

(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
22. September 2016 (22.09.2016)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2016/146264 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

A61B 5/00 (2006.01) G01N 3/40 (2006.01)
G01L 1/24 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2016/000475

(22) Internationales Anmeldedatum:
16. März 2016 (16.03.2016)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2015 003 433.2 17. März 2015 (17.03.2015) DE
10 2015 003 432.4 17. März 2015 (17.03.2015) DE

(71) Anmelder: HOCHSCHULE MÜNCHEN [DE/DE];
Lothstr. 34, 80335 München (DE).

(72) Erfinder: ROTH, Johannes; Wettersteinstr. 59, 82223
Eichenau (DE). CLAUSEN-SCHAUMANN, Hauke;
Kapellenstr. 24, 82347 Bernried (DE). MARCHI,
Gabriele; Schleibingerstr. 10, 81669 München (DE).
ASZODI, Attila; Kopernikusweg 1, 82152 Martinsried
(DE).

(74) Anwalt: LEHMANN, Horst; Giselstr. 28, 80802
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, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR,
KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG,
MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM,
PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC,
SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN,
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

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

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

— hinsichtlich der Berechtigung des Anmelders, ein Patent zu
beantragen und zu erhalten (Regel 4.17 Ziffer ii)

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: INDENTATION DEVICE HAVING A PIEZOELECTRIC CONTROL ELEMENT

(54) Bezeichnung : INDENTIERUNGSVORRICHTUNG MIT PIEZOELEKTRISCHEM STELLELEMENT

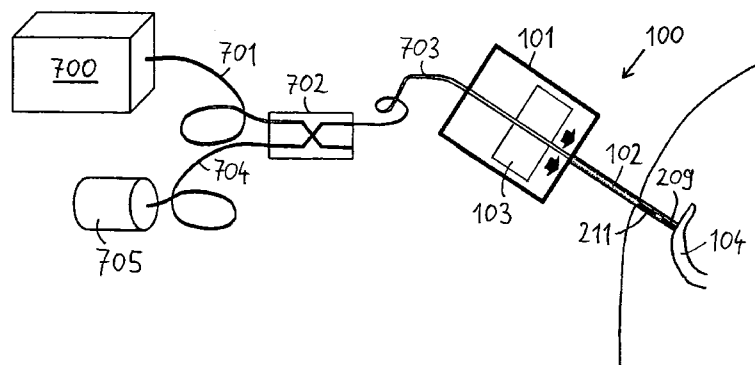


Fig. 7

(57) Abstract: The invention relates to an indentation device for determining elastic or viscoelastic properties of a substrate, in particular of cartilage tissue in vivo, having a measurement probe for indenting the substrate, which measurement probe comprises a tube and an optical fiber fastened within the tube, wherein the tube has an outside diameter of less than 1 millimeter. Furthermore, the indentation device comprises at least one fiber Bragg grating, which is written into the optical fiber and which is provided for detecting a force acting on the tip of the optical fiber, and a piezoelectric control element for positioning the measurement probe, which is mechanically connected to the measurement probe and which is designed to move the measurement probe onto the substrate to be measured and to press the measurement probe into the substrate. The indentation device is designed to sense the advancement of the measurement probe and the force acting on the tip of the optical fiber.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2016/146264 A1

**Veröffentlicht:**

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

Eine Indentierungsvorrichtung zur Bestimmung von elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften eines Substrats, insbesondere von Knorpelgewebe in-vivo, weist eine Messsonde zur Indentierung des Substrats auf, welche ein Röhrchen und eine innerhalb des Röhrchens befestigte optische Faser umfasst, wobei das Röhrchen einen Außendurchmesser von weniger als 1 Millimeter aufweist. Des Weiteren umfasst die Indentierungsvorrichtung mindestens ein in die optische Faser eingeschriebenes Faser-Bragg-Gitter, das dazu vorgesehen ist, eine auf die Spitze der optischen Faser einwirkende Kraft zu detektieren, sowie ein piezoelektrisches Stellelement zur Positionierung der Messsonde, das mit der Messsonde mechanisch verbunden ist und das dazu ausgelegt ist, die Messsonde auf das zu vermessende Substrat zu bewegen und in das Substrat einzudrücken. Die Indentierungsvorrichtung ist dazu ausgelegt, den Vorschub der Messsonde und die auf die Spitze der optischen Faser einwirkende Kraft zu erfassen.

Indentierungsvorrichtung mit piezoelektrischem Stellelement

Die Erfindung betrifft eine Indentierungsvorrichtung zur Bestimmung von elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften eines Substrats. Des Weiteren betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Bestimmung von elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften eines Substrats.

Es ist Aufgabe der Erfindung, eine Indentierungsvorrichtung sowie ein Verfahren zur Verfügung zu stellen, die eine genaue Bestimmung von elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften eines Substrats ermöglicht.

Die Aufgabe der Erfindung wird durch eine Indentierungsvorrichtung zur Bestimmung von elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften eines Substrats gemäß Anspruch 1, durch ein Verfahren zur Bestimmung von elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften eines Substrats gemäß Anspruch 23 sowie durch ein Verfahren zur Bestimmung von elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften eines Substrats gemäß Anspruch 25 gelöst.

Eine Indentierungsvorrichtung entsprechend den Ausführungsformen der Erfindung dient zur Bestimmung von elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften eines Substrats. Die Indentierungsvorrichtung weist eine Messsonde zur Indentierung des Substrats auf, welche ein Röhrchen und eine innerhalb des Röhrchens befestigte optische Faser umfasst, wobei das Röhrchen einen Außendurchmesser von weniger als 1 Millimeter aufweist. Des Weiteren umfasst die Indentierungsvorrichtung mindestens ein in die optische Faser eingeschriebenes Faser-Bragg-Gitter, das dazu vorgesehen ist, eine auf die Spitze der optischen Faser einwirkende Kraft zu detektieren, sowie ein piezoelektrisches Stellelement zur Positionierung der Messsonde, das mit der Messsonde mechanisch verbunden ist und das dazu ausgelegt ist, die Messsonde auf das zu vermessende Substrat zu bewegen und in das Substrat einzudrücken. Die Indentierungsvorrichtung ist dazu ausgelegt, den Vorschub der Messsonde und die auf die Spitze der optischen Faser einwirkende Kraft zu erfassen.

Durch eine Indentierungsvorrichtung entsprechend den Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung wird insbesondere für sehr kleine Indentierungstiefen von weniger als 10 μm eine genaue Bestimmung der elastischen Eigenschaften

des untersuchten Gewebes ermöglicht. Dabei wird zur exakten Steuerung des Vorschubs der Messsonde ein piezoelektrisches Stellelement eingesetzt, das insbesondere bei kleinen Indentierungstiefen eine Steuerung des Vorschubs mit einer Genauigkeit im Sub-Mikrometerbereich ermöglicht. Das piezoelektrische Stellelement ermöglicht also insbesondere kleine Stellwege mit hoher Positioniergenauigkeit, kann aber darüber hinaus auch für größere Indentierungstiefen von beispielsweise einigen hundert Mikrometern oder mehr eingesetzt werden, so dass die Indentierungsvorrichtung wahlweise für Messungen mit sehr kleiner Indentierungstiefe oder für gröbere Indentierungsmessungen eingesetzt werden kann.

Diese hohe Positioniergenauigkeit bei der Steuerung des Vorschubs durch Verwendung eines piezoelektrischen Stellelements wird durch eine präzise Messung der Indentierungskraft ergänzt. Diese genaue Kraftmessung wird durch die Verwendung von mindestens einem in die Glasfaser eingeschriebenen Faser-Bragg-Gitter ermöglicht. Dabei wird die auf die Glasfaser einwirkende Indentierungskraft gemessen, indem die spektroskopische Verschiebung der Bragg-Wellenlänge des Faser-Bragg-Gitters verfolgt wird. Durch den Einsatz einer rein optischen Kraftmessmethode ist sichergestellt, dass die Indentierungsmessung nicht durch elektromagnetische Interferenz beeinträchtigt oder gestört werden kann. Darüber hinaus sind Glasfasern als Messsonden für minimalinvasive „in vivo“-Messungen am menschlichen Körper gut geeignet, unter anderem weil sie sich sehr gut sterilisieren lassen. Darüber hinaus wird durch den Einsatz von Glasfasern die Realisierung von sehr dünnen Messsonden erreicht, die perkutan (also durch die Haut hindurch) bis zum zu vermessenden Gewebe vorgeschoben werden können und eine minimalinvasive Bestimmung der elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften des Gewebes, insbesondere beispielsweise eines Knorpelgewebes, ermöglichen.

Durch die Möglichkeit, Elastizitätsveränderungen in sehr dünnen Gewebeschichten zu erfassen und quantitativ zu bestimmen, eignet sich die vorgeschlagene Indentierungsvorrichtung insbesondere für eine Früherkennung der Arthrose. Durch die Vermessung von dünnen Oberflächenschichten von Knorpelgewebe und die Erkennung von degenerativen Veränderungen kann der Zeitpunkt, zu dem die Arthrose in der Früherkennungsdiagnose erkennbar wird, nach vorne verlagert werden. Dies ermöglicht eine frühzeitige Behandlung und eine dement-sprechende Verzögerung des Krankheitsverlaufs.

Nachfolgend wird die Erfindung anhand mehrerer in der Zeichnung dargestellter Ausführungsbeispiele weiter beschrieben. Es zeigen

5 Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Indentierungsmessung an einem Knorpel des Kniegelenks;

Fig. 2 einen Querschnitt durch ein Indentierungsmessgerät;

10 Fig. 3 eine Schrägbilddarstellung eines Indentierungsmessgeräts;

Fig. 4 eine vergrößerte Darstellung des stabförmigen Messelements des Indentierungsmessgeräts;

15 Fig. 5A eine Glasfaser, in die ein Faser-Bragg-Gitter eingeschrieben ist;

Fig. 5B die Variation des Brechungsindex n entlang der Längsausdehnung der Glasfaser;

20 Fig. 6A das Spektrum der einfallenden Lichtleistung P_I als Funktion der Wellenlänge λ ;

Fig. 6B das Spektrum der reflektierten Lichtleistung P_B als Funktion der Wellenlänge λ ;

25 Fig. 6C das Spektrum der transmittierten Lichtleistung P_T als Funktion der Wellenlänge λ ;

Fig. 7 eine optische Messanordnung zur spektralen Analyse des rückreflektierten
30 Lichts;

Fig. 8A eine Darstellung der Funktionsweise eines piezoelektrischen Stellelements;

35 Fig. 8B den Zusammenhang zwischen der an das piezoelektrische Stellelement angelegten Spannung U und der dadurch bewirkten Ausdehnung Δx des Piezos;

Fig. 9A die Position x der Messsondenspitze als Funktion der Zeit;

Fig. 9B die Verstimmung der Bragg-Wellenlänge λ_B als Funktion der Zeit;

5 Fig. 9C den Verlauf der Indentierungskraft F als Funktion der Zeit;

Fig. 10 eine schematische Darstellung der Geometrie einer Indentierungsmessung;

10 Fig. 11 ein Messverfahren, bei dem der Phasenversatz zwischen der sinusförmig variierten Position x der Messsondenspitze und der Indentierungskraft F erfasst und ausgewertet wird; und

15 Fig. 12 ein Messverfahren, bei dem sich ein linearer Vorschub der Messsondenspitze mit einer sinusförmigen Variation der Position abschnittsweise abwechselt.

Im Folgenden wird ein Indentierungsmessgerät beschrieben, mit dem die elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften von Gewebe durch Eindrücken einer
20 Messsonde in das Gewebe erfasst werden können. Mittels eines derartigen Indentierungsmessgeräts lassen sich insbesondere die elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften von Knorpelgewebe bestimmen. Dies ist z.B. für die Diagnose der Arthrose von Bedeutung, bei der das Knorpelgewebe im Verlauf der Erkrankung immer weiter degeneriert. Darüber hinaus eignet sich das Indentierungsmessgerät jedoch auch zur Bestimmung der elastischen oder viskoelastischen
25 Eigenschaften von anderen Geweben oder Substraten.

In Fig. 1 ist die prinzipielle Funktionsweise eines Indentierungsmessgeräts 100 schematisch gezeigt. Das Indentierungsmessgerät 100 umfasst ein Gehäuse 101
30 mit einem stabförmigen Messelement 102. In dem Gehäuse 101 ist ein piezoelektrisches Stellelement 103 untergebracht. Das stabförmige Messelement 102 umfasst eine Messsonde, die durch das piezoelektrische Stellelement 103 auf das Gewebe zu und vom Gewebe weg bewegt werden kann. Während des Vorschubs wird die auf die Messsonde einwirkende Kraft erfasst, und aus dem Zusammenhang zwischen Vorschub und Kraft können dann die elastischen oder viskoelastischen
35 Eigenschaften des Gewebes hergeleitet werden.

In Fig. 1 wird das Indentierungsmessgerät 100 zur Bestimmung der elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften eines Gelenkknorpels 104 am Oberschenkelknochen 105 des menschlichen Kniegelenks eingesetzt. In Fig. 1 sind darüber hinaus die Kniescheibe 106, der Meniskus 107, das Schienbein 108 und das Wadenbein 109 zu erkennen.

Mittels des Indentierungsmessgeräts 100 können die elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften des Gelenkknorpels 104 minimalinvasiv bestimmt werden. Hierzu wird das stabförmige Messelement 102 mit der Messsonde durch die Haut hindurch bis zur Oberfläche des Gelenkknorpels 104 vorgeschoben. Anschließend wird die Indentierungsmessung in vivo vorgenommen. Die Messsonde wird durch das piezoelektrische Stellelement 103 vorgeschoben und in den Gelenkknorpel 104 eingedrückt. Während des Eindrückens wird die Kraft erfasst, die beim Eindrücken auf die Messsonde einwirkt. Aus dem Zusammenhang zwischen Vorschub und Kraft können dann die elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften des Gelenkknorpels 104 hergeleitet werden.

In Fig. 2 ist einen Querschnitt durch ein Indentierungsmessgerät gezeigt, wobei insbesondere die Struktur des stabförmigen Messelements 102 erkennbar ist. Das stabförmige Messelement 102 umfasst ein äußeres Führungsröhrchen 200, welches vorzugsweise aus Metall besteht. Das äußere Führungsröhrchen 200 wird am Gehäuse 101 befestigt. Hierzu kann das äußere Führungsröhrchen 200 z.B. mittels eines äußeren Flansches 201 in einem Bajonett- oder Schraubverschluss am vorderen Ende des Gehäuses 101 befestigt werden. Das äußere Führungsröhrchen 200 weist vorzugsweise einen Außendurchmesser von z.B. 0,6 mm bis 1 mm auf, wobei eventuell auch kleinere Außendurchmesser möglich wären. Je kleiner der Außendurchmesser des äußeren Führungsröhrchens 200 ist, desto besser eignet sich das Indentierungsmessgerät für die minimalinvasive Diagnostik.

Das äußere Führungsröhrchen 200 dient als Führungshülse für die eigentliche Messsonde, die innerhalb des äußeren Führungsröhrchens 200 verschieblich gelagert ist. Die Messsonde besteht aus einem Röhrchen 202 und einer im Inneren des Röhrchens 202 angebrachten ersten Glasfaser 206, die zur Erfassung der beim Eindrücken der Messsonde in das Gewebe auftretenden Kraft dient.

