



(10) **DE 10 2009 059 094 A1** 2011.06.22

(12)

## Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2009 059 094.3**

(22) Anmeldetag: **18.12.2009**

(43) Offenlegungstag: **22.06.2011**

(51) Int Cl.: **G02B 26/06 (2006.01)**  
**G02B 26/02 (2006.01)**

(71) Anmelder:

**SeeReal Technologies S.A., Munsbach, LU**

(74) Vertreter:

**Heide, Margot, 01307, Dresden, DE**

(72) Erfinder:

**Reichelt, Stephan, Dr., 01279, Dresden, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

<b>DE</b>	<b>10 2008 041913</b>	<b>A1</b>
<b>US</b>	<b>2008/01 98 292</b>	<b>A1</b>
<b>US</b>	<b>2006/00 44 640</b>	<b>A1</b>
<b>WO</b>	<b>2007/ 96 687</b>	<b>A1</b>

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

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

(54) Bezeichnung: **Räumlicher Lichtmodulator mit Elektrobenetzungszellen**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft einen räumlichen Lichtmodulator (SLM) mit als EWOD-Zellen ausgebildeten steuerbaren Elektrobenetzungszellen zur Modulation von kohärentem Licht. Geringe Bewegungen der Fluide sollen definierte Phasen- und/oder Amplitudenwerte präzise einstellen. Die EWOD-Zellen sollen geringe Aspektverhältnisse und der SLM sehr hohe Schaltgeschwindigkeiten realisieren.

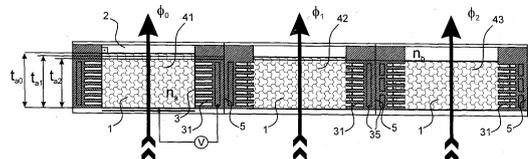
Im SLM ist erfindungsgemäß jede EW-Zelle als EWOD-Zelle (Elektrowetting-on-dielectrics) (40) ausgebildet, bei der die Oberfläche mindestens einer Seitenwand (5) mit mindestens einem Feld (51) von leitfähigen steuerbaren Nanostrukturen (3) bedeckt ist, wobei das Feld (51)

– zwischen den Nanostrukturen (3) mit einem verschiebbaren Fluid (2) ausgestattete Bereiche zur Aufnahme des leitfähigen Fluids (1) aufweist,

– eine unter den Nanostrukturen (3) angeordnete Elektrodenanordnung (35) zum Ändern des Benetzungszustands der Nanostrukturen (3) aufweist,

– außerhalb des Lichtwegs angeordnet ist, und jede EWOD-Zelle (40) der Matrix einzeln steuerbar ist.

Anwendungsgebiet der Erfindung sind z. B. Bildanzeigergeräte zur dreidimensionalen Darstellung mit einem SLM zur Phasen- und/oder Amplitudenmodulation.



## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft einen räumlichen Lichtmodulator mit einer Matrix von regelmäßig angeordneten Elektrobenetzungszellen und mit Elektrodenanordnungen zum Steuern der Elektrobenetzungszellen, wobei jede Elektrobenetzungszelle (EW-Zelle) mindestens zwei nicht mischbare Fluide sowie zwischen den Fluiden eine von der Elektrodenanordnung in ihrer Lage innerhalb der EW-Zelle einstellbare Grenzfläche aufweist, wobei mindestens ein Fluid flüssig und leitfähig ist, und ausreichend kohärentes Licht den Lichtmodulator beleuchtet.

**[0002]** Weiterhin umfasst die Erfindung eine räumliche Lichtmodulationsvorrichtung, die mindestens einen erfindungsgemäßen steuerbaren räumlichen Lichtmodulator (SLM) auf der Basis von Elektrobenetzungszellen (EW-Zellen) enthält, die als EWOD-Zellen (engt. electrowetting-on-dielectrics) ausgebildet sind. Die Lichtmodulationsvorrichtung kann reflektiv oder transmissiv gestaltet sein und ein transmissiv oder reflektiv ausgebildetes holographisches Displaygerät realisieren.

**[0003]** Ein Anwendungsgebiet der Erfindung sind beispielsweise Bildanzeigergeräte zur dreidimensionalen Darstellung, die eine Phasen- und/oder Amplitudenmodulation durchführen und dabei sehr schnelle Schaltzeiten realisieren müssen.

