



(10) **DE 10 2014 205 790 A1** 2015.10.01

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2014 205 790.6**

(22) Anmeldetag: **27.03.2014**

(43) Offenlegungstag: **01.10.2015**

(51) Int Cl.: **B81B 1/00 (2006.01)**

B81B 5/00 (2006.01)

G01N 33/48 (2006.01)

G01N 21/00 (2006.01)

G01N 33/50 (2006.01)

G02B 26/00 (2006.01)

B81B 7/02 (2006.01)

(71) Anmelder:
**Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 79098
Freiburg, DE**

(74) Vertreter:
**Grünecker Patent- und Rechtsanwälte PartG
mbB, 80802 München, DE**

(72) Erfinder:
**Schuhladen, Stefan, 79102 Freiburg, DE; Kopp,
Daniel, 78733 Aichhalden, DE; Müller, Philipp,
Oberrieden, CH; Zappe, Hans, Zürich, CH**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

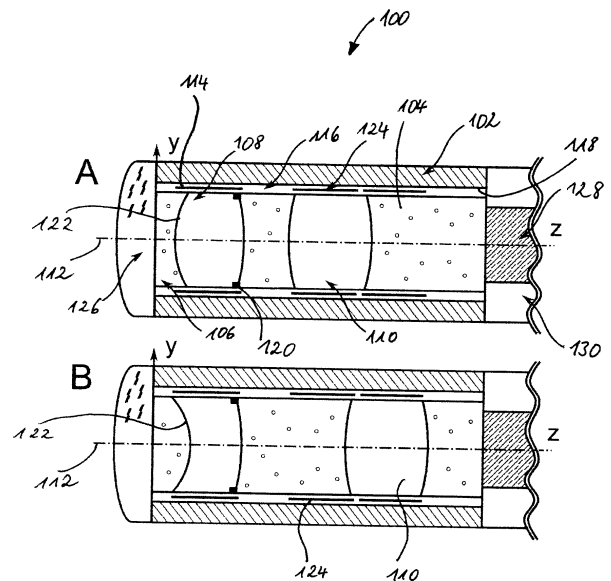
DE	28 17 525	A1
DE	698 04 119	T2
US	7 359 124	B1
US	2010 / 0 276 492	A1
US	5 886 332	A
WO	2007/ 069 213	A2
WO	2009/ 117 854	A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Optofluidisches Bauelement**

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein optofluidisches Bauelement zum Ausbilden eines optischen Pfades für elektromagnetische Strahlung. Das optofluidische Bauelement (100) weist ein Gehäuse (102) mit einem Hohlraum (104) auf, der zum Führen der Strahlung mit mindestens einer Fluidkomponente (106, 108, 110) gefüllt ist. Eine Steuereinheit (114, 124, 134, 140; 138, 150) ist zum gesteuerten Verändern optischer Eigenschaften der Fluidkomponente vorgesehen, wobei die Steuereinheit einen flexiblen Träger (116) umfasst, der auf einer der Fluidkomponente zugewandten Innenfläche einer den Hohlraum begrenzenden Wandung angeordnet ist.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein optofluidisches Bauelement zum Ausbilden eines optischen Pfades für elektromagnetische Strahlung. Seit einiger Zeit wurden Konzepte entwickelt, um verschiedene optische Bauelemente, insbesondere mit veränderlichen Optiken mit Hilfe optofluidischer Anordnungen zu realisieren. Im Bereich stark miniaturisierter Anordnungen basieren diese im Stand der Technik vorgestellten Konzepte, z. B. für Endoskopsonden, meist auf optischen Komponenten aus festen Materialien, die nicht durchstimmbare sind, beispielsweise feststehende Blenden oder festbrennweitige Linsen. Damit ist die Funktionalität dieser Systeme eingeschränkt. Zudem müssen bei komplexen optischen Systemen mehrere Einzelkomponenten präzise zueinander ausgerichtet und positioniert werden. Jede optische Komponente muss außerdem einzeln gefertigt werden. Daher steigt im Allgemeinen der Aufwand für Fertigung und Systemzusammenbau mit dem Grad der Miniaturisierung.

[0002] Die optofluidische Technologie ist eine Möglichkeit, optische Bauelemente mit einer Vielzahl von Funktionen ohne bewegte mechanische Teile zu realisieren. In den letzten Jahren hat sich die Optofluidik als ein neues Paradigma für Mikrooptik von einer Nischentechnologie zu einem weit verbreiteten Ansatz in den verschiedensten Gebieten entwickelt. Optofluidische Bauelemente nutzen die Wechselwirkung von Licht mit einem Fluid, meistens einer Flüssigkeit, gelegentlich aber auch einem Gas, um spezifische optische Funktionen zu realisieren. Gegenwärtig existieren drei wesentliche Anwendungsgebiete für optofluidische Bauelemente:

1. Lab-on-a-Chip (LoC), insbesondere photonische LoC (PhLoC)
2. Abstimmbare optische Bauteile, wie flüssige Linsen, flüssige Blenden, flüssige Spiegel, abstimmbare Faseroptik und dergleichen
3. Displays

[0003] Allgemein beinhalten die Abstimmechanismen für optofluidische Bauteile den fluidischen Austausch einer Flüssigkeit durch eine andere, das Anpassen eines Flüssigkeitsstroms (meist eines laminaren Stroms), elektrooptische Effekte, eine optische Ansteuerung wie optische Pinzetten, eine thermische Aktuierung, beispielsweise über den thermokapillaren Effekt, direkte Elektrobenetzung (Electrowetting, EW), das sogenannte Electrowetting-on-Dielectrics (EWOD), Dielektrophorese (DEP), Druck, das Ausüben äußerer Kräfte über Membranen und Inertialkräfte. Allerdings lassen sich viele der bislang entwickelten Konzepte nicht weit genug miniaturisieren, um die heutigen Anforderungen bezüglich der Miniaturisierung in der Optik zu erfüllen. Klassische optische Bauelemente, die auf festen Materialien wie Glas oder Polymeren basieren, sind daher in Anwendungsgebieten wie der digitalen Fotografie, für medizinische Endoskope, biomedizinische Sensoren, mobile Geräte und dergleichen immer noch überwiegend vertreten.

[0004] Bekannte optofluidische Bauelemente sind beispielsweise die flüssigen Linsen, die in dem Artikel Kuiper, S., B. H. W. Hendriks: Variable-focus liquid lens for miniature cameras. *Applied Physics Letters*, 85(7): 1128–1130, 2004, oder in Krupenkin, T., S. Yang, and P. Mach: Tunable liquid microlens. *Applied Physics* 82 (3): 316–318, 2003, beschrieben sind. Eine kommerzialisierte Lösung wird von der französischen Firma Vari-optik in Lyon angeboten.

[0005] Das Prinzip einer flüssigen Linse mit variablem Fokus ist auch in dem US-Patent 6,369,954 B1 gezeigt. Wie hier beispielsweise aus der **Fig. 6** hervorgeht, befinden sich Elektroden an der Außenseite einer dielektrischen Kammer und in der Nähe einer Kontaktregion, deren Benetzbarkeit nach dem Elektrobenetzbarkeitsprinzip durch die von den Elektroden vorhandenen Potenziale beeinflusst wird. Die Brennweite der Linse kann durch entsprechende Variation der Spannung an den Elektroden verändert werden.

[0006] Auf dem Prinzip der Elektrobenetzung basieren außerdem abgleichbare Flüssigprismen, wie z. B. aus dem Artikel Smith, Neil R., Don C. Abeyinghe, Joseph W. Haus, and Jason Heikenfeld: Agile wideangle beam steering with electrowetting micropisms. *Optics Express*, 14(14): 6557–6563, 2006, bekannt.

[0007] Weiterhin existieren abstimmbare Flüssigaperturen (im englischen Sprachraum auch oft als „liquid iris“ bezeichnet), wie sie beispielsweise in dem US-Patent 7,245,347 B2, und den Publikationen Kimmle, Christina, Christoph Doering, Anna Steuer, and Henning Fouckhardt: Compact dynamic microfluidic iris array. In *Proceedings of SPIE: Optomechanics 2011 – Innovations and Solutions*, volume 8125, pp. 548–550, DOI: 10.1117/12.892450, 2011; Hongbin, Yu, Zhou Guangya, Chau Fook Siong, and Lee Feiwen: Optofluidic variable aperture. *Optics Letters*, 33: 548–550, 2008; Ren, Hongwen and Shin TsonWu: Optical switch using a deformable liquid droplet. *Optics Letters*, 35(22): 3826–3828, 2010; Tsai, C. Gary and J. Andrew Yeh: Circular dielectric liquid iris. *Optics Letters*, 35(14): 2484–2486, 2010; Müller, Philipp, Nils Spengler, Hans Zappe, and Wolfgang Mönch: An optofluidic concept for a tunable micro-iris. *Journal of Microelectromechanical Systems*,

19(6): 1477–1484, 2010; dem US-Patent 7,859,741 B2, sowie den Artikeln Draheim, J., T. Burger, J. G. Korvink, and U. Wallrabe: Variable aperture stop based on the design of a single chamber silicone membrane lens with integrated actuation. *Optics Letters*, 36: 2032–2034, 2011; Murade, C. U., J. M. Oh, D. van den Ende, and F. Mugele: Electrowetting driven optical switch and tunable aperture. *Optics Express*, 19(16): 15525–15531, 2011; und Müller, Philipp, Roland Feuerstein, and Hans Zappe: Integrated optofluidic microiris. *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 21, No. 5, October 2012, p. 1156–1164; beschrieben sind. Dabei werden verschiedene Prinzipien angewendet, um eine opake Phase in definierter Art und Weise in den Strahlengang einzubringen, so dass eine Apertur mit einem veränderbaren Öffnungsdurchmesser entsteht.

[0008] Abstimmbare Flüssigspiegel können zum einen als Spiegel an der Grenzfläche fest-flüssig realisiert werden. Dabei kann, wie in dem Artikel Wan, Zhiliang, Hongjun Zeng, and Alan Feinerman: Area-tunable micromirror based on electrowetting actuation of liquid-metal droplets. *Applied Physics Letters*, 89: 201107 (3pp), 2006, gezeigt, die Spiegelfläche abstimmbare sein oder wie in Bucaro, Michael A., Paul R. Kolodner, J. Ashley Taylor, Alex Sidorenko, Joanna Aizenberg, and Tom N. Krupenkin: Tunable liquid optics: electrowetting-controlled liquid mirrors based on self-assembled janus tiles. *Langmuir*, 25: 3876–3879, 2009 gezeigt, die Krümmung abstimmbare sein. Der Artikel Llobera, A., S. Demming, R. Wilke, and S. Büttgenbach: Multiple internal reflection poly(dimethylsiloxane) systems for optical sensing. *Lab Chip*, 7: 1560–1566, 2007, schließlich offenbart einen Fest-Flüssig-Spiegel, der auf Totalreflexion beruht.

[0009] Weiterhin existieren auch Spiegel, die auf einer Totalreflexion an Flüssig-Flüssig-Grenzflächen basieren, wie dies beispielsweise in Müller, Philipp, Daniel Kopp, Andreu Llobera, and Hans Zappe: Optofluidic router based on tunable liquid-liquid mirrors. *Lab Chip*, 2014, 14, 737–743, dargestellt ist. Schließlich existieren auch schaltbare Flüssigfilter und Flüssigblenden, wie sie beispielsweise in Müller, Philipp, Anton Kloss, Peter Liebraut, Wolfgang Mönch, and Hans Zappe: A fully integrated optofluidic attenuator. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 21(12): 125027–125040, 2011, gezeigt sind.

[0010] Allen diesen bekannten optischen Bauelementen ist gemeinsam, dass sie stets als Einzelkomponenten realisiert werden. Will man daher ein komplexeres Bauteil mit mehreren derartigen Komponenten realisieren, ist zum einen der Aufbau und die Herstellung teuer, zum anderen die Justierung der Einzelkomponenten mit Bezug aufeinander schwierig.