Das Röhrchen 202 besteht vorzugsweise aus Metall und kann z.B. einen Außendurchmesser von 250 μm und einen Innendurchmesser von 140 μm aufweisen. Das Röhrchen 202 weist einen inneren Flansch 203 auf. Über den inneren Flansch 203 kann das Röhrchen 202 z.B. mittels eines Bajonett- oder Schraubverschlusses mit einer Halterungsscheibe 204 mechanisch verbunden werden, die ihrerseits mit der Stirnseite des piezoelektrischen Stellelements 103 verbunden ist. Angetrieben durch das piezoelektrische Stellelement 103 wird die Halterungsscheibe 204 mit der daran befestigten Messsonde hin- und herbewegt, wie dies durch den Doppelpfeil 205 veranschaulicht ist. Dadurch wird die Messsonde innerhalb des äußeren Führungsröhrchens 200 hin- und herbewegt. Auf diese Weise ist es möglich, die Messsonde mittels des piezoelektrischen Stellelements 103 aus dem äußeren Führungsröhrchen 200 herauszubewegen und in das zu vermessende Gewebe einzudrücken.

Die Messsonde umfasst das Röhrchen 202 und die darin angebrachte erste Glasfaser 206. Die erste Glasfaser 206 ist als Kraftaufnehmer ausgebildet und dient zur Erfassung der beim Eindringen der Messsonde in das Gewebe auftretenden Kraft. Die erste Glasfaser 206 kann beispielsweise einen Außendurchmesser von ca. 125 μm aufweisen. Da das Röhrchen 202 z.B. einen Innendurchmesser von 140 μm aufweist, kann die erste Glasfaser in das Röhrchen 202 eingeschoben werden. Die erste Glasfaser 206 wird mit Hilfe einer hinteren Verklebung 207 und einer vorderen Verklebung 208 mechanisch mit dem Röhrchen 202 verbunden. Auf diese Weise wird die erste Glasfaser 206 durch das Röhrchen 202 fixiert und stabilisiert.

Zur Bestimmung der elastischen Eigenschaften des jeweiligen Gewebes wird die beim Eindringen auf die Spitze der ersten Glasfaser 206 wirkende Kraft 210 erfasst. Die Bestimmung dieser Kraft 210 erfolgt bei dem in Fig. 2 gezeigten Indentierungsmessgerät mit Hilfe von einem oder mehreren Faser-Bragg-Gittern, die in die erste Glasfaser 206 eingeschrieben sind. Derartige Faser-Bragg-Gitter verursachen eine Reflexion des einfallenden Lichts bei einer Bragg-Wellenlänge λ_B . Wenn die Kraft 210 auf die erste Glasfaser 206 einwirkt, bewirkt diese Kraft 210 eine Stauchung der ersten Glasfaser 206, was zu einer entsprechenden Verringerung der Gitterkonstante des Faser-Bragg-Gitters führt. Durch diese Stauchung verschiebt sich die Wellenlänge λ_B des reflektierten Lichts. Diese Verschiebung der Bragg-Wellenlänge stellt ein Maß für die auf die erste Glasfaser 206 einwirkende Kraft 210 dar.

Bei dem in Fig. 2 gezeigten Beispiel ist in der Nähe der Spitze der ersten Glasfaser 206 ein erstes Faser-Bragg-Gitter 209 eingeschrieben. Wenn nun beim Indentieren eines Gewebes die Kraft 210 auf die Spitze der ersten Glasfaser 206 ein-
wirkt, dann wird das erste Faser-Bragg-Gitter 209 infolge dieser Krafteinwirkung
gestaucht. Diese Stauchung des ersten Faser-Bragg-Gitters 209 kann anhand
der Verschiebung der reflektierten Wellenlänge detektiert und ausgewertet wer-
den. Dadurch ist es möglich, die während der Indentierung auf die Spitze der
ersten Glasfaser 206 einwirkende Kraft 210 in ihrem zeitlichen Verlauf zu erfassen.
10

Zusätzlich zum ersten Faser-Bragg-Gitter 209 kann zwischen der hinteren Verklebung 207 und der vorderen Verklebung 208 ein zweites Faser-Bragg-Gitter 211 angeordnet sein, dessen Gitterkonstante sich von der Gitterkonstante des
ersten Faser-Bragg-Gitters 209 unterscheidet. Die Wellenlänge des vom zweiten
Faser-Bragg-Gitter 211 reflektierten Lichts unterscheidet sich daher von der Wellenlänge, die vom ersten Faser-Bragg-Gitter 209 reflektiert wird. Da das zweite
Faser-Bragg-Gitter 211 hinter der vorderen Verklebung 208 angeordnet ist, wird
es durch die auf die Sondenspitze einwirkende Kraft nicht gestaucht. Das zweite
Faser-Bragg-Gitter 211 ist so angeordnet, dass es dazu verwendet werden kann,
die Temperaturabhängigkeit der von den beiden Faser-Bragg-Gittern 209, 211
reflektierten Wellenlängen zu erfassen und rechnerisch die Temperaturabhängigkeit des ersten Faser-Bragg-Gitters 209 zu kompensieren. Das zweite Faser-
Bragg-Gitter 211 dient also zur Durchführung einer Referenzmessung bei einer
zweiten Wellenlänge, die nur von der Temperatur, nicht aber von der einwirkenden Kraft 210 abhängt.
20
25

Dabei ist es von Vorteil, wenn das zweite Faser-Bragg-Gitter 211 dicht hinter der vorderen Verklebung 208 angeordnet ist, also möglichst weit vorn im vorderen
Bereich der ersten Glasfaser 206. Dadurch ist gewährleistet, dass nach dem Einschieben des stabförmigen Messelements 102 in den Körper des Patienten auch
das zweite Faser-Bragg-Gitter 211 möglichst rasch auf Körpertemperatur erwärmt wird und somit auf dieselbe Temperatur wie das erste Faser-Bragg-Gitter 209 gebracht wird.
30

Bei der in Fig. 2 gezeigten Lösung ist die erste Glasfaser 206 über zwei Gradientenindex-Linsen bzw. GRIN-Linsen 212, 213 mit einer zweiten Glasfaser 214 op-
35

tisch gekoppelt. Über die zweite Glasfaser 214 und die GRIN-Linsen 212, 213 kann Licht in die erste Glasfaser 206 eingekoppelt werden. Gewisse spektrale Teilbereiche dieses Lichts werden durch das erste Faser-Bragg-Gitter 209 und das zweite Faser-Bragg-Gitter 211 zurückreflektiert. Die zurückreflektierten Lichtkomponenten können über die beiden GRIN-Linsen 212, 213 und die zweite Glasfaser 214 ausgekoppelt und spektral analysiert werden.

Die optische Kopplung zwischen der ersten Glasfaser 206 und der zweiten Glasfaser 214 über die beiden GRIN-Linsen 212, 213 ermöglicht es, das in Fig. 2 gezeigte Indentierungsmessgerät auseinanderzubauen. Zum Auseinanderbauen des Indentierungsmessgeräts wird zunächst das äußere Führungsröhrchen 200 abgenommen. Hierzu wird der äußere Flansch 201 aus dem Bajonett- oder Schraubverschluss am Gehäuse 101 gelöst, anschließend kann das äußere Führungsröhrchen 200 abgezogen werden. Als nächstes wird die Messsonde abgenommen. Hierzu wird der innere Flansch 203 aus dem Bajonett- oder Schraubverschluss an der Halterungsscheibe 204 gelöst. Anschließend kann das Röhrchen 202 zusammen mit der darin befindlichen GRIN-Linse 213 und der eingeklebten ersten Glasfaser 206 abgenommen werden. Dadurch ist es möglich, sämtliche Bestandteile des stabförmigen Messelements 102 zu reinigen und zu desinfizieren.

Nach der Reinigung wird das Indentierungsmessgerät wieder zusammengebaut. Hierzu wird zunächst der innere Flansch 203 des Röhrchens 202 in den zugehörigen Bajonett- oder Schraubverschluss der Halterungsscheibe 204 eingedreht. Anschließend wird das äußere Führungsröhrchen 200 auf das Röhrchen 202 aufgeschoben, und der äußere Flansch 201 wird in den zugehörigen Bajonett- oder Schraubverschluss am vorderen Ende des Gehäuses 101 eingedreht.

Bei dem in Fig. 2 gezeigten Indentierungsmessgerät wird zur Erfassung der Indentierungskraft eine optische Kraftdetektion mit Hilfe von einem oder mehreren Faser-Bragg-Gittern eingesetzt. Dabei wird die optische Faser sowohl als Sensorelement als auch zur Signalübertragung genutzt. Die Signalgewinnung und -übertragung erfolgt daher ohne den Einsatz von Elektrizität und kann daher durch elektromagnetische Störungen nicht beeinträchtigt werden. Dies ist insbesondere von Bedeutung bei der Anwesenheit von starken magnetischen Feldern, wie sie beispielsweise innerhalb von Magnetresonanztomographen zum Einsatz kommen.

Ein weiterer Vorteil ist, dass die Glasfasern einen sehr geringen Durchmesser von beispielsweise 125 μm aufweisen, so dass eine minimalinvasive Diagnostik ermöglicht wird. Es sind auch Spezialfasern erhältlich, die noch kleinere Faserdurchmesser aufweisen (beispielsweise 80 μm). Das Glasmaterial der Sensorfasern ist biokompatibel. Wie weiter oben beschrieben, kann das Indentierungsmessgerät auf einfache Weise in seine Bestandteile zerlegt werden, so dass die Komponenten des stabförmigen Messelements 102 gereinigt werden können. Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung von Faser-Bragg-Gittern ist, dass in eine einzige optische Faser unterschiedliche Faser-Bragg-Gitter eingeschrieben werden können, welche Licht von unterschiedlicher Wellenlänge reflektieren. Durch einen derartigen Wellenlängenmultiplex können mehrere Faser-Bragg-Gitter in die gleiche Glasfaser integriert werden, so dass beispielsweise Temperatur und Dehnung getrennt voneinander erfasst werden können.

Bei dem in Fig. 2 gezeigten Indentierungsmessgerät wird ein piezoelektrisches Stellelement 103 als Vortrieb für die Messsonde verwendet. Ein derartiges piezoelektrisches Stellelement 103 ermöglicht einen Vorschub der als Kraftaufnehmer dienenden ersten Glasfaser 206 im Bereich von ca. 0 bis 500 μm mit einer Stellgenauigkeit im Sub-Mikrometerbereich. Diese hohe Positionierungsgenauigkeit ermöglicht es, bereits kleine Veränderungen der elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften an der Oberfläche eines Gewebes zu detektieren. Dies ist insbesondere bei der Diagnose der Arthrose von Bedeutung, wo im Frühstadium zunächst eine leichte Veränderung der elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften in einer dünnen Oberflächenschicht des Knorpelgewebes auftritt.

Der Verlauf der Arthrose wird in vier unterschiedliche Stadien eingeteilt. Das erste Stadium der Arthrose ist durch Rauigkeiten und eine Ausdünnung der Knorpelschicht gekennzeichnet. Durch die hohe Stellgenauigkeit, die durch das piezoelektrische Stellelement 103 ermöglicht wird, können sehr hoch aufgelöste Indentierungen mit weniger als 10 μm Eindringtiefe durchgeführt werden. Im Unterschied zu herkömmlichen Indentoren des Stands der Technik, die typischerweise Indentierungstiefen von 80 μm und mehr aufweisen, wird durch den piezoelektrischen Antrieb eine Untersuchung von Oberflächenbereichen in einem Dickenbereich von weniger als 10 μm ermöglicht. Dabei können die in diesen dünnen Oberflächenschichten auftretenden Veränderungen der Elastizitätseigenschaften durch die simultane Erfassung von Position und Kraft aufgelöst werden.

Dies ermöglicht es, eine Degradation der äußersten Schichten des Knorpels zu einem früheren Zeitpunkt zu erkennen, als dies mit den bisherigen deutlich größeren Messverfahren möglich war. Je früher die Krankheit erkannt werden kann, desto besser kann die Degeneration des Knorpels verzögert werden, so dass die Lebensqualität des Patienten länger erhalten werden kann. Da es sich bei dem hier vorgestellten Indentierungsverfahren um eine minimalinvasive Prozedur handelt, ist der diagnostische Eingriff für den Patienten mit vergleichsweise geringen Belastungen verbunden.

In Fig. 3 ist ein Beispiel eines Indentierungsmessgeräts in Schrägbildansicht gezeigt, wobei gleiche oder funktionell entsprechende Merkmale mit denselben Bezugszeichen wie in Fig. 1 und Fig. 2 versehen sind.

Bei dem in Fig. 3 gezeigten Indentierungsmessgerät ist das Gehäuse als zweiteiliges Gehäuse ausgebildet und umfasst einen stationären Teil 300 sowie einen beweglichen Teil 301, der innerhalb des stationären Teils 300 beweglich gelagert ist. Am hinteren Ende des stationären Teils 300 ist eine Feder 302 angeordnet, die den beweglichen Teil 301 des Gehäuses nach vorne drückt. Während der Durchführung der Indentierungsmessung hält die Bedienperson das Indentierungsmessgerät am stationären Teil 300 fest und drückt das stabförmige Messelement 102 gegen das zu vermessende Gewebe. Dabei wird der bewegliche Teil 301 mit dem stabförmigen Messelement 102 durch die Feder 302 mit einer konstanten Anpresskraft 303 gegen das zu vermessende Gewebe gedrückt. Dadurch liegt der vordere Bereich des äußeren Führungsröhrchens 200 mit konstanter Anpresskraft 303 am zu vermessenden Gewebe an. Dadurch werden definierte und reproduzierbare Ausgangsbedingungen für die Durchführung der Indentierungsmessung geschaffen.

Das äußere Führungsröhrchen 200 ist über den äußeren Flansch 201 am vorderen Ende des beweglichen Teils 301 des Gehäuses befestigt. Im Inneren des äußeren Führungsröhrchens 200 ist die Messsonde angeordnet, die das Röhrchen 202 und die darin befestigte erste Glasfaser 206 umfasst. Die Messsonde kann mittels des piezoelektrischen Stellelements 103 innerhalb des äußeren Führungsröhrchens 200 vor- und zurückbewegt werden. Dazu ist der innere Flansch 203 des Röhrchens 202 an der Halterungsscheibe 204 befestigt, die ihrerseits mit der Stirnseite des piezoelektrischen Stellelements 103 verbunden ist. Inner-

halb des Röhrchens 202 ist die erste Glasfaser 206 angebracht, die über die beiden Verklebungen 207, 208 mit dem Röhrchen 202 verbunden ist. Dadurch wird die erste Glasfaser 206 durch das Röhrchen 202 fixiert und stabilisiert. Das erste Faser-Bragg-Gitter 209 ist zwischen der vorderen Verklebung 208 und der Spitze
5 der ersten Glasfaser 206 angeordnet. Wenn die Spitze der ersten Glasfaser 206 gegen das zu vermessende Gewebe gedrückt wird, wird das erste Faser-Bragg-Gitter 209 entsprechend gestaucht, und die Wellenlänge des rückreflektierten Lichts verschiebt sich. Das erste Faser-Bragg-Gitter 209 dient daher zur Bestimmung der Indentierungskraft.

10 Das zweite Faser-Bragg-Gitter 211 ist hinter der vorderen Verklebung 208 angeordnet und wird daher durch die bei der Indentierung einwirkende Kraft nicht gestaucht. Das zweite Faser-Bragg-Gitter 211 dient als Referenzsensor und kann zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit eingesetzt werden.