**[0004]** Aus Natur und Technik ist bekannt, dass die Strukturierung von Oberflächen mit komplexen Mikro- und Nanostrukturen die Benetzbarkeit einer Fläche mit Flüssigkeiten beeinflusst. Ein Beispiel ist der sogenannte Lotuseffekt, welcher die geringe Benetzbarkeit einer Oberfläche mit einer Flüssigkeit bezeichnet. Im Falle einer wässrigen Flüssigkeit wird die Oberfläche als hydrophob bezeichnet, wenn der Kontaktwinkel der Flüssigkeit zur Oberfläche größer als  $90^\circ$  ist. Hydrophobe Oberflächen bestehen in der Regel aus hydrophoben Substanzen oder sind von diesen bedeckt. Eine Oberfläche kann beispielsweise chemisch oder physikalisch oder durch eine Kombination beider Möglichkeiten modifiziert werden, um eine raue hydrophobe Oberfläche und damit eine geringe Benetzbarkeit zu erreichen. Für die Wirkung der Benetzung von rauen, hydrophoben Oberflächen sind zwei Modelle bekannt: (1) nach Wenzel und (2) nach Cassie/Baxter. Beim Modell nach Wenzel, auch Wenzel-Zustand genannt, stellt sich eine vollständige Benetzung der rauen, hydrophoben Oberfläche ein. Die Flüssigkeit hat hier überall Kontakt zur Oberfläche, die rauen Oberflächenstrukturen werden vollständig von der Flüssigkeit umgeben. Vom Modell nach Cassie/Baxter, auch Cassie-Baxter-Zustand genannt, spricht man bei einer partiellen Benetzung der rauen, hydrophoben Oberfläche. Ein Flüssigkeitstropfen liegt hier auf den oberen Bereichen von rauen Oberflächenstrukturen, während

die tiefer liegenden Strukturen von dieser Flüssigkeit nicht benetzt werden, sondern sind von einem dünnen Gas- oder Flüssigkeitsfilm einer anderen, nicht mischbaren Flüssigkeit umgeben sind.

**[0005]** Der Übergang vom Cassie/Baxter- zum Wenzel-Zustand erfolgt sprunghaft. Eine gezielte Steuerung des Benetzungsverhaltens von superhydrophoben Oberflächen ist ein Gegenstand aktueller Forschung. Das Hauptproblem stellt allerdings die Irreversibilität einer vollständigen Benetzung der superhydrophoben Oberfläche in luftartiger Umgebung dar: sobald die Oberfläche vollständig benetzt ist (Wenzel-Zustand), ist eine Rückführung zur partiellen Benetzung (Cassie/Baxter-Zustand) bisher nicht oder nur mit hohem Energieaufwand durch Verdampfen einer mikroskopisch dünnen Flüssigkeitsschicht möglich (siehe Verplanck, N.; Coffinier, Y.; Thomy, V.; Boukherroub, R.: Wettability Switching Techniques an Superhydrophobic Surfaces; Nanoscale Research Letters, 2007, 2, 577–596; Krupenkin, et al., Langmuir 2008, 24, 9–14).

**[0006]** Superhydrophobe Oberflächen sind durch einen Kontaktwinkel von etwas größer als  $150^\circ$  charakterisiert. Superhydrophobe Oberflächen erlauben eine einstellbare Benetzung über große Kontaktwinkelbereiche, unabhängig von der Oberflächenspannung der verwendeten Flüssigkeit.

**[0007]** Es ist weiterhin bekannt, Elektrobenetzungszellen (EW-Zellen) mit einer hydrophoben Schicht zu versehen. Derartige EW-Zellen werden als EWOD-Zellen bezeichnet.