[0011] Andererseits existieren diverse Vorschläge für hochintegrierte flexible Polymersubstrate, wie beispielsweise Dünnschichtelektrodenarrays, die für neuronale Implantate eingesetzt werden. Durch Einsatz von Reinraumfabrikationsbedingungen können Elektroden mit hoher Strichdichte auf einer vorgegebenen Fläche strukturiert werden. Beispielsweise beschreibt Ordonez, Juan S., Christian Boehler, Martin Schuettler, and Thomas Stieglitz: Improved polyimide thin-film electrodes for neural implants. In 34th Annual International Conference of the IEEE EMBS, pages 5134–5137, 2012, dass Bahnbreiten von 10 μm mit Abständen von 12 μm wiederholt strukturiert werden können. Weiterhin können dünne Polymersubstrate, die meist aus Polyimid hergestellt sind, bei Anlage an weiches biologisches Gewebe optimalen Kontakt aufgrund ihrer hohen Flexibilität herstellen.

[0012] Die Verwendung von Polyimid bei flexiblen Substraten ist für eine Vielzahl von Anwendungen bereits bekannt, wie dies die folgenden Beispiele belegen: flexible Displays mit aktiver Matrix werden in Gelinck, Gerwin H. et al.: Flexible active-matrix displays and shift registers based on solution-processed organic transistors. *Nature Materials*, 3: 106–110, 2004, beschrieben. Hier werden Metallelektroden in Kombination mit einem organischen Halbleiter und einem Gate-Dielektrikum auf der Oberseite von Polyimidfolien verwendet.

[0013] Kim, Dae Hyeong, Jong Hyun Ahn, Hoon Sik Kim, Keon Jae Lee, Tae Ho Kim, Chang Jae Yu, Ralph G. Nuzzo, and John A. Rogers: Complementary logic gates and ring oscillators on plastic substrates by use of printed ribbons of single-crystalline silicon. *IEEE Electron Device Letters*, 29(1): 73–76, 2008, zeigt einen flexiblen Ringoszillator und demonstriert damit die Funktionalität eines elektrischen logischen Schaltkreises auf einem flexiblen Substrat.

[0014] Weiterhin beschreibt beispielsweise Tiwari, A. N., A. Romeo, D. Baetzner, and H. Zogg: Flexible CdTe solar cells on polymer films. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 9: 211–215, 2001 flexible Solarzellen und insbesondere leichte und flexible CdTe-CdS-Solarzellen auf Polyimid.

[0015] Ein flexibler miniaturisierter Temperatursensor ist in dem Artikel Moser, Yves and Martin A. M. Gijss: Miniaturized flexible temperature sensor. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 16(6): 1349–1354, 2007, gezeigt. Der Sensor basiert auf einem Dünnschichtplatinwiderstand, der in eine Polyimidfolie eingebettet ist.

[0016] Ultradünne Chips werden auf einer Folie aufgebracht, um flexible elektronische Schaltkreise herzustellen. Beispielsweise zeigt Rempp, Horst, Joachim Burghartz, Christine Harendt, Nicoleta Pricopi, Marcus Pritschow, Christian Reuter, Harald Richter, Inge Schindler, and Martin Zimmermann: Ultra-thin chips on foil for flexible electronics. In IEEE International Conference on Solid-State Circuits, pages 334–617, 2008, die Verwendung von gedünnten Siliziumchips (in der Größenordnung von wenigen 10 μm), die auf eine Polyimidfolie montiert sind, um einen hohen Grad an Integration zu realisieren. Schließlich wurden auch bereits Elektrobenetzungs-systeme (EWOD) auf Foliensubstraten vorgeschlagen (siehe beispielsweise Abdelgawad, Mohamed and Aaron R. Wheeler: Low-cost, rapid-prototyping of digital microfluidics devices. Microfluid Nanofluid, 4: 349–355, 2008). Dieses System hat ein offenes Design, d. h. Flüssigkeitstropfen werden auf Foliensubstraten in Umgebungsluft bewegt.

[0017] All diesen bekannten flexiblen Schaltungsträgern ist aber gemeinsam, dass sie von ihrer Funktionalität her nur als eine in geringem Maße auslenkbare zweidimensionale Struktur betrachtet werden.

[0018] Es besteht daher ein Bedürfnis nach einem optofluidischem Bauelement, das in hochintegrierter Form und in äußerst kompakter Geometrie ein robustes und hochfunktionelles optisches System bereitstellt.

[0019] Dabei basiert die vorliegende Erfindung auf der Idee, Elektroden und andere Aktuierungsstrukturen, die für optofluidische Bauteile benötigt werden, im Inneren eines fluidgefüllten Hohlraumes, der durch das Gehäuse des optofluidischen Bauelements gebildet ist, anzuordnen. Dadurch, dass der flexible Träger zunächst separat mit allen benötigten Strukturen und Bauteilen versehen wird und erst dann im Inneren des optofluidischen Bauelements montiert wird, können hochkomplexe Strukturen auf exakte Art und Weise an von außen schwer zugänglichen Bauteilregionen angebracht werden.

[0020] Mit dem erfindungsgemäßen Ansatz ist es möglich, hochfunktionelle optische Systeme innerhalb einer ultrakompakten Geometrie zu realisieren. Systeme mit mehr als nur einer abstimmbaren optischen Komponente können leicht erstellt werden. Damit kann die Integration einer Vielzahl von abstimmbaren Komponenten im Bedarfsfall einfach realisiert werden. Es sind keine bewegten mechanischen Teile erforderlich, so dass ein mechanischer Verschleiß als Ausfallursache wegfällt. Weiterhin ist keine komplexe Assemblierung mechanischer Teile nötig, wie dies momentan für mit Spulen aktuierte Linsenstapel erforderlich ist.

[0021] Die Verwendung eines hochintegrierten multifunktionalen flexiblen Trägers, der elektrische, mikrofluidische und optische Aufgaben erfüllen kann, bietet zum einen den Vorteil einer hohen Justiergenauigkeit der optischen Elemente, da die exzellenten Justiereigenschaften der lithografischen Strukturierung beim Positionieren der Strukturen auf dem Träger ausgenutzt werden können. Weiterhin ist die elektrische Kontaktierung und Ansteuerung der Flüssigkeiten beispielsweise auch die elektrofluidische Aktuierung z. B. für EWOD, DEP oder dergleichen leicht realisierbar.

[0022] Das erfindungsgemäße System ist kompatibel mit einer kostengünstigen Massenfertigung, bei der sowohl das Gehäuse als auch die flexible Trägerstruktur im Rahmen von Standardplanartechniken und Batchprozessen hergestellt werden können. Eine Automatisierung der Endmontage ist leicht möglich und die Justierung der Einzelkomponenten mit Bezug aufeinander wird nicht mehr bei der Assemblierung, sondern, wie bereits erwähnt, schon während der fotolithografischen Strukturierung des flexiblen Trägers durchgeführt.

[0023] Damit ist die Aufbau- und Verbindungstechnik des Gesamtsystems erfindungsgemäß besonders einfach: Die benötigten Flüssigkeiten können über eine automatisierte präzise Dosierung entsprechend zugeführt werden. Aufgrund entsprechender Oberflächenstrukturierung und/oder Beschichtung der den Fluiden zugewandten Oberfläche des flexiblen Trägers lässt sich erreichen, dass die Fluide beim Einfüllen von präzise dosierten Volumina selbständig die beabsichtigte geometrische Gestalt einnehmen.

[0024] Mit Hilfe des erfindungsgemäßen Ansatzes ist es auf besonders einfache Weise möglich, eine Vielzahl von optischen Formen zu realisieren: Kugelige Oberflächen (refraktiv und reflektiv), konkave, konvexe und nicht abstimmbare asphärische Linsen (in Form von Festkörperbauteilen) können leicht kombiniert werden. Weiterhin können auch die optischen Eigenschaften der Fluide bezüglich Brechungsindex, Dispersion, Transmissionsspektrum und dergleichen in einem weiten Rahmen gewählt werden. Abstimmbare und nicht abstimmbare Elemente können leicht miteinander kombiniert werden.

[0025] Im Folgenden wird mit dem Begriff "Steuereinheit" die Vielzahl von möglichen Aktuierungselementen bezeichnet, die zu einer Veränderung der optischen Eigenschaften der jeweiligen Fluidkomponenten führen.

Dies umfasst beispielsweise Elektroden mit oder ohne Oberflächenmodifikationen, aber auch Mikrokanäle zum Zuführen und Abführen von Fluiden.

[0026] Gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform umfasst der flexible Träger eine Folie, in der mindestens ein elektrisch leitendes Element vorgesehen ist. Dieses elektrisch leitende Element kann gegenüber der Fluidkomponente entweder elektrisch isoliert sein, oder aber offen und direkt mit dem Fluid in Kontakt sein. Eine elektrische Isolierung ist für all die Aktuierungsverfahren nötig, die über kapazitive oder induktive Wechselwirkung arbeiten, während eine offene Elektrode benötigt wird, wenn direkt ein Potenzial, beispielsweise Masse, an das Fluid angelegt werden soll.

[0027] Um verschiedenartige Strukturen in einer Folienstruktur zu realisieren, kann die flexible Folie mehrlagig mit einer Vielzahl von voneinander isolierten elektrisch leitenden Elementen, aber auch weiteren elektronischen Komponenten ausgeführt sein. Beispielsweise können auch aktive und passive elektronische Bauteile wie Widerstände, Kondensatoren, Spulen aber auch LEDs und Steuerelektronik sowie strahlungsdetektierende Bauteile in der Folie selbst integriert sein. Die flexible Trägerstruktur kann außerdem auch Heizelemente enthalten, die elektrisch ansteuerbar sind.

[0028] Erfindungsgemäß bildet das Gehäuse des optofluidischen Bauelements einen Hohlraum aus, der zum Führen der Strahlung mit mindestens einer Fluidkomponente gefüllt ist, und das Gehäuse kann in vorteilhafter Weise eine rohrförmige Gestalt haben. Der darin gebildete Hohlraum kann jeden geeigneten Querschnitt aufweisen, z. B. kreisförmig, polygonal oder elliptisch. Zum Montieren des flexiblen Trägers an der Innenseite der den Hohlraum begrenzenden Wandung ist es am einfachsten, wenn das Gehäuse eine kreiszylindrische Gestalt hat, da auf diese Weise die Folie besonders leicht an den Innenquerschnitt des Hohlraums anzupassen ist.

[0029] Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des erfindungsgemäßen optofluidischen Bauelements kann die Wandung des Hohlraums zumindest teilweise flexibel ausgestaltet sein, so dass zusätzlich durch einen an dem optofluidischen Bauelement angebrachten Gehäuseaktuator diese Wandung auslenkbar ist. Durch das Anbringen von beispielsweise pneumatischen Aktuatoren an der Außenseite einer flexiblen Gehäusestruktur kann das rohrförmige Gehäuse aus der ursprünglichen optischen Achse wegbewegt werden, so dass beispielsweise die Fähigkeit erreicht werden kann, Licht außerhalb der optischen Hauptachse zu senden und/oder zu empfangen.

[0030] Bei der erfindungsgemäßen optofluidischen Struktur können je nach Bedarf durch Einbringen transparenter Bereiche strahlungsdurchlässige Fenster vorgesehen werden. Zum Schutz gegen unerwünschtes Streulicht kann aber selbstverständlich das Gehäuse und damit die Wandung des Hohlraums auch opak ausgeführt sein. Aufbau- und verbindungstechnisch lässt sich das erfindungsgemäße optofluidische Bauelement besonders einfach realisieren, wenn eine optische Achse des Bauelements mit der longitudinalen Symmetrieachse des Hohlraums zusammenfällt. Im einfachsten Fall wird das Gehäuse des optofluidischen Bauelements durch einen rotationssymmetrischen Hohlzylinder gebildet.