15 Über die beiden GRIN-Linsen 212, 213 ist die erste Glasfaser 206 mit einer zweiten Glasfaser 214 optisch gekoppelt. Über die zweite Glasfaser 214 kann Licht in die erste Glasfaser 206 eingekoppelt werden. Darüber hinaus kann das von den Faser-Bragg-Gittern 209, 211 rückreflektierte Licht über die zweite Glasfaser 214
20 ausgekoppelt werden.

In Fig. 4 ist das vordere Ende des stabförmigen Messelements 102 noch einmal vergrößert herausgezeichnet. Zu erkennen sind das äußere Führungsröhrchen 200, das Röhrchen 202 sowie die erste Glasfaser 206. Im Unterschied zu Fig. 3
25 befindet sich die vordere Verklebung 400 in Fig. 4 unmittelbar am vorderen Ende des Röhrchens 202. Das erste Faser-Bragg-Gitter 209 befindet sich zwischen der vorderen Verklebung 400 und dem vorderen Ende der ersten Glasfaser 206, während das zweite Faser-Bragg-Gitter 211 hinter der vorderen Verklebung 400 angeordnet ist.

30 Im Folgenden soll anhand der Fig. 5A und Fig. 5B sowie Fig. 6A bis 6C die Struktur und Funktionsweise eines Faser-Bragg-Gitters beschrieben werden. Hierzu ist in Fig. 5A eine Glasfaser 500 gezeigt, die einen Faserkern (core) 501 sowie einen Mantel (cladding) 502 aufweist, wobei der Mantel 502 den Faserkern 501
35 rundum umschließt. Der Brechungsindex n_2 des Faserkerns 501 ist dabei größer als der Brechungsindex n_1 des Mantels 502, so dass also gilt: $n_2 > n_1$. Durch diese Bedingung wird eine Lichtausbreitung innerhalb der Glasfaser 500 ermöglicht.

Die in Fig. 5A gezeigte Glasfaser 500 weist ein Faser-Bragg-Gitter 503 auf. Als Faser-Bragg-Gitter bezeichnet man ein in die Faser eingeschriebenes optisches Interferenzfilter, das eine periodische Abfolge von Bereichen 504 mit hohem Brechungsindex und Bereichen 505 mit niedrigem Brechungsindex aufweist. Die Bereiche 504 mit hohem Brechungsindex n_3 sind in Fig. 5A schraffiert eingezeichnet. Die dazwischenliegenden Bereiche 505 weisen einen niedrigeren Brechungsindex n_2 auf. Als Gitterperiode Λ bezeichnet man den Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Bereichen mit hohem Brechungsindex n_3 .

In Fig. 5B ist die Variation des Brechungsindex n entlang der Längsrichtung der Glasfaser 500 aufgetragen. Anhand von Fig. 5B ist erkennbar, dass die schraffiert eingezeichneten Bereiche 504 einen Brechungsindex n_3 aufweisen, der höher ist als der Brechungsindex n_2 der dazwischenliegenden Bereiche 505.

Das Faser-Bragg-Gitter 503 wirkt als optisches Interferenzfilter, das einfallendes Licht einer bestimmten Wellenlänge reflektiert. Die Mittenwellenlänge des rückreflektierten Lichts wird als "Bragg-Wellenlänge" λ_B bezeichnet. Die Bragg-Wellenlänge λ_B des Faser-Bragg-Gitters ergibt sich aus der Bragg-Bedingung:

$$\lambda_B = n_{\text{eff}} \cdot 2\Lambda \quad (1)$$

In dieser Formel bezeichnet λ_B die Wellenlänge des rückreflektierten Lichts im Vakuum, Λ die Gitterperiode des Faser-Bragg-Gitters und n_{eff} den effektiven Brechungsindex. Der effektive Brechungsindex n_{eff} hängt von der Geometrie (Kern- und Manteldurchmesser) des Wellenleiters, von den Brechungsindizes n_1 , n_2 , n_3 und von den Wellenmoden ab. Die spektrale Breite des rückreflektierten Lichts hängt von der Länge des Faser-Bragg-Gitters und der Stärke der Brechungsindexänderung zwischen den benachbarten Brechungsindexbereichen ab.

Zur Veranschaulichung der Bragg-Beziehung kann man sich vorstellen, dass das Faser-Bragg-Gitter aus vielen aufeinanderfolgenden Abschnitten der Länge $\Lambda = \lambda/2$ zusammengesetzt ist. Jeder Abschnitt der Länge $\Lambda = \lambda/2$ setzt sich aus einem ersten $\lambda/4$ -Abschnitt mit hohem Brechungsindex n_3 und einem zweiten $\lambda/4$ -Abschnitt mit niedrigem Brechungsindex n_2 zusammen. An jeder Grenzfläche zwischen den Abschnitten wird ein Teil der eingespeisten Amplitude durch die Fresnel-Reflexion reflektiert, so dass die reflektierte Welle am Ende jedes $\lambda/4$ -

Abschnitts entweder einen Phasensprung von 0° oder von 180° erfährt. Wenn die Bragg-Bedingung erfüllt ist, kommt es infolge der Mehrfachreflexion an den verschiedenen Grenzflächen bei der reflektierten Welle zu konstruktiver Interferenz, und die an den einzelnen Grenzflächen rückreflektierten Teilamplituden überlagern sich zu einer reflektierten Welle.

In den Fig. 6A, 6B und 6C sind die einfallende Leistung P_I , die reflektierte Leistung P_B und die durchgelassene Leistung P_T jeweils als Funktion der Wellenlänge aufgetragen.

Fig. 6A zeigt das Spektrum der einfallenden Leistung P_I als Funktion der Wellenlänge λ . Es ist zu erkennen, dass das einfallende Licht relativ breitbandig ist und eine Vielzahl von unterschiedlichen Lichtwellenlängen umfasst. Als Lichtquelle kann beispielsweise eine Weißlichtquelle eingesetzt werden.

Fig. 6B zeigt das Spektrum der vom Faser-Bragg-Gitter 503 reflektierten Leistung P_B als Funktion der Wellenlänge λ . Es ist zu erkennen, dass Wellenlängen, die innerhalb der Filterbandbreite um die Bragg-Wellenlänge λ_B liegen, vom Faser-Bragg-Gitter 503 zurückreflektiert werden.

Fig. 6C zeigt das Spektrum der durchgelassenen Leistung P_T als Funktion der Wellenlänge λ . Es ist zu erkennen, dass sowohl der Teil des einfallenden Spektrums unterhalb der Bragg-Wellenlänge λ_B als auch der Teil des einfallenden Spektrums oberhalb der Bragg-Wellenlänge λ_B durchgelassen werden, wohingegen diejenigen Wellenlängen, die innerhalb der Filterbandbreite um λ_B liegen, nicht durchgelassen werden. Diese Wellenlängen fehlen daher in der durchgelassenen Leistung P_T .

Das Faser-Bragg-Gitter 503 kann beispielsweise mit Hilfe von UV-Licht in die Glasfaser 500 eingeschrieben werden, um auf diese Weise die charakteristische Abfolge von Bereichen mit hohem und niedrigem Brechungsindex zu erzeugen. Für die Herstellung des Faser-Bragg-Gitters 503 kann beispielsweise ein Excimerlaser mit einer Wellenlänge $\lambda = 248$ nm verwendet werden. Durch das UV-Licht des Excimerlasers kann die für das Faser-Bragg-Gitter charakteristische Modulation des Brechungsindex innerhalb des Faserkerns 501 der Glasfaser 500 erzeugt werden.

Die Mittenwellenlänge λ_B der Filterbandbreite eines Faser-Bragg-Gitters wird sowohl durch eine mechanische Stauchung oder Dehnung als auch durch eine Temperaturänderung beeinflusst. Wenn beispielsweise infolge einer Krafteinwirkung eine Stauchung des Faser-Bragg-Gitters auftritt, dann verringert sich die Gitterperiode Λ des Faser-Bragg-Gitters, und dementsprechend verringert sich auch die Bragg-Wellenlänge λ_B .

Eine Temperaturänderung dagegen führt zu zwei unterschiedlichen Effekten: zum einen führt die thermische Ausdehnung zu einer Veränderung der Gitterperiode, die durch den thermischen Ausdehnungskoeffizienten α der Glasfaser beschrieben werden kann. Zum andern besitzt der Brechungsindex n eine Temperaturabhängigkeit, so dass eine Temperaturänderung auch zu einer Änderung der Brechungsindizes n_1 , n_2 und n_3 und somit auch von n_{eff} führt. Beide Effekte tragen zur Temperaturabhängigkeit der Bragg-Wellenlänge λ_B bei. Insgesamt kann die Verschiebung $\Delta\lambda_B$ der Bragg-Wellenlänge in Abhängigkeit von der Dehnung ε und der Temperaturänderung ΔT durch folgende Formel beschrieben werden:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \cdot \varepsilon + (\alpha + \xi) \cdot \Delta T \quad (2)$$

In dieser Formel bezeichnet λ_B die Bragg-Wellenlänge, und $\Delta\lambda_B$ die Änderung der Bragg-Wellenlänge. ε bezeichnet die (dimensionslose) Dehnung oder Stauchung des Glasfasermaterials, und ΔT bezeichnet die Temperaturänderung, α den thermischen Ausdehnungskoeffizienten, p_e den effektiven elektrooptischen Koeffizienten (0,211) und ξ den thermooptischen Koeffizienten.

In Fig. 7 ist das Indentierungsmessgerät 100 zusammen mit einer zugehörigen optischen Messanordnung gezeigt. Das Indentierungsmessgerät 100 umfasst das Gehäuse 101 sowie das stabförmige Messelement 102 mit der Messsonde, die durch das im Gehäuse 101 angeordnete piezoelektrische Stellelement 103 vor- und zurückbewegbar ist. Die Messsonde umfasst eine Glasfaser mit den beiden Faser-Bragg-Gittern 209 und 211.

Der optische Messaufbau, der häufig auch als "optischer Interrogator" bezeichnet wird, umfasst eine Lichtquelle 700, die über eine optische Faser 701, einen Faserkoppler 702 und eine optische Faser 703 Licht in das Indentierungsmessgerät

100 einspeist. Als Lichtquelle 700 kann ein durchstimmbarer Laser eingesetzt werden, wobei die Frequenz des emittierten Laserlichts innerhalb eines bestimmten Frequenzbereichs periodisch durchgefahren wird. Alternativ dazu kann als Lichtquelle 700 eine Weißlichtquelle verwendet werden, deren Licht ein ganzes
5 Frequenzband von unterschiedlichen spektralen Lichtkomponenten enthält. Das emittierte Licht wird über die optische Faser 701, den Faserkoppler 702 und die optische Faser 703 in das Indentierungsmessgerät 100 eingespeist. Das erste Faser-Bragg-Gitter 209 reflektiert das einfallende Licht bei einer ersten Bragg-Wellenlänge, während das als Referenz dienende zweite Faser-Bragg-Gitter 211
10 Licht bei einer zweiten Bragg-Wellenlänge reflektiert. Die rückreflektierten spektralen Komponenten gelangen über die optische Faser 703, den Faserkoppler 702 und eine optische Faser 704 zu einer Detektionseinheit 705, die beispielsweise mittels einer Fotodiode realisiert sein kann. Die Detektionseinheit 705 ist dazu ausgelegt, die Spektralkomponenten des rückreflektierten Signals auszuwerten.
15 Anhand der Wellenlängen der rückreflektierten Spektralkomponenten kann die auf die Messsonde einwirkende Kraft als Funktion der Zeit verfolgt und aufgezeichnet werden.

In Fig. 8A ist das piezoelektrische Stellelement 103 dargestellt. Das piezoelektrische Stellelement 103 ist als zylinderförmiges Piezoelement ausgebildet, welches
20 ein Loch 800 für die Durchführung der zweiten Glasfaser 214 aufweist. Das piezoelektrische Stellelement 103 dient als Stellglied für das Röhrchen 202 und die darin befestigte erste Glasfaser 206. Wenn an das piezoelektrische Stellelement 103 z.B. eine Spannung U im Bereich bis zu 400 V angelegt wird, so führt dies
25 zu einer entsprechenden Ausdehnung des piezoelektrischen Stellelements 103 in lateraler Richtung, wie dies durch den Pfeil 801 in Fig. 8A veranschaulicht ist. Über die angelegte Spannung U lässt sich der Vorschub des Röhrchens 202 und der darin angebrachten ersten Glasfaser 206 mit hoher Genauigkeit steuern.

30 Der Zusammenhang zwischen der Spannung U und der Ausdehnung Δx des piezoelektrischen Stellelements 103 ist in Fig. 8B gezeigt. Entlang der Rechtsachse ist die angelegte Spannung U aufgetragen, die sich z.B. im Bereich zwischen 0 V und 400 V bewegt. Entlang der Hochachse ist die durch die Spannung bewirkte Auslenkung Δx des piezoelektrischen Stellelements 103 aufgetragen, welche sich
35 beispielsweise im Bereich zwischen 0 und 100 μm bewegen kann. Wenn die Spannung von 0 V auf einen Wert von z.B. einige zehn Volt oder einige hundert Volt erhöht wird, dann folgt die Ausdehnung des Piezos der Kurve 802. Wenn die

Ausdehnung Δx am Punkt 803 einen gewissen Wert erreicht hat und die Spannung dann wieder reduziert wird, dann folgt die Ausdehnung des piezoelektrischen Stellelements 103 der Kurve 804, die sich von der Kurve 802 unterscheidet. Das Ausdehnungsverhalten des piezoelektrischen Stellelements 103 weist
5 also eine gewisse Hysterese auf.

Um die durch diese Hysterese verursachte Beeinträchtigung der Stellgenauigkeit zumindest zum Teil auszugleichen, kann die am Piezo anliegende Spannung mittels eines Regelkreises geregelt werden. Dabei kann die aktuelle Position des Piezo beispielsweise mittels eines Dehnungsmessstreifens oder mittels eines kapazitiven Abstandssensors oder mittels eines dritten Faser-Bragg-Gitters erfasst werden, und in Abhängigkeit von dieser aktuellen Position wird die angelegte Spannung mittels des Regelkreises so nachgeregelt, dass eine gewünschte Sollposition erreicht wird. Durch den Einsatz eines derartigen rückgekoppelten piezoelektrischen Stellelements, welches mittels eines Regelkreises betrieben wird, lässt sich
10 die ohnehin gute Stellgenauigkeit des piezoelektrischen Stellelements noch weiter verbessern.

Das piezoelektrische Stellelement 103 kann als einzelnes Element aus piezokeramischem Material ausgebildet sein. Alternativ dazu kann das piezoelektrische Stellelement 103 aus einem Stapel (Stack) von mehreren einzelnen Stapelementen aus piezokeramischem Material aufgebaut sein, wobei jedes Stapelement einzeln ansteuerbar ist und wobei sich die Ausdehnungen der einzelnen Stapelemente addieren. Die Stapelemente werden dabei in der Regel alle mit derselben Spannung beaufschlagt. Die Vorteile eines aus einem Stapel von mehreren Stapelementen aufgebauten Piezos gegenüber einem einstückigen Piezo sind ein größerer Stellweg, eine verbesserte Positioniergenauigkeit sowie eine geringere Hysterese.
20

Damit eine beginnende Knorpeldegeneration in einer nur wenige μm dicken oberflächennahen Knorpelschicht erkannt werden kann, sollte sich auch die Indentierungstiefe im Bereich von einigen μm bewegen. Dies ist mit einem piezoelektrischen Stellelement 103 ohne Probleme möglich. Wenn an das piezoelektrische Stellelement 103 beispielsweise Spannungen im Bereich von 0 bis ca. 40 V angelegt werden, erhält man eine zugehörige Indentierungstiefe von 0 μm bis ca. 10 μm mit einer Stellgenauigkeit im Sub-Mikrometerbereich. Mit einer Ansteuer-
35 spannung U in diesem Spannungsbereich lassen sich daher die benötigten In-

dentierungstiefen von weniger als 10 μm realisieren, die zur Erkennung der Arthrose im Frühstadium benötigt werden.