**[0008]** Eine EW-Zelle enthält bekanntlich mindestens eine leitfähige Flüssigkeit, deren Kontaktwinkel und damit deren Grenzfläche zu einem Fluid (Gas oder eine weitere nicht mischbare Flüssigkeit) gezielt durch Anlegen einer Spannung oder einer Potentialdifferenz beeinflusst werden kann. Beispielsweise ist es bekannt, die sphärische Grenzfläche (Meniskus) einer steuerbaren optischen Linse in ihrem Krümmungsradius durch Anlegen einer Spannung gezielt zu verändern, um einfallendes Licht gezielt abzulenken und damit eine Linse mit variabler Brennweite zu verwirklichen. Neben optischen Linsen können auch andere steuerbare optische Komponenten wie Prismen durch das Prinzip der Elektrobenetzung realisiert werden. Diese Linsen und Prismen können einzeln oder zusammengesetzt in ihren optischen Eigenschaften steuerbare optische Komponenten und Systeme bilden. Ein (newtonsches) Fluid ist im Sinne der Erfindung eine Flüssigkeit, z. B. Wasser oder viele Öle, oder ein komprimierbares Gas.

**[0009]** Steuerbare räumliche Lichtmodulatoren (SLM) auf EWOD-Basis stellen eine Weiterentwicklung des Prinzips der Elektrobenetzung zur Lichtmodulation dar. Es sind Displays und Anzeigevorrich-

tungen auf EWOD-Basis bekannt, welche die Durchlässigkeit einer Pixelzelle eines SLM mit Pixelmatrix für Licht durch Bewegung eines Flüssigkeitstropfens verändern. Dieses Prinzip ist aber nur für eine Beleuchtung des SLM mit inkohärentem Licht geeignet und realisiert eine Amplitudenmodulation des Lichts. Dies wird z. B. im Dokument US 7529012 B2 für ein Display beschrieben, in dem hydrophobisch beschichtete Zellen einen optischen Schalter zur räumlichen Amplitudenmodulation realisieren.

**[0010]** Ein SLM mit auf EWOD basierenden Zellen für die kohärente Beleuchtung, Ablenkung oder Modulation ist bisher nur durch Anmeldungen der Anmelderin bekannt, z. B. durch die GB 2453815 B.

**[0011]** Dieser EWOD-SLM hat verschiedene Nachteile: zum einen ist die zu bewegendes Flüssigkeitsmenge in den einzelnen Pixelzellen des EWOD-SLM relativ groß. Zum anderen müssen die Kontaktwinkel zwischen der Zellenwand und der Flüssigkeit über einen relativ großen Bereich verändert werden. Das ist mit einer relativen großen Verschiebung der Dreiphasenkontaktlinie entlang der festen Phase (Zellenwand) verbunden. Die Dreiphasenkontaktlinie bezeichnet die Linie, an der der Übergang zwischen den vorhandenen Materialphasen vorliegt (flüssige Phase der leitfähigen Flüssigkeit (L), flüssige oder gasförmige Phase des Umgebungsmediums (A) und Festkörperphase (S)). Die maximale Schaltgeschwindigkeit der EW-Zelle wird durch die Geschwindigkeit der Verschiebung dieser Dreiphasenkontaktlinie begrenzt. Große Verschiebungen der Dreiphasenkontaktlinie ergeben eine Verringerung der erreichbaren Schaltgeschwindigkeit des EWOD-SLM.

**[0012]** Da chemische Inhomogenitäten oder morphologische Unregelmäßigkeiten der Festkörperphase (Unebenheiten, makroskopische Rauheitsmerkmale) zu Hysterese während des Betriebs eines derartigen EWOD-SLM führen können, sind die technologischen Anforderungen an die Qualität der EW-Zellenwände hoch. Weiterhin wird bei einem solchen EWOD-SLM neben der eingestellten Phasenverschiebung gleichzeitig ein Parallelversatz des transmittierten Lichtes eingeführt. Es hat sich in praktischen Modellen erwiesen, dass dadurch z. B. die Rekonstruktionsgüte eines holographischen Displays nachteilig beeinflusst werden kann. Der laterale Parallelversatz kann zwar durch Blenden beschnitten werden, allerdings wird dadurch die Lichtintensität für die Rekonstruktion reduziert. Ein wesentlicher weiterer Nachteil des EWOD-SLM ist jedoch, dass mindestens zwei Flüssigkeitsgrenzflächen (Menisken) unabhängig voneinander eingestellt und gesteuert werden müssen, um eine Phasenmodulation des einfallenden Lichtes zu verwirklichen. Eine Zelle des EWOD-SLM enthält daher mindestens drei verschiedene Medien (Gase, Liquide), wodurch der Aufbau und die

Ansteuerung einer solchen EWOD-Zelle aufwendiger sind.