[0031] Sowohl zum Befüllen des Bauteils mit den benötigten Fluiden als auch für die eigentliche optische Funktionalität kann auf besonders einfache Weise eine dem Fluid zugewandte geometrische Oberflächenstruktur und/oder Oberflächenbeschichtung dadurch präsentiert werden, dass sie auf der Oberfläche des flexiblen Trägers vorgesehen ist.

[0032] Je nach Anwendungsfall kann auf einfache Weise bei dem optofluidischen Bauelement gemäß der vorliegenden Erfindung ein lichtemittierendes oder lichtempfangendes optisches Bauelement an einer Außenseite der den Hohlraum begrenzenden Wandung angeordnet sein. Beispielsweise kann an einer der Stirnseiten eines hohlzylindrischen Gehäuses ein CMOS-Fotoelement oder jede andere Art von Licht empfangendem Bauteil angeordnet sein.

[0033] Um beispielsweise einen Flüssig-Flüssig-Spiegel zu realisieren, kann in vorteilhafter Weise der Hohlraum in zwei Kompartimente aufgeteilt sein, die jeweils ein mit dem anderen Fluid nicht mischbares Fluid mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften beinhalten. Gemäß einer weiteren vorteilhaften Ausbildung der vorliegenden Erfindung ist mindestens ein Optikaktuator zum Steuern der optischen Eigenschaften der mindestens einen Fluidkomponente an dem flexiblen Träger angeordnet. Damit kann eine besonders präzise Fertigung in einem Planar-Batchprozess erreicht werden und der Aktuator wird zusammen mit dem flexiblen Träger in das Gehäuse eingefügt.

[0034] Wie bereits ausgeführt, kann der mindestens eine Optikaktuator durch eine Vielzahl von Komponenten realisiert werden, beispielsweise eine Elektrodenanordnung zum Aktuieren der mindestens einen Fluidkomponente mittels direkter Elektrobenetzung, mittels des Electrowetting-on-Dielectrics (EWOD), einer Dielektrophorese und/oder einer Heizstruktur zum Aktuieren der Fluidkomponente mittels Thermokapillarkräften.

[0035] Weiterhin kann das optofluidische Bauelement gemäß der vorliegenden Erfindung auch eine Pumpenstruktur zum hydraulischen oder pneumatischen Aktuieren der mindestens einen Fluidkomponente enthalten. Durch Einpumpen kann beispielsweise eine gefärbte Fluidkomponente in den Strahlengang eingefügt und auch wieder entfernt werden, um eine Irisblende zu realisieren. Pumpenvorgänge lassen sich aber auch dazu verwenden, um Grenzflächen zwischen zwei Fluiden zu verschieben oder um gezielt Fluide gegen solche mit anderen optischen Eigenschaften auszutauschen.

[0036] Um eine möglichst einfache Herstellbarkeit zu gewährleisten, werden gemäß der vorliegenden Erfindung das Gehäuse des optofluidischen Bauelements mit seinem Hohlraum und der flexible Träger der Steuereinheit als separate Bauteile hergestellt und anschließend zusammengefügt. Auf besonders effiziente Weise geschieht diese Montage, indem der flexible Träger in den Hohlraum eingeschoben wird und dann an der den Hohlraum begrenzenden Wandung mittels einer Klebung, einer Schweißung und/oder eines Formschlusses fixiert wird.

[0037] Um Strahlung in das optofluidische Bauelement einzuspeisen und aus ihm wieder auszukoppeln, können im Strahlungseintritts- und/oder Strahlungsaustrittsbereich Linsenstrukturen oder optische Fenster vorgesehen sein, die auch dafür eingerichtet sind, den Hohlraum fluiddicht zu versiegeln. Auf besonders einfache Weise lässt sich dies bei einem rohrförmigen Gehäuse realisieren, bei dem an den beiden Stirnseiten jeweils entsprechende Linsen und/oder Halterungen für Lichtleitfasern angebracht werden.

[0038] Zum besseren Verständnis der vorliegenden Erfindung wird diese anhand der in den nachfolgenden Figuren dargestellten Ausführungsbeispiele näher erläutert. Dabei werden gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen und gleichen Bauteilbezeichnungen versehen. Weiterhin können auch einzelne Merkmale oder Merkmalskombinationen aus den gezeigten und beschriebenen Ausführungsformen für sich genommen eigenständige erfinderische oder erfindungsgemäße Lösungen darstellen.

[0039] Es zeigen:

[0040] Fig. 1 eine schematische Längsschnittdarstellung eines optofluidischen Bauelements gemäß einer ersten Ausführungsform in zwei Betriebszuständen;

[0041] Fig. 2 einen Querschnitt durch das optofluidische Bauelement gemäß Fig. 1;

[0042] Fig. 3 ein Detail des optofluidischen Bauelements der Fig. 1;

[0043] Fig. 4 eine Querschnittsdarstellung des Details aus Fig. 3;

[0044] Fig. 5 eine schematische Längsschnittdarstellung eines rotierenden Prismas;

[0045] Fig. 6 einen Querschnitt durch das Prisma der Fig. 5;

[0046] Fig. 7 eine schematische Darstellung einer abstimmbaren Flüssigapertur;

[0047] Fig. 8 eine schematische Längsschnittdarstellung einer weiteren Ausführungsform einer abstimmbaren Flüssigapertur;

[0048] Fig. 9 einen Querschnitt durch die Anordnung aus Fig. 7;

[0049] Fig. 10 eine schematische Darstellung einer abstimmbaren Flüssiglinse;

[0050] Fig. 11 eine schematische Darstellung einer weiteren abstimmbaren Linse;

[0051] Fig. 12 einen Schnitt durch die Anordnung der Fig. 10;

[0052] Fig. 13 eine schematische Darstellung eines abstimmbaren Flüssigspiegels;

[0053] Fig. 14 einen Querschnitt durch die Anordnung aus Fig. 13;

[0054] Fig. 15 eine Darstellung eines abstimmbaren optischen Filters in einem ersten und einem zweiten Betriebszustand;

[0055] Fig. 16 eine Schnittdarstellung durch die Anordnung aus Fig. 15;

[0056] Fig. 17 ein Beispiel für eine Gesamtanordnung eines optofluidischen Bauelements mit abstimmbarer Flüssigapertur;

[0057] Fig. 18 eine Darstellung eines vollständigen optofluidischen Bauelements mit einem EWOD-Flüssigprisma;

[0058] Fig. 19 eine Darstellung eines vollständigen optofluidischen Bauelements mit einem EWOD-Flüssigspiegel;

[0059] Fig. 20 eine schematische Darstellung eines teleskopischen Abbildungssystems;

[0060] Fig. 21 eine schematische Darstellung eines optischen Kohärenztomografie- und Mikroskopiesystems;

[0061] Fig. 22 eine schematische Darstellung eines teleskopischen Abbildungssystems mit von außen angebrachten mechanischen Aktoren;

[0062] Fig. 23 einen Schnitt durch die Anordnung aus Fig. 22.

[0063] Fig. 1 zeigt ein optofluidisches Bauelement **100** gemäß einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Dabei zeigen die Fig. 1A und Fig. 1B zwei unterschiedliche Betriebszustände des optofluidischen Bauelements **100**. Der mechanische Aufbau soll zunächst mit Bezug auf die Fig. 1A erläutert werden. Das optofluidische Bauelement **100** umfasst ein Gehäuse **102**, das beispielsweise aus Kunststoff hergestellt sein kann und wie aus Fig. 2 ersichtlich ist, beispielsweise einen kreisförmigen Durchmesser haben kann.

[0064] Selbstverständlich sind aber auch andere Raumformen, wie beispielsweise polygonale oder elliptische Querschnitte ebenfalls möglich.

[0065] Im Inneren des Gehäuses **102** ist ein Hohlraum **104** ausgebildet, der zum Führen elektromagnetischer Strahlung, insbesondere zur Führung von sichtbarem Licht, Laserlicht oder Infrarotstrahlung, geeignet ist. Gemäß der vorliegenden Erfindung sind in dem Hohlraum Fluidkomponenten enthalten, deren optische Eigenschaften sich gezielt steuern lassen. Im speziellen Fall sind dies verschiedene nicht mischbare Flüssigkeiten, die, wie dies später noch erläutert werden wird, Linsen mit steuerbarer Form ausbilden. Wie in Fig. 1A gezeigt, ist in einer ersten Flüssigkeit **106** in zwei Regionen jeweils eine zweite und eine dritte Flüssigkeit **108**, **110** eingebettet. Beispielsweise kann die erste Flüssigkeit ein Öl sein, während die zweite Flüssigkeit **108** und die dritte Flüssigkeit **110** eine damit nicht mischbare Flüssigkeit wie beispielsweise Wasser, sein kann. Die Prinzipien der vorliegenden Erfindung lassen sich aber auch auf andere Flüssigkeiten und auch auf Gase anwenden.

[0066] Die beiden Flüssigkeitskompartimente **108** und **110** bilden Linsen mit einer gemeinsamen optischen Achse **112**, die gleichzeitig auch die Mittelachse des Hohlraums **104** ist, aus. Zum Ansteuern der optischen Eigenschaften dieser beiden Linsen wird erfindungsgemäß der Meniskus der Grenzfläche zwischen der ersten Flüssigkeit **106** und der zweiten Flüssigkeit **108** durch Elektrobenetzung verändert. Hierfür ist eine erste Elektrodenanordnung **114** vorgesehen. Wie dies später noch mit Bezug auf Fig. 3 und Fig. 4 erläutert wird, kann über die Ansteuerung der Elektrodenanordnung **114** eine durch die Flüssigkeit **108** gebildete Linse verformt werden. So kann aus der in Fig. 1A gezeigten konkaven Dispersionslinse im aktuierten Zustand (Fig. 1B) eine konvexe Linse geschaffen werden.

[0067] Um den hohen Kontaktwinkel der wässrigen Phase zu gewährleisten, ist die dem Fluid zugewandte Oberfläche hydrophob beschichtet.

[0068] Der Grundgedanke der vorliegenden Erfindung besteht nun darin, die Steuereigenschaften der Elektrode **114** und einer geeigneten Oberflächenbeschichtung in Form eines flexiblen Trägers **116** zu realisieren. Erfindungsgemäß wird der flexible Träger **116** an der Innenwandung **118** des Hohlraums **104** angebracht. Der flexible Träger **116** kann beispielsweise durch eine Polyimidfolie mit eingebetteten Elektrodenstrukturen **114**

gebildet sein. Um die Flüssigkeit auf ein definiertes Potenzial zu legen, ist außerdem eine offene Elektrode **120** an der Oberfläche der Folie **116** aufgebracht. Durch Anlegen einer Spannung an die ringförmige Elektrode **114** im Inneren der Folie **116** kann daher die Flüssig-Flüssig-Grenzfläche **122** in ihrer Krümmung verändert werden.

[0069] Aufgrund einer hydrophoben Beschichtung auf der Oberfläche der Folie **116** wird ein hoher Kontaktwinkel der wässrigen Phase im unbetätigten Zustand (**Fig. 1A**) erzeugt und daher eine konkave Linsenfläche generiert. Wird die Spannung an der Ringelektrode **114** erhöht, ändert sich nach den Prinzipien der Elektrobenetzung der Kontaktwinkel und die Krümmung der Flüssig-Flüssig-Grenzfläche **122** kann verändert werden, bis sie beispielsweise die in **Fig. 1B** gezeigte Form hat.

[0070] Unterschiedliche Krümmungsradien können durch unterschiedliche Spannungswerte an der Elektrode **114** erreicht werden. Die erforderlichen Zuleitungen zu einer in dieser Figur nicht dargestellten Spannungsversorgung können ebenfalls in dem flexiblen Träger **116** realisiert werden.