Der Ablauf einer Indentierungsmessung ist in den Fig. 9A bis 9C veranschaulicht. Fig. 9A zeigt die Auslenkung x des piezoelektrischen Stellelements als Funktion der Zeit. Zwischen den Zeitpunkten 900 und 901 wird die am piezoelektrischen Stellelement 103 anliegende Spannung erhöht, so dass man eine lineare Auslenkung des piezoelektrischen Stellelements erhält. Zwischen den Zeitpunkten 900 und 901 wird daher das Röhrchen 202 mit der darin befestigten ersten Glasfaser 206 gleichmäßig nach vorne geschoben. Zwischen den Zeitpunkten 901 und 902 wird die am piezoelektrischen Stellelement 103 anliegende Spannung wieder reduziert, die Auslenkung des Piezos wird wieder linear zurückgefahren.

Die während des Vortriebs des Piezos auf die Messspitze wirkende Kraft wird mittels des ersten Faser-Bragg-Gitters 209 erfasst. Wenn eine Kraft auf die Messspitze einwirkt, wird das erste Faser-Bragg-Gitter 209 dementsprechend gestaucht, und die Bragg-Wellenlänge λ_B verschiebt sich zu kleineren Wellenlängen hin. In Fig. 9B ist zu der in Fig. 9A gezeigten Piezoauslenkung ein möglicher zugehöriger Verlauf der Bragg-Wellenlänge λ_B des ersten Faser-Bragg-Gitters 209 als Funktion der Zeit aufgetragen. Die Bragg-Wellenlänge λ_B des ersten Faser-Bragg-Gitters 209 bleibt bis zum Zeitpunkt 903 konstant. Der Zeitpunkt 903 bezeichnet den sogenannten Kontaktpunkt, bei dem die Spitze der vorgeschobenen Messsonde die Oberfläche des Knorpelgewebes erreicht. Zwischen dem Zeitpunkt 903 und dem Zeitpunkt 901 wird die Messsonde noch weiter vorgeschoben und somit in das Knorpelgewebe eingedrückt. Dementsprechend beginnt eine immer größer werdende Indentierungskraft auf die Messsondenspitze zu wirken. Dies führt zu einer entsprechenden Stauchung des ersten Faser-Bragg-Gitters 209. Das erste Faser-Bragg-Gitter 209 wird infolge der einwirkenden Kraft gestaucht, und dementsprechend verringert sich die Bragg-Wellenlänge λ_B des rückreflektierten Lichts. Die zunehmende Verringerung der Bragg-Wellenlänge λ_B zwischen den Zeitpunkten 903 und 901 ist in Fig. 9B zu erkennen. Ab dem Zeitpunkt 901 wird die Messsonde wieder zurückbewegt. Dementsprechend verringert sich die auf das erste Faser-Bragg-Gitter 209 einwirkende Kraft, und zwischen den Zeitpunkten 901 und 904 kehrt die Bragg-Wellenlänge λ_B wieder zu ihrem ursprünglichen Wert zurück.

In Fig. 9C ist die auf die Spitze der Sonde einwirkende Kraft F als Funktion der Zeit dargestellt. Je geringer die in Fig. 9B dargestellte Bragg-Wellenlänge λ_B ist, desto höher ist die auf die Sondenspitze einwirkende Kraft F . Es muss kein linearer Zusammenhang zwischen dem Vorschub und der Kraft bestehen.

5

Aus dem in den Fig. 9A bis 9C gezeigten Zusammenhang zwischen Vorschub und Kraft können Messparameter, wie möglicherweise ein Elastizitätsmodul E des untersuchten Gewebes, abgeleitet werden. Im Folgenden soll das zur Berechnung verwendete Modell kurz diskutiert werden. Die hierzu verwendete Terminologie ist anhand von Fig. 10 veranschaulicht.

10

Fig. 10 zeigt, wie die Spitze der ersten Glasfaser 206 in das zu untersuchende Gewebe 1000 eingedrückt wird. Der Radius an der Spitze der ersten Glasfaser 206 ist mit a bezeichnet, und die Tiefe der Indentierung wird mit δ bezeichnet. Infolge der Eindrückung wirkt eine Kraft F auf die Spitze der ersten Glasfaser 206 ein. Infolge dieser Indentierungskraft F kommt es zu einer entsprechenden Verschiebung $\Delta\lambda_B$ der Bragg-Wellenlänge. Das (vorbekannte) Elastizitätsmodul der ersten Glasfaser 206 wird mit E_{FBG} bezeichnet, wohingegen das zu bestimmende Elastizitätsmodul des untersuchten Gewebes 1000 mit E bezeichnet ist.

20

Zunächst soll der Zusammenhang zwischen der Indentierungskraft F , der Stauchung der ersten Glasfaser 206 und der dadurch bewirkten Verstimmung $\Delta\lambda_B$ der Bragg-Wellenlänge untersucht werden. Für den Zusammenhang zwischen der Indentierungskraft F und der Dehnung bzw. Stauchung ε kann möglicherweise der Zusammenhang gelten:

25

$$F = \varepsilon \cdot \pi \cdot a^2 \cdot E_{FBG} \quad (3)$$

wobei ε die Stauchung der ersten Glasfaser 206 bezeichnet, a den Radius an der Spitze der ersten Glasfaser 206 und E_{FBG} das Elastizitätsmodul der ersten Glasfaser 206 bezeichnet.

30

Darüber hinaus besteht ein Zusammenhang zwischen der Dehnung bzw. Stauchung ε der ersten Glasfaser 206 und der dadurch bewirkten Verschiebung $\Delta\lambda_B$ der Bragg-Wellenlänge:

35

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \cdot \varepsilon \quad (4)$$

wobei p_e den effektiven elastooptischen Koeffizienten bezeichnet (ca. 0,211 für eine Faser vom Typ GF1B). Wenn man diese Beziehung nach ε auflöst und in Gleichung (3) einsetzt, dann erhält man für die Kraft F:

$$F = \frac{\pi \cdot a^2}{(1 - p_e)} \cdot E_{\text{FBG}} \cdot \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (5)$$

Es ergibt sich also eine direkte Proportionalität zwischen $\Delta\lambda_B$ und der Indentierungskraft F.

Die Indentierungskraft F lässt sich unter bestimmten Bedingungen mittels des Hertz-Modells auch aus der Sicht des eingedrückten Gewebes beschreiben. Dabei ergibt sich für die Indentierungskraft F

$$F = \frac{2 \cdot a \cdot E \cdot \delta \cdot \kappa}{(1 - \nu^2)} \quad (6)$$

wobei E ein Elastizitätsmodul des untersuchten Gewebes, a den Radius an der Spitze der Glasfaser und δ die Indentierungstiefe bezeichnet. Der Koeffizient κ bezeichnet einen durch eine Finite-Elemente-Methode (FEM) ermittelten Koeffizienten, der zu $\kappa=1,218$ ermittelt wurde. Im Nenner von Gleichung (6) taucht die Querkontraktionszahl bzw. Poissonzahl ν auf, wobei hier $\nu=0,185$ gesetzt werden kann.

Man kann die Indentierungskraft jetzt also zum einen mit Hilfe von Gleichung (5) über das Elastizitätsmodul E_{FBG} der Glasfaser und die Verstimmung $\Delta\lambda_B$ der Bragg-Wellenlänge ausdrücken. Zum andern kann man die Indentierungskraft F entsprechend Gleichung (6) mittels des Hertz-Modells über das Elastizitätsmodul E des untersuchten Gewebes und die Indentierungstiefe δ ausdrücken. Wenn man die beiden Ausdrücke für die Indentierungskraft F gleichsetzt, ergibt sich

$$F = \frac{2 \cdot a \cdot E \cdot \delta \cdot \kappa}{(1 - \nu^2)} = \frac{\pi \cdot a^2}{(1 - p_e)} \cdot E_{\text{FBG}} \cdot \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (7)$$

Aufgelöst nach dem Elastizitätsmodul E des untersuchten Gewebes ergibt sich

$$E = \frac{(1 - \nu^2)}{2 \cdot a \cdot \delta \cdot \kappa} \cdot \frac{\pi \cdot a^2}{(1 - p_e)} \cdot E_{\text{FBG}} \cdot \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} \quad (8)$$

Mit Hilfe dieser Formel lässt sich aus den in Fig. 9A bis 9C gezeigten Indentierungskurven ein Elastizitätsmodul E für das untersuchte Gewebe bestimmen. Die Bestimmung eines Elastizitätsmoduls kann für bestimmte Parameterbereiche und Indentierungstiefen ein sinnvolles Hilfsmittel für die Beschreibung der elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften des Substrats sein.

In Fig. 11 ist ein weiteres Messverfahren zur Ermittlung der elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften eines Gewebes gezeigt, bei dem das piezoelektrische Stелеlement 103 mit einer Sinusspannung beaufschlagt wird. Wie im oberen Diagramm von Fig. 11 gezeigt, ergibt sich dadurch eine sinusförmige Variation 1100 der Position x der Messspitze. Wenn man die auf die Messspitze einwirkende Indentierungskraft als Funktion der Zeit aufzeichnet, ergibt sich die im unteren Diagramm von Fig. 11 gezeigte sinusförmige Variation 1101 der Indentierungskraft, die eine gewisse Phasenverschiebung 1102 gegenüber der Position x aufweist. Diese Phasenverschiebung 1102 beschreibt das elastische Response-Verhalten des jeweiligen Gewebes und kann als Funktion der Frequenz der Sinusanregung erfasst werden. Dazu kann die Frequenz der Sinusanregung im Bereich von beispielsweise 0,5 bis 100 Hz durchgestimmt werden. Da insbesondere bei einem Knorpelgewebe mit Relaxationszeiten im Bereich von Sekunden zu rechnen ist, dürften signifikante Aussagen über das Relaxationsverhalten des Knorpelgewebes bei Anregungsfrequenzen insbesondere im Bereich von 0,5 bis 2 Hz erhalten werden.

In Fig. 12 ist ein weiteres Anregungsmuster für die Erfassung von elastischen Eigenschaften eines Gewebes gezeigt. Im oberen Teil von Fig. 12 ist die Position x der Sondenspitze als Funktion der Zeit t aufgetragen. Im Bereich 1200 ergibt sich ein linearer Vorschub der Sondenspitze, anschließend wird die Position der Sondenspitze im Bereich 1201 sinusförmig variiert. Im Bereich 1202 schließt sich ein weiterer linearer Vorschub der Sondenspitze an, und daraufhin wird im Bereich 1203 erneut eine sinusförmige Variation auf die Position x aufmoduliert.

Im unteren Teil von Fig. 12 ist der zugehörige Verlauf der Indentierungskraft F als Funktion der Zeit aufgetragen. In den Bereichen 1204 und 1206 ergibt sich jeweils ein linearer Anstieg der Indentierungskraft mit der Zeit. In den Bereichen 1205 und 1207 ergibt sich jeweils eine sinusförmige Variation der Indentierungskraft F , die jeweils eine gewisse Phasenverschiebung zur zugrundeliegenden sinusförmigen Variation der Position x aufweist. Mit Hilfe des in Fig. 12 gezeigten Anregungsschemas kann ein Elastizitätsmodul E des untersuchten Gewebes ermittelt werden. Darüber hinaus ermöglicht die sinusförmige Variation der Position x und die Erfassung der zugehörigen Indentierungskraft F eine Aussage über das zeitliche Relaxationsverhalten des Knorpelgewebes.

Patentansprüche

1. Indentierungsvorrichtung (100) zur Bestimmung von elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften eines Substrats, wobei die Indentierungsvorrichtung (100) aufweist

- eine Messsonde zur Indentierung des Substrats, welche ein Röhrchen (202) und eine innerhalb des Röhrchens (202) befestigte optische Faser (206) umfasst, wobei das Röhrchen (202) einen Außendurchmesser von weniger als 1 Millimeter aufweist,

- mindestens ein in die optische Faser (206) eingeschriebenes Faser-Bragg-Gitter (209, 211), das dazu vorgesehen ist, eine auf die Spitze der optischen Faser (206) einwirkende Kraft (210) zu detektieren,

- ein piezoelektrisches Stellelement (103) zur Positionierung der Messsonde, das mit der Messsonde mechanisch verbunden ist und das dazu ausgelegt ist, die Messsonde auf das zu vermessende Substrat zu bewegen und in das Substrat einzudrücken,

- wobei die Indentierungsvorrichtung (100) dazu ausgelegt ist, den Vorschub der Messsonde und die auf die Spitze der optischen Faser (206) einwirkende Kraft (210) zu erfassen.

2. Indentierungsvorrichtung nach Anspruch 1, gekennzeichnet durch mindestens eines von folgenden:

- die optische Faser ist in das Röhrchen der Messsonde eingeschoben und am Röhrchen befestigt;

- das Röhrchen der Messsonde ist dazu ausgelegt, die im Inneren des Röhrchens befestigte optische Faser zu stabilisieren und zu fixieren;

- bei dem Röhrchen der Messsonde handelt es sich um ein Metallröhrchen oder ein Glasröhrchen;

- das Röhrchen der Messsonde weist einen Außendurchmesser im Bereich von ca. 200 Mikrometer bis 500 Mikrometer auf;

- das Röhrchen der Messsonde weist einen Außendurchmesser im Bereich von ca. 200 Mikrometer bis 300 Mikrometer auf;

- das Röhrchen der Messsonde weist einen Innendurchmesser im Bereich von ca. 90 Mikrometer bis 170 Mikrometer auf;

- die optische Faser weist einen Außendurchmesser im Bereich von ca. 80 Mikrometer bis 125 Mikrometer auf.

3. Indentierungsvorrichtung nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Indentierungsvorrichtung zusätzlich ein äußeres Führungsröhrchen für die Messsonde aufweist, wobei die Messsonde im äußeren Führungsröhrchen verschieblich aufgenommen ist.

5

4. Indentierungsvorrichtung nach Anspruch 3, gekennzeichnet durch mindestens eines von folgenden:

- die Indentierungsvorrichtung weist ein Gehäuse auf und das äußere Führungsröhrchen ist mit dem Gehäuse der Indentierungsvorrichtung mechanisch verbunden;
- angetrieben durch das piezoelektrische Stellelement und geführt im äußeren Führungsröhrchen ist die Messsonde zum Substrat hin und vom Substrat weg bewegbar;
- bei dem äußeren Führungsröhrchen handelt es sich um ein Metallröhrchen;
- das Röhrchen der Messsonde ist so dimensioniert, dass es im äußeren Führungsröhrchen verschieblich aufgenommen werden kann;
- das äußere Führungsröhrchen weist einen Außendurchmesser im Bereich von ca. 0,6 mm bis 1 mm auf.

