 integriert (zu einem „Transceiver“).

Bei der Transmission oder Spiegelung an der Probe bzw. am Objekt kann es zu Polarisationsänderungen der Strahlung kommen. Je nach Anwendung sind diese Polarisationsänderungen unerwünscht oder gerade das gesuchte Messsignal. Fälle bei denen diese Polarisationsänderungen unerwünscht sind, bei denen sie die Bestimmung der Objekteigenschaften also stören, sind beispielsweise:

- Detektion dekorativer Defekte (Einschlüsse, Kratzer o.ä.)
- Detektion oder Vermessung von Objektstrukturen (beispielsweise Außenkanten oder Konturen des Objekts, Grenzflächen im Inneren des Objekts, ...).

Fälle bei denen die Polarisationsänderungen ausgewertet werden sollen sind beispielsweise:

- Detektion von Spannungen im Material
- Detektion der Materialart oder Schichtdicke mittels Ellipsometrie.

Bei Anordnungen nach dem Stand der Technik sind diese (oder andere) unterschiedliche(n) Informationen über das Objekt in der Regel im Messsignal überlagert und können nicht oder nur bedingt voneinander unterschieden werden.

Zudem kann es bei der Verwendung von Reflektoren 2 mit Mikrostrukturen (Folien mit Mikroprismen, Mikrogaskugeln etc.) durch die Mikrostruktur des Reflektors zu erhöhtem Rauschen kommen.

5 Bei dem vorangehend beschriebenen Stand der Technik kommt es beispielsweise bei ellipsometrischen Messungen zu folgenden Einschränkungen:

- Einschränkung des eindeutigen Bereichs zur Bestimmung der ellipsometrischen Kenngrößen  $\psi$ ,  $\Delta$ .
- 10 • Einschränkung bei der gleichzeitigen Überprüfung auf dekorative Defekte bzw. Überlagerung der Signale dieser Defekte und der polarimetrischen oder ellipsometrischen Signale.
- Unbekannte Neigungswinkel der Probe in und senkrecht zur Einfallsebene.
- 15 • Rauschen durch die Mikrostruktur des Reflektors und / oder Speckle.

Stand der Technik:

[STT1] WO 99/41568 A1 = Anmeldung PCT/EP2011/004553 bzw. EP 1056987.

20

[STT2] WO 2012/038036 A1

[STT3] „Ellipsometrie an gekrümmten Oberflächen“, Conference Paper, November 2014, Forum Bildverarbeitung 2014, Regensburg, DOI:  
25 10.5445/KSP/1000043608.

[STT4] “Simultaneous measurement of surface geometry and material distribution by focusing ellipsotopometry”, U. Neuschaefer-Rube und W. Holzapfel, APPLIED OPTICS, Vol. 41, No. 22, 1 August 2002.

30

[STT5] R. M. A. Azzam „Division-of-amplitude Photopolarimeter (DOAP) for the Simultaneous Measurement of All Four Stokes Parameters of Light.“, Optica Acta: International Journal of Optics, 29(5): 685–689, 1982.

35

**II. Einführung in die sowie Aufgabe der vorliegenden Erfindung**

Ausgehend vom Stand der Technik ist es die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine verbesserte optische Charakterisierung einer Probe bzw. eines Objekts in Retroreflexanordnung zu ermöglichen. Dazu sollen ein erfindungsgemäßes retroreflektorbasiertes Sensorsystem, ein entsprechendes  
5 retroreflektorbasiertes Detektions-, Mess- und Auswerteverfahren sowie entsprechende Verwendungen solcher Systeme oder Verfahren zur Verfügung gestellt werden.

Diese Aufgabe wird durch ein Sensorsystem gemäß Anspruch 1 gelöst. Vorteilhafterweise realisierbare Ausführungsformen lassen sich den abhängigen  
10 Patentansprüchen entnehmen.

Entsprechende Verfahren (und Verwendungen) ergeben sich entsprechend in dem Fachmann offensichtlicher Abwandlung der Patentansprüche (beispielsweise gemäß Anspruch 1, indem die Probe mittels Strahlung im Senderstrahlengang bestrahlt wird, ... bis schließlich die Strahlung  $S_{RR}$  vom Empfänger detektiert wird und daraus zum optischen Charakterisieren der Probe Messwerte gewonnen und ausgewertet werden, wobei dann besagtes Gewinnen und/oder Auswerten dadurch verbessert wird, dass besagtes oder besagte  
15 Konfigurationsmittel vorgesehen wird/werden).

Nachfolgend wird die vorliegende Erfindung zunächst in allgemeiner Form, dann auch anhand mehrerer einzelner Ausführungsbeispiele im Detail beschrieben. In Bezug auf die Ausführungsbeispiele ist es gemäß der Anspruchsstruktur möglich, einzelne der gezeigten Merkmale auch wegzulassen oder  
25 einzelne der gezeigten Merkmale auch anders mit anderen der gezeigten Merkmale (auch beispielübergreifend) zu kombinieren.

Gegenstand der vorliegenden Erfindung ist ein konfigurierbarer Sensor zur verbesserten optischen Charakterisierung einer Probe in Retroreflexanordnung.  
30

Eine solche verbesserte Charakterisierung kann erfindungsgemäß insbesondere durch ein(e) einzelne(s) oder mehrere (gleichzeitig in einem erfindungsgemäßen System realisierte) Zusatz-Konfiguration(en) bzw. Konfigurationsmittel,  
35 die nachfolgend auch mit den Bezugszeichen K1 bis K6 versehen sind bzw.

über die Bezeichnungen K1 bis K6 abgekürzt werden, erreicht werden:

- 5 • Konfigurationsmittel K1: Eine Bewegung des Reflektors während der Messung durch einen Aktor.
- 10 • Konfigurationsmittel K2: Anordnen (einer) optischen/r Komponente(n) zwischen Probe und Retroreflektor, welche die Polarisation, Richtung oder die Intensität der Strahlung ändert/n. Technisch oft gleichwertig kann alternativ ein Retroreflektor verwendet werden, der die Polarisation, die Intensität, die Richtung und/oder den Versatz der zurückreflektierten Strahlung in definierter (also dem Benutzer bekannter) Art und Weise ändert.
- 15 • Konfigurationsmittel K3: Anordnen (mindestens) eines Modulators oder Umschalters für den Polarisationszustand, die Wellenlänge und/oder die Kohärenz oder die Abstrahlrichtung der Beleuchtung. In einigen Ausführungen der Erfindung ist es dabei vorteilhaft eine Modulation mehrerer der oben genannten Parameter gleichzeitig durchzuführen. Ein Beispiel hierfür ist die Beleuchtung mit linkszirkular polarisierter Strahlung einer ersten Wellenlänge  $\lambda_1$ , die alternierend zu einer rechtszirkular polarisierten Beleuchtung bei einer zweiten Wellenlänge  $\lambda_2$  geschaltet wird. Dabei können die Wellenlängen  $\lambda_1$  oder  $\lambda_2$  im empfindlichen Bereich des Detektors oder außerhalb dieses Bereichs liegen (so dass beispielsweise (polarisierte) Fluoreszenz oder nichtlineare optische Effekte an der Probe auswertbar sind).
- 20 • Konfigurationsmittel K4: Anordnen von einem oder mehreren Element(en) zur Änderung der Polarisation des gesamten Empfängerstrahlengangs bzw. zur spektralen Aufspaltung des Empfängerstrahlengangs, welche(s) dabei aber vorzugsweise die Polarisation und die spektralen Eigenschaften des Senderstrahlengangs unbeeinflusst lässt/lassen.
- 25 • Konfigurationsmittel K5: Erweitern des Empfängers zu einem Detektor bzw. Verwenden eines Empfängers, der den kompletten Stokes- oder Jonesvektor der einfallenden Strahlung – auch ohne Nebenbedingung durch die Kohärenz – bestimmt. Alternativ und technisch gleichwertig,
- 30
- 35

kann ein entsprechender Ersatz eines bereits vorgesehenen oder vorhandenen Detektors erfolgen.

- 5 • Konfigurationsmittel K6: Verwendung einer Datenquelle, z.B. CAD-Modell, oder Anordnen mindestens eines zusätzlichen weiteren Detektors bzw. Sensorsystems für die Berücksichtigung oder Erfassung von weiteren Probeneigenschaften wie z.B. der Geometriedaten der Probe. Aus diesen zusätzlichen Daten können der Einfallswinkel der Strahlung auf die Probenoberfläche und/oder der Neigungswinkel der Probe gegen das Sensor-Koordinatensystem bestimmt werden. Mit Hilfe dieser Informationen können beispielsweise aus den ellipsometrischen Messwerten  $\psi$ ,  $\Delta$  der Brechungsindex  $n$  und der Extinktionskoeffizient  $k$  der Probe bestimmt werden. Alternativ ist es in vielen Fällen auch möglich, die Geometriedaten aus den ellipsometrischen Daten (Messgrößen des Detektors) selbst zu bestimmen. Das Verfahren ist als Ellipsotopography eingeführt. Siehe "Simultaneous measurement of surface geometry and material distribution by focusing ellipsotopometry" eingeführt, siehe [STT4]. In diesem Fall kann erfindungsgemäß eine Auswertestufe vorgesehen werden, um aus den Messwerten u.a. mit Hilfe der Fresnelschen Formeln für die Reflexionskoeffizienten die Geometrie der Probe zu bestimmen.  
10  
15  
20
- 25 • Als weitere(s) Konfigurationsmittel (diese werden erfindungsgemäß auch als Konfigurationsmittel K7 bezeichnet) kann/können (ein) Mittel zur automatischen Kalibrierung der Messwerte vorgesehen sein. Diese(s) Konfigurationsmittel kann/können z.B. (ein) polarisationserhaltende(r) oder depolarisierende(r) Retroreflektor(en) oder ein reflektierendes Objekt bzw. Reflektor mit genau bekannter Reflexionscharakteristik sein. Der/die Retroreflektor(en) kann/können in einem Teil des Sendestrahlangangs eingebracht sein oder in einen Teil des Sendestrahlangangs einschwenkbar sein. Der/die Retroreflektor(en) kann/können im Gehäuse des Transceivers (bzw. einer kombinierten Sende- und Empfangseinheit) positioniert werden oder auch außerhalb dieses Gehäuses, in letzterem Fall bevorzugt unmittelbar neben der Probe (im Falle einer Reflexionsanordnung – im Falle einer Trans-  
30  
35



missionsanordnung kann ein nicht im Schatten der Probe liegender Raumbereich des Retroreflektors verwendet werden).

5 Abhängig von der jeweils zu lösenden Messaufgabe kann ein(e) Konfiguration(smittel) allein oder eine Kombination mehrerer oder aller Konfigurationen bzw. Mittel vorteilhaft sein, um die erfindungsgemäße Aufgabe zufriedenstellend (besser noch: optimal) zu lösen.

### 10 III. Zum Schutzzumfang der Erfindung

Ein erfindungsgemäßes retroreflektorbasiertes Sensorsystem lässt sich Anspruch 1 entnehmen.

15 Dabei ist die Probe nicht Teil des Systems, d. h., das System besteht aus den anderen genannten Komponenten und hat einen Probenbereich, in dem die besagte Probe so positionierbar ist, dass das im Anspruch Beschriebene realisiert wird. Der Begriff „optisch“ und der Begriff der „Strahlung“ beziehen sich in der Regel auf sichtbares Licht, also auf Licht mit (einer) Wellenlänge(n) im Bereich zwischen etwa 350 nm und 780 nm. Erfindungsgemäß ist es aber auch  
20 denkbar, Strahlungsquellen (als Sender) bzw. Strahlungen in anderen Wellenlängenbereichen, insbesondere im UV-Bereich unterhalb von 350 nm oder auch im Infrarotbereich oberhalb von 780 nm, zu nutzen.

25 Es ist sowohl eine Transmissionsanordnung, als auch eine Reflexionsanordnung der Probe möglich (vgl. auch die Ausführungsbeispiele nachfolgend). Die Messwerte können insbesondere Intensitäts(mess)werte und/oder Polarisations(mess)werte der Strahlung sein.

30 Sofern nichts anderes gesagt ist, ist der Sendestrahlangang der Strahlungsweg vom Sender bis zum Auftreffen auf den Retroreflektor. Entsprechend ist der Empfangsstrahlangang der Strahlungsweg vom Retroreflektor (nach der Rückreflexion an diesem) wieder zurück in Richtung auf den Sender hin und bis zum Auftreffen auf den Empfänger. Dabei ist der Fall umfasst, dass eventuell  
35 nur echte Anteile der Strahlung die nächste optisch wirksame Stufe (bzw. das nächste optisch wirksame Mittel wie z. B. die Probe, den Retroreflektor, ein

Konfigurationsmittel oder dergleichen) erreichen. Beispielsweise werden in der Regel nur Teile der auf die Probe einfallenden Strahlung nach ihrer Reflexion an der Probe bzw. ihrer Transmission durch die Probe den Retroreflektor auch wirklich erreichen (so können Strahlungsanteile an/in der Probe beispielsweise durch Absorption, Streuung, ... verlorengehen). Ebenso ist es möglich, dass Teile der an der Probe reflektierten Strahlung den Retroreflektor gar nicht erreichen, da sie neben dem Retroreflektor vorbeigehen bzw. vorbeigestrahlt werden.

5

10

Der Sender kann einen punktförmigen oder ein- oder zweidimensionalen Bereich der Probe (bevorzugt einen Punkt, eine Linie oder eine Fläche dieser Probe) beleuchten. Der Empfänger (Detektor) empfängt also diejenige Strahlung bzw. diejenigen Strahlungsanteile, die vom Retroreflektor zurückreflektiert werden und die – auf dem gesamten Strahlengang, also dem Senderstrahlengang zuzüglich dem Empfängerstrahlengang gesehen – (mindestens) zweifach an der Probe reflektiert werden (oder die die Probe zweifach in Transmission durchstrahlt haben).

15

20

In der Regel sind die optischen Achsen im Beleuchtungsstrahlengang (also dem Senderstrahlengang) und im Empfangsstrahlengang (also vom Retroreflektor wieder zurück hin zum Detektor) zumindest abschnittsweise übereinstimmend bzw. haben zumindest abschnittsweise annähernd dieselbe Ausrichtung. Das an der Probe reflektierte und/oder das durch die Probe transmittierte Licht kann vom Retroreflektor prinzipiell (im Empfangsstrahlengang) auf dem gleichen, also dem identischen optischen Weg zurückreflektiert werden. Dies geschieht beispielsweise bei Verwendung eines Folienreflektors als Retroreflektor. Ebenso ist es aber möglich, dass das vom Retroreflektor zurückgeworfene Licht mit einem Parallelversatz (bezogen auf den Senderstrahlengang) zurückreflektiert wird, also der Empfangsstrahlengang zumindest abschnittsweise beabstandet vom und parallel zum Senderstrahlengang (bzw. Abschnitten desselben) verläuft. Dabei kann im Empfangsstrahlengang (wiederum relativ zum Senderstrahlengang gesehen) auch eine in der Regel geringfügige Aufweitung vorliegen.

25

30

35

Vorteilhafterweise realisierbare Merkmale lassen sich Anspruch 2 entnehmen.

Dabei ist bevorzugt nur genau eines (besonders bevorzugt: der Retroreflektor) der im Anspruch beschriebenen Elemente bewegbar. Das Bewegen des besagten Elements (bzw. der Elemente) wie beispielsweise des Retroreflektors erfolgt vorzugsweise durch einen Aktor. Beispielsweise kann ein Motor, ein Vibration oder dergleichen als Aktor eingesetzt werden. Die Bewegung kann als Rotation, als Vibration oder auch als schnelle Hin- und Herbewegung entlang mindestens einer Achse (oder auch als Kombination solcher Bewegungen) erfolgen.

5

10

Weitere vorteilhafterweise realisierbare Merkmale lassen sich Anspruch 3 entnehmen.

15

Die Anordnung (eines) solchen/r Element(e)s erfolgt in der Regel an definierter/n Position (en) im Senderstrahlengang und/oder im Empfangsstrahlengang. Beispielsweise kann ein solches Element im Senderstrahlengang zwischen Sender und Probe angeordnet werden. Ein (anderes) Element kann stattdessen oder zusätzlich dazu im Senderstrahlengang und im Empfangsstrahlengang zwischen Probe und Retroreflektor angeordnet sein. Stattdessen oder zusätzlich zu dem/den vorangehend genannten Element(en) kann im Empfangsstrahlengang (also den Senderstrahlengang bzw. die Strahlung desselben unbeeinflusst lassend) ein (weiteres) solches Element zwischen der Probe und dem Empfänger angeordnet werden.

20

25

Ein oder mehrere solches/r Element(e) kann/können auch (eine) zusätzliche Lichtquelle (n) sein, die beispielsweise in einem oder in mehreren Teilstrahlengang/-gängen des Senders angeordnet ist/sind oder über einen oder mehrere Strahlteiler in (einen) solche(n) Teilstrahlengang/-gänge eingekoppelt wird/werden.