[0071] Für die Befestigung des flexiblen Trägers **116** an der Innenwandung **118** des Gehäuses **102** können alle geeigneten Verfahren verwendet werden. Beispielsweise können Klebungen oder Plasmapbonding ebenso wie Ultraschall- und Laserschweißen eingesetzt werden, je nach Ausgestaltung des Gehäuses **102**. Weiterhin können auch formschlüssige Befestigungsmechanismen bei geeigneter Ausformung des Gehäuses verwendet werden.

[0072] Das optofluidische Bauelement **100** der **Fig. 1** enthält noch eine weitere Ausführungsform einer abstimmbaren Linse in Form der dritten Flüssigkeit **110**, die über eine zweite Elektrodenanordnung **124** angesteuert wird.

[0073] Durch unterschiedliche Spannungsbeaufschlagung der beiden Ringelektroden **124** kann die Benetzbarkeit der Folienoberfläche so verändert werden, dass die Flüssigkeit **110** ihre Position entlang der optischen Achse **112** verändert. Dadurch wird auch die Brennweite des Gesamtsystems verändert und auf diese Weise eine Zoomfunktion ermöglicht.

[0074] Die in den **Fig. 1** und **Fig. 2** dargestellte Anordnung besitzt außerdem eine feste Glas- oder Kunststofflinse **126**, die beispielsweise auch asphärische Eigenschaften haben kann. Das optofluidische Bauelement **100** ist, wie in **Fig. 1** gezeigt, speziell geeignet für eine teleskopische Bilderzeugung wie z. B. als endoskopische Sonde (Durchmesser geringer als 5 mm). Das durch die feste Linse **126** eintretende Licht kann am gegenüberliegenden Ende des optofluidischen Bauelements **100** durch eine entsprechende Glasfaser **128** oder einen anderen Lichtleiter ausgekoppelt werden. Der Lichtleiter ist dabei in einem optischen Fenster **130**, das mit dem Gehäuse **102** verbunden ist, eingebettet. Alternativ kann aber auch an dem optischen Fenster **130** ein Bildsensor wie z. B. ein CCD(Charge-coupled Device)-Sensor oder ein CMOS-Sensor angeordnet sein.

[0075] Gemäß der vorliegenden Erfindung werden zur Herstellung des optofluidischen Bauelements das Gehäuse **102** und der flexible Träger **116** getrennt voneinander hergestellt. Dabei wird der Träger in einem zweidimensionalen hochpräzisen fotolithografischen Prozess mit den entsprechenden Elektrodenstrukturen hergestellt. Darüber hinaus können an der der Flüssigkeit zugewandten Seite geometrische Strukturen ebenso wie chemische Beschichtungen aufgebracht werden. Nachdem die zweidimensionale Folie entsprechend mit fluidischer und elektrischer Funktionalität ausgestattet ist, wird sie gerollt und in den Hohlraum **104** des Gehäuses **102** eingeführt. Die Fixierung erfolgt beispielsweise über eine Klebung. Die verschiedenen Flüssigkeitsvolumina werden über einen Mikrodosierer in hier insgesamt fünf Dosierschritten eingefüllt. Anschließend wird das System versiegelt, indem die Linse **126** und das optische Fenster **130** angebracht werden. Elektrische Kontakte zum Ansteuern der Elektrodenstrukturen **114**, **124** und **120** werden auf geeignete Weise nach außen geführt.

[0076] Mit Bezug auf die **Fig. 3** und **Fig. 4** wird nachfolgend das Konzept der Elektrobenetzung im Detail erläutert. Dabei stellt die **Fig. 3** ein Detail aus der Anordnung der **Fig. 1** dar, nämlich die durch das zweite Flüssigkeitskompartiment **108** gebildete abstimmbare Linse. Das Grundprinzip der Elektrobenetzung (engl. „electro wetting“) basiert auf dem physikalischen Phänomen, dass ein elektrisches Feld durch Veränderung der Oberflächenspannung einer Flüssigkeit bewirkt, dass die Flüssigkeit einen Gegenstand stärker benetzt, also der Kontaktwinkel geringer wird. Ohne ein elektrisches Feld nimmt die Grenzfläche **122** die gestrichelt eingezeichnete Lage ein, da die Innenfläche der Folie **116** zumindest oberhalb der Ringelektrode **114** hydrophob beschichtet ist und daher die erste Flüssigkeit **106**, die eine hydrophobe Flüssigkeit ist, sich bevorzugt an den Elektrodenbereich anlegt. Wird dagegen ein elektrisches Feld an die Elektrode **114** angelegt, wie dies in **Fig. 3** und **Fig. 4** symbolisch durch die Ladungen dargestellt ist, verdrängt das Wasser zunehmend den Ölfilm,

da das anliegende Feld die Polarisierung der Dipole in der Wasseroberfläche aufhebt. Daher nimmt die Flüssig-Flüssig-Grenzfläche den in **Fig. 3** durchgezogen dargestellten Verlauf an.

[0077] Gemäß der vorliegenden Erfindung hat der flexible Träger **116** mehrere Aufgaben. Zum einen sind elektrische Strukturen und Oberflächenmodifikationen für die eigentliche Aktuierung der optofluidischen Komponenten notwendig, zum anderen ist eine besonders präzise Dosierung der verwendeten Flüssigkeiten für das fehlerfreie Funktionieren des Bauteils unerlässlich.

[0078] Hier wird beispielsweise mit präzisen Dosierpumpen gearbeitet, alternativ oder zusätzlich kann auch an der Oberfläche des flexiblen Trägers **116** eine Strukturierung vorgesehen sein, welche die Selbstjustierung von Flüssigkeiten beim Einströmen ermöglicht. Zum Beispiel können mikrofluidische Benetzungsmuster auf der flexiblen Folie in Form von stark hydrophoben Regionen auf einem hydrophilen Substrat oder in Form von sogenannten Pinning-Barrieren und Phaseguide-Strukturen vorgesehen sein. Beispielsweise können scharfe Knickstellen oder Stufen in der Substratopografie als Pinning-Barrieren verwendet werden. Auf diese Weise werden die Oberflächen der Flüssigkeiten gezwungen, bestimmte gewünschte Formen einzunehmen. Indem verschiedene Flüssigkeitspositionen durch lithografisch strukturierte mikrofluidische Benetzungsmuster und Pinning-Barrieren auf der aktiven flexiblen Folie definiert werden, kann eine hochgenaue Positionierung der zahlreichen optischen Komponenten innerhalb der fertiggestellten optofluidischen Struktur erzielt werden. Auf diese Weise können abstimmbare optische Systeme mit Durchmessern im Millimeterbereich hergestellt werden, die eine große Beständigkeit gegen mechanischen Schock haben, da die Oberflächenkräfte stärker sind als die Inertialkräfte. Komplexe dreidimensionale abstimmbare optische Systeme können daher ohne mechanisch bewegte Teile realisiert werden.

[0079] Beispiele für die Realisierung geeigneter topografischer Strukturen mit Pinning-Barrieren und Variationen der lokalen Benetzbarkeit werden nachfolgend gegeben. Um die Oberflächeneigenschaften der flexiblen Folie zu beeinflussen, kann z. B. das Fluoropolymer Cytop verwendet werden, um stark hydrophobe Regionen herzustellen. Eine dünne Ordylschicht oder ein fotostrukturierbares PDMS kann verwendet werden, um flexible Knicke zu erstellen, die als Pinning-Strukturen fungieren. Um diese Filme mit guter Haftung auf einen flexiblen Polyimidträger zu fixieren, kann ein Haftvermittler verwendet werden. Beispielsweise können mittels plasmaverstärkter chemischer Dampfabscheidung (PECVD) Siliziumkarbid und Siliziumdioxidschichten abgeschieden werden, die als dünne flexible Haftvermittler dienen. Die Siliziumdioxidschicht stellt eine geeignete Oberfläche für die Abscheidung von Cytop, Ordyl oder PDMS ab und zeigt darüber hinaus hydrophilen Charakter, was nützlich ist, um verschiedene Flüssigkeitspositionierungsgebiete mit Hilfe von veränderlicher Benetzbarkeit zu definieren.

[0080] Die so hergestellten flexiblen Träger (insbesondere Polyimidfolien) werden anschließend in das Gehäuse eingeführt, um den Hohlraum **104** auszukleiden. Dies kann beispielsweise mit Hilfe eines geeigneten Werkzeugs zum Aufrollen und Einführen der Folie geschehen. Mit dem Werkzeug wird zum einen die Folie mechanisch gestützt, zum anderen wird die Justierung und Befestigung an der inneren Oberfläche des Hohlraums damit bewerkstelligt. Beispielsweise kann ein Vakuumwerkzeug verwendet werden, bei dem durch Änderung des Druckes von negativen zu positiven Werten die Folie gegen die Hohlraumwandung gepresst wird. Um eine permanente Fixierung der Folie an der Innenwandung zu erzielen, können geringe Mengen eines Klebers verwendet werden.

[0081] Generell sollte, um eine möglichst präzise Einstellung der optofluidischen Elemente innerhalb des Hohlraums sicherzustellen, ein automatisiertes Dosiersystem verwendet werden, bei dem eine Kanüle in den Hohlraum eingeführt wird, ohne die darin bereits angeordnete flexible Folie zu beschädigen und anschließend kleine Volumina der jeweils benötigten Flüssigkeit einzufüllen.

[0082] Neben der Realisierung der Elektrodenstrukturen für die Elektrobenetzung (EWOD) sind auch die Metallisierungen für Anschlüsse und Verdrahtung in der Polyimidfolie eingebettet. Um einen höheren Freiheitsgrad beim Design zu erreichen, können auch Mehrlagenverdrahtungen verwendet werden. Für einen Fachmann ist selbstverständlich klar, dass jede Art von flexiblem Träger, wie beispielsweise keramische Träger oder andere Kunststoffe für die vorliegende Erfindung eingesetzt werden können. Im Folgenden wird jedoch in der Regel von einer Polyimidträgerfolie ausgegangen.

[0083] In einem ersten Schritt werden Polyimidfolien mit den benötigten EWOD-Aktuatoren hergestellt und verschiedene dielektrische Schichten werden auf der Elektrode vorgesehen. Beispielsweise kann eine Kombination von Parylen C mit Cytop, Parylen HT (was bereits selbst hydrophob ist), Polyimid mit Cytop und bei-

spielsweise Polyimid in Kombination mit Parylen HT, oder Siliziumdioxid mit Parylen und Cytop verwendet werden.

[0084] Für den elektrischen Anschluss der elektrisch funktionellen flexiblen Folie können beispielsweise miniaturisierte ultraflache Bandkabel mit direktem Zugang zur Folie eingesetzt werden. Damit können die elektrischen Verbindungen und Anschlüsse in einem Prozess mit der Folie selbst hergestellt werden und es besteht keine Notwendigkeit auf die aktive Folie zu bonden.

[0085] Mit Bezug auf die **Fig. 5** bis **Fig. 16** werden nachfolgend einige optofluidische Einzelkomponenten beschrieben, die nach Bedarf allein oder in beliebiger Kombination zum Erstellen eines optofluidischen Bauelements nach der vorliegenden Erfindung verwendet werden können.

[0086] Die **Fig. 5** und **Fig. 6** zeigen ein optofluidisches Prisma mit auslenkbarer Strahlführung des ausgelenkten Strahls. Die Flüssig-Flüssig-Grenzfläche **122** zwischen zwei nicht mischbaren Fluiden **106**, **108** ist hier so geformt, dass sie eine glatte Begrenzung ausbildet und durch den Brechungsindexwechsel von der zweiten in die erste Flüssigkeit wird der Lichtstrahl **132** wie beim Eintritt in ein Prisma von der ursprünglichen optischen Achse **112** abgelenkt. Durch entsprechend ausgestaltete Ringelektroden **134** kann die Position des austretenden Lichtstrahls **132** um die Mittelachse herum rotiert werden. Die schräge Lage der Flüssig-Flüssig-Grenzfläche **122** wird im nicht aktuierten Zustand durch entsprechende Pinning-Barrieren definiert.