20

5. Indentierungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, gekennzeichnet durch mindestens eines von folgenden:

- das piezoelektrische Stellelement ist dazu ausgelegt, die Messsonde in Richtung auf das Substrat zu und vom Substrat weg zu positionieren;
- das piezoelektrische Stellelement ist dazu ausgelegt, die Messsonde auf das zu vermessende Substrat zu und vom Substrat weg zu bewegen;
- das piezoelektrische Stellelement ist dazu ausgelegt, die Messsonde in Richtung auf das Substrat zu und vom Substrat weg zu bewegen und dabei in das Substrat einzudrücken;
- das piezoelektrische Stellelement ist dazu ausgelegt, in Abhängigkeit von einem Hochspannungssignal die Messsonde in Richtung auf das Substrat zu und vom Substrat weg zu positionieren;
- zur Steuerung des Vorschubs ist an das piezoelektrische Stellelement eine Spannung von bis zu einigen hundert Volt anlegbar, wobei durch die angelegte Spannung ein Vorschub der Messsonde von bis zu einigen hundert Mikrometer bewirkt wird;
- bei dem piezoelektrischen Stellelement handelt es sich um ein rückgekoppeltes piezoelektrisches Stellelement, das dazu ausgelegt ist, die am piezoelektrischen

Stellelement anliegende Spannung in Abhängigkeit vom tatsächlichen Vorschub des piezoelektrischen Stellelements einzuregeln;

- die durch das piezoelektrische Stellelement bewirkte Positionierung der Messsonde erfolgt mit einer Genauigkeit im Submikrometerbereich;

- 5 - der Vorschub der Messsonde während einer Indentierungsmessung ist so einstellbar, dass eine Indentierungstiefe von weniger als 40 Mikrometer erzielt wird;

- 10 - der Vorschub der Messsonde während einer Indentierungsmessung ist so einstellbar, dass eine Indentierungstiefe von weniger als 20 Mikrometer erzielt wird;

- der Vorschub der Messsonde während einer Indentierungsmessung ist so einstellbar, dass eine Indentierungstiefe von weniger als 10 Mikrometer erzielt wird.

15 6. Indentierungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die optische Faser ein erstes Faser-Bragg-Gitter aufweist, das dazu ausgelegt ist, die auf die Spitze der optischen Faser einwirkende Kraft zu detektieren.

20 7. Indentierungsvorrichtung nach Anspruch 6, gekennzeichnet durch mindestens eines von folgenden:

- das erste Faser-Bragg-Gitter ist im Bereich der Spitze der optischen Faser angeordnet;

- 25 - die auf die Spitze der optischen Faser einwirkende Kraft verursacht eine Stauchung des ersten Faser-Bragg-Gitters;

- während der Indentierung des Substrats durch die Messsonde wirkt auf die Spitze der optischen Faser eine Kraft ein, die eine entsprechende Stauchung des ersten Faser-Bragg-Gitters hervorruft;

- 30 - die auf die Spitze der optischen Faser einwirkende Kraft verursacht eine Stauchung des ersten Faser-Bragg-Gitters, wobei die Stauchung des ersten Faser-Bragg-Gitters eine entsprechende Verschiebung der Mittenwellenlänge des vom ersten Faser-Bragg-Gitter reflektierten Lichts zu kleineren Wellenlängen hin bewirkt;

- 35 - die auf die Spitze der optischen Faser einwirkende Kraft verursacht eine Stauchung des ersten Faser-Bragg-Gitters, wobei die Stauchung des ersten Faser-Bragg-Gitters eine entsprechende Verschiebung der Bragg-Wellenlänge des ersten Faser-Bragg-Gitters zu kleineren Wellenlängen hin bewirkt;

- anhand einer Verschiebung der Wellenlänge des vom ersten Faser-Bragg-Gitter rückreflektierten Lichts ist die auf die Spitze der optischen Faser einwirkende Kraft bestimmbar.

- 5 8. Indentierungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass die optische Faser in das Röhrchen der Messsonde eingeschoben ist und an mindestens einer Verklebungsstelle mit dem Röhrchen verklebt ist.
- 10 9. Indentierungsvorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die optische Faser ein erstes Faser-Bragg-Gitter aufweist, das dazu ausgelegt ist, die auf die Spitze der optischen Faser einwirkende Kraft zu detektieren, wobei das erste Faser-Bragg-Gitter zwischen der vordersten der mindestens einen Verklebungsstelle und der Spitze der optischen Faser angeordnet ist.
- 15 10. Indentierungsvorrichtung nach Anspruch 8 oder Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die optische Faser im Bereich hinter der vordersten der mindestens einen Verklebungsstelle ein zweites Faser-Bragg-Gitter aufweist, das als Referenz-Faser-Bragg-Gitter zur Durchführung einer Temperaturkompensation
- 20 für das erste Faser-Bragg-Gitter vorgesehen ist.
11. Indentierungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, gekennzeichnet durch mindestens eines von folgenden:
- Licht ist von außen in die optische Faser einkoppelbar;
 - 25 - von dem mindestens einen Faser-Bragg-Gitter rückreflektiertes Licht ist aus der optischen Faser auskoppelbar;
 - das Ein- und Auskoppeln von Licht in die optische Faser erfolgt über Gradientenindexlinsen.
- 30 12. Indentierungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 11, gekennzeichnet durch mindestens eines von folgenden:
- das piezoelektrische Stellelement ist dazu ausgelegt, die Messsonde während einer Indentierungsmessung mit einem linearen Vorschub in Richtung des Substrats zu bewegen;
 - 35 - die Indentierungsvorrichtung ist dazu ausgelegt, die während eines linearen Vorschubs der Messsonde auf die Spitze der optischen Faser einwirkende Kraft zu erfassen;

- die Indentierungsvorrichtung umfasst eine Spannungsversorgung, die dazu ausgelegt ist, die am piezoelektrischen Stellelement anliegende Spannung so zu erhöhen, dass die Messsonde mit einem linearen Vorschub auf das Substrat zu bewegt und in das zu untersuchende Substrat eingedrückt wird;
- 5 - die Indentierungsvorrichtung umfasst eine Spannungsversorgung, die dazu ausgelegt ist, dem piezoelektrischen Stellelement eine sägezahnförmige oder dreieckförmige Spannung zuzuführen.

13. Indentierungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Indentierungsvorrichtung eine Auswerteeinheit umfasst,
10 die dazu ausgelegt ist, die auf die optische Faser einwirkende Kraft in Abhängigkeit vom Vorschub der Messsonde zu erfassen.

14. Indentierungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13, gekennzeichnet durch mindestens eines von folgenden:

- die Auswerteeinheit ist dazu ausgelegt, aus dem Vorschub der Messsonde und der auf die Spitze der optischen Faser einwirkenden Kraft elastische oder viskoelastische Eigenschaften des Substrats zu ermitteln;
- die Auswerteeinheit ist dazu ausgelegt, aus dem Zusammenhang zwischen dem
20 Vorschub der Messsonde und der auf die Spitze der optischen Faser einwirkenden Kraft ein Elastizitätsmodul des untersuchten Substrats zu bestimmen.

15. Indentierungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Indentierungsvorrichtung eine Spannungsversorgung
25 umfasst, die dazu ausgelegt ist, der am piezoelektrischen Stellelement anliegenden Spannung eine oszillierende Spannung zu überlagern, die eine oszillierende Bewegung der in das Substrat eingedrückten Messsonde verursacht.

16. Indentierungsvorrichtung nach Anspruch 15, gekennzeichnet durch mindestens eines von folgenden:

- die Indentierungsvorrichtung ist dazu ausgelegt, die während der oszillierenden Bewegung der Messsonde auf die Spitze der optischen Faser einwirkende oszillierende Kraft zu erfassen;
- die Indentierungsvorrichtung umfasst eine Auswerteeinheit, die dazu ausgelegt
35 ist, einen Phasenversatz zwischen der oszillierenden Bewegung der Messsonde und einer während der oszillierenden Bewegung der Messsonde auf die Spitze der optischen Faser einwirkenden oszillierenden Kraft zu bestimmen;

- die Indentierungsvorrichtung umfasst eine Auswerteeinheit, die dazu ausgelegt ist, einen Phasenversatz zwischen der oszillierenden Bewegung der Messsonde und einer während der oszillierenden Bewegung der Messsonde auf die Spitze der optischen Faser einwirkenden oszillierenden Kraft zu bestimmen und aus
5 der Abhängigkeit des Phasenversatzes von der Frequenz der oszillierenden Bewegung ein Relaxationsverhaltens des Substrats abzuleiten.

17. Indentierungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 16, gekennzeichnet durch mindestens eines von folgenden:

- 10 - die Indentierungsvorrichtung ist als auseinandernehmbare Indentierungsvorrichtung realisiert;
- die Messsonde ist zu Reinigungszwecken vom Gehäuse lösbar;
- die Messsonde ist über eine lösbare mechanische Verbindung mit dem piezoelektrischen Stellelement verbunden;
- 15 - die Messsonde ist mittels eines Bajonett- oder Schraubverschlusses mit dem piezoelektrischen Stellelement verbunden;
- das Ein- und Auskoppeln von Licht in die optische Faser erfolgt über Gradientenindexlinsen.

20 18. Indentierungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 17, gekennzeichnet durch mindestens eines von folgenden:

- die Indentierungsvorrichtung weist ein äußeres Führungsröhrchen für die Messsonde auf, wobei das äußere Führungsröhrchen zu Reinigungszwecken vom Gehäuse lösbar ist;
- 25 - die Indentierungsvorrichtung weist ein äußeres Führungsröhrchen für die Messsonde auf, wobei das äußere Führungsröhrchen über eine lösbare mechanische Verbindung mit dem Gehäuse der Indentierungsvorrichtung verbunden ist;
- die Indentierungsvorrichtung weist ein äußeres Führungsröhrchen für die
30 Messsonde auf, wobei das äußere Führungsröhrchen mittels eines Bajonett- oder Schraubverschlusses mit dem Gehäuse der Indentierungsvorrichtung verbunden ist.

35 19. Indentierungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 18, gekennzeichnet durch mindestens eines von folgenden:

- bei dem Substrat handelt es sich um ein Gewebe;
- bei dem Substrat handelt es sich um Knorpelgewebe;

- bei dem Substrat handelt es sich um Knorpelgewebe, wobei die Indentierungsvorrichtung dazu ausgelegt ist, die elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften des Knorpelgewebes zu bestimmen;
 - die Indentierungsvorrichtung ist für eine minimalinvasive Diagnostik ausgelegt;
 - 5 - die Indentierungsvorrichtung ist für eine Untersuchung von Gewebe in vivo ausgelegt;
 - die Indentierungsvorrichtung ist für eine Untersuchung von Knorpelgewebe in vivo ausgelegt;
 - bei dem Substrat handelt es sich um Knorpelgewebe, wobei die Indentierungsvorrichtung dazu ausgelegt ist, anhand einer Veränderung von elastischen oder
 - 10 viskoelastischen Eigenschaften des Knorpelgewebes eine beginnende Degeneration des Knorpelgewebes festzustellen;
 - die Indentierungsvorrichtung ist für eine Diagnose der Arthrose ausgelegt.
- 15 20. Messanordnung zur Messung von elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften eines Substrats, welche aufweist:
- eine Indentierungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 19,
 - einen optischen Interrogator, der dazu ausgelegt ist, Anregungslicht in die optische Faser einzukoppeln und das von dem mindestens einen Faser-Bragg-Gitter
 - 20 rückreflektierte Licht aus der optischen Faser auszukoppeln und auszuwerten.
21. Messanordnung nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass der optische Interrogator eine Lichtquelle, einen Faserkoppler und einen Fotodetektor umfasst.
- 25 22. Messanordnung nach Anspruch 21, gekennzeichnet durch mindestens eines von folgenden:
- bei der Lichtquelle handelt es sich um einen durchstimbaren Laser oder um eine breitbandige Weißlichtquelle;
 - 30 - der optische Interrogator ist dazu ausgelegt, Anregungslicht in die optische Faser einzukoppeln und das von dem mindestens einen Faser-Bragg-Gitter rückreflektierte Licht aus der optischen Fasern auszukoppeln und auszuwerten.
23. Verfahren zur Bestimmung von elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften eines Substrats mittels einer Indentierungsvorrichtung (100), welche aufweist
- 35 - eine Messsonde zur Indentierung des Substrats, welche ein Röhrchen (202) und eine innerhalb des Röhrchens (202) befestigte optische Faser (206) umfasst,

wobei das Röhrchen (202) einen Außendurchmesser von weniger als 1 Millimeter aufweist,

- mindestens ein in die optische Faser (206) eingeschriebenes Faser-Bragg-Gitter (209, 211),

- ein piezoelektrisches Stellelement (103) zur Positionierung der Messsonde, das mit der Messsonde mechanisch verbunden ist,

und wobei das Verfahren folgende Schritte umfasst:

- Aufsetzen der Indentierungsvorrichtung (100) auf das zu vermessende Substrat;

- Verschieben der Messsonde mittels des piezoelektrischen Stellelements (103) und Eindrücken der Messsonde in das zu vermessende Substrat;

- Erfassen der während der Indentierung auf die Spitze der optischen Faser (206) einwirkenden Kraft (210) mittels des mindestens einen Faser-Bragg-Gitters (209, 211);

- Auswerten des Zusammenhangs zwischen dem Vorschub der Messsonde und der auf die Spitze der optischen Faser (206) einwirkenden Kraft (210).

24. Verfahren nach Anspruch 23, gekennzeichnet durch folgenden zusätzlichen Schritt:

- Überlagern der am piezoelektrischen Stellelement anliegenden Spannung mit einer oszillierenden Spannung, die eine entsprechende oszillierende Bewegung der in das Substrat eingedrückten Messsonde verursacht.

25. Verfahren zur Bestimmung von elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften eines Substrats mittels einer Indentierungsvorrichtung (100), welche aufweist

- eine Messsonde zur Indentierung des Substrats, welche ein Röhrchen (202) und eine innerhalb des Röhrchens (202) befestigte optische Faser (206) umfasst, wobei das Röhrchen (202) einen Außendurchmesser von weniger als 1 Millimeter aufweist,

- mindestens ein in die optische Faser (206) eingeschriebenes Faser-Bragg-Gitter (209, 211),

- ein piezoelektrisches Stellelement (103) zur Positionierung der Messsonde, das mit der Messsonde mechanisch verbunden ist,

und wobei das Verfahren folgende Schritte umfasst:

- Aufsetzen der Indentierungsvorrichtung (100) auf das zu vermessende Substrat;

- Beaufschlagen des piezoelektrischen Stellelements (103) mit einer oszillierenden Spannung, die eine entsprechende oszillierende Bewegung der in das Substrat eingedrückten Messsonde verursacht;
- Erfassen der auf die Spitze der optischen Faser (206) einwirkenden oszillierenden Kraft mittels des mindestens einen Faser-Bragg-Gitters (209, 211);
- Auswerten des Zusammenhangs zwischen der oszillierenden Bewegung der Messsonde und der auf die Spitze der optischen Faser (206) einwirkenden oszillierenden Kraft.

10 26. Indentierungsvorrichtung (100) zur Bestimmung von elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften eines Substrats, wobei die Indentierungsvorrichtung (100) aufweist

- eine Messsonde zur Indentierung des Substrats, welche ein Röhrchen (202) und eine innerhalb des Röhrchens (202) befestigte optische Faser (206) umfasst,
- 15 wobei das Röhrchen (202) einen Außendurchmesser von weniger als 1 Millimeter aufweist,
- mindestens ein in die optische Faser (206) eingeschriebenes Faser-Bragg-Gitter (209, 211), das dazu vorgesehen ist, eine auf die Spitze der optischen Faser (206) einwirkende Kraft (210) zu detektieren,
- 20 - ein Vorschubelement (103) zur Positionierung der Messsonde, das mit der Messsonde mechanisch verbunden ist und das dazu ausgelegt ist, die Messsonde auf das zu vermessende Substrat zu bewegen und in das Substrat einzudrücken,
- wobei die Indentierungsvorrichtung (100) dazu ausgelegt ist, den Vorschub der
- 25 Messsonde und die auf die Spitze der optischen Faser (206) einwirkende Kraft (210) zu erfassen.