30

Bei einem solchen optischen Element kann es sich auch um den Retroreflektor selbst handeln. Beispiel hierfür ist ein Retroreflektor, der den Polarisationszustand bzw. die Polarisation der auftreffenden und wieder zurückreflektierten Strahlung definiert (also in für den Benutzer des retroreflektorbasierten Sensorsystems bekannter) Art und Weise ändert. Ein weiteres Beispiel ist ein Retroreflektor, der einen definierten Versatz zwischen der Strahlung des Senderstrahlengangs und der Strahlung im Empfangsstrahlengang bewirkt.

35

Weitere vorteilhafterweise realisierbare Merkmale lassen sich Anspruch 4 entnehmen.

5 Hier (wie auch für alle anderen Ausführungsvarianten des erfindungsgemäßen Sensorsystems) gilt, dass das Sensorsystem, insbesondere dessen Auswerteeinheit, rechnergestützt, also computergestützt oder mikroprozessorgestützt, arbeiten kann.

10 Das Sensorsystem, insbesondere dessen Auswerteeinheit, kann also ein(en) entsprechenden/r Server PC oder Mikrocontroller (mit geeignetem Programm- und Datenspeicher) umfassen oder sein.

15 Zum Auswerten können geeignete Auswerteprogramme im Programmspeicher (fest) hinterlegt sein bzw. in den Programmspeicher geladen werden. Diese Auswerteprogramme sind zum Auswerten der Messwerte bzw. von aus diesen generierten Daten (die im Datenspeicher abgelegt werden können bzw. abgelegt sein können) ausgebildet.

20 Weitere vorteilhafterweise realisierbare Merkmale lassen sich Anspruch 5 entnehmen.

Dabei wird der Informationsspeicher nachfolgend alternativ auch als Datenquelle bezeichnet.

25 Weitere vorteilhafterweise realisierbare Merkmale lassen sich Anspruch 6 entnehmen.

Dergestaltige Mittel können beispielsweise sein:

30 1. Im Falle, dass der Sender und der Empfänger in einem gemeinsamen Gehäuse positioniert sind (insbesondere: falls der Sender und der Empfänger als Laserscanner in/mit einem solchen gemeinsamen Gehäuse ausgebildet sind), ein weiterer Retroreflektor innerhalb dieses gemeinsamen Gehäuses, wobei mit dem weiteren Retroreflektor ein Teil der  
35 vom Sender emittierten Strahlung (insbesondere: ein Teil der Scan-Linie

besagten Laserscannern) unmittelbar (in der Regel also vor dem Verlassen des gemeinsamen Gehäuses) in den Empfänger zurückreflektiert wird (also ohne Probenberührung).

- 5           2. Ein Teil des im Senderstrahlengang hinter der Probe positionierten Retroreflektors, wobei besagter Teil nicht durch die Probe verdeckt wird.
- 10           3. In erfindungsgemäßen Systemen in Reflexionsanordnung (in der Regel also nicht bei Transmissionsanordnungs-Sensorsystemen) ein oder mehrere im Bereich oder neben der Probe so angeordnete(s) Referenzobjekt(e), so dass ein Teil der Strahlung des Senderstrahlengangs auf diese(s) Referenzobjekt(e) fällt, daran reflektiert wird und letztgenannter, reflektierter Teil den Retroreflektor trifft.

15           Mit diesem/n Mittel(n) können insbesondere Intensitäten oder Polarisationswerte als Messwerte normiert werden.

Weitere vorteilhafterweise realisierbare Merkmale lassen sich Anspruch 7 entnehmen.

20

Dabei können abgetastete Konfigurationsmittel insbesondere die bereits erwähnten Referenzobjekte sein.

25

Weitere vorteilhafterweise realisierbare Merkmale lassen sich Anspruch 8 entnehmen.

30

Der Strahlversatz kann dabei insbesondere so realisiert werden, dass sich die Strahlung entlang des Senderstrahlengangs und des Empfangsstrahlengangs zumindest abschnittsweise parallel ausbreitet. Sofern besagter Strahlversatz und/oder eine eventuell vorhandene, auf die Länge vom Senderstrahlengang und Empfangsstrahlengang (zusammengenommen) endliche Strahlaufweitung es erlaubt, kann der Empfänger neben dem oder (in der Regel geringfügig) beabstandet vom Sender angeordnet sein.

35

Weitere vorteilhafterweise realisierbare Merkmale lassen sich Anspruch 9 entnehmen.

Gemäß der ersten Variante dieses Anspruchs ist es auch (beispielsweise durch eine geeignete Anordnung von zusätzlichen Strahlteilern) möglich, die Strahlung mehr als zweimal, beispielsweise viermal oder gar sechsmal, an der Probe zu reflektieren, bevor sie als Strahlung  $S_{RR}$  detektiert wird.

5

Gemäß der zweiten Variante dieses Anspruchs ist es auch (beispielsweise bei geeigneter Anordnung von zusätzlichen Strahlteilern, die beispielsweise jeweils leicht gekippt zueinander angeordnet werden) möglich, die Strahlung mehr als zweimal, beispielsweise viermal oder sechsmal, durch die Probe zu transmittieren, bevor sie als Strahlung  $S_{RR}$  detektiert wird.

10

In beiden Varianten ist es dabei in der Regel so, dass jeweils nur ein Anteil der reflektierten bzw. transmittierten Strahlung pro Reflexions- oder Transmissionsvorgang reflektiert bzw. transmittiert wird. Mit anderen Worten treten in der Regel pro Vorgang (geringfügige) Verluste an Strahlanteilen durch ungerichtete Streuung, Absorption, .... auf.

15

Weitere vorteilhafterweise realisierbare Merkmale sind in Anspruch 10 beschrieben.

20

Das Gehäuse kann eine gemeinsame Strahleintritts- und Strahlaustrittsöffnung aufweisen. Diese ist in der Regel geeignet ausgebildet, um sowohl den Austritt der vom Sender ausgesandten Strahlung als auch den Empfang der vom Retroreflektor über die Probe wieder rückreflektierten Strahlung durch den Empfänger zu ermöglichen.

25

Weitere vorteilhafterweise realisierbare Merkmale lassen sich Anspruch 11 entnehmen.

30

Das Scansystem kann insbesondere ein Laserscan(ner)system bzw. ein Laserscanner sein. Das Scannen kann dabei vermittels eines oder mehrerer beweglicher/n Spiegel(s) erfolgen. Beispielsweise lassen sich ein- oder zweidimensionale Galvanometerscanner als Spiegelsysteme zum Scannen einsetzen.

35

Die Figuren – wie auch die Beschreibung – zeigen bzw. beschreiben die wesentlichen Merkmale der Erfindung. Der Klarheit halber sind unwesentliche,

für den Fachmann selbstverständliche, d.h. die prinzipielle Funktion nicht berührende (rein abbildende oder einen oder mehrere Teilstrahlengang bzw. Teilstrahlengänge umlenkende) optische Elemente weder eingezeichnet noch in der Beschreibung erwähnt.

5

Die in den nachfolgenden Ausführungsbeispielen gezeichneten Strahlengänge funktionieren bereits in Realisierungen ohne spezielle abbildende oder strahlformende Elemente (wie z.B. Linsen, Blenden, Filter oder dergleichen) – beispielsweise bei Verwendung eines kollimierten Lasers (als Strahlenquelle) und eines relativ großen Detektors (Empfängers). Es ist offensichtlich, dass schon mit der Verwendung einer einfachen Linse die Größe des vermessenen Oberflächen- oder Volumenelements der Proben sowie die Effizienz des Strahlengangs positiv beeinflusst werden können. Ebenso offensichtlich ist der Vorteil zusätzlicher Blenden und Filter in den Strahlengängen. Dem Fachmann ist daher klar, dass das erfindungsgemäße Prinzip auch in einer Form realisierbar ist, in der die in den nachfolgenden Ausführungsbeispielen gezeigten Strahlengänge lediglich Teilstrahlengänge komplexerer optischer Anordnungen bzw. optischer Systeme (z.B. zusätzliche strahlformende Elemente umfassender und/oder linienförmig oder flächig abtastender oder abbildender Systeme – z.B. eindimensionaler oder zweidimensionaler Laserscanner) sind.

10

15

20

Beispiel (mit Bezug auf das nachfolgend beschriebene Ausführungsbeispiel aus Figur 3): Die Ablenkeinheit kann mehrere Elemente (drehbare(r) bzw. rotierbare(r) Spiegel, abbildende(r) Spiegel, eine oder mehrere Linse(n), ein oder mehrere holografische Elemente etc.) aufweisen, um z.B. eine eindimensionale oder zweidimensionale Abtastung (Laserscan, bevorzugt im Zeitmultiplex) oder Abbildung der Probenoberfläche zu erlauben. Genauso klar ist dem Fachmann, dass zusätzliche Linsen und Blenden im Strahlengang die Effizienz der Strahlengänge und die Größe der abgetasteten Oberflächenelemente der Probe beeinflussen können. Man würde dennoch für jeden Lichtstrahl die gleiche Wirkung der Konfigurationen erhalten, somit ist der erfindungsgemäße Grundgedanke wiedererkennbar. Auch das Einbringen von Filtern ist möglich, z.B. zur Fremdlichtkompensation.

25

30

35

Kurz gesagt: Es können erfindungsgemäß nahezu beliebige Strahlengänge verwirklicht werden, nahezu beliebige strahlformende Elemente zusätzlich in

den Strahlengang eingebracht werden und/oder nahezu beliebige Retroreflektor-Konfigurationen und –formen verwendet werden.

#### IV. Ausführungsbeispiele, mögliche Ausführungsformen und Vorteile der Erfindung

5

##### IV.1. Grundsätzliches zu den erfindungsgemäß möglichen Systemaufbauten

10

Nachfolgend werden anhand der Figuren 2 bis 10 verschiedene Konfigurationsbeispiele, also Ausführungsbeispiele für Sensorsysteme gemäß der Erfindung, beschrieben.

15

So zeigt Fig. 2 einen möglichen prinzipiellen Aufbau der Erfindung, bei dem ein Konfigurationsmittel, mehrere Konfigurationsmittel oder auch alle Konfigurationsmittel K1 bis K6 wie nachfolgend beschrieben z. B. im Strahlengang positioniert und/oder auch als Teil einzelner Elemente des Systems integriert werden können.

20

Das/die Sensorsystem(e) gemäß Fig. 2 weist/weisen einen strahlungsemittierenden Sender 1 (hier: Laser emittierend mit der Wellenlänge  $\lambda$ ) auf. Der Sender 1 wird nachfolgend auch als Beleuchtung bezeichnet. An ihm oder in ihm integriert kann ein drittes Konfigurationsmittel K3 ausgebildet sein, d. h., gemäß Fig. 2 kann eine Konfiguration K3 (alleine oder zusammen mit einer, mehreren oder allen der anderen Konfigurationen K1 bis K2 sowie K4 bis K6) realisiert werden.

25

30

Der Laser 1 emittiert Licht in den Senderstrahlengang 1-S, das auf einen Strahlteiler 5 fällt und durch diesen hindurch transmittiert wird. Die Transmissionseigenschaften des Strahlteilers (Transmissionsgrad, Veränderung der Polarisation etc.) können an die Messaufgabe angepasst sein. Zur genauen Auswertung der Messsignale müssen sie lediglich bekannt sein oder durch eine Messung ermittelt werden.

35

Im Sendestrahlgang 1-S fällt die Strahlung dann auf die Probe P und wird an dieser gemäß des Reflexionsgesetzes (Einfallswinkel = Ausfallswinkel) spie-



gelnd reflektiert.

Diese reflektierte Strahlung fällt im Strahlengang 1-S auf ein zweites Konfigurationsmittel K2 (falls dieses, wie in Fig. 2 gezeigt, tatsächlich realisiert bzw.  
5 vor dem Retroreflektor 2 positioniert ist – Konfiguration K2) und anschließend auf einen Retroreflektor 2 bzw. unmittelbar auf den Reflektor 2. Das durch das Konfigurationsmittel K2 hindurchtretende Licht bzw. die auf den Retroreflektor 2 einfallende Strahlung  $S_e$  wird am Retroreflektor 2 in sich zurückreflektiert, also in den Empfangsstrahlengang 1-E zurückreflektiert, wobei letzterer 1-E bis hin zum Auftreffen auf den Strahlteiler 5 identisch zum Senderstrahlengang 1-S verläuft. Mit anderen Worten läuft die vom Reflektor 2 zurückreflektierte Strahlung in entgegengesetzter Richtung den Senderstrahlengang 1-S entlang, trifft zum zweiten Mal auf die Probe P, wird an dieser zum zweiten Mal gemäß des Reflexionsgesetzes spiegelnd reflektiert und trifft somit nach Eintritt in das gemeinsame Gehäuse 4 des Senders 1 und des Empfängers 3 erneut auf den Strahlteiler 5.

Der Strahlteiler 5 reflektiert gemäß seinen optischen Eigenschaften einen Teil der ankommende Empfangsstrahlung 1-E in Richtung zum Empfänger 3 hin.  
20 Die Reflexions- und Transmissionseigenschaften des Strahlteilers (Transmissionsgrad, Reflexionsgrad, Änderung der Polarisations-eigenschaften in Transmission und Reflexion etc.) können an die Messaufgabe angepasst sein. Zur genauen Auswertung der Messsignale müssen sie lediglich bekannt sein oder durch eine Messung ermittelt werden.

Strahlteiler 5, Sender 1 und Empfänger 3 sind hier im Gehäuse 4 um  $90^\circ$  zueinander gedreht angeordnet. Die am Teiler 5 reflektierte Empfangsstrahlung 1-E trifft auf das vierte Konfigurationsmittel K4, sofern dieses wie in Fig. 2 gezeigt implementiert ist, und die vom Mittel K4 modifizierte Empfangsstrahlung trifft als vom Empfänger 3 zu detektierende Strahlung  $S_{RR}$  auf den Empfänger 3.

Wie Fig. 2 zeigt, können zusätzlich oder alternativ noch folgende Konfigurationsmittel vorgesehen sein bzw. Konfigurationen realisiert werden:

- Konfigurationsmittel K1 (erstes Konfigurationsmittel) in/am Retroreflek-

tor bzw. als Retroreflektor (siehe insbesondere nachfolgende Beschreibung).

- Konfigurationsmittel K5 im/am Empfänger 3 (siehe insbesondere nachfolgende Beschreibung).
- Konfigurationsmittel K6, das hier das Auftreffen der Strahlung  $S_e$  auf dem Reflektor 2 und/oder der Strahlung 1-S auf dem Konfigurationsmittel K2 mittels einer Kamera abbildet (siehe insbesondere nachfolgende Beschreibung).

Der innere Aufbau des Empfängers 3 hängt von der zu lösenden Messaufgabe ab. Im einfachsten Fall eines Punktsensors zur Detektion von dekorativen Defekten kann es sich um eine Fotodiode oder einen Photomultiplier handeln. Er kann aber auch der Abb. 20.6 aus STT3 folgen (siehe in dieser Figur den Strahlverlauf rechts desjenigen nicht-polarisationsändernden Strahlteilers, auf den die gestrichelte, mit „Eingangsstrahl“ bezeichnete Strahlung fällt).

Die genauen optischen Eigenschaften (Transmission, Reflexion, Polarisations-eigenschaften, etc.) der optischen Elemente in Fig. 2 können in weiten Grenzen für die zu lösende Messaufgabe optimiert werden. In der Regel müssen sie für eine zufriedenstellende Lösung der Aufgabe lediglich hinreichend genau bekannt sein, so dass sie in der Auswertung der Signale entsprechend berücksichtigt werden können.

Fig. 2 zeigt also beispielhaft die erfindungsgemäßen Konfigurationen K1 bis K6 zur optimalen Anpassung eines Retroreflex-Sensorsystems an eine Messaufgabe bzw. zur erweiterten Charakterisierung von Proben am Beispiel eines Punktmesssystems. Dabei können die folgenden erfindungsgemäßen Zusatzkonfigurationen eingesetzt werden:

- K1: Aktor zur Bewegung des Retroreflektors.
- K2: Zusätzliches optisches Element, das die Polarisation, Richtung oder die Intensität der Strahlung ändert.
- K3: Modulator oder Umschalter für den Polarisationszustand, die Wellenlänge, die Kohärenz oder die Abstrahlrichtung der Beleuchtung.
- K4: Ein oder mehrere optische Elemente zur Änderung der Polarisation

und/oder zur spektralen Aufspaltung des Empfangsstrahlengangs  
und/oder zur Auswahl der Wellenlänge des Detektors (z.B. AOTF).

- 5 • K5: Erweiterter Detektor, der den Jonesvektor oder den kompletten Stokesvektor der einfallenden Strahlung – auch ohne Nebenbedingung durch die Kohärenz bzw. vollständige Polarisation – bestimmt und ggf. diffraktive Elemente zur spektralen Aufspaltung sowie Punkt, Linien oder Flächensensoren beinhaltet.
- 10 • K6: Zusätzlicher Sensor zur Bestimmung der Objektgeometrie bzw. des Einfallswinkels der Strahlung zur Objektoberfläche und/oder des Drehwinkels der Probenoberfläche zur Detektor-Vorzugsrichtung und/oder der Höhe der untersuchten Probenoberfläche.