[0087] Die flexible Folie beinhaltet als Ansteuereinheit für dieses abstimmbare Prisma radial segmentierte Elektroden **134**, wie dies aus **Fig. 6** erkennbar ist. Die wässrige Phase kann dadurch schrittweise um 360° gedreht werden. Indem die geeignete Spannung an die Elektroden angelegt wird, kann ein vollständig ebener Meniskus erzeugt werden, so dass die Grenzfläche **122** als Prisma fungieren kann. Das heißt, die Elektrodenanordnung steuert sowohl die Form des Grenzflächenwinkels wie auch die Rotation der ausgekoppelten optischen Achse.

[0088] Für eine hohe optische Effizienz müssen die gewählten Flüssigkeiten einen ausreichend großen Unterschied im Brechungsindex aufweisen. Eine mögliche Materialkombination wäre 1-Chlornaphthalin ($n = 1,63$) und Wasser.

[0089] Die **Fig. 7** bis **Fig. 9** zeigen als weiteres optofluidisches Bauelement eine abstimmbare Iris, die nachfolgend auch als abstimmbare Apertur bezeichnet wird. Diese abstimmbare Apertur wird dadurch realisiert, dass in den Strahlengang ein ringförmiger Bereich aus opakem Material **136** eingeführt wird. Um den Öffnungsdurchmesser der Apertur zu vergrößern, befindet sich die Grenze zwischen dem ersten Fluid und dem opaken Material näher am Außendurchmesser, während sie näher an der optischen Achse befindlich ist, wenn die Apertur weiter geschlossen ist. Für die Aktuierung einer solchen optofluidischen Apertur gibt es unterschiedliche Möglichkeiten. Beispielsweise kann ein Ab- und Zuführkanal **138** vorgesehen sein, der ein über Pumpen gesteuertes Injizieren und Abpumpen des opaken Materials in die erste Flüssigkeit **106** ermöglicht. Eine entsprechende Elektrodenstruktur **140** kann mit Hilfe von Kapillarkräften das Einsaugen und Ausstoßen des opaken Flüssigkeitstropfens **136** aktuieren. Alternativ kann, wie in **Fig. 8** gezeigt, ein unverändertes Volumen an opaker Flüssigkeit **126** durch entsprechendes Aktuieren einer zweiten Elektrode **140** auf einen größeren Flächenbereich verteilt werden, so dass wiederum in der Durchsicht die Apertur weiter geöffnet ist.

[0090] **Fig. 9** zeigt einen Schnitt durch die Anordnung der **Fig. 7**.

[0091] Die beiden Linsenstrukturen, die mit Bezug auf **Fig. 1** erläutert wurden, sind der Vollständigkeit halber in **Fig. 10** bis **Fig. 12** als Einzelmodule nochmals gezeigt.

[0092] Die **Fig. 13** und **Fig. 14** zeigen die Anordnung der **Fig. 5** für einen Betriebsmodus, bei dem der einfallende Lichtstrahl aus dem Medium mit der höheren Brechzahl kommt. In diesem Fall fungiert die Flüssig-Flüssig-Grenzfläche **122** als total reflektierende Grenzfläche und der einfallende Lichtstrahl wird entsprechend den Gesetzen der Totalreflexion in Richtung der Wandung des Gehäuses abgelenkt. Damit ist ein Spiegel realisiert. Durch entsprechende Ansteuerung der Elektroden **134** kann die Grenzfläche **122** rotiert werden und damit die Position des auftretenden Lichtstrahls eingestellt werden.

[0093] Damit der Lichtstrahl nach außen treten kann, muss selbstverständlich in dem Austrittsbereich eine ausreichende Transparenz des Gehäuses vorhanden sein und insbesondere die Metallisierung der Elektrode **134** unterbrochen sein, wie dies in **Fig. 12** erkennbar ist. Der so realisierte sogenannte TIR (Total Internal Reflection) Spiegel lässt sich wiederum vorteilhaft mit einer Kombination aus 1-Chlornaphthalin und Wasser

realisieren, wobei, wie bereits erwähnt, die Wellenlänge des Lichts in Einklang mit der Transparenz der Folie und aller zu durchdringenden Materialien gebracht werden muss.

[0094] Die **Fig. 15** und **Fig. 16** erläutern ein alternatives Konzept zum Bewegen der Flüssigkeitsfronten. Gemäß dieser alternativen Ausführungsform sind Kanäle **138** vorgesehen, mit denen der Druck der jeweils mit dem Kanal verbundenen Flüssigkeit veränderbar ist. Wie in **Fig. 15A** dargestellt, kann damit die Grenzfläche **122** verschoben werden oder aber, wie in **Fig. 15B** dargestellt, ein Austausch des Mediums **108** vorgenommen werden. Beide Strukturen der **Fig. 15** realisieren Filterstrukturen. Zum einen ist, wie in **Fig. 15A** gezeigt, die Länge der gesamte Wegstrecke, die der Lichtstrahl entlang der optischen Achse **112** durch das Medium **108** zurücklegt, steuerbar und damit eine Filterwirkung erzielbar. Alternativ ist, wie in **Fig. 15B** gezeigt, die gesamte Flüssigkeit **108** austauschbar, so dass eine Flüssigkeit mit unterschiedlichen Absorptionseigenschaften eingefüllt werden kann.

[0095] Nachfolgend sollen einige kombinierte Anordnungen eines optofluidischen Bauelements **100** unter Verwendung der in den **Fig. 5** bis **Fig. 16** beschriebenen Module beschrieben werden.

[0096] **Fig. 17** zeigt ein Beispiel eines optofluidischen Bauelements, das als Sonde mit variabler Apertur ausgebildet ist. Das Funktionsprinzip der variablen Apertur entspricht dem Prinzip der **Fig. 7**, wobei nur ein Kanal für das Zu- und Abführen des opaken Materials **136** vorgesehen ist. Der Hohlraum **104** ist mit einer ersten Flüssigkeit **106** gefüllt, die ebenfalls über einen Kanal **138** zu- und abführbar ist. Die Position des opaken Materials **136** wird durch entsprechend strukturierte Pinning-Barrieren **142** definiert. Eine feste asphärische Linse **126** bündelt entsprechend das eintretende Licht. An der gegenüberliegenden Stirnseite des Gehäuses **102** ist der Lichtleiter **128** angebracht, der zu einer Bilderfassungseinheit führt. Gemäß dieser Ausführungsform beinhaltet die Folie **116** nur die Oberflächenstruktur **142** und Eintrittsöffnungen für die Kanäle **138**, aber keine Elektroden.

[0097] Die **Fig. 18** und **Fig. 19** illustrieren, wie ein optofluidisches Prisma bzw. ein optofluidischer TIR-Spiegel gehäust werden könnten. Jede der beiden Stirnseiten des Gehäuses **102** ist dabei mit einem optischen Fenster **130** versiegelt. Zusätzlich ist im Fall der Ablenkung gemäß der **Fig. 19** auch das Gehäuse **102** wenigstens in dem Bereich, in dem auch die Elektroden geöffnet sind, für den Lichtstrahl **132** transparent.

[0098] **Fig. 20** zeigt eine weitere Ausführungsform eines komplexen optofluidischen Bauelements mit teleskopischer Linsenanordnung und einer steuerbaren Apertur. Eine solche Anordnung könnte z. B. in einer endoskopischen Sonde verwendet werden. In dieser speziellen Ausführungsform hat das Gehäuse **102** wiederum eine hohlzylindrische Gestalt und der Querschnitt ist kreisförmig. Entlang der optischen Achse erstreckt sich zunächst die Apertur entsprechend der bereits in **Fig. 7** erläuterten Ausgestaltung. Anschließend folgt eine abstimmbare Linse, wie sie in **Fig. 10** dargestellt ist und schließlich eine Linse mit verschieblichem Fokus, wie sie mit Bezug auf **Fig. 11** erläutert wurde.

[0099] Die flexible Trägerfolie **116** beinhaltet bei dieser Ausführungsform neben Pinning-Barrieren **142** und Durchtrittsöffnungen **144** für die Kanäle **138** auch die Elektrodenstrukturen **114** und **124**. Die beiden Stirnseiten des Gehäuses **102** sind einerseits mit einer festbrennweitigen Linse **126** und andererseits mit einem optischen Fenster **130** verschlossen. In dem optischen Fenster ist ein Bildsensor **129** aufgenommen, der beispielsweise ein CCD-Sensor oder ein CMOS-Sensor sein kann.

[0100] Die bezüglich der **Fig. 1** bereits gegebenen Erläuterungen bezüglich der Herstellung des optofluidischen Bauelements treffen auch bei beiden Anordnungen nach **Fig. 20** zu, mit der Ausnahme, dass zusätzlich als sechstes Fluid die opake Flüssigkeit **136** ebenfalls zugeführt werden muss.

[0101] **Fig. 21** zeigt den Betrieb der Anordnung nach **Fig. 20** beim Einstrahlen einer Beleuchtung in den zu beobachtenden Bereich: Eine Lichtleitfaser **128** koppelt den Lichtstrahl **132** in das System ein und ein weiterer Spiegel, der für einen Scanningbetrieb auch beweglich sein kann, positioniert die Strahlung in dem Zielbereich. Das aufgenommene Bild wird in derselben Art und Weise wie in **Fig. 20** beschrieben, zurück in die Lichtleitfaser **128** gekoppelt. Auf diese Weise ist mit dem System der **Fig. 21** ein System geschaffen, das für optische Kohärenztomografie und Mikroskopie geeignet ist. Der Mikrospiegel **146** kann nach Belieben realisiert werden und selbstverständlich auch durch ein Bauteil nach **Fig. 19** realisiert werden.

[0102] Eine Weiterbildung der vorliegenden Erfindung ist in den **Fig. 22** und **Fig. 23** gezeigt. Gemäß dieser Ausführungsform ist das Gehäuse **102** flexibel ausgestaltet und ein Gehäuseaktuator **148** ist an der Außenseite des Gehäuses zum Deformieren desselben vorgesehen. Ein derartiger Gehäuseaktuator kann beispielsweise durch ein ferroelektrisches Flüssigkristallelastomer („liquid crystal elastomer“, LCE) gebildet sein. Derartige

elektrostriktive Materialien zeigen eine Gestaltänderung in Folge von angelegten elektrischen Feldern, aber auch Temperaturänderungen. Die LCEs werden häufig auch als künstliche Muskeln bezeichnet und können im Gegensatz zu piezoelektrischen Aktoren induzierte Spannungen von 400% aufbauen. Im Vergleich zu harten Materialien haben solche Elastomere den Vorteil ihrer Flexibilität und höheren Bruchbeständigkeit. Durch gezielten Druck des Gehäuseaktuators **148** auf den Bereich der verschieblichen Linse kann diese näher oder weiter entfernt von dem Bildsensor **129** positioniert werden. Ein Druckausgleich zwischen den beiden Kompartimenten, in denen die erste Flüssigkeit **106** sich je nach Position der dritten Flüssigkeit **110** aufhält, ist über Druckausgleichskanäle **150** möglich.

[0103] Zusammenfassend sind die technischen Merkmale der vorliegenden Erfindung zum einen die Verwendung einer flexiblen Folie als multifunktionales Substrat, zum anderen die Kombination von festen und/oder flüssigen optischen Komponenten, aber auch die Verwendung von Flüssig-Flüssig-Grenzflächen, um durchstimmbare optofluidische Komponenten zu definieren. Dies sind beispielsweise Linsen, Blenden, Prismen, Spiegel und Filter. Diverse Aktuierungsmechanismen (mechanisch, pneumatisch, hydraulisch, elektrofluidisch und thermisch) werden für miniaturisierte Optiken adaptiert und verwendet. Weiterhin kann die präzise Ausrichtung und Positionierung mehrerer optischer Komponenten durch die Verwendung eines einzigen Foliensubstrats erreicht werden und die optischen Komponenten können durch Oberflächenstrukturen auf der Folie definiert werden. Dadurch entfällt die aufwändige Fertigung von Einzelkomponenten, wie z. B. einzelner Linsen.