27. Messanordnung zur Messung von elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften eines Substrats, welche aufweist:

- 30 - eine Indentierungsvorrichtung nach Anspruch 26,
- einen optischen Interrogator, der dazu ausgelegt ist, Anregungslicht in die optische Faser einzukoppeln und das von dem mindestens einen Faser-Bragg-Gitter rückreflektierte Licht aus der optischen Faser auszukoppeln und auszuwerten.

35 28. Verfahren zur Bestimmung von elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften eines Substrats mittels einer Indentierungsvorrichtung (100), welche aufweist

- eine Messsonde zur Indentierung des Substrats, welche ein Röhrchen (202) und eine innerhalb des Röhrchens (202) befestigte optische Faser (206) umfasst, wobei das Röhrchen (202) einen Außendurchmesser von weniger als 1 Millimeter aufweist,
 - 5 - mindestens ein in die optische Faser (206) eingeschriebenes Faser-Bragg-Gitter (209, 211),
 - ein Vorschubelement (103) zur Positionierung der Messsonde, das mit der Messsonde mechanisch verbunden ist,
- und wobei das Verfahren folgende Schritte umfasst:
- 10 - Aufsetzen der Indentierungsvorrichtung (100) auf das zu vermessende Substrat;
 - Verschieben der Messsonde mittels des Vorschubelements (103) und Eindringen der Messsonde in das zu vermessende Substrat;
 - Erfassen der während der Indentierung auf die Spitze der optischen Faser (206) einwirkenden Kraft (210) mittels des mindestens einen Faser-Bragg-Gitters
 - 15 (209, 211);
 - Auswerten des Zusammenhangs zwischen dem Vorschub der Messsonde und der auf die Spitze der optischen Faser (206) einwirkenden Kraft (210).
- 20 29. Verfahren zur Bestimmung von elastischen oder viskoelastischen Eigenschaften eines Substrats mittels einer Indentierungsvorrichtung (100), welche aufweist
- eine Messsonde zur Indentierung des Substrats, welche ein Röhrchen (202) und eine innerhalb des Röhrchens (202) befestigte optische Faser (206) umfasst, wobei das Röhrchen (202) einen Außendurchmesser von weniger als 1 Millimeter aufweist,
 - 25 - mindestens ein in die optische Faser (206) eingeschriebenes Faser-Bragg-Gitter (209, 211),
 - ein Vorschubelement (103) zur Positionierung der Messsonde, das mit der Messsonde mechanisch verbunden ist,
- 30 und wobei das Verfahren folgende Schritte umfasst:
- Aufsetzen der Indentierungsvorrichtung (100) auf das zu vermessende Substrat;
 - Ansteuern des Vorschubelements (103) dergestalt, dass der in das Substrat eingedrückten Messsonde eine oszillierende Bewegung aufgeprägt wird;
 - 35 - Erfassen der auf die Spitze der optischen Faser (206) einwirkenden oszillierenden Kraft mittels des mindestens einen Faser-Bragg-Gitters (209, 211);

32

- Auswerten des Zusammenhangs zwischen der oszillierenden Bewegung der Messsonde und der auf die Spitze der optischen Faser (206) einwirkenden oszillierenden Kraft.