15 Fig. 3 zeigt ein alternatives erfindungsgemäßes System, das grundsätzlich wie in Fig. 2 gezeigt aufgebaut ist, so dass nachfolgend nur die Unterschiede beschrieben werden. Gezeigt ist ein Transceiver (also Sender 1 und Empfänger 2 im selben Gehäuse 4), der mit einer Ablenkeinheit (hier z.B. umfassend einen beweglichen, hier: rotierbaren, Spiegel 6) ausgestattet ist und das Objekt P linien- bzw. zeilenweise abtastet.

20 In Fig. 3 ist als Konfigurationsmittel 6 eine Kamera vorgesehen und gezeichnet, welche die Auftreffpunkte der beleuchtenden Strahlung auf der Probe abbildet. Mit Hilfe der bekannten Strahlrichtung des Transceivers kann aus der Abbildung der Auftreffpunkte die Höhe der betrachteten Objektpunkte bestimmt werden. In Kombination mit einer Bestimmung der Auftreffpunkte  
25 des Strahlengangs auf dem Retroreflektor (beispielsweise mittels einer Kamera, die wie K6 in Fig. 2 angeordnet ist) oder einer ellipsometrischen Bestimmung der Strahlwinkel im Sensor selbst, kann zusätzlich eine Vermessung der Oberflächengeometrie der Probe erfolgen.

30 In den Figuren 2 und 3 (dies gilt auch für die anderen Figuren) nicht gezeichnet sind ggf. vorhandene Optiken zur Abbildung oder zur Formung des Strahlverlaufs (z.B. Linsen oder Spiegel zur Erzeugung einer speziellen Abtastung oder Abbildung).

35 Dabei können der Sender bzw. Laser 1 die folgenden Eigenschaften haben: Grundsätzlich können Retroreflex-Sensorsysteme im gesamten Bereich der

elektromagnetischen Strahlung realisiert werden. Bedingung ist lediglich, dass es im jeweiligen Bereich geeignete Retroreflektoren, Detektoren und „optische“ Elemente mit geeigneten Eigenschaften gibt (Strahlteilung, Polarisation, Refraktion bzw. Spiegelung). Naheliegende Ausführungsformen arbeiten im sichtbaren bzw. daran angrenzenden Spektralbereich. In bevorzugten Ausführungsformen kann beispielsweise eine Weißlichtquelle, ein oder mehrere Laser oder eine breitbandige IR- oder UV-Lichtquelle im Sender enthalten sein oder über eine Lichtleitfaser in den Sender eingekoppelt werden. Der Empfänger kann eine oder mehrere Fotodiode(n), einen oder mehrere Zeilensensoren, Photomultiplier, ... enthalten.

Geeignete Proben transmittieren oder reflektieren (spiegelnd, d.h. gemäß dem Reflexionsgesetz) einen ausreichenden Anteil der auftreffenden Strahlung. Sehr gut geeignete Proben sind beispielsweise optische (auch beschichtete) Elemente, Metalle, vorzugsweise dünn beschichtete Materialien, Solarzellen, Nanoimprints.

Zur Verdeutlichung der vorteilhaften Wirkungen der einzelnen Konfigurationen bzw. Konfigurationsmittel K dieser Konfigurationen sind sie im Folgenden exemplarisch an Anwendungsfällen erläutert.

#### IV.2. Die einzelnen, unabhängig voneinander oder miteinander realisierbaren Konfigurationen sowie Anwendungsfälle dafür

##### IV.2.1. Konfiguration K1

Erfindungsgemäß können Mittel K1 vorgesehen sein, um den Retroreflektor 2 während der Messung zu bewegen. Dies kann mittels einer Drehbewegung oder einer Vibration des Reflektors erfolgen. Die Bewegung kann durch einen Aktor als Mittel K1 hervorgerufen werden. Bei dem Aktor kann es sich beispielsweise um einen frei laufenden oder optimal zur Lösung der Messaufgabe angesteuerten Motor oder Vibrator handeln.

Die Bewegung kann beispielsweise kreisförmig oder vibrierend durchgeführt werden, um das Rauschen der Messsignale durch eine Mikrostruktur des Re-

flektors 2 zu minimieren. Fig. 4 zeigt eine erste vorteilhafte Wirkung dieser Konfiguration. Die in Fig. 4 gezeigten Messkurven wurden in einem Aufbau gemäß Fig. 3 aufgenommen. Als Mittel zur Ablenkung (6 in Fig. 3) war ein Polygonspiegel eingesetzt, so dass die Probe über die Zeit zeilenweise abgetastet wurde. Mit 3 einem Detektor (hier z. B. umfassend drei Einzeldetektoren) wurde der Intensitätsverlauf für drei Polarisationsrichtungen ( $90^\circ, 0^\circ, 45^\circ$ ) über die Zeit aufgenommen und mit dem Beginn der Abtastung der Probe so synchronisiert, dass die Messdaten als Bildsignale (Pixel = x-Achse der Fig.4) auswertbar sind. Fig. 4a zeigt die Signale einzelner Bildzeilen, die ohne Bewegung des Reflektors aufgenommen wurden. Demgegenüber zeigt Fig.4b. das Ergebnis einer Auswertung, bei der einzelne Bildzeilen mit bewegtem Reflektor aufgenommen und in einer Vorverarbeitungsstufe passend so gemittelt wurden, dass Fig. 4b den Verlauf der Mittelwerte der Intensitäten über die Bildzeile darstellt.

Wie Fig. 4 zeigt kann ein für den Zweck der Konfiguration K1 optimiertes Aufnahmeverfahren eine Mittelung der Messsignale enthalten, die sowohl an die Messaufgabe, als auch an die Bewegung des Reflektors angepasst ist.

Fig. 4 zeigt also die Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses durch Konfiguration K1 anhand des Signalvergleichs ohne Konfiguration K1, d.h. mit statischem Reflektor (links) gegenüber einem gemäß K1 bewegten Reflektor 2 mit dazu abgestimmter Mittelung der Signale (rechts, b).

In Ausführungsformen der Erfindung, in denen gemäß Konfiguration K2 (s. nachfolgend) ein diese Konfiguration K2 realisierender Reflektor 2 (der z.B. die Polarisation der einfallenden Strahlung in bekannter Abhängigkeit vom Auftreffort oder Einfallswinkel ändert) bzw. ein Reflektor 2 samt einem diese Konfiguration K2 realisierenden, reflektor-externen Element verwendet wird, kann die Bewegung auch gezielt so gesteuert werden, dass dadurch eine Modulation der detektierten Strahlung mit einem Signal erfolgt, aus dem in einer Auswerteeinheit des Systems (nicht gezeigt) der Einstrahlwinkel des Messsignals auf die Reflektoroberfläche oder die Geometrie des Prüflings P berechenbar ist. Dies kann beispielsweise mit einem Aktor, der eine Sollgröße bekommt, die den Reflektor beispielsweise in eine davon abhängige Position oder Winkellage bringt, realisiert werden.

#### IV.2.2. Konfiguration K2

5 Erfindungsgemäß können optisch wirksame Mittel K2 zwischen Probe und Reflektor gebracht werden. Beispiele hierfür sind Verzögerungselemente, optische Rotatoren, Abschwächer. Diese können auch veränderbar sein (beispielsweise gezielt ansteuerbar oder dreh- oder kippbar), so dass sich ihre optische Wirkung verändern lässt und in den ermittelten Messsignalen zu einer Modulation mit einem gewünschten bzw. auswertbaren Signalanteil führt.

10

In einigen Ausführungsformen der Erfindung kann es sich bei K2 auch um eine Beschichtung des Retroreflektors 2 selbst handeln, beispielsweise eine Schicht, die als Viertelwellen-Verzögerer wirkt.

15

In weiteren Ausführungsformen der Erfindung kann es sich um einen gezielten Aufbau eines Retroreflektors 2 selbst durch entsprechend ausgerichtete Mikrostrukturen handeln.

20

Neben Retroreflektoren (nachfolgend z.T. abgekürzt auch als „Reflektoren“ bezeichnet) bestehend aus Mikrokugeln können in weiteren Ausführungsformen Reflektoren bestehend aus Mikroprismen verwendet werden. Diese Mikroprismen bestehen meist aus drei verspiegelten Ebenen, die untereinander jeweils einen 90°-Winkel bilden. Die verspiegelten Ebenen können entweder dreieckig oder quadratisch sein. Neben der geringeren Strahldivergenz bzw. höheren Intensität haben diese Reflektoren polarisationsverändernde Eigenschaften – im Gegensatz zu Reflektoren mit Mikrokugeln. Bei geeigneter Wahl der Mikrostruktur bewirkt die Mehrfachreflexion an den Mikrospiegeln eine Polarisationsänderung des auftreffenden Lichts, die sowohl vom Einfallswinkel als auch vom Drehwinkel des Retroreflektors bzw. der Mikroelemente abhängig ist und mit einem mathematischen Modell bestimmt werden kann. Werden bei unterschiedlichen Drehwinkeln des Retroreflektors mehrere Aufnahmen gemacht, dann ist es möglich sowohl die Drehung der Probe bzgl. des Kamerakoordinatensystems als auch den Einfallswinkel direkt zu berechnen. Dies ist unabhängig von der untersuchten Probe, solange die Schichtstruktur aus isotropen Materialien besteht. Nach der Berechnung des Einfalls- und Drehwinkels für jeden Bildpunkt können die weiteren Modellparameter wie

25

30

35

Brechungsindex und Schichtdicke mit herkömmlichen Verfahren der Ellipsometrie berechnet werden, da die Oberflächennormale bekannt ist.

#### IV.2.2.1. Erstes Beispiel für die Konfiguration K2

5

Ein Beispiel für die Konfiguration K2 ist die Unterdrückung von Polarisierungseffekten bei der Reflexion der Strahlen an der Probe P.

10

Die gemeinsame Wirkung von Konfiguration K2 kann mit dem Müllerformalismus beschrieben werden. In dieser Betrachtung wird die gemeinsame Wirkung von einem separaten, reflektorexternen Konfigurationsmittel K2 einerseits und dem Retroreflektor 2 andererseits durch eine resultierende Müllermatrix  $M_{\text{res}}$  beschrieben als  $M_{\text{res}} = M_{\text{Rück}} M_{\text{Reflektor}} M_{\text{Hin}}$ . Dabei ist  $M_{\text{Hin}}$  ist die Müllermatrix für den optischen Weg der Strahlung 1-S von der Probe P durch das Element K2,  $M_{\text{Reflektor}}$  ist die Müllermatrix des Reflektors 2 und  $M_{\text{Rück}}$  ist die Müllermatrix für den Rückweg der Strahlung 1-E durch das optische Element K2 zur Probe P zurück.

15

20

Für die Unterdrückung von Polarisierungseffekten bei der Reflexion der Strahlung an der Probe P wird das optische Element K2 so auf die Eigenschaften des Retroreflektors 2 abgestimmt, dass  $M_{\text{res}}$  möglichst nahe an die für diesen Anwendungsfall optimale Müllermatrix

25

$$M_{\text{res,optimal}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

herankommt.

30

In diesem Optimalfall werden Polarisierungseffekte bei der Reflexion an der Probe eliminiert oder zumindest minimiert. Damit ist diese Konfiguration beispielsweise ideal für die Erkennung dekorativer Defekte auf beschichteten oder lackierten Oberflächen geeignet. Dort sind die durch diese Defekte ver-

ursachten Einbrüche der Reflektanz ansonsten ggf. von Polarisierungseffekten überlagert und können nicht zuverlässig von diesen unterschieden werden.

5 Als optisch wirksames Mittel für diesen Anwendungsfall kann es sich bei K2 um einen Depolarisator oder um eine Depolarisationsbeschichtung des eigentlichen Reflektors handeln.

10 Auch für Anwendungen, bei denen Strukturkanten des Prüflings P oder Grenzflächenverläufe im Prüfling ermittelt werden sollen, erhält man in dieser Konfiguration den Vorteil, dass Polarisierungssignale, die ansonsten das Messsignal überlagern und verfälschen, eliminiert werden.

#### IV.2.2.2. Weitere Beispiele für die Konfiguration K2

15 Ein weiteres Beispiel einer Anwendung dieser Konfiguration ist in Fig. 5 dargestellt. Fig. 5 zeigt alternative erfindungsgemäße Systeme, die grundsätzlich wie in Fig. 2 gezeigt aufgebaut sind, so dass nachfolgend nur die Unterschiede beschrieben werden. Erster Unterschied ist, dass es sich bei den in Fig. 5a und 5b gezeigten Beispielsystemen um Transmissionssysteme handelt.

20 Zudem sendet der Sender 1 in diesem Fall zirkular polarisiertes Licht aus. Der Empfänger 3 detektiert das entgegengesetzt zirkular polarisierte Licht. Bei dem erfindungsgemäßen Mittel K2 handelt es sich hier um ein Element in Form einer (beliebig zur optischen Achse gedrehte) Halbwellenlängenplatte oder Halbwellenlängenfolie. Die gemeinsame Detektionseinheit im Gehäuse 4 kann entweder aufgebaut sein, wie in Fig. 5b gezeigt (mit Strahlteiler 5 und getrennter Realisierung der Polarisation von Beleuchtung 1 und Detektor 3) oder wie in Fig. 5a gezeigt. Dort wird ein polarisierender Strahlteiler eingesetzt. Die von den Lichtquellen kommende Strahlung ist dann linear polarisiert und nach Durchgang durch das Viertelwellenlängen ( $\lambda/4$ )-  
30 Verzögerungselement 7 ist die Strahlung zirkular polarisiert. Der Empfängerstrahlengang gelangt durch das gleiche Element 7 auf den polarisierenden Strahlteiler 5, so dass Element 7 insgesamt (über den gesamten Strahlengang) zu einer Verzögerung von einer halben Wellenlänge führt ( $\lambda/2$ ).

35 In beiden Aufbauvarianten detektiert der Sensor 3 ein Signal, das proportional



zu  $\cos^2(\Delta)$  ist, mit der gesuchten Verzögerung  $\Delta$  in der Probe.

5 In weiteren Ausführungsformen der Erfindung ist das Mittel bzw. Element K2 modulierbar oder verstellbar ausgeführt und erlaubt zusätzliche oder bessere Messungen zur Charakterisierung der Probe. In anderen Ausführungsformen der Erfindung ist K2 als optisches Element fest mit einem drehbaren Reflektor 2 gemäß Konfiguration K1 verbunden, beispielsweise als Beschichtung des Reflektors 2 oder als mit diesem rotierendes, separates optisches Element.

10 Als Beispiel für eine Anwendung mit einem rotierenden optischen Element K2 wird (ohne Beschränkung auf diese Ausführungsform) die Retroreflex-Transmissionsanordnung gem. Fig. 5b betrachtet. Sie besteht (oder enthält die nachfolgenden Elemente) aus dem Sender 1, der zirkular polarisiertes Licht emittiert, dem Empfänger 3, der einkanalig die Intensität der auf ihn  
15 auftreffenden zirkular polarisierten Strahlung detektiert und einer erfindungsgemäß mit dem polarisationserhaltenden Retroreflektor 2 rotierenden Viertelwellenlängenplatte oder -folie K2. Wenn ein Retroreflektor 2 ohne Strahlversatz eingesetzt wird, detektiert der Empfänger 3 selbst bei Objekten P mit starken Brechkräften ein Intensitätssignal I, das die folgende Charakteristik  
20 aufweist:

$$I = 0.5 \cos^2[2(\alpha - \theta)] \sin^2[\Delta]$$

mit dem Winkel  $\alpha$  der Richtung der (ggf. spannungsinduzierten) Verzögerung in der Probe, dem Drehwinkel  $\theta$  der Viertelwellenlängenplatte oder -folie und  
25 der Verzögerung bzw. spannungsinduzierten Phasenverschiebung  $\Delta$  auf den Strahlengängen durch die Probe P.

Für dieses Ausführungsbeispiel kann die Verzögerungsplatte K2 allein oder gemeinsam mit dem Reflektor 2 rotieren. In anderen Ausführungsformen der  
30 Erfindung wird ein modulierbares Verzögerungselement als K2 eingesetzt. Der Winkel  $\theta$  wird in diesen Fällen durch Modulation verändert.

Fig. 5 zeigt also Beispiele für Systeme bzw. Sensoren mit optischen Elementen bzw. Konfigurationsmitteln K2 zwischen Probe P und Reflektor 2. In Figur 5a  
35 ist das optische Element K2 allein angebracht, in Figur 5b ist das Element K2 mit dem Reflektor 2 fest verbunden und wird (mittels K1) zusammen mit dem

Reflektor bewegt.

In den genannten Beispielen wird ein polarisationserhaltender Retroreflektor verwendet. Die zirkulare Polarisation des Senderstrahlengangs wird entweder durch Verwendung einer zirkular polarisierten Strahlungsquelle 1 und eines nicht polarisierenden Strahlteilers 5 erreicht (s. Fig. 5b) oder durch Verwendung eines polarisierenden Strahlteilers (5 in Fig. 5a) gemeinsam mit einem Verzögerungselement (7 in Fig. 5a).