[0104] Die Vorteile für den Anwender sind die gesteigerte optische Funktionalität auf kleinstem Raum, die präzise und kostengünstige Fertigung und die Tatsache, dass komplexe Systeme bestehend aus mehreren Komponenten durch eine einzige Folie definiert werden können, wodurch der Fertigungsaufwand signifikant reduziert wird. In den obigen Ausführungen wurden abstimmbare optofluidische Blenden kombiniert mit festbrennweitigen Linsen und Faserkollimatoren für Endoskopoptiken sowie durchstimmbare Flüssig-Flüssig-Linsen, Flüssig-Flüssig-Prismen für miniaturisierte Abbildungsoptiken und rotierbare Flüssig-Flüssig-Spiegel für Beleuchtungs- und Scanneranwendungen beschrieben.

Bezugszeichenliste:

Bezugsziffer	Beschreibung
100	Optofluidisches Bauelement
102	Gehäuse
104	Hohlraum
106	Erste Flüssigkeit
108	Zweite Flüssigkeit
110	Dritte Flüssigkeit
112	Optische Achse
114	Erste Elektrodenanordnung
116	Flexibler Träger
118	Innenwandung des Hohlraums
120	Offene Elektrode
122	Flüssig-flüssig-Grenzfläche
124	Zweite Elektrodenanordnung
126	Feste Linse
128	Lichtleitfaser
130	Optisches Fenster
132	Lichtstrahl
134	Prismaelektrodenanordnung
136	Opakes Material
138	Kanalstruktur
140	Elektrodenstruktur an der Apertur

142	Pinning-Barriere
144	Öffnung im Träger
146	Mikrospiegel
148	Gehäuseaktuator
150	Druckausgleichskanal

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 6369954 B1 [0005]
- US 7245347 B2 [0007]
- US 7859741 B2 [0007]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Artikel Kuiper, S., B. H. W. Hendriks: Variable-focus liquid lens for miniature cameras. *Applied Physics Letters*, 85(7): 1128–1130, 2004 [0004]
- Krupenkin, T., S. Yang, and P. Mach: Tunable liquid microlens. *Applied Physics* 82 (3): 316–318, 2003 [0004]
- Artikel Smith, Neil R., Don C. Abeysinghe, Joseph W. Haus, and Jason Heikenfeld: Agile wideangle beam steering with electrowetting micropisms. *Optics Express*, 14(14): 6557–6563, 2006 [0006]
- Publikationen Kimmle, Christina, Christoph Doering, Anna Steuer, and Henning Fouckhardt: Compact dynamic microfluidic iris array. In *Proceedings of SPIE: Optomechanics 2011 – Innovations and Solutions*, volume 8125, pp. 548–550, DOI: 10.1117/12.892450, 2011 [0007]
- Hongbin, Yu, Zhou Guangya, Chau Fook Si-ong, and Lee Feiwen: Optofluidic variable aperture. *Optics Letters*, 33: 548–550, 2008 [0007]
- Ren, Hongwen and Shin TsonWu: Optical switch using a deformable liquid droplet. *Optics Letters*, 35(22): 3826–3828, 2010 [0007]
- Tsai, C. Gary and J. Andrew Yeh: Circular dielectric liquid iris. *Optics Letters*, 35(14): 2484–2486, 2010 [0007]
- Müller, Philipp, Nils Spengler, Hans Zappe, and Wolfgang Mönch: An optofluidic concept for a tunable micro-iris. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 19(6): 1477–1484, 2010 [0007]
- Artikeln Draheim, J., T. Burger, J. G. Korvink, and U. Wallrabe: Variable aperture stop based on the design of a single chamber silicone membrane lens with integrated actuation. *Optics Letters*, 36: 2032–2034, 2011 [0007]
- Murade, C. U., J. M. Oh, D. van den Ende, and F. Mugele: Electrowetting driven optical switch and tunable aperture. *Optics Express*, 19(16): 15525–15531, 2011 [0007]
- Müller, Philipp, Roland Feuerstein, and Hans Zappe: Integrated optofluidic microiris. *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 21, No. 5, October 2012, p. 1156–1164 [0007]
- Artikel Wan, Zhiliang, Hongjun Zeng, and Alan Feinerman: Area-tunable micromirror based on electrowetting actuation of liquid-metal droplets. *Applied Physics Letters*, 89: 201107 (3pp), 2006 [0008]
- Bucaro, Michael A., Paul R. Kolodner, J. Ashley Taylor, Alex Sidorenko, Joanna Aizenberg, and Tom N. Krupenkin: Tunable liquid optics: electrowetting-controlled liquid mirrors based on self-assembled janus tiles. *Langmuir*, 25: 3876–3879, 2009 [0008]
- Artikel Llobera, A., S. Demming, R. Wilke, and S. Büttgenbach: Multiple internal reflection poly(dimethylsiloxane) systems for optical sensing. *Lab Chip*, 7: 1560–1566, 2007 [0008]
- Müller, Philipp, Daniel Kopp, Andreu Llobera, and Hans Zappe: Optofluidic router based on tunable liquid-liquid mirrors. *Lab Chip*, 2014, 14, 737–743 [0009]
- Müller, Philipp, Anton Kloss, Peter Liebetraut, Wolfgang Mönch, and Hans Zappe: A fully integrated optofluidic attenuator. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 21(12): 125027–125040, 2011 [0009]
- Ordonez, Juan S., Christian Boehler, Martin Schuettler, and Thomas Stieglitz: Improved polyimide thin-film electrodes for neural implants. In *34th Annual International Conference of the IEEE EMBS*, pages 5134–5137, 2012 [0011]
- Gelinck, Gerwin H. et al.: Flexible active-matrix displays and shift registers based on solution-processed organic transistors. *Nature Materials*, 3: 106–110, 2004 [0012]
- Kim, Dae Hyeong, Jong Hyun Ahn, Hoon Sik Kim, Keon Jae Lee, Tae Ho Kim, Chang Jae Yu, Ralph G. Nuzzo, and John A. Rogers: Complementary logic gates and ring oscillators on plastic substrates by use of printed ribbons of single-crystalline silicon. *IEEE Electron Device Letters*, 29(1): 73–76, 2008 [0013]

- Tiwari, A. N., A. Romeo, D. Baetzner, and H. Zogg: Flexible CdTe solar cells on polymer films. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 9: 211–215, 2001 [0014]
- Artikel Moser, Yves and Martin A. M. Gijs: Miniaturized flexible temperature sensor. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 16(6) : 1349–1354, 2007 [0015]
- Rempp, Horst, Joachim Burghartz, Christine Harendt, Nicoleta Pricopi, Marcus Pritschow, Christian Reuter, Harald Richter, Inge Schindler, and Martin Zimmermann: Ultra-thin chips on foil for flexible electronics. In *IEEE International Conference on Solid-State Circuits*, pages 334–617, 2008 [0016]
- Abdelgawad, Mohamed and Aaron R. Wheeler: Low-cost, rapid-prototyping of digital microfluidics devices. *Microfluid Nanofluid*, 4: 349–355, 2008 [0016]

Patentansprüche

1. Optofluidisches Bauelement zum Ausbilden eines optischen Pfades für elektromagnetische Strahlung, wobei das optofluidische Bauelement (**100**) aufweist:
ein Gehäuse (**102**) mit einem Hohlraum (**104**), der zum Führen der Strahlung mit mindestens einer Fluidkomponente (**106, 108, 110**) gefüllt ist,
eine Steuereinheit (**114, 124, 134, 140; 138, 150**) zum gesteuerten Verändern optischer Eigenschaften der Fluidkomponente,
wobei die Steuereinheit einen flexiblen Träger (**116**) umfasst, der auf einer der Fluidkomponente zugewandten Innenfläche einer den Hohlraum begrenzenden Wandung angeordnet ist.
2. Optofluidisches Bauelement nach Anspruch 1, wobei die Steuereinheit eine flexible Folie mit mindestens einem elektrisch leitenden Element aufweist.
3. Optofluidisches Bauelement nach Anspruch 3, wobei das mindestens eine elektrisch leitende Element wenigstens teilweise gegenüber der mindestens einen Fluidkomponente isoliert ist.
4. Optofluidisches Bauelement nach einem der Ansprüche 2 oder 3, wobei die flexible Folie mehrlagig mit einer Vielzahl voneinander isolierter elektrisch leitender Elemente ausgeführt ist.
5. Optofluidisches Bauelement nach Anspruch 1 oder 2, wobei das Gehäuse eine rohrförmige Gestalt hat und der darin gebildete Hohlraum einen kreisförmigen, polygonalen oder elliptischen Querschnitt hat.
6. Optofluidisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Wandung des Hohlraums wenigstens teilweise flexibel ist und das optofluidische Bauelement weiterhin einen mindestens einen Gehäuseaktuator (**148**) zum Auslenken der Wandung umfasst.
7. Optofluidisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Wandung des Hohlraums opak oder wenigstens teilweise transparent ist.
8. Optofluidisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei eine optische Achse (**112**) des optofluidischen Bauelements wenigstens teilweise mit einer longitudinalen Symmetrieachse des Hohlraums zusammenfällt.
9. Optofluidisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der flexible Träger geometrische Oberflächenstrukturen (**142**) und/oder unterschiedliche Oberflächenmaterialien zum Beeinflussen der Benetzungseigenschaften für die mindestens eine Fluidkomponente aufweist.
10. Optofluidisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, das mindestens einen Bereich aufweist, der eine Linse, ein Prisma, eine Apertur, ein Filter oder einen Spiegel bildet.
11. Optofluidisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei an einer Außenseite der den Hohlraum begrenzenden Wandung wenigstens ein Licht emittierendes und/oder wenigstens ein Licht empfangendes optisches Bauelement angeordnet ist.
12. Optofluidisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei in dem Hohlraum wenigstens zwei Kompartimente durch nicht miteinander mischbare Fluide mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften ausgebildet sind.
13. Optofluidisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der flexible Träger an der der mindestens einen Fluidkomponente zugewandten Oberfläche Fluidführungsstrukturen zum definierten Befüllen des Hohlraumes aufweist.
14. Optofluidisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei wenigstens ein Optikaktuator zum Steuern der optischen Eigenschaften der mindestens einen Fluidkomponente an dem flexiblen Träger angeordnet ist.
15. Optofluidisches Bauelement nach Anspruch 14, wobei der Optikaktor wenigstens eine Elektrodenanordnung zum Aktuieren der mindestens einen Fluidkomponente mittels direkter Elektrobenetzung (electro wetting),

EW), Electrowetting-on-Dielectrics (EWOD) oder Dielektrophorese und/oder eine Heizstruktur zum Aktuieren der mindestens einen Fluidkomponente mittels Thermokapillarkräften aufweist.

16. Optofluidisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, weiterhin umfassend einen Pumpenstruktur zum hydraulischen oder pneumatischen Aktuieren der mindestens einen Fluidkomponente.

17. Optofluidisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der flexible Träger an der den Hohlraum begrenzenden Wandung mittels einer Klebung, einer Schweißung und/oder eines Formschlusses fixiert ist.

18. Optofluidisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Gehäuse in einem Strahlungseintrittsbereich mindestens eine erste Linienstruktur (**126**) aufweist, welche den Hohlraum fluiddicht versiegelt.

19. Optofluidisches Bauelement nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Gehäuse in einem Strahlungsaustrittsbereich mindestens ein optisches Fenster (**130**) oder eine zweite Linienstruktur aufweist, welche den Hohlraum fluiddicht versiegelt.