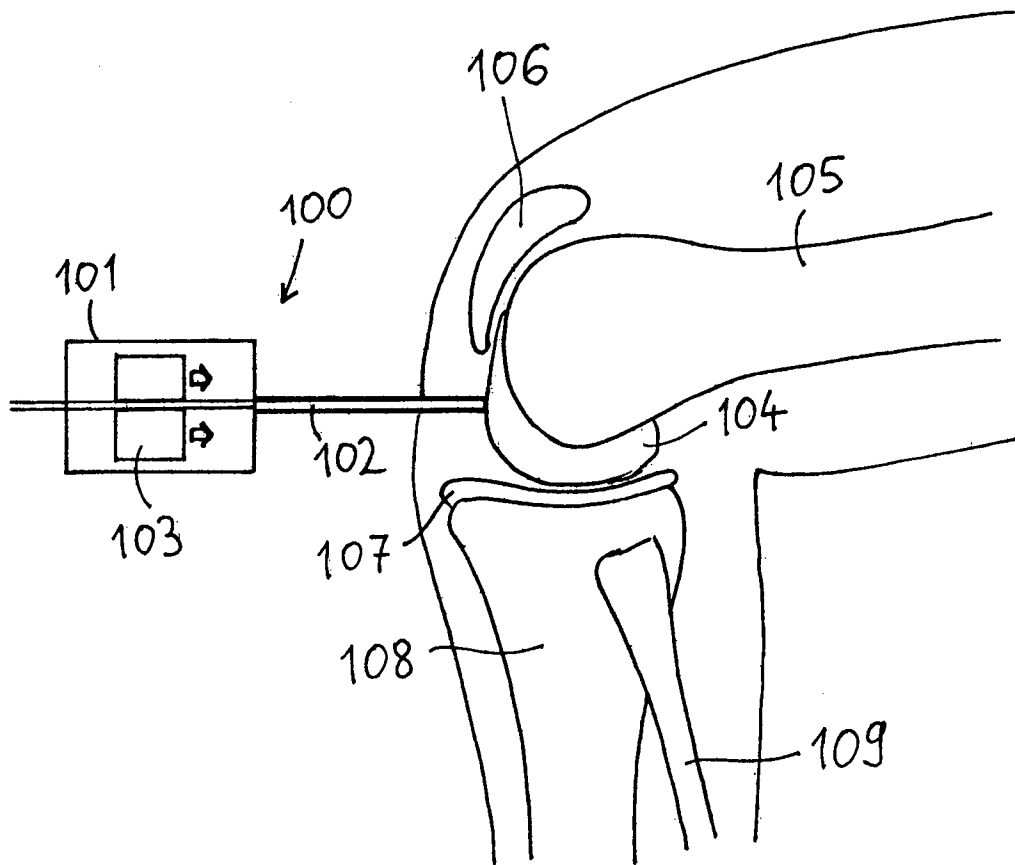


Fig. 1

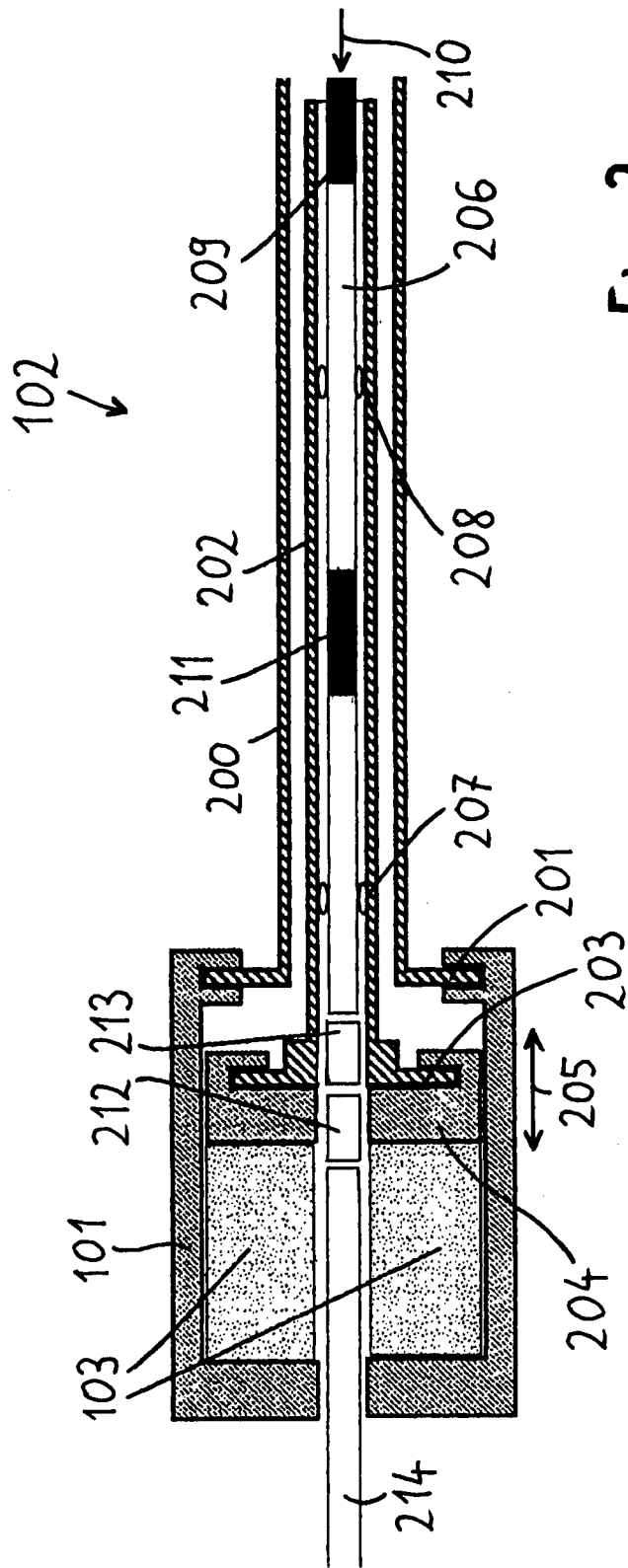


Fig. 2

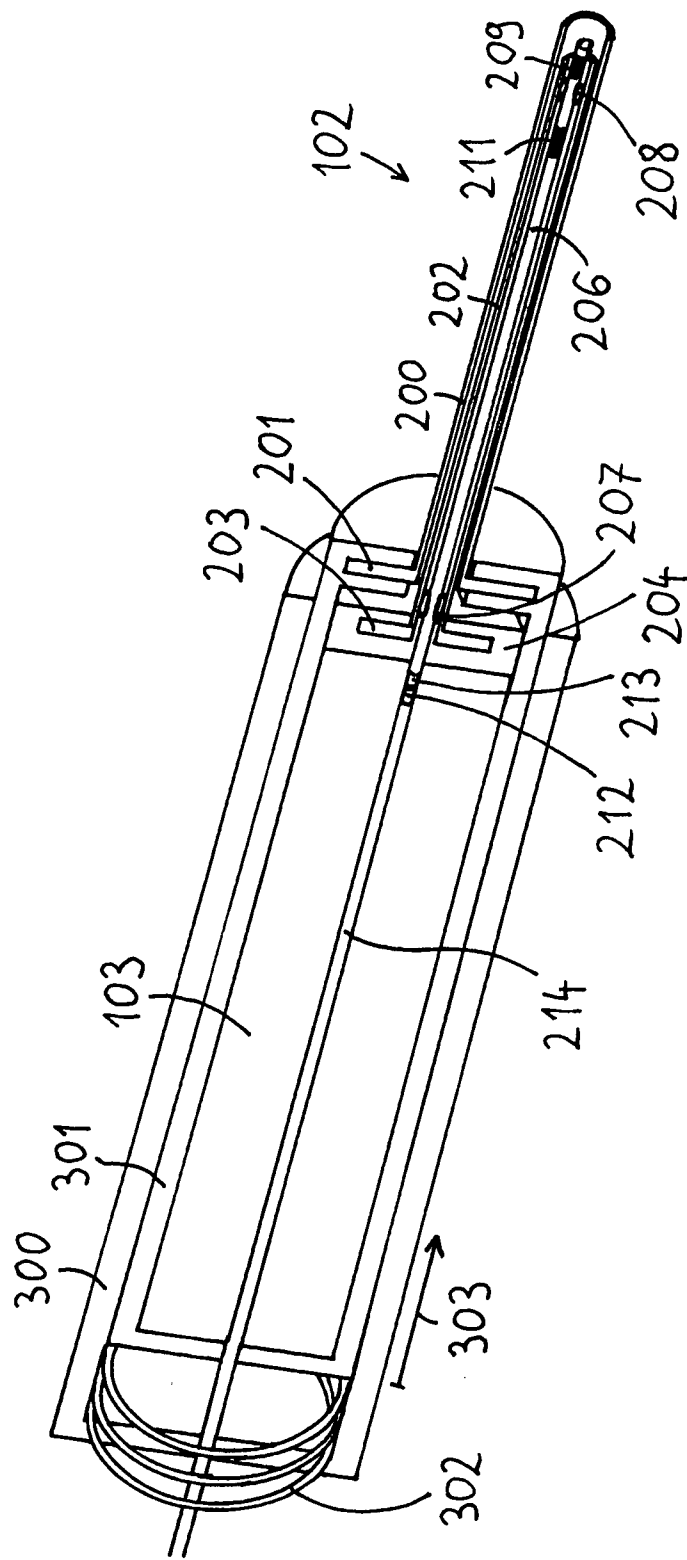


Fig. 3

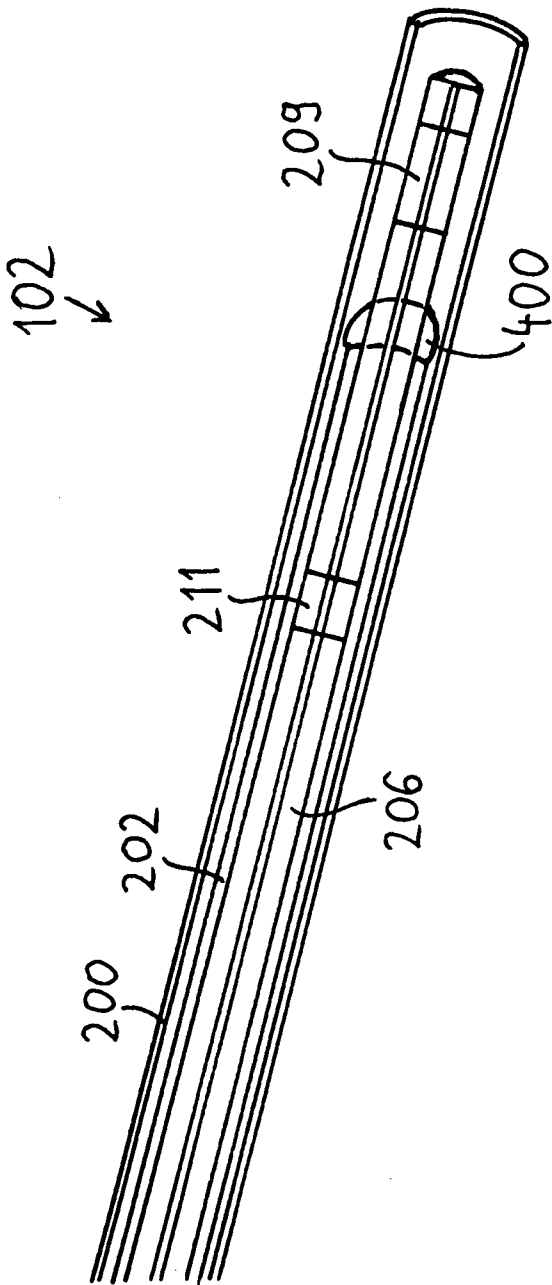
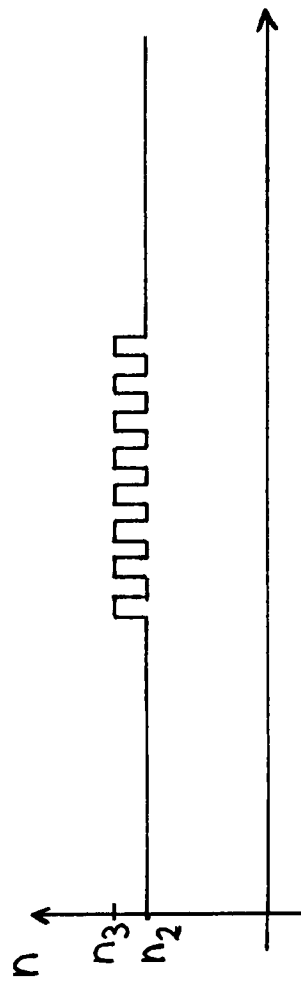
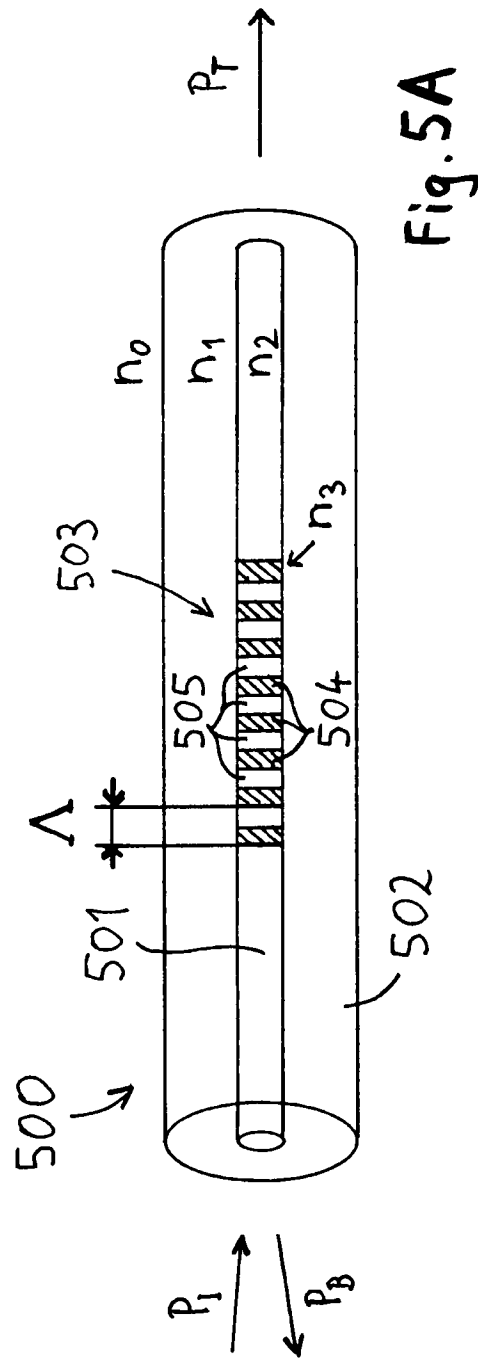


Fig. 4



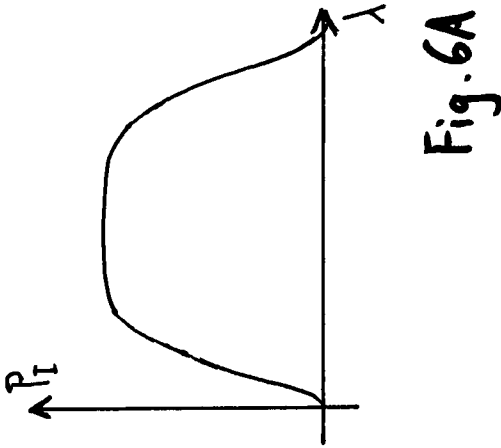


Fig. 6A

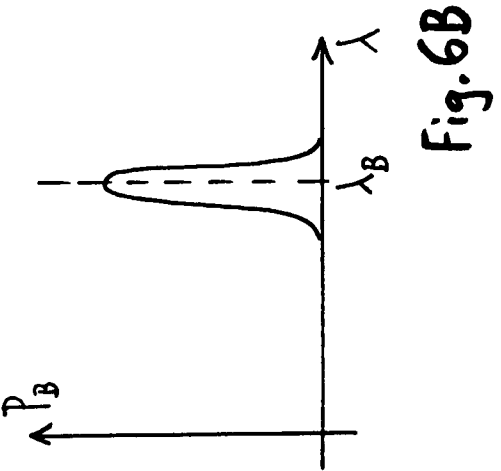


Fig. 6B

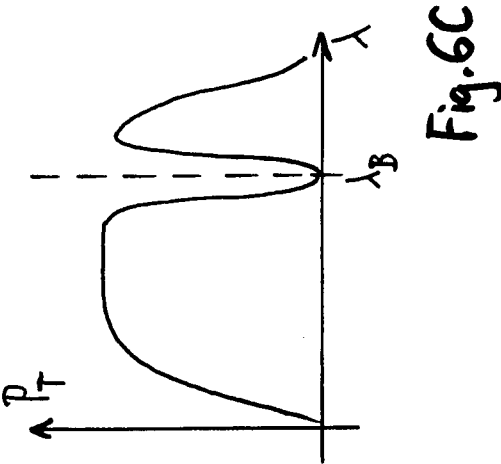


Fig. 6C

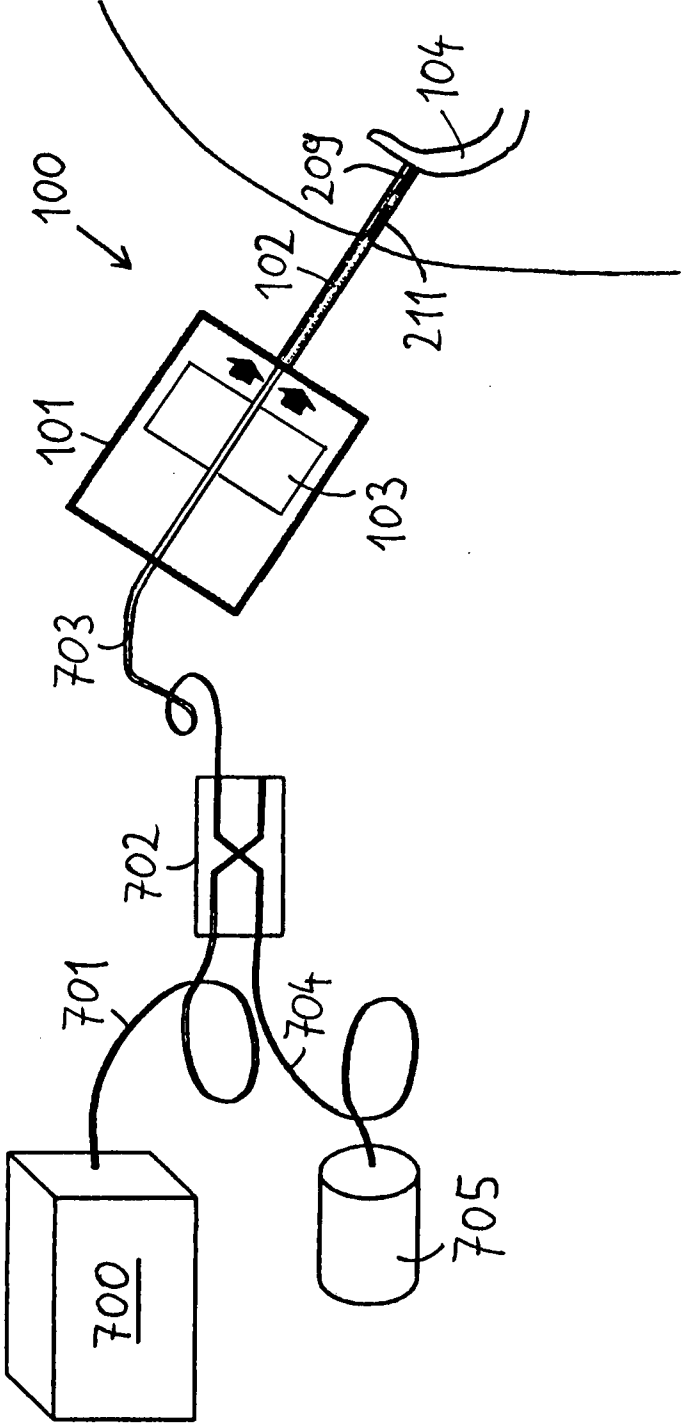


Fig. 7

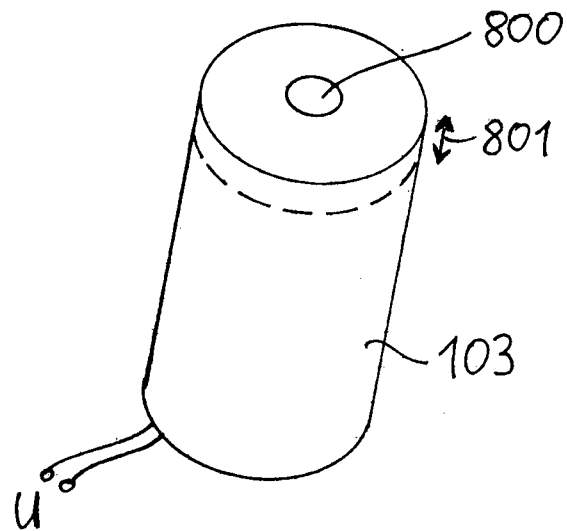


Fig. 8A

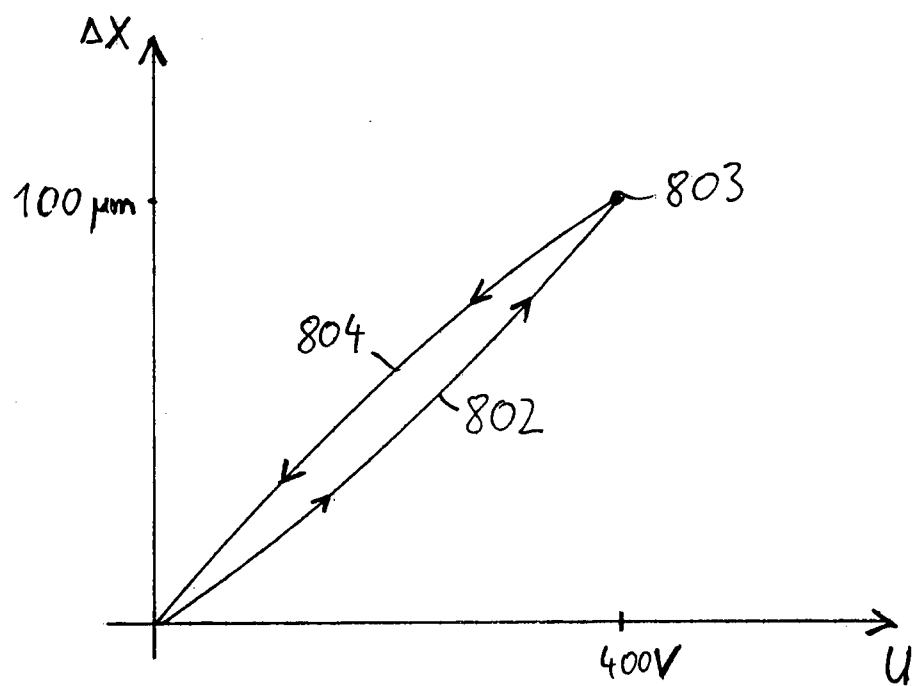
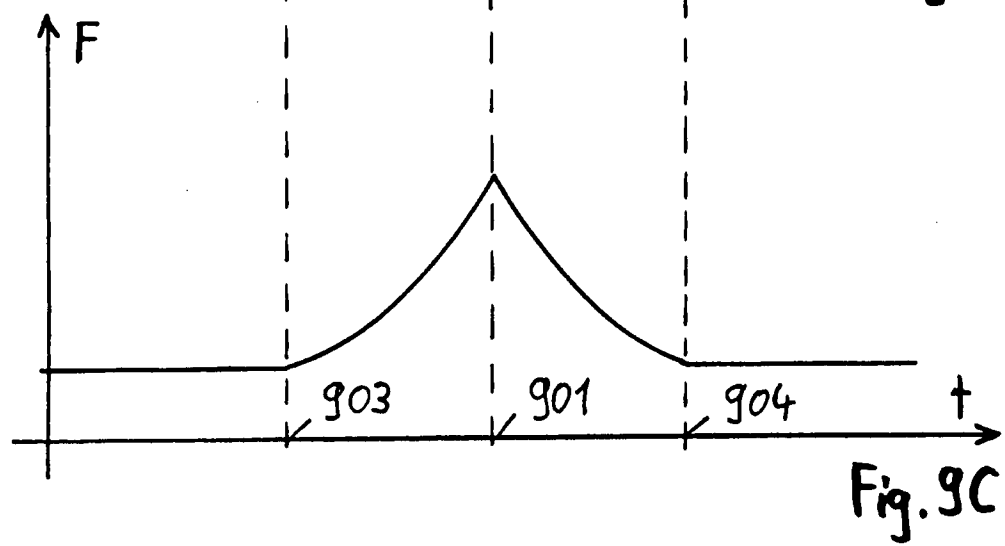
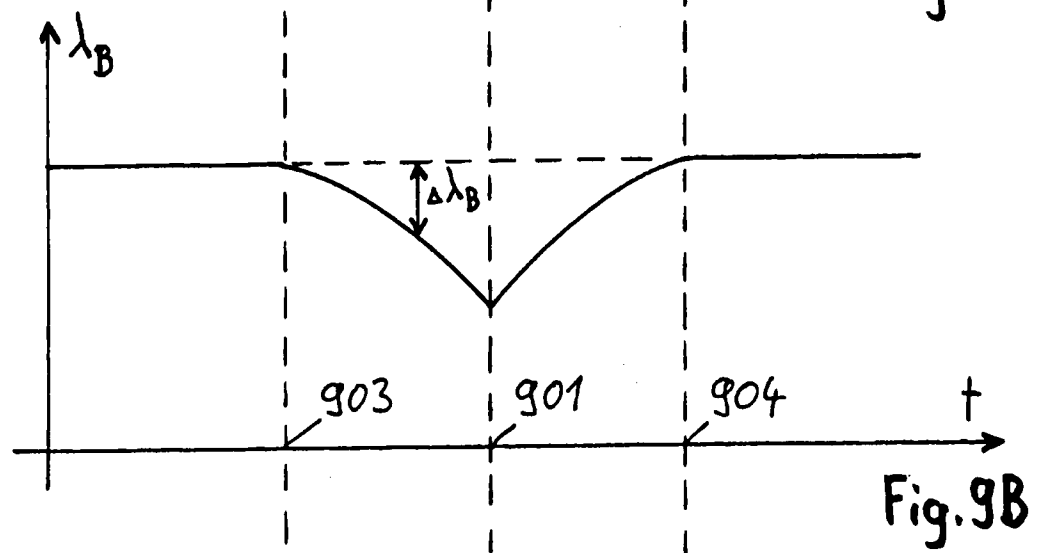
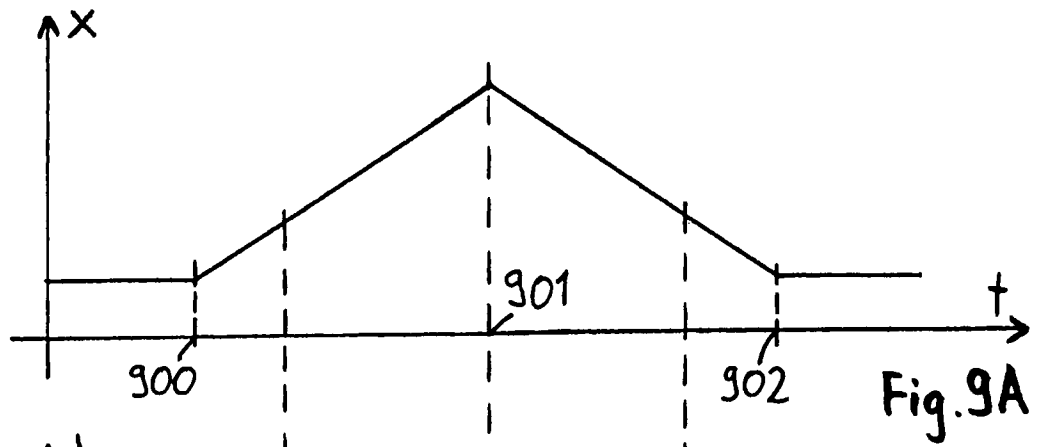