#### 10 IV.2.3. Konfiguration K3

Durch eine Modulation des Polarisationszustands der Beleuchtung 1 mit mindestens zwei unterschiedlichen Zuständen durch ein Modulationsmittel bzw. -element K3 im Senderstrahlengang 1-S wird es möglich, zusätzlich den Neigungswinkel der Probenoberfläche gegen die optische Achse zu bestimmen. Bei erfindungsgemäßen Systemen bzw. Sensoren mit Abtastung der Probenoberfläche (z.B. Laserscanner) kann damit die Bestimmung des Neigungswinkels für jeden Bildpunkt bzw. jedes Pixel getrennt erfolgen. Ein Beispiel für eine derartige Modulation ist die Modulation der Beleuchtung 1 so, dass abwechselnd links- und rechtszirkular polarisierte Strahlung abgegeben wird. Dazu wird ein elektronisch einstellbares Verzögerungselement K3 im Senderstrahlengang 1-S angebracht, z.B. unmittelbar strahlausgangsseitig des Senders 1 (vgl. Fig. 6a).

Alternativ dazu (vgl. Fig. 6b) kann eine weitere Lichtquelle 8 mit derselben Emissionswellenlänge  $\lambda$  wie der Sender 1 (oder mit einer vom  $\lambda$  des Senders 1 in der Regel lediglich geringfügig abweichenden Emissionswellenlänge) in dem zweiten Lichtweg 1-S2 eines eingebrachten polarisierenden Strahlteilers 9 angeordnet werden. (Die Strahlung der Quelle 8 bzw. des Lichtwegs wird über den Strahlteiler 9 in den Lichtweg 1-S1 des Senders 1 eingekoppelt zur Gesamtstrahlung 1-S strahlungsausgangsseitig des Teilers 9.) Im Senderstrahlengang 1-S hinter dem Teiler 9, also zwischen dem polarisierenden Strahlteiler 9 und dem Objekt P (hier nicht sichtbar) kann zusätzlich ein Viertelwellenlängen- bzw.  $\lambda/4$ -Verzögerungselement 10 angeordnet sein.

Die Modulation entsteht bei Fig. 6b, indem die Lichtquellen 1 und 8 abwech-

selnd eingeschaltet werden. Beispielsweise kann im Rahmen der vorliegenden Erfindung als Transceiver bzw. als kombinierte Sende- und Empfangseinheit (d.h. als Sender 1 samt Empfänger 3 im gemeinsamen Gehäuse 4) ein Laser-scanner gemäß der STT1 eingesetzt werden( z.B. gemäß des dort in den Figu-  
 5 ren 2, 3 oder 7 gezeigten Aufbaus. Kann der Empfänger 1 des Transceivers 1, 2, 4 zumindest die Komponenten U und V der einfallenden Strahlung bestimmen, die einen Stokesvektors {S,U,V,W} aufweist, so kann aus diesen Mess-  
 10 werten der linearen Polarisationskomponenten des Stokesvektors den Winkel  $\phi$  jedes Mess- bzw. Bildpunktes der Probe P gegen die Vorzugsrichtung des Detektors berechnet werden. Bei der Vermessung isotroper Proben ist der Winkel  $\phi$  die Drehlage der Oberflächennormale der Probe gegen die Vorzugs-  
 richtung des Detektors (Richtungen der U-Polarisationen). Die Werte U[W+] und V[W+] des Detektors werden bei positiver zirkular polarisierter Beleuch-  
 15 tung bestimmt. Die Werte U[W-] und V[W-] werden bei der entgegengesetzt zirkular polarisierten Beleuchtung bestimmt. In diesen Bezeichnungen ist die Bestimmungsgleichung für den Winkel  $\phi$  gegeben durch:

$$\tan(2\phi) = \frac{V[W+] + V[W-]}{U[W+] + U[W-]}.$$

20 Damit können ellipsometrische Messungen mit der Anordnung korrigiert und eine Drehlage des Objekts bzw. jedes Objektpunktes zum Sensorkoordinaten-system kann bestimmt werden.

25 Sofern der Beleuchtungsstrahlengang 1-S in der Wellenlänge  $\lambda$  moduliert wird, kann das System die optischen Eigenschaften an mehreren spektralen Mess-punkten aufnehmen und so – in nach dem Stand der Technik für Einzelpunkt-Messgeräte an und für sich bekannter Weise – mehrere Stützstellen bei der modellgestützten Vermessung von Proben P gewinnen. Bei ein- oder zweidi-  
 30 mensional arbeitenden (bildgebenden) Sensoren bzw. Systemen kann eben-falls eine Wellenlängenmodulation durchgeführt werden. Die Modulation er-folgt in diesem Fall synchron zu der Gewinnung von Teilbildern – beispielswei-se zeilenweise, bildweise oder in einem festen Pixelraster.

35 Die Wellenlängenmodulation lässt sich mit der erfindungsgemäßen Modulati-on des Polarisationszustands der Beleuchtung 1 kombinieren. In einer vorteil-

haften Ausführung dieser Kombination emittieren die beiden Lichtquellen 1 und 8 Fig. 6b (jeweils als Laser) unterschiedliche Wellenlängen, mit einem spektralen Abstand, der jeweils klein im Verhältnis zu jeder der beiden Wellenlängen der Laser ist.

5

Fig. 6 zeigt also zwei Ausführungsbeispiele einer zirkular polarisierten Beleuchtungsmodulation (gemäß K3) durch einen polarisierten Sender 1 und ein modulierbares bzw. drehbares Verzögerungselement K3 (Fig. 6a) oder äquivalent dazu durch ein Mittel K3 umfassend eine zusätzliche Strahlquelle 8, einen polarisierenden Strahlteilerwürfel 9 und ein festes Verzögerungselement 10 (Fig. 6b). In der in Fig. 6b gezeigten Ausführung erfolgt die Modulation durch Um- bzw. Ein- und Ausschalten der beiden Lichtquellen 1 und 8.

10

#### IV.2.4. Konfiguration K4

15

Durch die Messung in Retroreflexion gehen die optischen Eigenschaften des Messobjekts P quadratisch in die Messsignale ein (multiplikativ auf dem Hinweg 1-S über/durch die Probe P zum Reflektor 2 und auf dem Rückweg 1-E vom Reflektor 2 über/durch die Probe P). Während die ellipsometrischen Kenngrößen  $\Delta$  und  $\psi$  als Argumente von Winkelfunktionen in die Messgrößen bei Systemen mit einfacher Reflexion eingehen, gehen sie bei vergleichbaren Retroreflex-Messsystemen mit einem Vorfaktor 2 ein. Dementsprechend weisen die Retroreflexsysteme einen nur halb so großen Bereich auf, in dem diese Größen eindeutig bestimmt werden können. Ferner kann je nach Ausführungsform des Systems die Messgenauigkeit für die Bestimmung der Größen  $\Delta$  und  $\psi$  mit deren Absolutwert stark variieren.

20

25

Erfindungsgemäß wird zur Lösung dieser Probleme in Konfiguration K4 ein festes, einstellbares oder modulierbares optisches Mittel bzw. Element (Verzögerungselement und/oder dichroitische Element) angeordnet, um die eindeutigen Bereiche der Vermessung optimal an die zu messenden Wertebereiche der jeweils interessierenden Proben anzupassen.

30

Bringt man entsprechend Konfiguration K4 beispielsweise ein zusätzliches Verzögerungselement direkt vor den Empfänger 3 in den Empfangsstrahlengang 1-E (also im Gehäuse 4 in 1-E strahlausgangsseitig des Teilers 5, also zwi-

35

schen den Teiler 5 und den Empfänger 3), so kann der eindeutige Messbereich des Systems an den Bereich der zu vermessenden Proben angepasst werden. Fig. 7 zeigt dies für die Bestimmung der Phasenverschiebung  $\Delta$  mit einem Retroreflex-Ellipsometer für ein gemäß Konfiguration 4 bzw. als K4 eingebrachtes Verzögerungselement, das im gezeigten Beispiel auf eine Phasenverschiebung von  $\delta = -\pi/2$ ,  $\delta = 0$  oder  $\delta = +\pi/2$  eingestellt ist.

Je nach Anwendungsfall kann das Verzögerungselement fest eingestellt im Strahlengang eingebracht, als variables Element (z.B. elektrisch ansteuerbar) oder in den Strahlengang einschwenkbar sein.

Weitere Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Konfiguration K4 können die Größen  $\Delta$  und  $\psi$  modulieren und mit einem entsprechenden Auswerteverfahren genauere oder ergänzende Messwerte ermitteln.

Fig. 7 zeigt also die eindeutigen Bereiche ( $\Delta_{\text{real}} - \Delta_{\text{m}} = 0$ ) der Bestimmung von  $\Delta$  für unterschiedliche Phasenverschiebungen  $\delta$  eines zusätzlichen Verzögerungselements (als Mittel K4) vor dem Empfänger 3.

#### IV.2.5. Konfiguration K5

Zusätzliche Objektinformationen über P können erhalten werden, wenn das System bzw. dessen Detektor 3 alle vier Stokesparameter gleichzeitig bestimmt. Dies kann beispielsweise durch eine Erweiterung des Detektors eines Retroreflex-Sensors zu einem „Division of Amplitude Photopolarimeter“, erfolgen (z. B. gemäß [STT5]). Alternativ dazu kann der Detektor eines Retroreflex-Sensors durch einen entsprechenden Detektor ersetzt werden.

Wird beispielsweise der Detektor eines Retroreflexsensors nach STT1 entsprechend erweitert und im Rahmen der vorliegenden Erfindung eingesetzt, so kann anhand der Messwerte selbst überprüft werden, ob das Objekt P oder jeder Bildpunkt des Objekts P depolarisierend ist oder nicht. Sofern keine Depolarisation festgestellt wird, kann eine weitergehende ellipsometrische Untersuchung der Anisotropie der Probe erfolgen.

Bei der vorliegenden Erfindung können auch zusätzliche Lichtquellen in den

optischen Pfad eingebracht werden. Diese Lichtquellen können zusätzlich oder alternativ zu der (den) Lichtquelle(n) im Senderteil 1 angeordnet werden. Bei entsprechender Ausgestaltung der Anordnung erlaubt dies die Ermittlung der kompletten Müllermatrix jedes untersuchten Objektpunktes in einer Retroreflex-Anordnung.

5

#### IV.2.6. Konfiguration K6

Für genaue ellipsometrische Messungen – beispielsweise der Dicke von Beschichtungen oder Lackierungen – ist die Kenntnis des Einfallswinkels der Strahlung auf die Probe P notwendig – sowohl in der Reflexionsebene, als auch gegen die Strahlachse bzw. Vorzugsrichtung des Detektors 3.

10

In vielen Fällen ist diese Information vorhanden bzw. prinzipiell zugänglich (beispielsweise bei planaren Objekten P, die präzise durch das Messfeld geführt werden oder in CAD-Daten). Sofern die Objektgeometrie aus CAD-Daten abgeleitet wird (eine der Möglichkeiten für ein Konfigurationsmittel K6), muss die Auswerteeinheit des Systems die CAD-Daten mit der Bewegung des Objekts P durch das Messfeld abgleichen und aus Daten der Bewegung des Objekts durch das Messfeld (Bewegungsdaten) und den CAD-Daten für jeden Messpunkt die zugehörigen Winkelinformationen bereitstellen.

15

20

Der einfachste Fall für einen solchen Abgleich ist die Bewegung des Objekts mit konstanter Geschwindigkeit durch das Messfeld. Unter dieser Vorbedingung muss nur ein Triggersignal ausgelöst werden, wenn die Bewegung des Objekts durch das Messfeld beginnt und die Geschwindigkeit der Bewegung muss bekannt sein. Dann können die CAD-Daten direkt mit den Bilddaten abgeglichen werden. Ansonsten müssen Signale (Bewegungsdaten z.B. aus einer Motorsteuerung für die Bewegung des Objekts P oder zusätzlichen Weggeber-Signalen, etc.) bereitgestellt werden, die diesen Abgleich erst möglich machen.

25

30

In Fällen, in denen weder aus den Messwerten selbst, noch aus externen Datenquellen die Strahlwinkel ableitbar sind, müssen für eine erweiterte Charakterisierung der optischen Eigenschaften des Objekts P (bzw. von Bildpunkten desselben) die Strahlwinkel zusätzlich vermessen werden. In einfacher Weise

35

kann dies durch eine Abbildung des Messpunktes auf dem Objekt P (vgl. Kamera K6 in Fig. 3) und/oder eine Abbildung des Auftreffpunktes der Strahlung 1-S bzw.  $S_e$  auf dem Reflektor 2 erfolgen (vgl. Kamera K6 in Fig. 2). Alternativ dazu kann auch ein zusätzliches Messsystem angeordnet werden, das mit Verfahren nach dem Stand der Technik (z.B. mechanische Abtastung, Triangulation, Deflektometrie etc.) die Neigungen der Oberfläche von P (relativ zur Führung oder Auflage) bestimmt.

#### IV.2.7. Weitere erfindungsgemäße Konfigurationsmittel

Für erweiterte oder verbesserte Auswertungen der Messwerte ist es vorteilhaft Konfigurationsmittel vorzusehen, mit deren Hilfe die gemessenen Intensitätswerte bereits auf der untersten Stufe der Auswertung normiert werden können. Diese können in dem gemeinsamen Gehäuse 4 integriert sein oder im Bereich außerhalb desselben angebracht sein.

Beispielhafte Ausführungen dafür sind:

- Für Systeme mit Laserscannern (z. B. gemäß STT1) kann im Gehäuse 4 ein weiterer Retroreflektor (oder eine Kombination eines weiteren Retroreflektors mit optischen Mitteln wie Neutralfilter oder polarisationsverändernden optische Bauteilen) so angeordnet sein, dass ein Teil der Scanlinie direkt in den Empfänger 3 zurückreflektiert wird. Dies ist immer dann möglich, wenn nicht die komplette Scanlinie zur Erfassung der Probe P benötigt wird. In diesem Fall können Schwankungen der Beleuchtung 1 oder der Empfindlichkeit vom Detektor 3 (bzw. von Detektorteilen desselben) durch die Normierung ausgeglichen werden.
- In erfindungsgemäßen Transmissions-Systemen mit Laserscannern (z. B. gemäß STT1) kann ein Bereich des Retroreflektors 2 zur Normierung verwendet werden, der durch das Objekt P nicht verdeckt wird. Mit dieser Normierung können zusätzliche Schwankungen der gemessenen Intensitäten kompensiert werden, die außerhalb des Gehäuses 4 entstehen (z.B. ein Beschlag des Retroreflektors 2).

- In erfindungsgemäßen Reflexionssystemen kann/können für entsprechende Normierungen mit gleichen Vorteilen (ggf. zusätzlich) ein oder mehrere Referenzobjekt(e) neben der Probe P so angeordnet sein, dass ein Teil der Beleuchtung 1 an diesem/n Referenzobjekt(en) reflektiert wird und die reflektierten Strahlen den Retroreflektor 2 treffen.

5

### IV.3. Beispielhafte Kombinationen erfindungsgemäßer Konfigurationen

#### IV.3.1. Erstes Kombinationsbeispiel

10

Der einheitliche Gesamtgedanke der Erfindung wird nun am Beispiel eines universellen Systems zur verbesserten Klassifikation und Charakterisierung von Objekten P bzw. Punkten der Objektoberfläche dargestellt. Dabei wird verdeutlicht, dass die Hinzunahme jeder einzelnen beschriebenen Konfiguration (also z.B. mehrerer oder aller der Konfigurationsmittel K1 bis K6) eine Verbesserung erbringt, die für definierte Messaufgaben bereits eine ausreichende oder sogar die optimale Lösung darstellt.

15

Das Kombinationsbeispiel basiert auf einem bildgebenden Retroreflex-Laserscanner gemäß des Grundaufbaus in STT1, der durch entsprechende (Zusatz-)Konfigurationsmittel erfindungsgemäß erweitert ist zu einem umfassenden System zur Klassifikation von Proben hinsichtlich dekorativer Defekte, Materialdefekte, der Materialart, der Beschichtung und von Beschichtungsfehlern. Mit diesem System können alle ellipsometrischen Parameter – auch an nicht ebenen Oberflächen und auch in vielen Fertigungsprozessen – ermittelt werden. Oft waren diese Parameter bisher nur im Labor an flachen Bereichen von Proben mittels Ellipsometrie bestimmbar.

20

25

Der Grundaufbau aus STT1 nutzt die Retroreflexion der an der Probe gespiegelten Strahlung: Die Strahlen treffen nach der Spiegelung auf der Objektoberfläche von P auf einen Retroreflektor 2. Bei Reflektoren 2 ohne Strahlversatz werden die Strahlen auf genau dem gleichen optischen Weg zurück in die kombinierte Sende- und Empfangseinheit 1, 3 und 4 reflektiert. Daher erhält man mit diesem Systemkonzept in einem weiten Winkelbereich auswertbare Signale der untersuchten Proben P. (Im Gegensatz dazu führen bei herkömm-

30

35



lichen Ellipsometern aus dem Stand der Technik bereits kleine Winkelabweichungen in der Größenordnung  $1^\circ$  bei Komponenten und Probe in der Einfallsebene dazu, dass kein auswertbares Messsignal detektierbar ist.)

5 Mit dem Grundaufbau aus STT1 können dekorative Fehler der Proben als lokale Einbrüche der Reflektanz erkannt werden.

10 Sofern ein solches System erfindungsgemäß mit der Konfiguration 1 um einen bewegten Reflektor 2 erweitert wird, kann das Signal-Rausch-Verhältnis verbessert werden. Damit wird die Erkennung feinerer oder schwächerer lokaler Oberflächenstörungen entsprechend verbessert.