Es folgen 5 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

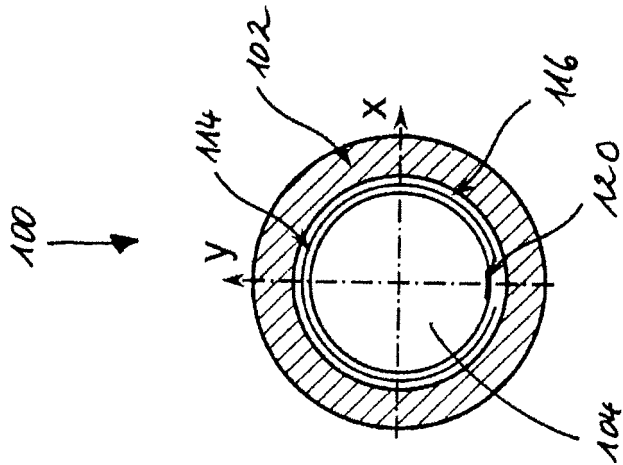


Fig. 2

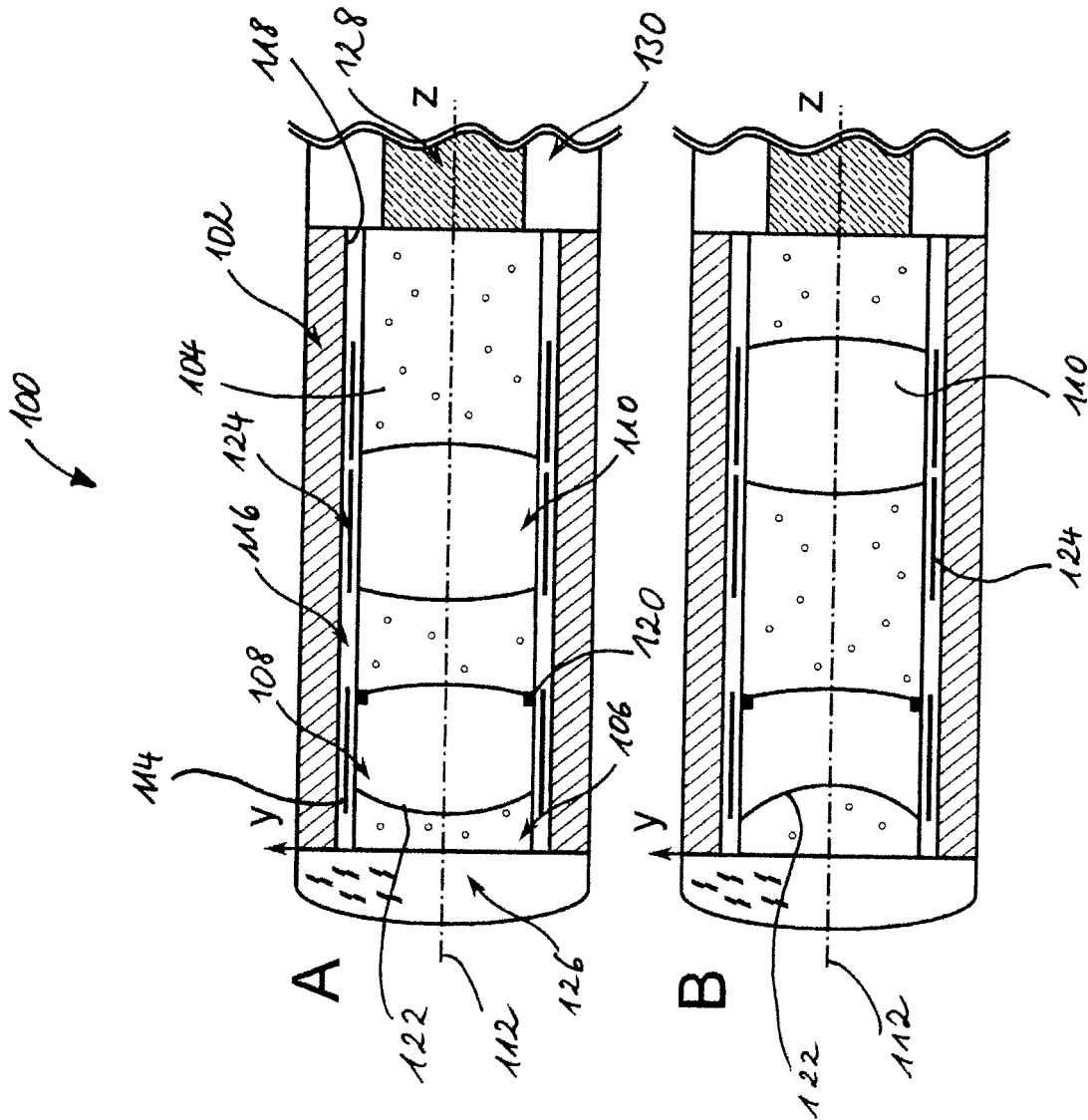


Fig. 1

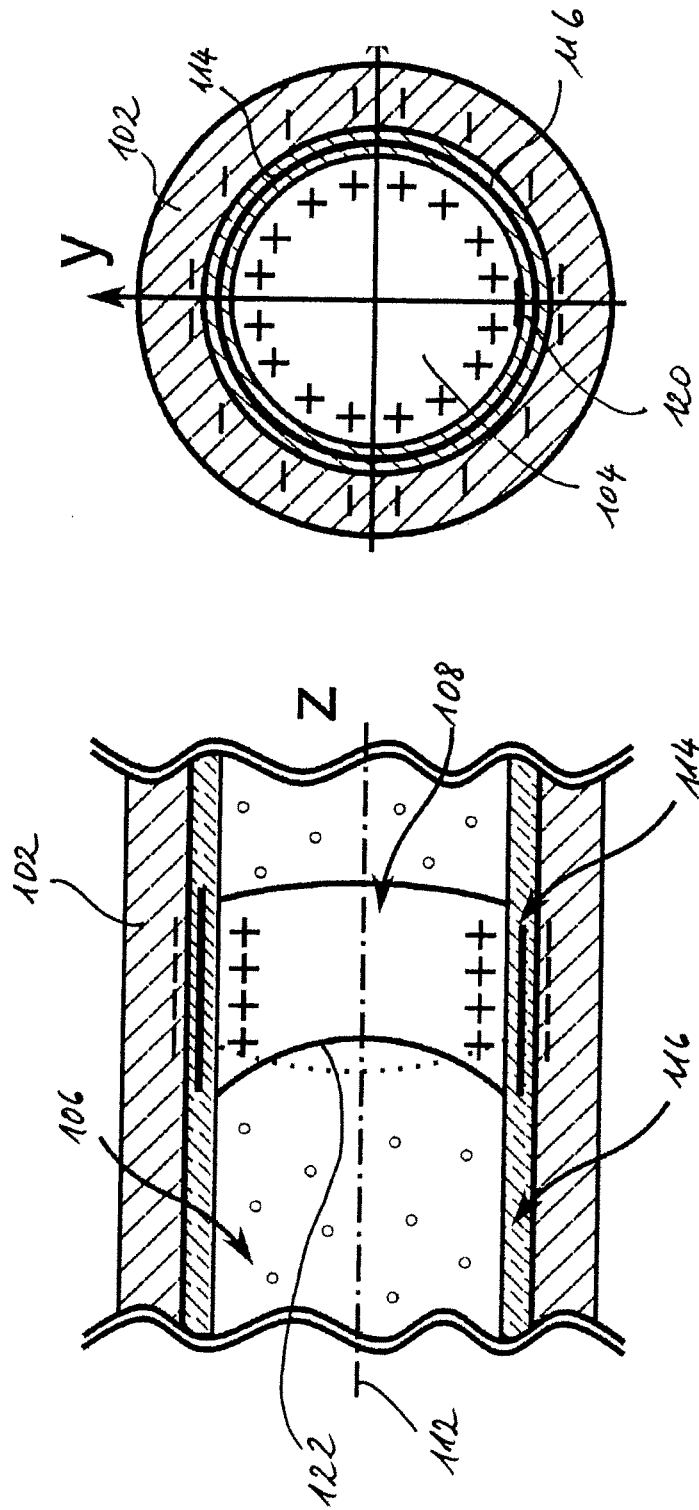
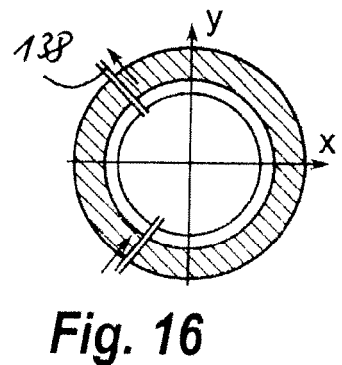
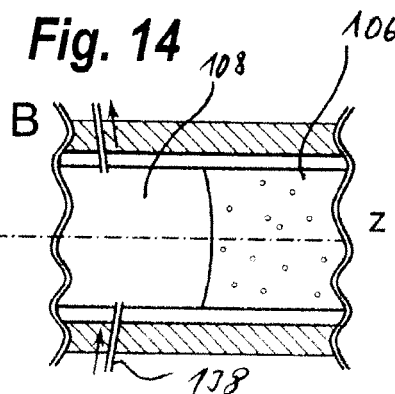
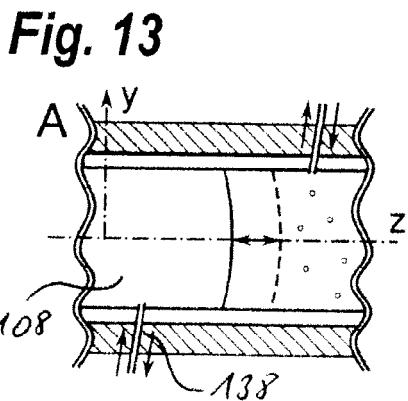
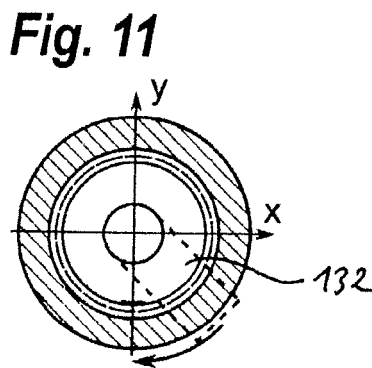
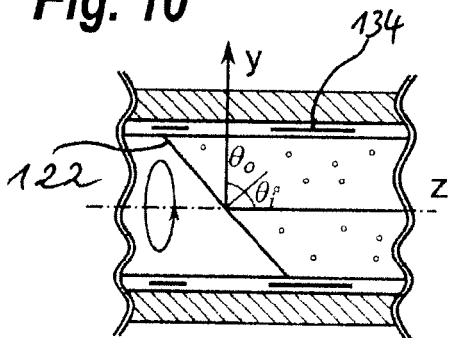
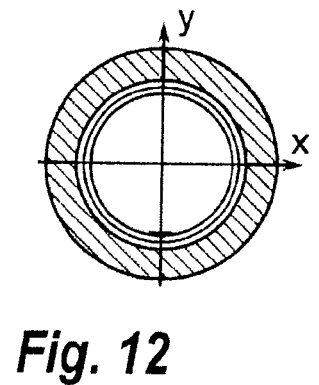
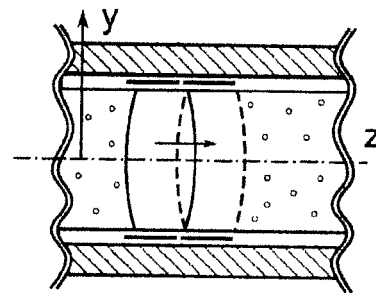
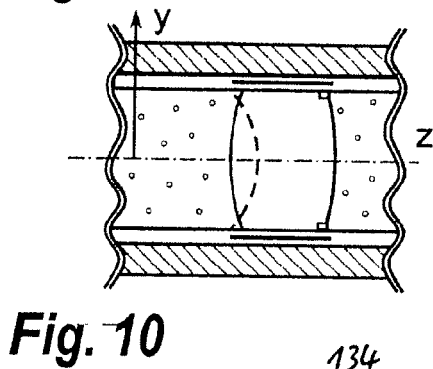
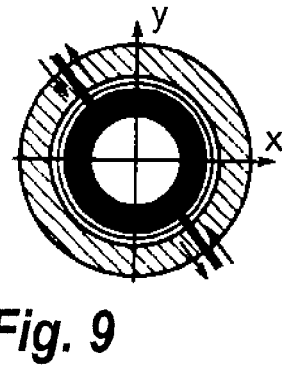
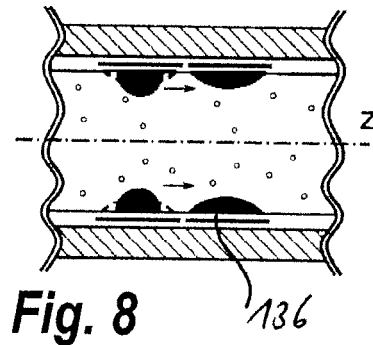
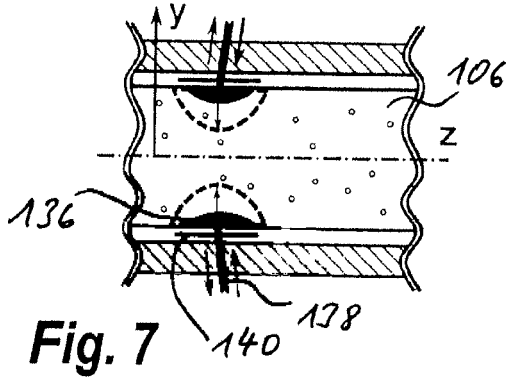
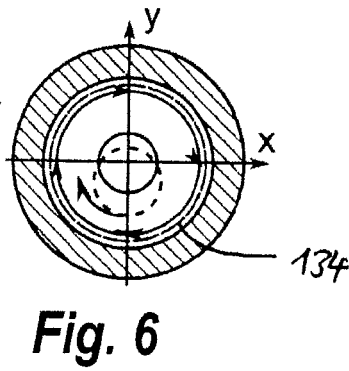
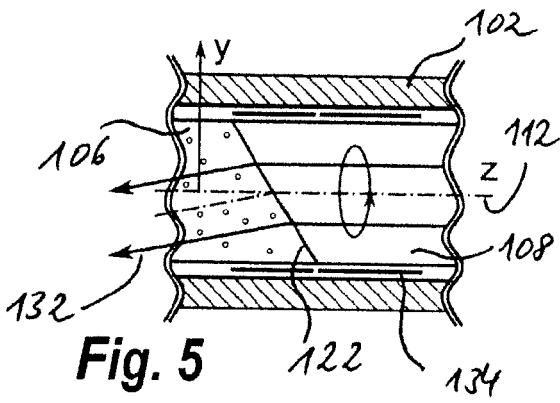