Fig. 8B



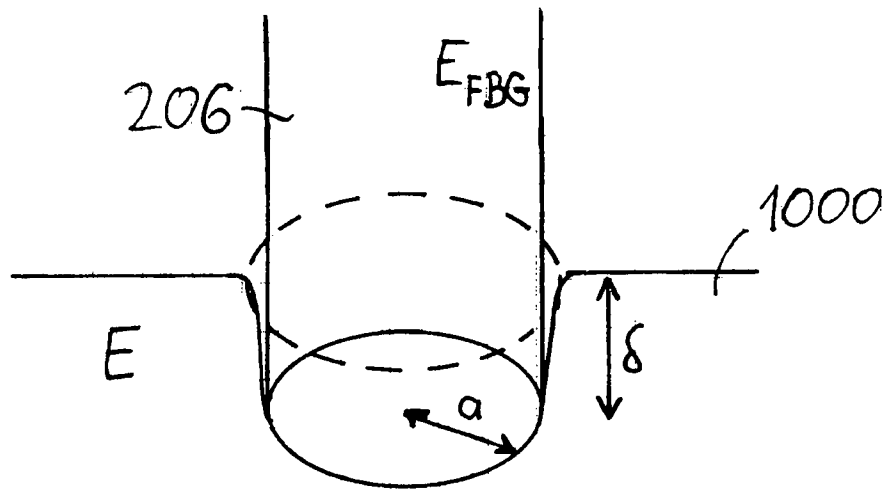


Fig.10

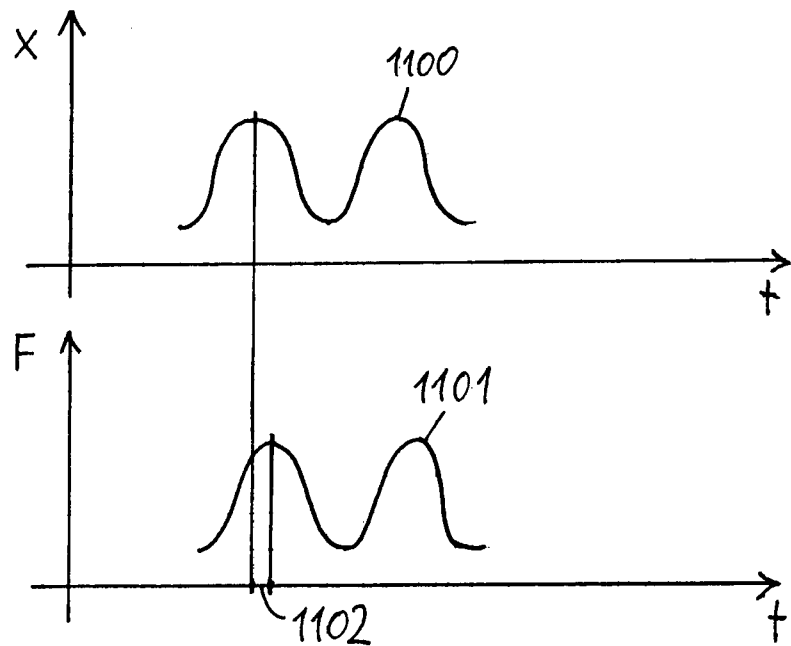


Fig. 11

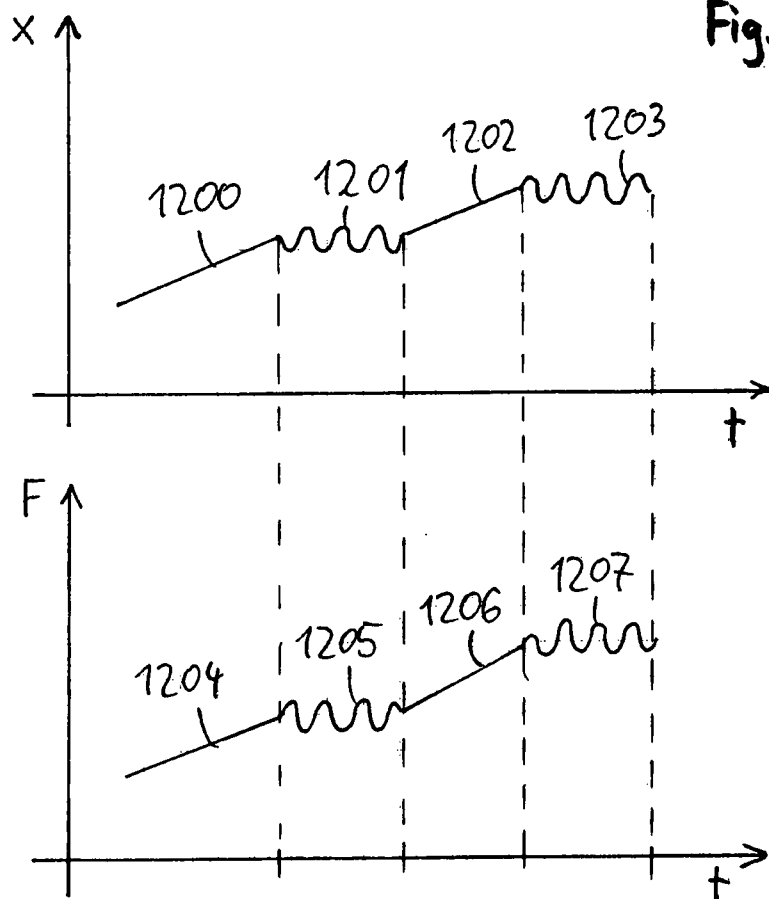


Fig. 12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2016/000475

Box No. II Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. ☒ Claims Nos.: **23-25, 28, 29**
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:
PCT Rule 39.1(iv) - methods for treatment of the human or animal body by surgery.
2. ☐ Claims Nos.:
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:
3. ☐ Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

Box No. III Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

1. ☐ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2. ☐ As all searchable claims could be searched without effort justifying additional fees, this Authority did not invite payment of additional fees.
3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:
4. ☐ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

Remark on Protest

- ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest and, where applicable, the payment of a protest fee.
- ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest but the applicable protest fee was not paid within the time limit specified in the invitation.
- ☐ No protest accompanied the payment of additional search fees.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2016/000475

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. A61B5/00 G01L1/24 G01N3/40
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

A61B G01L G01B G01N

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	MOERMAN KEVIN M ET AL: "A novel MRI compatible soft tissue indenter and fibre Bragg grating force sensor", MEDICAL ENGINEERING & PHYSICS, BUTTERWORTH-HEINEMANN, GB, vol. 35, no. 4, 20 July 2012 (2012-07-20), pages 486-499, XP028544537, ISSN: 1350-4533, DOI: 10.1016/J.MEDENGPY.2012.06.014 abstract figure 4 Abschnitt 1, Zeilen 24-28 Abschnitt 2 Abschnitt 2.2.2 Abschnitt 2.2.3 Abschnitt 2.2.4 ----- -/-	1-22,26, 27



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

17 June 2016

Date of mailing of the international search report

29/06/2016

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Albrecht, Ronald

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2016/000475

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CHRISTOPHER R DENNISON ET AL: "An in-fiber Bragg grating sensor for contact force and stress measurements in articular joints;An in-fiber Bragg grating sensor for contact force and stress measurements in articular joints", MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, IOP, BRISTOL, GB, vol. 21, no. 11, 6 October 2010 (2010-10-06), page 115803, XP020199908, ISSN: 0957-0233, DOI: 10.1088/0957-0233/21/11/115803 abstract page 6; table 1 -----	2,17,19, 26
A	KIT MAN CHUNG ET AL: "Highly Sensitive Compact Force Sensor Based on Microfiber Bragg Grating", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, vol. 24, no. 8, 1 April 2012 (2012-04-01), pages 700-702, XP011440353, ISSN: 1041-1135, DOI: 10.1109/LPT.2012.2187049 Abschnitt III, letzter Absatz) -----	17,26
A	WO 2012/015592 A2 (UNIV CALIFORNIA [US]; RANDALL CONNOR [US]; BRIDGES DANIEL [US]; HANSMA) 2 February 2012 (2012-02-02) paragraphs [0031], [0033], [0060] -----	1,4,5, 17,19
A	WO 99/53292 A1 (SMITH & NEPHEW INC [US]) 21 October 1999 (1999-10-21) abstract sentences 19-27 -----	15-17,19

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2016/000475

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 2012015592 A2	02-02-2012	EP 2598027 A2	05-06-2013
		US 2013122466 A1	16-05-2013
		WO 2012015592 A2	02-02-2012

WO 9953292 A1	21-10-1999	AR 014835 A1	28-03-2001
		AU 3213199 A	01-11-1999
		US 6068604 A	30-05-2000
		WO 9953292 A1	21-10-1999

Feld Nr. II Bemerkungen zu den Ansprüchen, die sich als nicht recherchierbar erwiesen haben (Fortsetzung von Punkt 2 auf Blatt 1)

Gemäß Artikel 17(2)a) wurde aus folgenden Gründen für bestimmte Ansprüche kein internationaler Recherchenbericht erstellt:

1. ☒ Ansprüche Nr. 23-25, 28, 29
weil sie sich auf Gegenstände beziehen, zu deren Recherche diese Behörde nicht verpflichtet ist, nämlich
Regel 39.1 iv) PCT - Verfahren zur chirurgischen Behandlung des menschlichen oder tierischen Körpers
2. ☐ Ansprüche Nr.
weil sie sich auf Teile der internationalen Anmeldung beziehen, die den vorgeschriebenen Anforderungen so wenig entsprechen, dass eine sinnvolle internationale Recherche nicht durchgeführt werden kann, nämlich
3. ☐ Ansprüche Nr.
weil es sich dabei um abhängige Ansprüche handelt, die nicht entsprechend Satz 2 und 3 der Regel 6.4 a) abgefasst sind.

Feld Nr. III Bemerkungen bei mangelnder Einheitlichkeit der Erfindung (Fortsetzung von Punkt 3 auf Blatt 1)

Diese Internationale Recherchenbehörde hat festgestellt, dass diese internationale Anmeldung mehrere Erfindungen enthält:

1. ☐ Da der Anmelder alle erforderlichen zusätzlichen Recherchegebühren rechtzeitig entrichtet hat, erstreckt sich dieser internationale Recherchenbericht auf alle recherchierbaren Ansprüche.
2. ☐ Da für alle recherchierbaren Ansprüche die Recherche ohne einen Arbeitsaufwand durchgeführt werden konnte, der zusätzliche Recherchegebühr gerechtfertigt hätte, hat die Behörde nicht zur Zahlung solcher Gebühren aufgefordert.
3. ☐ Da der Anmelder nur einige der erforderlichen zusätzlichen Recherchegebühren rechtzeitig entrichtet hat, erstreckt sich dieser internationale Recherchenbericht nur auf die Ansprüche, für die Gebühren entrichtet worden sind, nämlich auf die Ansprüche Nr.
4. ☐ Der Anmelder hat die erforderlichen zusätzlichen Recherchegebühren nicht rechtzeitig entrichtet. Dieser internationale Recherchenbericht beschränkt sich daher auf die in den Ansprüchen zuerst erwähnte Erfindung; diese ist in folgenden Ansprüchen erfasst:

Bemerkungen hinsichtlich eines Widerspruchs

- ☐ Der Anmelder hat die zusätzlichen Recherchegebühren unter Widerspruch entrichtet und die gegebenenfalls erforderliche Widerspruchsgebühr gezahlt.
- ☐ Die zusätzlichen Recherchegebühren wurden vom Anmelder unter Widerspruch gezahlt, jedoch wurde die entsprechende Widerspruchsgebühr nicht innerhalb der in der Aufforderung angegebenen Frist entrichtet.
- ☐ Die Zahlung der zusätzlichen Recherchegebühren erfolgte ohne Widerspruch.

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. A61B5/00 G01L1/24 G01N3/40 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) A61B G01L G01B G01N		
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal, WPI Data		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	MOERMAN KEVIN M ET AL: "A novel MRI compatible soft tissue indenter and fibre Bragg grating force sensor", MEDICAL ENGINEERING & PHYSICS, BUTTERWORTH-HEINEMANN, GB, Bd. 35, Nr. 4, 20. Juli 2012 (2012-07-20), Seiten 486-499, XP028544537, ISSN: 1350-4533, DOI: 10.1016/J.MEDENGPY.2012.06.014 Zusammenfassung Abbildung 4 Abschnitt 1, Zeilen 24-28 Abschnitt 2 Abschnitt 2.2.2 Abschnitt 2.2.3 Abschnitt 2.2.4 ----- -/--	1-22,26, 27
☒ Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie		
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen : "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt) "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche 17. Juni 2016		Absendedatum des internationalen Recherchenberichts 29/06/2016
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016		Bevollmächtigter Bediensteter Albrecht, Ronald

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	CHRISTOPHER R DENNISON ET AL: "An in-fiber Bragg grating sensor for contact force and stress measurements in articular joints;An in-fiber Bragg grating sensor for contact force and stress measurements in articular joints", MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, IOP, BRISTOL, GB, Bd. 21, Nr. 11, 6. Oktober 2010 (2010-10-06), Seite 115803, XP020199908, ISSN: 0957-0233, DOI: 10.1088/0957-0233/21/11/115803 Zusammenfassung Seite 6; Tabelle 1	2,17,19, 26
A	----- KIT MAN CHUNG ET AL: "Highly Sensitive Compact Force Sensor Based on Microfiber Bragg Grating", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, IEEE SERVICE CENTER, PISCATAWAY, NJ, US, Bd. 24, Nr. 8, 1. April 2012 (2012-04-01), Seiten 700-702, XP011440353, ISSN: 1041-1135, DOI: 10.1109/LPT.2012.2187049 Abschnitt III, letzter Absatz)	17,26
A	----- WO 2012/015592 A2 (UNIV CALIFORNIA [US]; RANDALL CONNOR [US]; BRIDGES DANIEL [US]; HANSMA) 2. Februar 2012 (2012-02-02) Absätze [0031], [0033], [0060]	1,4,5, 17,19
A	----- WO 99/53292 A1 (SMITH & NEPHEW INC [US]) 21. Oktober 1999 (1999-10-21) Zusammenfassung Sätze 19-27	15-17,19

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2016/000475

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2012015592 A2	02-02-2012	EP 2598027 A2	05-06-2013
		US 2013122466 A1	16-05-2013
		WO 2012015592 A2	02-02-2012

WO 9953292 A1	21-10-1999	AR 014835 A1	28-03-2001
		AU 3213199 A	01-11-1999
		US 6068604 A	30-05-2000
		WO 9953292 A1	21-10-1999