15 Sofern der Detektor 3 eines solchen System erfindungsgemäß entsprechend Konfiguration K5 so erweitert (es liegt also die Kombination K1 und K5 vor), dass auch der Polarisationsgrad der Strahlung detektiert wird, so kann für jeden Bildpunkt bzw. abgebildeten Punkt der Probe bereits eine Grobklassifikation durchgeführt werden nach den Kriterien:

- Depolarisierend mit gleichzeitiger Bestimmung des (De-)Polarisationsgrads.
- 20 • Das Objekt P (bzw. der Objektpunkt) weist eine rein zirkular anisotrope Müllermatrix auf.
- Das Objekt P (bzw. der Objektpunkt) zeigt keine Phasenverschiebung.
- Die Müllermatrix des Objekts P bzw. Objektpunkts zeigt lineare oder gemischt lineare und zirkulare Anisotropie.

25 Für Objekte ohne Phasenverschiebung kann zusätzlich der Drehwinkel zur optischen Achse des Sensors bestimmt werden. Ferner können für diese Objekte die Reflektanz R (in Reflexionsanordnungen) oder der Transmissionskoeffizient T (in Transmissionsanordnungen) und der ellipsometrische Parameter  $\psi$  aus den Messwerten berechnet werden. In vielen Fällen können daraus der Brechungsindex und der Extinktionskoeffizient ermittelt werden. Sofern nur diese Größen für diese Objekte zu ermitteln sind, ist bereits an dieser Stelle die optimale Lösung der Aufgabe erreicht.

35 Eine weitere Charakterisierung der Proben(-messpunkte) ist mit der Kombination K1 mit K3 und K5 möglich. Wird die Probe P dementsprechend abwech-

selnd mit links- und rechtszirkular polarisiertem Licht beleuchtet, so kann – unabhängig von der Objektart – für jedes Paar von Bildpunkten der Drehwinkel einer Probenanomalie zum Sensorkoordinatensystem (also dem Empfängerkoordinatensystem) bestimmt werden. Aus dieser Information und den  
5 weiteren Messwerten kann zudem eindeutig bestimmt werden, ob die Müllermatrix des zugehörigen Punktes der Probe rein lineare Anisotropie aufweist. Für jeden Objektpunkt mit einer Müllermatrix mit rein linearer Anisotropie können zudem die ellipsometrischen Größen  $R$  bzw.  $T$ ,  $\Delta$  und  $\psi$  berechnet werden. Anomalien wie lokale Beschichtungsfehler oder Materialfehler  
10 können so als lokale Störungen erkannt werden, selbst wenn sie ggf. dem menschlichen Auge verborgen sind. Wird gemäß K3 die Modulation durch Umschaltung zweier Lichtquellen 1 und 8 realisiert, die spektral in einem geringen Abstand emittieren, kann zudem oft für jeden Bildpunkt eines Substrats  $P$  der komplexe Brechungsindex des zugehörigen Punktes der Oberfläche  
15 bestimmt werden.

Zur Verbesserung und/oder Anpassung der Messgenauigkeit bzw. des eindeutigen Bereichs für die Auswertung kann zudem gemäß Konfiguration K4 ein optisches Element direkt vor dem Sensor angeordnet werden (es liegt dann  
20 die Kombination K1 mit K3, K4 und K5 vor).

Eine weitere Verbesserung der Genauigkeit des Systems ist ferner möglich, wenn präzisere Werte des Drehwinkels der Probe und/oder des Einfallswinkels gemäß Konfiguration K6 aus externen Datenquellen genutzt werden (es  
25 liegt dann die Kombination K1 mit K3, K4, K5 und K6 vor).

In einer anderen Ausführung eines solchen Systems kann eine spektral breitbandige Lichtquelle eingesetzt werden, in Kombination mit einem diffraktiven optischen Element vor dem Empfängerstrahlengang (gemäß Konfiguration  
30 K4). In diesem Fall ist es vorteilhaft die Modulation der Beleuchtung mit einem modulierbaren Verzögerungselement durchzuführen (gemäß Konfiguration K3) und Zeilensensoren als Detektoren im Empfänger einzusetzen. In dieser Ausführung erhält man zu jedem Zeitpunkt der Abtastung der Oberfläche den spektralen Verlauf der ellipsometrischen Kenngrößen bei einer Polarisati-  
35 on. Durch mindestens zweifache Abtastung des Messpunktes bei unterschiedlich polarisierter Beleuchtung erhält man Paare von Spektren, aus denen sich

mit den Methoden der spektroskopischen Ellipsometrie die Eigenschaften des Objektpunkts sowie dessen Winkellage ableiten lassen.

5 Die Konfigurationskombinationen wurden hier exemplarisch ausgehend vom Grundaufbau aus STT1 (also als erfindungsgemäße Erweiterungen von Systemen nach STT1) beschrieben, also für Systeme, die in Reflexion arbeiten. Für Systeme, die in Transmission arbeiten, gelten die Ausführungen sinngemäß. Bei Bedarf können einzelne Konfigurationen auch weggelassen werden.

#### 10 IV.3.2. Zweites Kombinationsbeispiel

Für dieses Beispiel wird ein Retroreflexsensor wie folgt erweitert (z.B. erfindungsgemäßes System gemäß Fig. 2, wobei von den Konfigurationen zumindest K2 und zusätzlich K3 vorgesehen sind):

- 15
- Das optisch wirksame Mittel K2 (zwischen Objekt P und einem polarisationserhaltenden Retroreflektor 2) ist ein mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  rotierendes Viertelwellen-Verzögerungselement.
  - Zusätzlich ist gemäß K3 eine abwechselnd links- und rechtszirkulare Beleuchtung gewählt, die im Vergleich zur Winkelgeschwindigkeit  $\omega$
- 20 schnell moduliert wird.

Fig. 8a zeigt eine solche Ausführungsform der Erfindung in Transmissionsanordnung mit einer Lichtquelle, die neben dem Detektor angeordnet ist und die ellipsometrischen Kenngrößen in Transmission ermittelt. Sender S und Empfänger E können dabei als Punkt-, Linien- oder Flächen- Beleuchtung und Detektor realisiert sein.

25

In einer besonders vorteilhaften Ausgestaltung dieses erfinderischen Gedankens ist das Verzögerungselement K2 fest mit dem Retroreflektor 2 gekoppelt (beispielsweise als Beschichtung oder darüber angebrachter Folie) und rotiert

30 zusätzlich gemäß K1 gemeinsam mit diesem. In diesem Fall kann gleichzeitig eine zusätzliche Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses erreicht werden.

35 Fig. 8b zeigt eine solche Ausführung zur Bestimmung der Kenngrößen in Reflexion mit einem drehbaren Retroreflektor 2 gemäß K1. In vorteilhafter Aus-

führung ist das optische Element K2 direkt mit dem Reflektor 2 verbunden.

Fig. 8 zeigt somit zwei Ausführungsformen erfindungsgemäßer Retroreflex-Ellipsometer zur Bestimmung der ellipsometrischen Parameter unabhängig von der Probenjustierung.

Figuren 9 und 10 zeigen (zur Fig. 8) das Messsignal, das mit einer Ausführungsform mit einkanaligem Intensitätsdetektor während einer Drehung des Verzögerungselements K2 entsteht. Gezeigt sind die Summe (Fig. 9) und die Differenz (Fig. 10) der Intensitätssignale bei abwechselnder links- und rechtszirkularer Beleuchtung. Wie dies verdeutlicht, können aus den Signalverläufen in einfacher Weise die Kenngrößen  $R$  bzw.  $T$ ,  $\Delta$  und  $\psi$  abgeleitet werden. Aus der Winkellage der Maxima bzw. Minima folgt ferner direkt der Drehwinkel der Probe  $P$  (gegen die Vorzugsrichtung des Verzögerungselements K2).

Durch zusätzliche Konfiguration eines diffraktiven optischen Elements vor dem Empfängerstrahlengang (gemäß Konfiguration K4) in Kombination mit einer linienförmigen Weißlichtquelle als Sender und einem Matrixdetektor als Empfänger kann ein spektroskopisches Ellipsometer realisiert werden. Dieses kann zur Vermessung von Objekten eingesetzt werden, die mit spektroskopischen Ellipsometern nach dem Stand der Technik nicht vermessbar sind.

#### **V. (Weitere) Ausführungen der Erfindung und erfindungsgemäß realisierbare Aspekte**

Die Erfindung lässt sich (auch bzw. insbesondere auch) gemäß der und/oder unter Verwendung der folgenden Aspekte realisieren. (Der Begriff „Retroreflexsensor“ wird dabei synonym zu „Retroreflektorbasiertes Sensorsystem“ verwendet.)

1. Retroreflexsensor zur verbesserten Charakterisierung der Eigenschaften einer Probe umfassend
  - einen Retroreflektor,

○ einen Sender, der einen punktförmigen oder ein- oder zweidimensionalen Bereich einer Probe, bevorzugt einen Punkt, eine Linie oder eine Fläche dieser Probe, beleuchtet und

5

○ einen Empfänger (Detektor), welcher die Strahlung empfängt, die vom Retroreflektor zurückreflektiert wird und auf dem gesamten Strahlengang zweifach an der Probe reflektiert wurde oder diese zweifach durchstrahlte

wobei

10

- die optische Achse im Beleuchtungsstrahlengang des Senders und die optische Achse im Empfangsstrahlengang zum Detektor zumindest abschnittsweise, also annähernd dieselbe Richtung haben und/oder übereinstimmen, und

15

- das an der Probe reflektierte und/oder das von der Probe transmittierte Licht von einem Retroreflektor prinzipiell auf dem gleichen optischen Weg, beispielsweise bei Verwendung eines Folienreflektors als Retroreflektor, oder mit einem Parallelversatz zurückreflektiert wird.

(Dabei bedeutet gemäß Aspekt 1 und im nachfolgenden Aspekt 2 „prinzipiell“, dass der überwiegende Anteil (insbesondere: Strahlungsanteil oder Intensitätsanteil) des an der Probe reflektierten und/oder des von der Probe transmittierten Lichts auf dem gleichen optischen Weg (beispielsweise bei Verwendung des Folienreflektors als Retroreflektor) oder mit einem Parallelversatz zurückreflektiert wird.)

20

25

2. Retroreflexsensor zur verbesserten Charakterisierung der Eigenschaften einer Probe umfassend

○ einen Sender, der einen Fleck oder ein- oder zweidimensionalen Bereich einer Probe, bevorzugt einen Punkt, eine Linie oder eine Fläche dieser Probe, beleuchtet

30

○ einen Empfänger (Detektor), bestehend aus Einzel-Detektorelement(en), Liniendetektor(en) in der Ausführung als Zeilenarray(s) oder –sensor(en), oder Flächensensor(en) in der Ausführung als Flächenarray(s) oder Matrixsensor(en).

wobei

35

- die optische Achse im Beleuchtungsstrahlengang des Senders und die optische Achse im Empfangsstrahlengang zum Detektor zumindest ab-

schnittsweise, also annähernd dieselbe Richtung haben und/oder übereinstimmen, und

- das an der Probe reflektierte und/oder das von der Probe transmittierte Licht von einem Retroreflektor prinzipiell auf dem gleichen optischen Weg, beispielsweise bei Verwendung eines Folienreflektors als Retroreflektor, oder mit einem Parallelversatz zurückreflektiert wird.

3. Retroreflexsensor nach Aspekt 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass zwei beliebige oder mehr als zwei beliebige der folgenden Elemente (Zusatzelemente) oder Konfigurationsmittel angeordnet und/oder vorhanden sind:

- ein Aktor zur Bewegung des Retroreflektors während der Vermessung der Probe,

- ein optisches Element zwischen Probe und Retroreflektor, das die Polarisation die Richtung oder die Intensität der Strahlung ändert,

- ein Retroreflektor, der die Polarisation, die Intensität, die Richtung oder den Versatz der zurückreflektierten Strahlung in bekannter Weise ändert,

- eine Modulationseinheit zur Modulation oder Umschaltung der Polarisation und / oder der Wellenlänge und / oder der Kohärenz und / oder der Abstrahlrichtung des Senderstrahls,

- ein oder mehrere optische Elemente zur Veränderung des Polarisationszustands und / oder spektralen Aufspaltung oder Selektion des gesamten Empfängerstrahlengangs, die vor dem Empfängerstrahlengang so angeordnet sind, dass sie den Strahlengang zur Beleuchtung der Probe nicht beeinflussen,

- ein Detektor, der den kompletten Polarisationszustand der auf ihn einfallenden Strahlung erfasst, wobei der Detektor als Erweiterung einer vorherigen Realisierung ausgebildet sein kann oder einen bisher vorgesehenen oder vorhandenen Detektor ersetzt,

- Lichtquellen in mehreren Teilstrahlengängen des Empfängers die zusätzlich oder anstelle des Senders S vorhanden sind,

- eine mit der Auswerteinheit verbundene Datenquelle mit Geometriedaten der Probe, aus der unter Annahme einer konstanten Bewegung der Probe durch das Messfeld oder durch Kombination mit Signalen die diese Bewegung charakterisieren, der Einfallswinkel der Strahlung auf die Probe und / oder der Neigungswinkel der Probe gegen das Detektor-Koordinatensystem (um die optische Achse) ableitbar ist,

- ein Sensor oder mehrere Sensoren, zur Bestimmung von Geometriedaten der Probe oder ihrer Position, Lage oder Orientierung im Messfeld und der Sensor oder die Sensoren mit der Auswerteeinheit so verbunden sind, dass der Einfallswinkel der Senderstrahlung auf die Probe und / oder der Neigungswinkel der Probe gegen das Detektor-Koordinatensystem (um die optische Achse) in der Auswerteeinheit zur Verfügung stellbar ist/sind,
- 5
- Referenzobjekte zur automatischen Kalibrierung von Intensitäts- und / oder Polarisationsmesswerten.
- 10
4. Retroreflexsensor zur verbesserten Charakterisierung der Eigenschaften einer Probe nach Aspekt 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Aktor den Retroreflektor in eine rotierende oder vibrierende Bewegung versetzt und in der Auswerteeinheit Mittel zur Mittelung der Messwerte vorgesehen sind und / oder, dass der Aktor den Reflektor in einem gezielte oder
- 15
- gesteuerten Bewegungsablauf so bewegt, dass aus einer bekannten Strukturierung des Retroreflektors, in Zusammenhang mit dessen Bewegung Zusatzinformationen über das Messobjekt gewonnen werden können.
- 20
5. Retroreflexsensor zur verbesserten Charakterisierung der Eigenschaften einer Probe nach einem der Aspekte 1 bis 4 dadurch gekennzeichnet, dass das optische Element zwischen Messobjekt und Retroreflektor ausgebildet ist als
- statisches oder modulierbares Verzögerungselement, oder
  - statischer oder modulierbarer Polarisator, oder
- 25
- Element das die Intensität statisch oder modulierbar als Funktion des Eintrittsortes oder Einfallswinkels verändert (z. B. als Maske mit teilabsorbierenden Punkten, Linien oder Gittern),
- oder als Element ausgebildet ist, das gleichzeitig eine Kombination dieser Veränderungen durchführt.
- 30
6. Retroreflexsensor zur verbesserten Charakterisierung der Eigenschaften einer Probe nach einem der Aspekte 1 bis 5 dadurch gekennzeichnet, dass der Retroreflektor entweder
- depolarisierend ist,
- 35
- oder eine Kombination aus polarisationserhaltendem Retroreflektor und einem statischen oder modulierbaren Verzögerungselement enthält,

- oder so aufgebaut ist, dass der Polarisationszustand der reflektierten Strahlung in definierter Weise vom Einfallswinkel oder Auftreffpunkt der auftreffenden Strahlung abhängt
- oder die spektrale Funktion des Rückstreukoeffizienten des Retroreflektors in definierter Weise vom Einfallswinkel und / oder Auftreffpunkt der auftreffenden Strahlung abhängt.

5

7. Retroreflexsensor zur verbesserten Charakterisierung der Eigenschaften einer Probe nach einem der Aspekte 1 bis 6 dadurch gekennzeichnet, dass

- die zusätzliche Modulationseinheit umschaltbare Lichtquellen enthält, die über optische Elemente wie polarisierende, dichroitische oder andere Strahlteiler so gekoppelt sind, dass bei der Umschaltung der Polarisationszustand und / oder die Wellenlänge und / oder die Kohärenz und / oder die Abstrahlrichtung der Strahlung geändert wird,

10

- und / oder modulierbare optische Elemente zur Änderung der Polarisation wie rotierende oder einstellbare Verzögerungselemente in den Senderstrahlengang integriert sind,
- und / oder Elemente zur Änderung der Abstrahlrichtung wie modulierbare Spiegel in den Senderstrahlengang integriert sind.