Fig. 3

Fig. 4



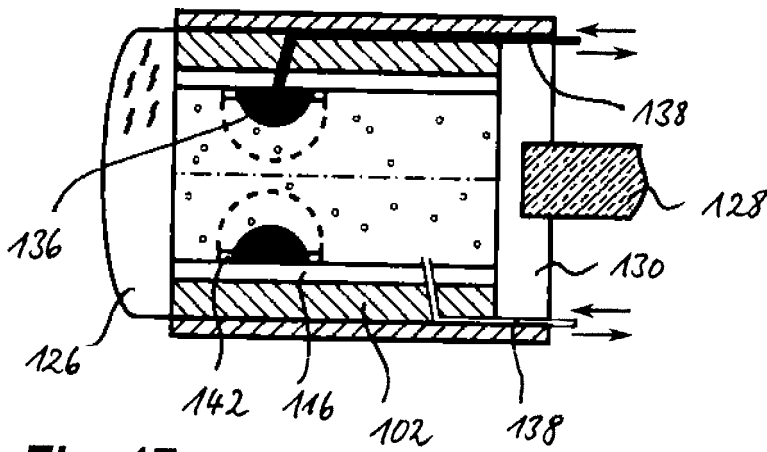


Fig. 17

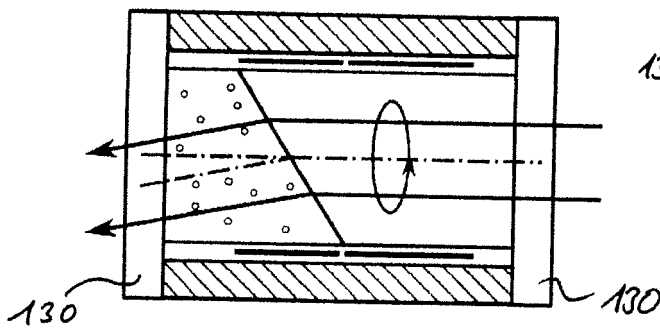


Fig. 18

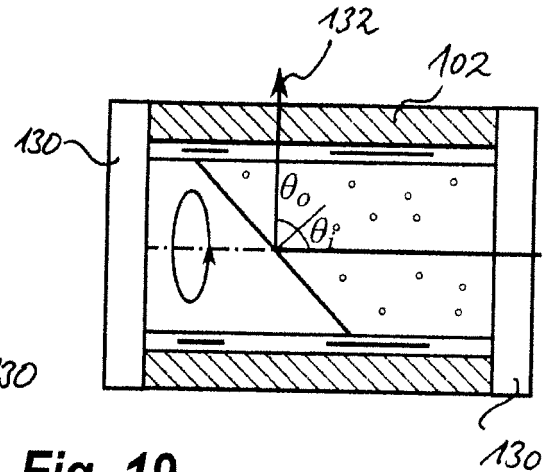


Fig. 19

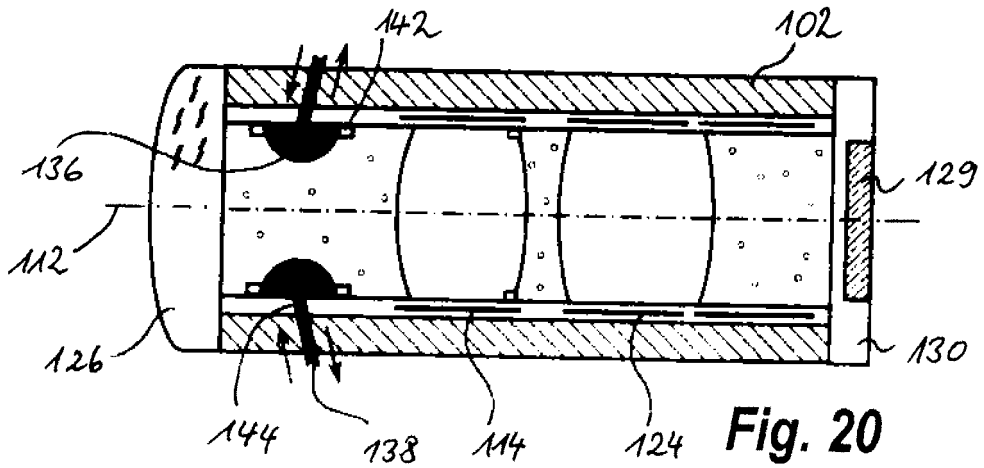


Fig. 20

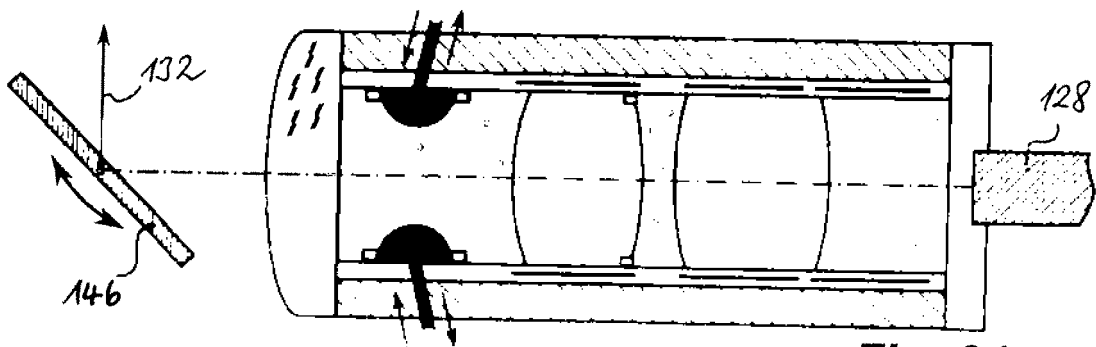


Fig. 21

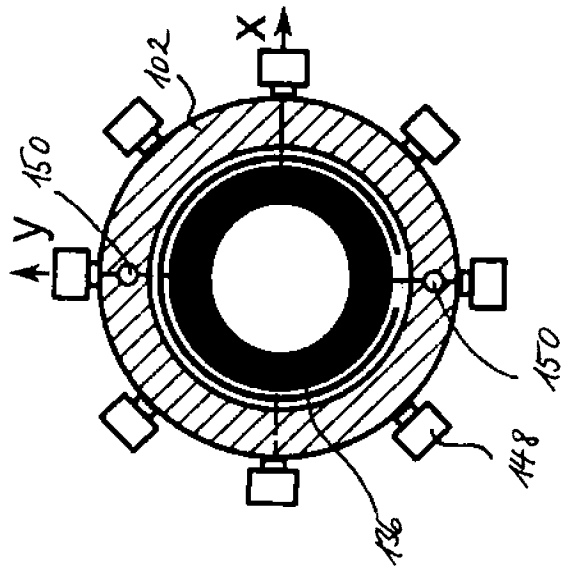


Fig. 23

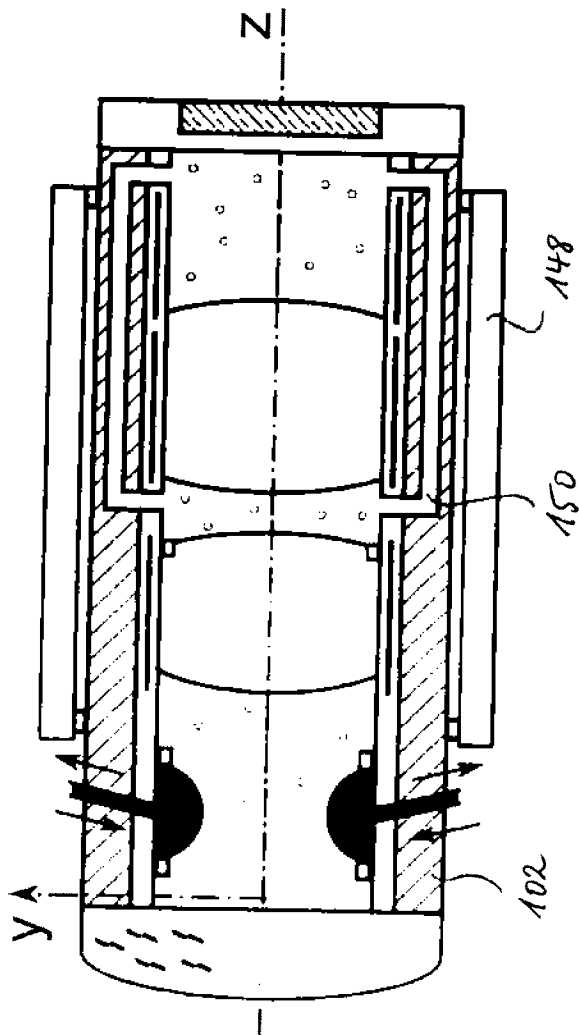


Fig. 22