15

20

8. Retroreflexsensor zur verbesserten Charakterisierung der Eigenschaften einer Probe nach einem der Aspekte 1 bis 7 dadurch gekennzeichnet, dass vor dem Empfängerstrahlengang, ohne Beeinflussung des Senderstrahlengang optische Elemente angeordnet sind, welche

25

- statisch oder veränderbar die Gesamt-Verzögerung der im Empfänger detektierten Strahlung ändern,
- und / oder statisch oder veränderbar den Dichroismus der im Empfänger detektierten Strahlung ändern,
- und / oder den Empfängerstrahlengang in einer Richtung spektral in der Position und / oder Richtung verändern (z.B. als diffraktives optisches Element ausgebildet sind),
- und / oder statisch oder veränderbar die Wellenlänge der im Empfänger detektierten Strahlung auswählen.

30

35

9. Retroreflexsensor zur verbesserten Charakterisierung der Eigenschaften einer Probe nach den Aspekte 1 bis 8 dadurch gekennzeichnet, dass



der oder die Zusatzsensor(en) zur Bestimmung von Geometriedaten der Probe oder ihrer Orientierung im Messfeld nach einem (oder mehreren) der folgenden Merkmale aufgebaut ist:

- 5 - die vom Transceiver abgestrahlte und an der Probenoberfläche oder an der Oberfläche des Retroreflektors teilweise gestreute Strahlung zur Bestimmung der Geometrie oder des Neigungswinkels der Probenoberfläche auf einen zusätzlichen Sensor (z.B. Kamera) abgebildet wird,
- und / oder Punkte, Linien oder Muster auf die Objektoberfläche projiziert und auf einen Sensor (Kamera) abgebildet werden,
- 10 - und / oder zusätzliche 3D-Sensoren angeordnet werden, die nach einem Verfahren nach dem Stand der Technik arbeiten (z.B. mechanischer Abtastung, Deflektometrie, Streifenprojektion oder Lasertriangulation).

10. Verfahren zur verbesserten Charakterisierung der Eigenschaften einer Probe, wobei ein Retroreflexsensor gemäß einem der Aspekte 1 bis 9 wie folgt eingesetzt wird:

Durchführen einer ersten Messung des Stokesvektors der empfangenen Strahlung und Bestimmung der Polarisationsgrads für den gemessenen Bereich der Probe (Punkt, Linie oder Fläche) sowie bevorzugt auch für Bereiche ohne Depolarisation.

11. Verfahren nach Aspekt 10, wobei eine weitere Charakterisierung einer/der Müllermatrix der zugehörigen Objektbereiche hinsichtlich der Art der Anisotropie erfolgt in der/den Anisotropie-Kategorie(n)

- a) rein zirkular anisotrop, und/oder
- b) ohne Phasenverschiebung, und/oder
- c) rein linear anisotrop oder gemischt linear und zirkular anisotrop.

12. Verfahren nach Aspekt 11, wobei weiter für die Müllermatrizen der Bereiche aus den Kategorien a) und/oder b)

- für Bereiche aus der Kategorie a) die Art und Größe der zirkularen Anisotropie (zirkular dichroitisch und/oder zirkular doppelbrechend) bestimmt wird und/oder
- 35 ▪ für Bereiche aus der Kategorie b) der Wert des Dichroismus bestimmt wird und/oder

- der Neigungs- bzw. Drehwinkel der Anisotropie gegen die Vorzugsrichtung des Detektors bestimmt wird.

13. Verfahren zur verbesserten Charakterisierung der Eigenschaften einer Probe nach einem der Aspekte 10 bis 12, weiter umfassend:

Durchführen einer zweiten Messung des Stokesvektors der empfangenen Strahlung, bei welcher der Polarisationszustand allein oder in Kombination mit anderen Parametern der Komponenten (Wellenlänge, Kohärenz und/oder Einstellungen mindestens einer der Konfigurationen K2 bis K4) gegenüber der ersten Messung verändert ist, und wobei eine gegenseitige Zuordnung der ersten Messung und der zweiten Messung zu Paaren von Messergebnissen für jeweils gleiche Bereiche der Probe erfolgt, und wobei bevorzugt für diese eine weitere Charakterisierung erfolgt

- der Müllermatrix hinsichtlich mindestens einer der Unterkategorien

- c1) rein linear anisotrop,

- c2) gemischt linear und zirkular anisotrop,

wobei bevorzugt die Art und Größe der Anisotropie bestimmt wird, und/oder

- hinsichtlich des Neigungs- und/oder Drehwinkels der Anisotropie gegen die Vorzugsrichtung des Detektors und bevorzugt eines oder mehrerer der ellipsometrischen Parameter (also  $R$ ,  $T$ ,  $\Delta$  und  $\psi$ ), wobei vorzugsweise der ermittelte Drehwinkel der Anisotropie zur Korrektur der ellipsometrischen Parameter verwendet wird.

14. Verfahren zur verbesserten Charakterisierung der Eigenschaften einer Probe nach einem der Aspekte 10 bis 13, weiter umfassend:

Durchführen einer oder mehrerer weiterer Messungen des Stokesvektors der empfangenen Strahlung, bei welcher/n der Polarisationszustand und/oder einzelne oder Kombinationen anderer Parametern der Komponenten (Wellenlänge, Kohärenz, und/oder Einstellungen der Konfigurationen K2 bis K4) gegenüber der ersten und/oder der zweiten Messung verändert ist, wobei bevorzugt eine gegenseitige Zuordnung der ersten und der zweiten Messung mit der/den weiteren Messung(en) zu Vektoren von Messergebnissen für jeweils gleiche Bereiche der Probe erfolgt, und wobei bevorzugt darüber hinaus aus diesen weitere, ergänzende Informationen zur optischen Charakterisierung

der Probenbereiche abgeleitet werden.

15. Verfahren zur verbesserten Charakterisierung der Eigenschaften einer Probe nach einem der Aspekte 10 bis 14, weiter umfassend:

5 Eine Auswertung zur Verknüpfung der (Zwischen-)Ergebnisse der Probenbereiche zu Ergebnissen für die gesamte Probe, welche eine oder mehrere der folgenden Auswertungen enthält und die in der Reihenfolge vom Aufbau des Sensorsystems und / oder der Art der untersuchten Proben abhängen können:

- 10 ○ Berechnung des Einfallswinkels, sowie für Transmission-Anordnungen bevorzugt auch des/der Austrittswinkel(s), aus den Messwerten und/oder die Messwerte ergänzenden Daten (Konfiguration K6), und/oder
- Wahl des geeignetsten Objektmodells in Abhängigkeit von den Messwerten und / oder Vorwissen über die Probe, und/oder
- 15 ○ Berechnung von physikalischen Eigenschaften der Probe/Probenbereiche die direkt aus den ermittelten Kenngrößen ableitbar sind (wie beispielsweise Brechungsindex und/oder Extinktionskoeffizient) oder aus diesen weiter ableitbar sind (beispielsweise Spannung, Zuckergehalt, und/oder Temperatur),
- 20 ○ Eine Auswertung, welche lokale Anomalien erkennt und bevorzugt auch durch eine Korrekturrechnung unter Berücksichtigung der Polarisierungseffekte hinsichtlich Art und/ oder Größe klassifiziert in:
  - dekorative lokale Anomalie (Kratzer, Flecken, matte Stellen ...),
  - Materialanomalie (Beschichtungsfehler, Rauigkeit, Blasen, Partikeleinschluss...) oder
  - 25 ▪ Grenzflächen (Objektrand, eingeschmolzene Bereiche...),und weiter optional deren Verlauf in oder auf der Probe ermittelt.

30 16. Verfahren zur verbesserten Charakterisierung der Eigenschaften einer Probe nach dem vorhergehenden Aspekt, weiter umfassend: einen Vergleich dieser Ergebnisse mit Vorgaben und basierend auf diesem Vergleich eine Klassifikation der Probe (z.B. in Form von gut oder schlecht für automatische (Schüttgut-) Sortiersysteme).

35

17. Verwendung, nach einem der vorhergehenden Aspekte 1 bis 16,

- 5 a. eines Retroreflexensors zur verbesserten Charakterisierung der Eigenschaften einer Probe oder eines Verfahrens zur Anwendung ellipsometrischer Messverfahren bei Proben oder Messobjekten, deren Lage oder Neigung im Messfeld nicht konstant und/oder genau definiert ist,  
oder
- 10 b. eines Retroreflexensors zur verbesserten Charakterisierung der Eigenschaften einer Probe oder eines Verfahrens zur Schichtdickenbestimmung beschichteter und/oder lackierter Oberflächen und/oder Erkennung und/oder Klassifikation von Beschichtungsfehlern,  
oder
- 15 c. eines Retroreflexensors zur verbesserten Charakterisierung der Eigenschaften einer Probe oder eines Verfahrens zur Unterscheidung oder Prüfung auf Homogenität unterschiedlicher Oberflächen bezüglich Materialart und/oder Beschichtungsart und/oder Schichtdicke und/oder Rauigkeit,  
oder
- 20 d. eines Retroreflexensors zur verbesserten Charakterisierung der Eigenschaften einer Probe oder eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche zur Bestimmung der Geometrie der Probe und/oder der Drehlage der Probe im Messbereich.

## Patentansprüche

5

1. Retroreflektorbasiertes Sensorsystem zum optischen Charakterisieren einer Probe (P) mit

einem Sender (1) zum Bestrahlen der im Senderstrahlengang (1-S) positionierten Probe (P),

10

einem Retroreflektor (2), der im Senderstrahlengang (1-S) hinter der Probe (P) so positioniert ist, dass er im Senderstrahlengang (1-S) von der Probe (P) herkommend auf ihn einfallende Strahlung ( $S_e$ ) im Empfangsstrahlengang (1-E) auf die Probe (P) zurückreflektiert,

15

wobei der Sender (1), die Probe (P) und der Retroreflektor (2) so positioniert sind, dass im Empfangsstrahlengang (1-E) vom Retroreflektor (2) zurückreflektierte Strahlung erneut auf die Probe (P) einfällt und von letzterer (P) in Richtung zum Sender (1) hin zurückgestrahlt wird, und

20

einem Empfänger (3), der im Empfangsstrahlengang (1-E) so positioniert ist, dass er vom Retroreflektor (2) zurückreflektierte, erneut auf die Probe (P) eingefallene und von letzterer (P) in Richtung zum Sender (1) hin zurückgestrahlte Strahlung ( $S_{RR}$ ) detektiert,

25

wobei aus der vom Empfänger (3) detektierten Strahlung ( $S_{RR}$ ) Messwerte gewinn- und auswertbar sind zum optischen Charakterisieren der Probe (P), und

wobei ein oder mehrere Konfigurationsmittel (K1 bis K7) vorgesehen ist/sind, mittels dessen/derer eine verbesserte Gewinnung und/oder Auswertung der Messwerte ermöglicht ist/sind, zum verbesserten optischen Charakterisieren der Probe (P).

2. Retroreflektorbasiertes Sensorsystem nach dem vorhergehenden Anspruch,

*dadurch gekennzeichnet, dass*

5 eines (K1) oder mehrere der Konfigurationsmittel (K1 bis K7) ausgebildet und/oder positioniert ist/sind, um den Sender (1), die Probe (P), den Retroreflektor (2) und/oder den Empfänger (3) zu bewegen, insbesondere mechanisch zu bewegen, während die Strahlung ( $S_{RR}$ ) durch den Empfänger (3) detektiert wird.

- 10 3. Retroreflektorbasiertes Sensorsystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

*dadurch gekennzeichnet, dass*

15 eines oder mehrere (K2 bis K4) der Konfigurationsmittel (K1 bis K7) (ein) optische(s) Element(e) umfasst/umfassen, das/die einen oder mehrere Parameter der Strahlung ändert/n, moduliert/en und/oder umschaltet/n,

20 bevorzugt das/die einen/den Polarisationszustand, eine/die Richtung, eine/die Kohärenz, eine/die Wellenlänge, eine/die Intensität und/oder einen/den spektralen Aufspaltungszustand im Senderstrahlengang (1-S) und/oder im Empfangsstrahlengang (1-E) und/oder einen Versatz zwischen dem Senderstrahlengang (1-S) einerseits und dem Empfangsstrahlengang (1-E) andererseits ändert/n, moduliert/en, umschaltet/n und/oder bewirkt/en.

- 25 4. Retroreflektorbasiertes Sensorsystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

*dadurch gekennzeichnet, dass*

eines (K5) der Konfigurationsmittel (K1 bis K7) der Empfänger (3) selbst ist, indem dieser (3) so ausgebildet ist, dass aus der von ihm (3) detektierten Strahlung ( $S_{RR}$ ) sowie durch ihn (3) oder durch eine Auswerteeinheit des Sensorsystems der vollständige Polarisationszustand dieser

Strahlung ( $S_{RR}$ ) oder der komplette Stokesvektor dieser Strahlung ( $S_{RR}$ ) bestimmbar ist, insbesondere berechenbar ist.

5. Retroreflektorbasiertes Sensorsystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

5 *dadurch gekennzeichnet, dass*

eines (K6) oder mehrere der Konfigurationsmittel (K1 bis K7) (ein) Mittel zum Erlangen zusätzlicher Informationen über die Probe (P) und/oder über die Strahlung des Senderstrahlengangs (1-S) ist/sind,

10 wobei bevorzugt das/die Mittel zum Erlangen zusätzlicher Informationen (ein) Sensor(en), (eine) Kamera(s) und/oder (ein) Informationsspeicher, bevorzugt (ein) Informationsspeicher einer/der Auswerteeinheit des Sensorsystems, enthaltend die zusätzlichen Informationen, ist/sind,

und/oder

15 wobei bevorzugt die zusätzlichen Informationen sind oder umfassen:

- Die Pose, also sowohl die Position als auch die Orientierung, die Position oder die Orientierung der Probe (P) relativ zum Sender (1), Retroreflektor (2), Empfänger (3) und/oder zur auf sie (P) einfallenden Strahlung,

20 • Daten über die Beschaffenheit der Probe oder deren Oberfläche, insbesondere Geometriedaten der Probe,

- den Einfallswinkel der auf die Probe (P) im Senderstrahlengang (1-S) einfallenden Strahlung,

und/oder

25 • einen oder mehrere Neigungswinkel einer oder mehrerer definierter/r Achse(n) der Probe (P) gegen ein definiertes Koordinatensystem des Empfängers (3).

6. Retroreflektorbasiertes Sensorsystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

*dadurch gekennzeichnet, dass*

eines oder mehrere der Konfigurationsmittel (K1 bis K7) (ein) Mittel zum Normieren der Messwerte ist/sind.

5

7. Retroreflektorbasiertes Sensorsystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

*dadurch gekennzeichnet, dass*

eines oder mehrere der Konfigurationsmittel (K1 bis K7) im Senderstrahlengang (1-S), im Empfangsstrahlengang (1-E), im/am Sender (1), im/am Retroreflektor (2), im/am Empfänger (3), in/an einem Gehäuse (4) umschließend oder enthaltend sowohl den Sender (1) als auch den Empfänger (3) positioniert oder ausgebildet ist/sind, oder so vorgesehen ist/sind, dass mit ihm/ihnen die Probe (P), der Retroreflektor (2) oder eines der Konfigurationsmittel optisch abtastbar ist, beispielsweise mittels eines Bildsensors, insbesondere einer Kamera, abbildbar ist.

10

15

8. Retroreflektorbasiertes Sensorsystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

*dadurch gekennzeichnet, dass*

der Sender (1), der Retroreflektor (2) und der Empfänger (3) so ausgebildet und positioniert sind, dass (die) am Retroreflektor (2) zurückreflektierte Strahlung sich, relativ zum Senderstrahlengang (1-S) gesehen, in zumindest Abschnitten des Empfangsstrahlengangs (1-E) auf identischem Weg ausbreitet oder auf einem dazu versetzten Weg ausbreitet, also mit Strahlversatz zum Senderstrahlengang (1-S).

20

25

9. Retroreflektorbasiertes Sensorsystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

*dadurch gekennzeichnet, dass*



5 der Sender (1), die Probe (P) und der Retroreflektor (2) in Reflexionsanordnung positioniert sind, dass also im Senderstrahlengang (1-S) vom Sender (1) herkommendes und auf die Probe (P) eingestrahltes Licht an der Probe (P) reflektiert wird, von dort (P) herkommend auf den Retroreflektor (2) einfällt ( $S_e$ ), vom Retroreflektor (2) in den Empfangsstrahlengang (1-E) und auf die Probe (P) zurückreflektiert wird, an der Probe (P) erneut reflektiert wird und schließlich als zweifach an der Probe (P) reflektierte Strahlung ( $S_{RR}$ ) vom Empfänger (3) detektiert wird,

10 oder

15 dass der Sender (1), die Probe (P) und der Retroreflektor (2) in Transmissionsanordnung positioniert sind, dass also im Senderstrahlengang (1-S) vom Sender (1) herkommendes und auf die Probe (P) eingestrahltes Licht durch die Probe (P) hindurch transmittiert wird, von dort (P) herkommend auf den Retroreflektor (2) einfällt ( $S_e$ ), vom Retroreflektor (2) in den Empfangsstrahlengang (1-E) und auf die Probe (P) zurückreflektiert wird, erneut durch die Probe (P) hindurch transmittiert wird und schließlich als zweifach durch die Probe (P) hindurch transmittierte Strahlung ( $S_{RR}$ ) vom Empfänger (3) detektiert wird.

20 10. Retroreflektorbasiertes Sensorsystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

*dadurch gekennzeichnet, dass*

25 der Sender (1) und der Empfänger (3) nebeneinander, unmittelbar benachbart zueinander oder möglichst nahe beieinander positioniert sind,

oder

dass der Empfänger (3) in einem Raumbereich positioniert ist, in dem auch der Sender (1) positioniert ist,

oder

dass der Sender (1) und der Empfänger (3) in(nerhalb) ein und dasselbe/desselben Gehäuse(s) (4) integriert oder positioniert sind.

11. Retroreflektorbasiertes Sensorsystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

5 *dadurch gekennzeichnet, dass*

der Sender (1) und der Empfänger (3) als Punktmesssystem ausgebildet sind, also einen punktförmigen Bereich der Probe (P) abtasten,

oder

10 dass der Sender (1) und der Empfänger (3) als Scannersystem ausgebildet sind, also einen eindimensionalen, d.h. linienförmigen, Bereich der Probe (P) oder einen zweidimensionalen, d.h. flächenförmigen, Bereich der Probe (P) abtasten.

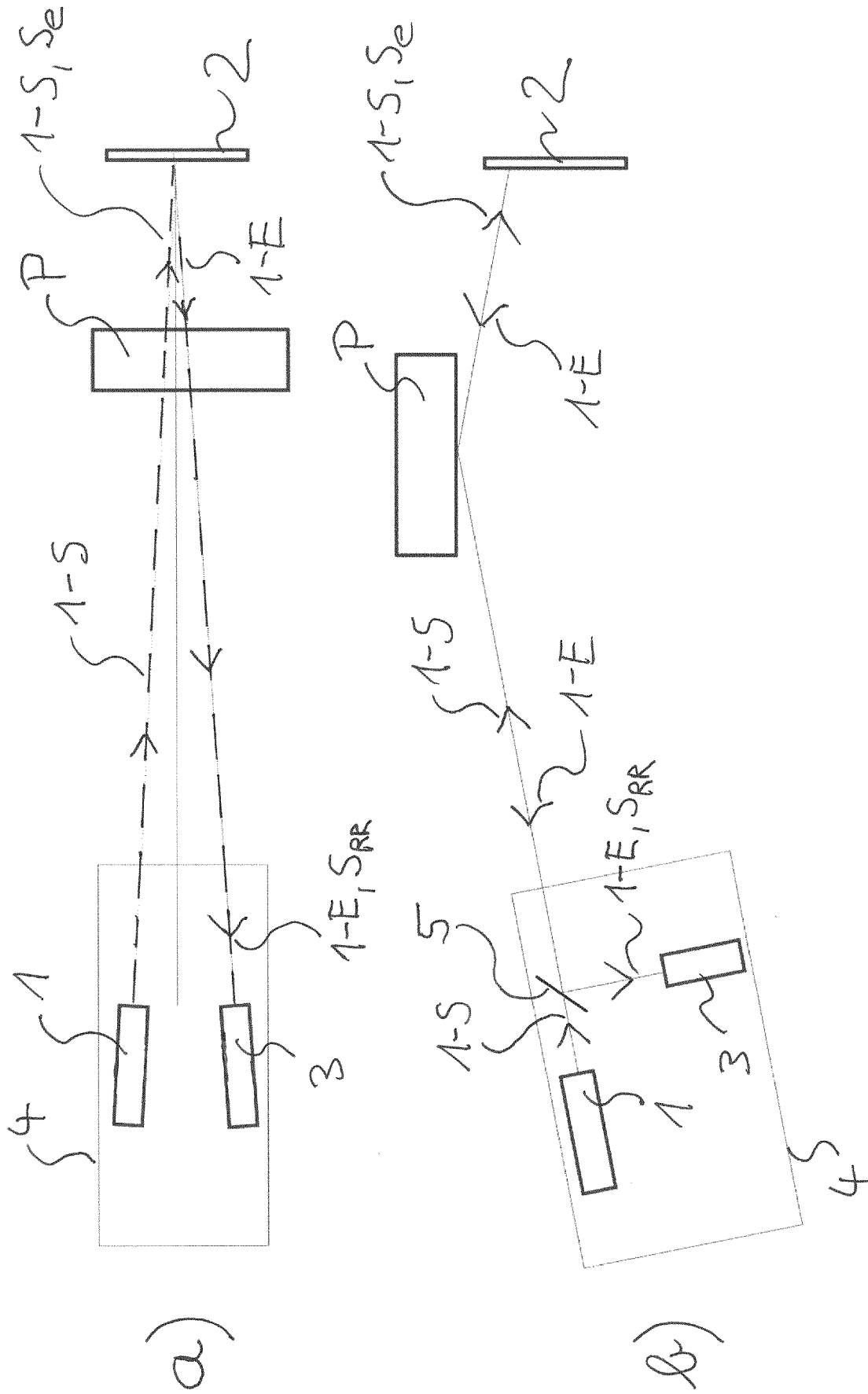


Fig. 1 (Stand der Technik)



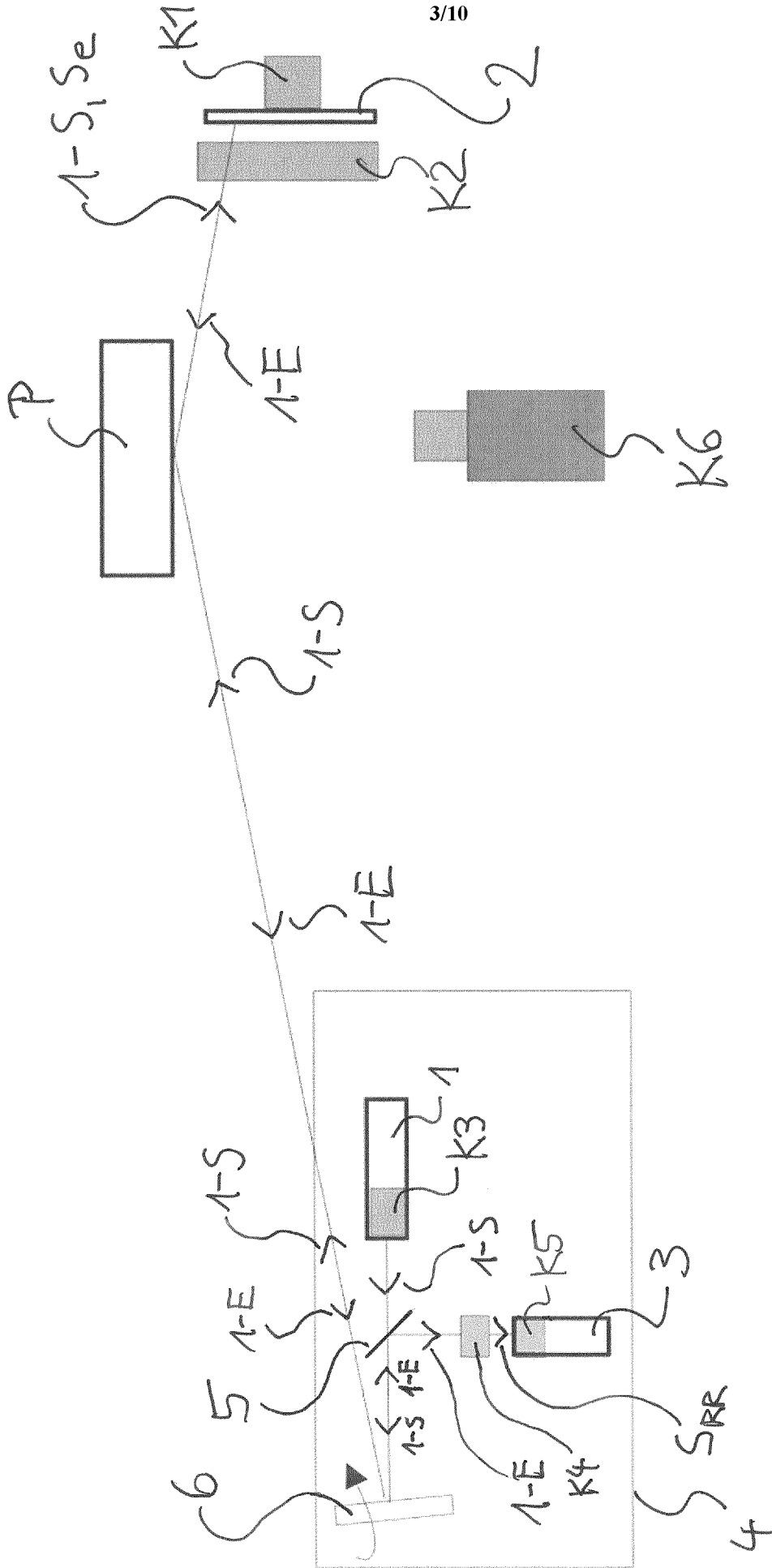
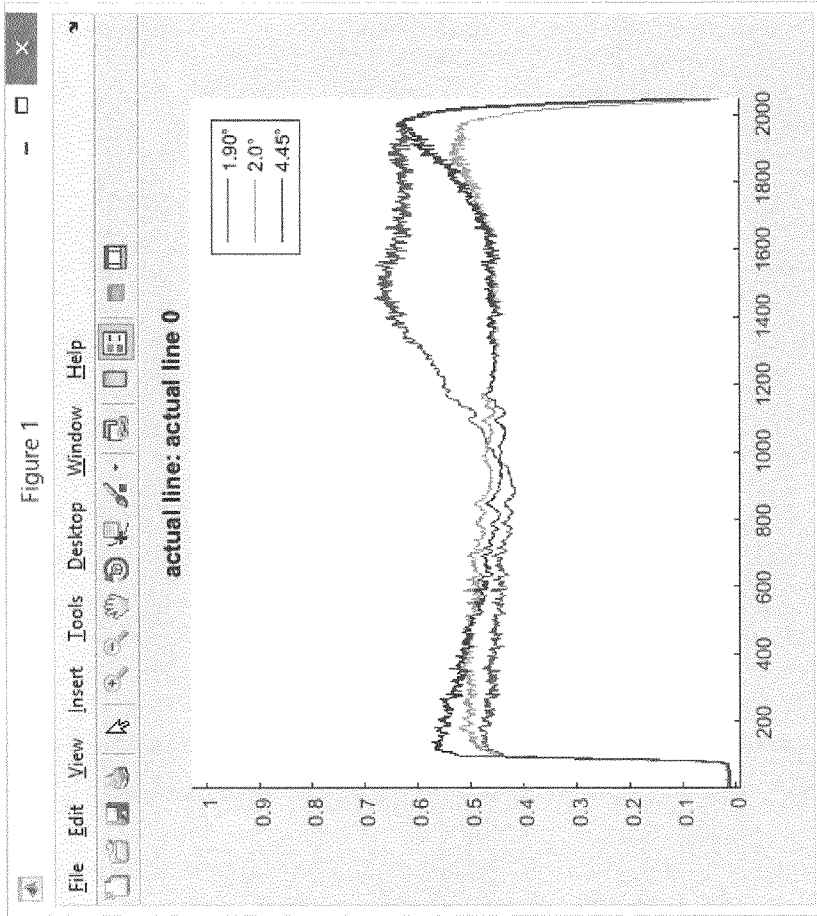
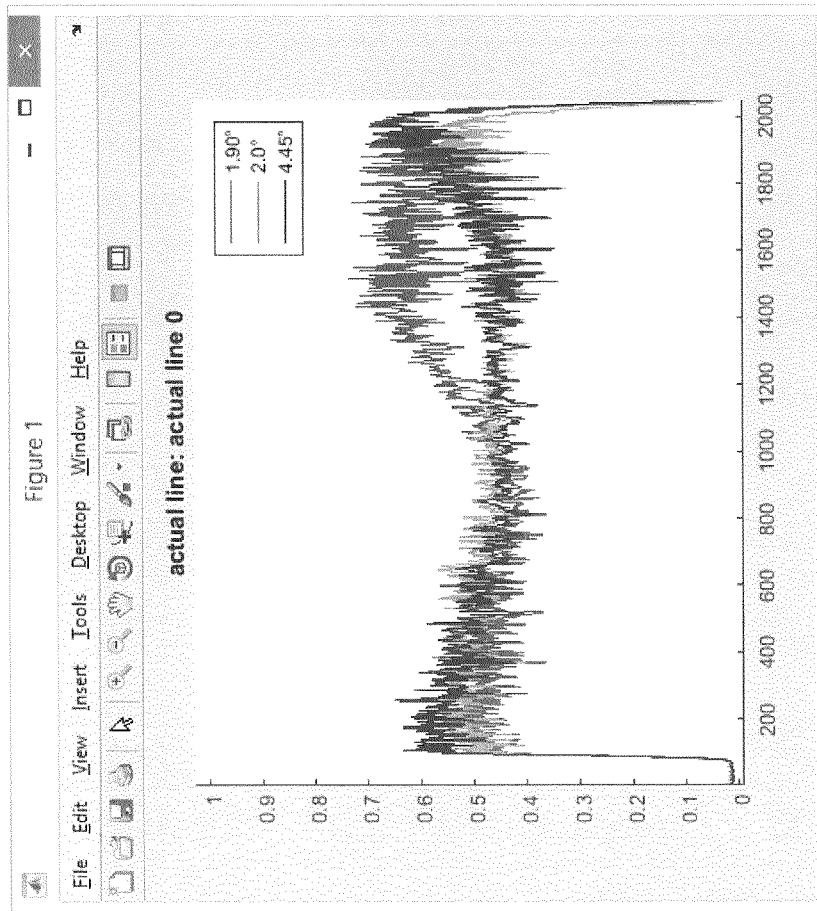


Fig. 3



b)



a)

Fig. 4

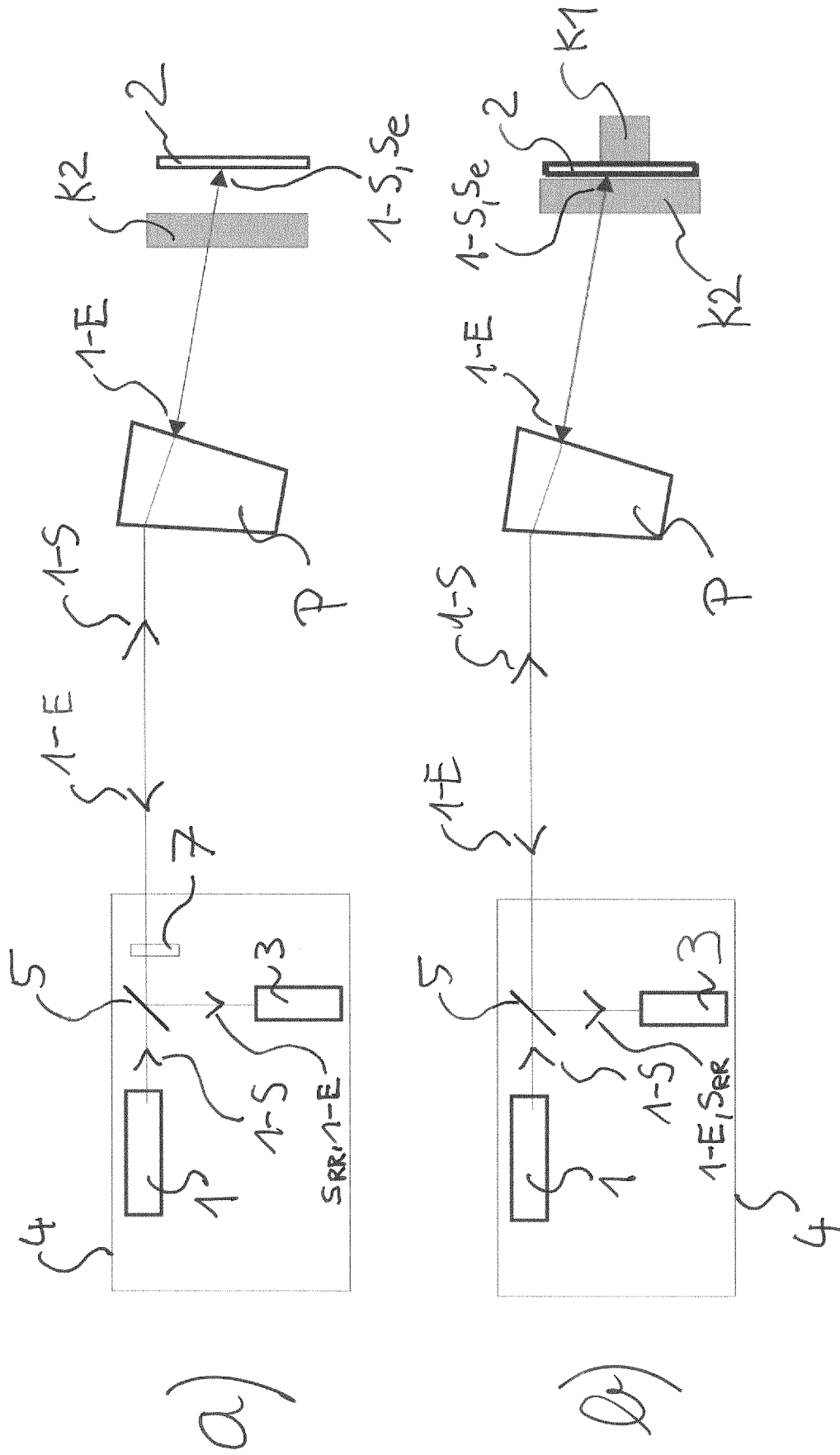


Fig. 5

a)

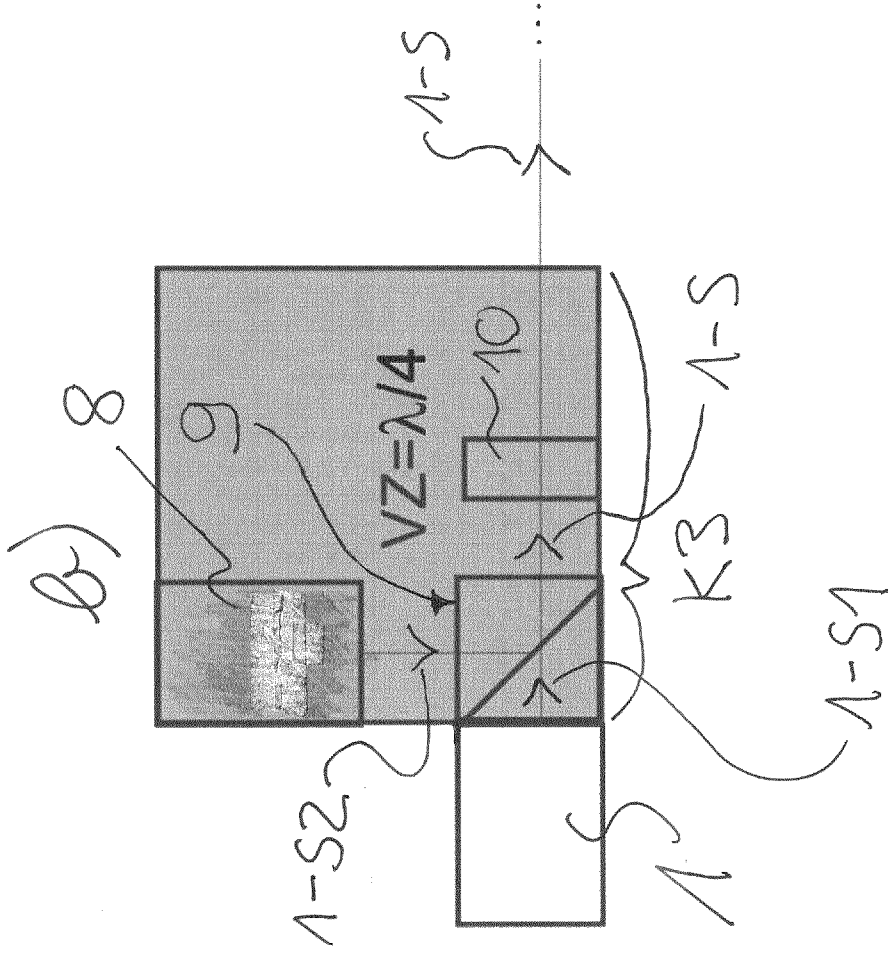
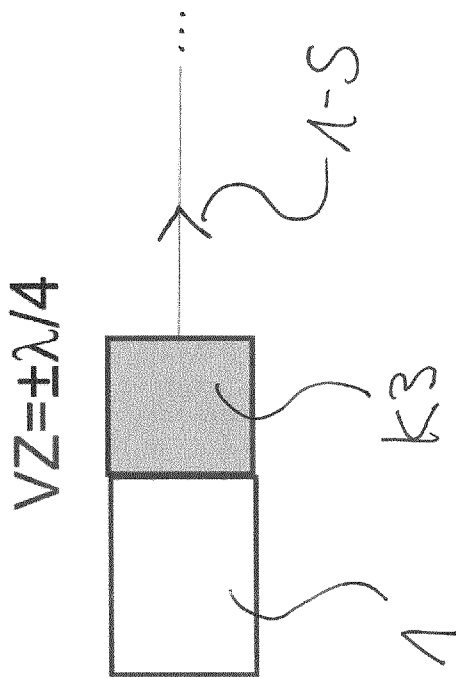


Fig. 6



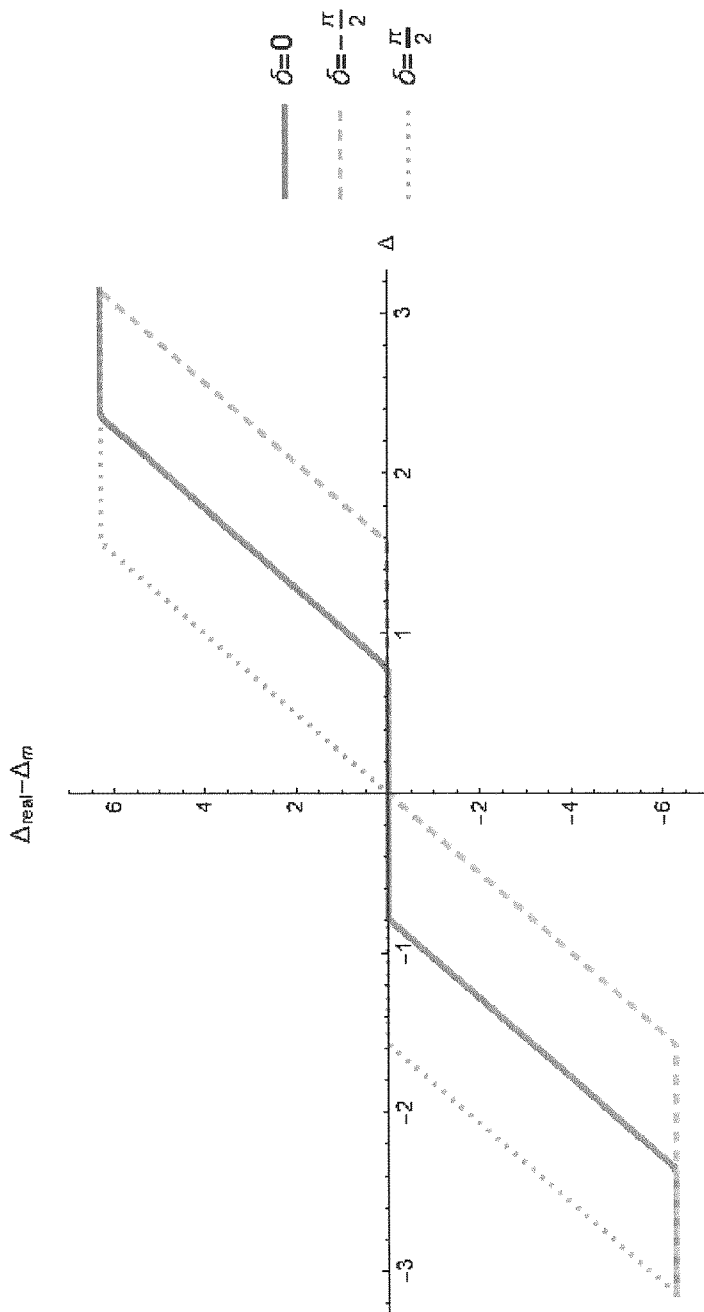


Fig. 7

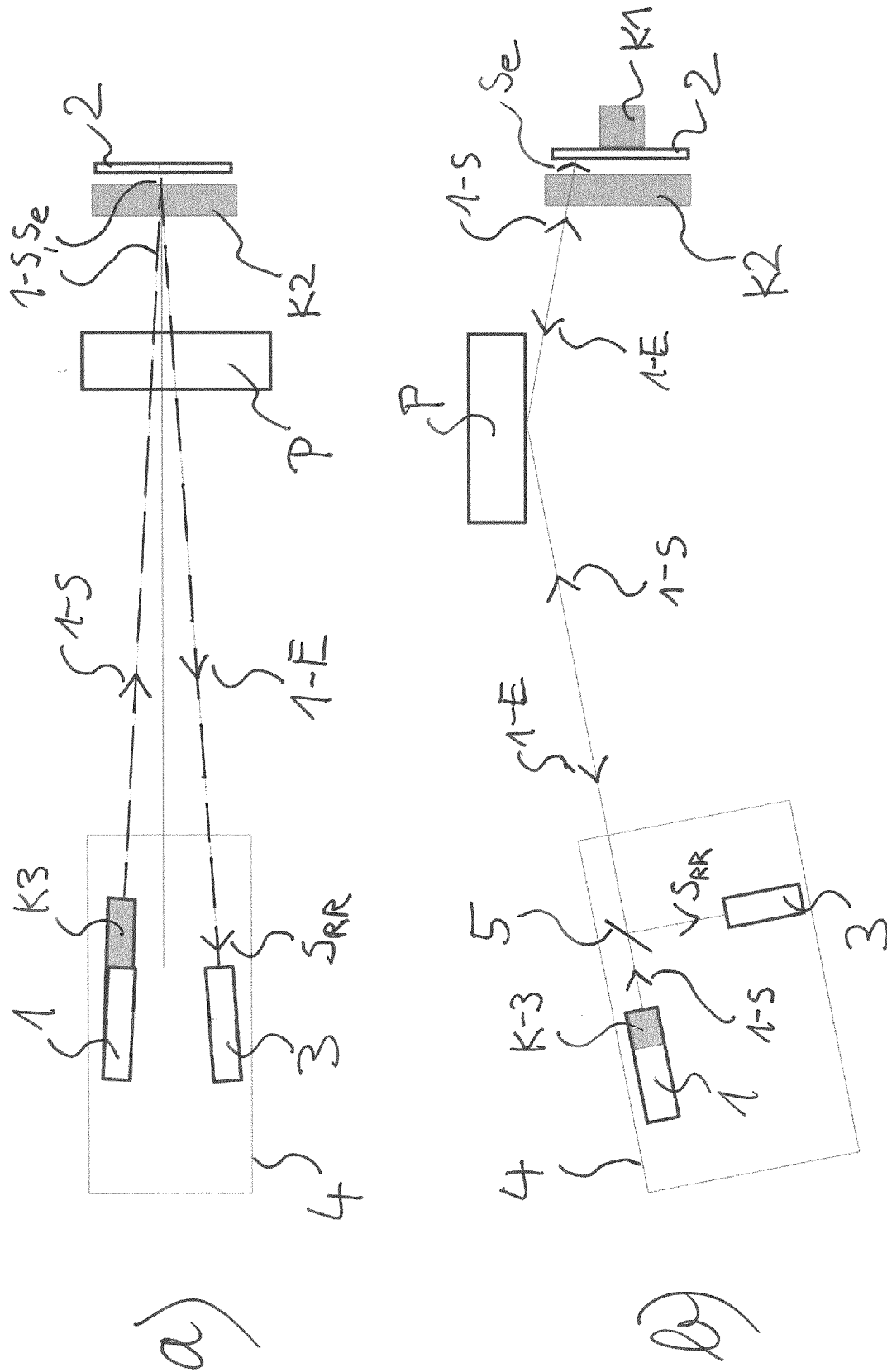


Fig. 8

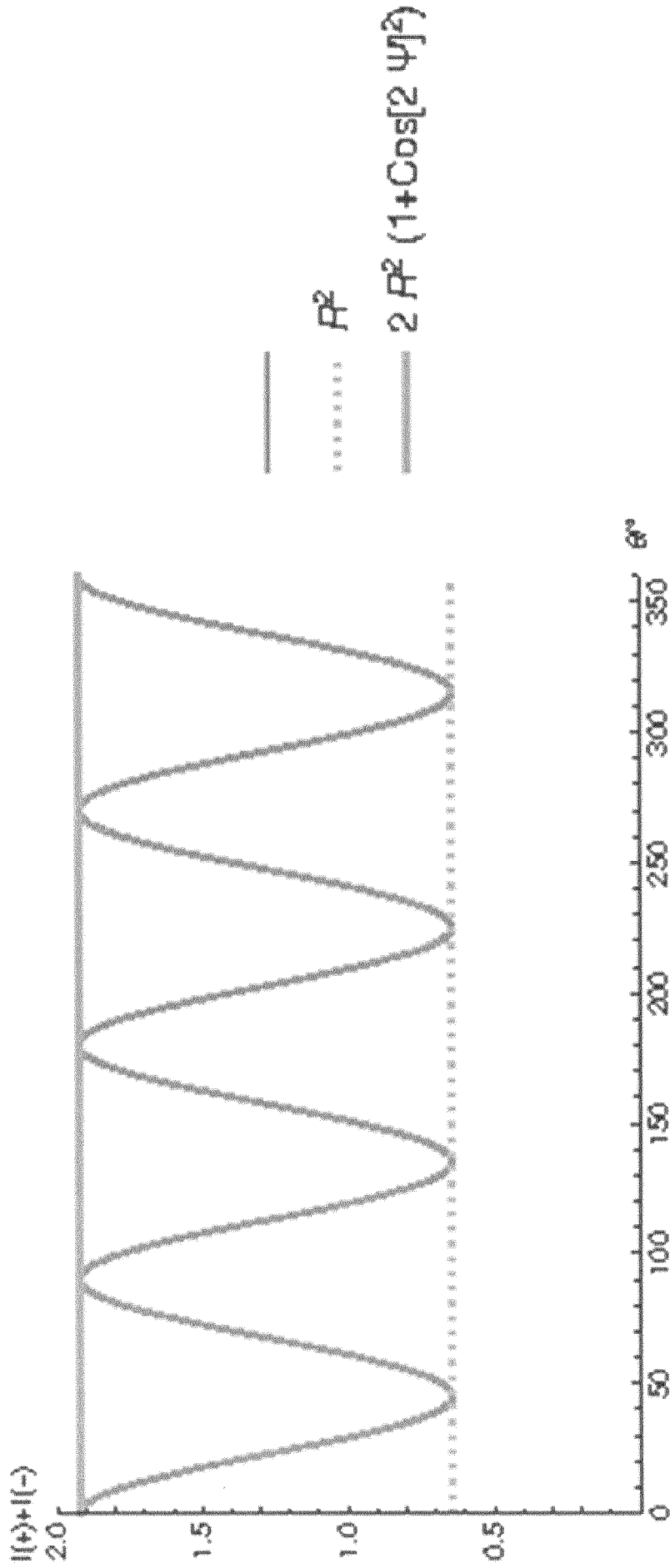


Fig. 9

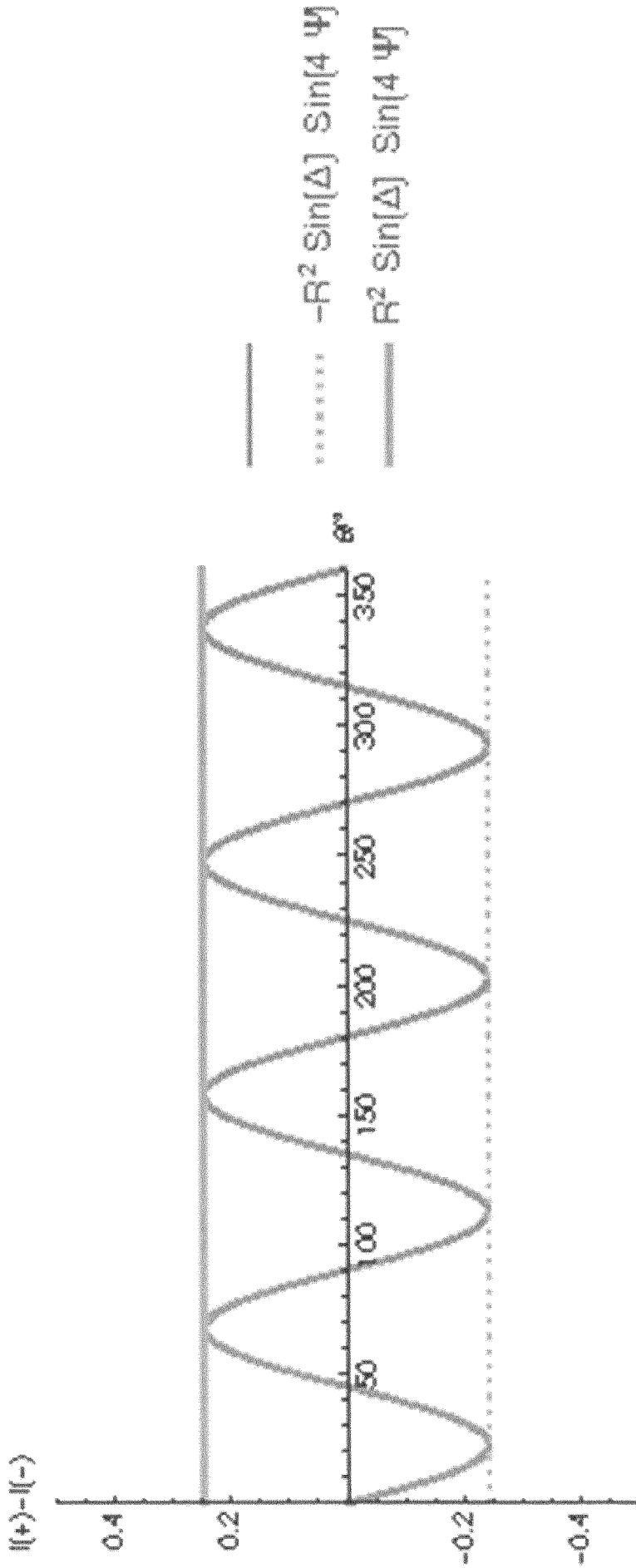


Fig. 10