**[0013]** Nachteilig sind weiterhin die hohen Aspektverhältnisse der Trennwände einer EW-Zelle (z. B. 10:1 und größer), die für einen ausreichenden Bewegungsspielraum der Menisken bei gleichzeitig hohem Pixelfüllfaktor des SLM erforderlich sind. Dadurch ist der Fertigungsaufwand für einen EWOD-SLM relativ groß und kompliziert.

**[0014]** Es ist daher Aufgabe der Erfindung, die räumliche Modulation von ausreichend kohärentem Licht in einem SLM auf der Basis von EWOD-Zellen zu realisieren und dabei die genannten Nachteile des Standes der Technik zu verringern. In den EWOD-Zellen soll mit geringen Bewegungen der Fluide eine sehr präzise Einstellung eines definierten Phasen- und/oder Amplitudenwertes erzielt werden. Die EWOD-Zellen sollen mit geringen Aspektverhältnissen (große aktive optische Grenzfläche und damit großer Füllfaktor bei geringer Seitenwandhöhe) geschaffen werden. Gleichzeitig sollen in einem die EWOD-Zellen aufweisenden SLM sehr hohe Schaltgeschwindigkeiten erreicht werden.

**[0015]** Grundlage der Erfindung ist ein räumlicher Lichtmodulator mit einer Matrix von regelmäßig angeordneten Elektrobenetzungszellen und mit Elektrodenanordnungen, wobei jede Elektrobenetzungszelle (EW-Zelle) mindestens zwei nicht mischbare Fluide sowie zwischen den Fluiden eine von einer Elektrodenanordnung in ihrer Lage innerhalb der EW-Zelle einstellbare Grenzfläche aufweist, wobei mindestens ein Fluid flüssig und leitfähig ist, und ausreichend kohärentes Licht den räumlichen Lichtmodulator beleuchtet.

**[0016]** Die Aufgabe wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass jede EW-Zelle des räumlichen Lichtmodulators als eine EWOD-Zelle (Elektrowetting-on-dielectrics) ausgebildet ist, bei der die Oberfläche mindestens einer Seitenwand partiell oder vollständig mit mindestens einem Feld von leitfähigen, dielektrisch isolierten steuerbaren Nanostrukturen bedeckt ist, wobei das Feld

- zwischen den Nanostrukturen mit einem verschiebbaren Fluid ausgestattete Bereiche zur Aufnahme eines Teils des leitfähigen Fluids aufweist,
- eine unter den Nanostrukturen elektrisch isoliert angeordnete Elektrodenanordnung zum Ändern der Benetzungseigenschaft der Nanostrukturen aufweist,
- außerhalb des Lichtwegs angeordnet ist, und

jede EWOD-Zelle der Matrix einzeln steuerbar ist.

**[0017]** Zweckmäßigerweise sind die Felder von Nanostrukturen senkrecht zu einer oberen oder einer unteren Abdeckung der EWOD-Zelle angeordnet.

**[0018]** Die Nanostrukturen weisen in Ausbildung der Erfindung regelmäßig ausgebildete oder statistisch verteilte Nanoelemente auf, die aus hydrophob ausgeführtem Material bestehen oder hydrophob beschichtet sind. Das in den Hohlräumen zwischen den Nanostrukturen verteilte verschiebbare Fluid ist ein komprimierbares Gas oder ein ölartiges Fluid.

**[0019]** In weiterer Ausbildung der Erfindung ist die obere oder untere Abdeckung zusätzlich mit einem ölartigen Fluid beschichtet, das mit dem ölartigen Fluid zwischen den Nanostrukturen bei angelegter Spannung eine Verbindung herstellt.

**[0020]** Der steuerbare räumliche Lichtmodulator kann transmissiv oder reflektiv ausgebildet sein, wobei das leitfähige Fluid optisch transparent oder optisch reflektierend ausgeführt ist.

**[0021]** Die Grenzfläche zwischen den Fluiden ist zweckmäßigerweise eben ausgebildet und ihre Lage ist senkrecht zur Ausbreitungsrichtung von einfallendem oder reflektiertem Licht mit relativ geringen Bewegungen der eingefüllten Fluide verschiebbar. Durch die Verschiebung sind Phasen- und/oder Amplitudenwerte sehr präzise einstellbar.

**[0022]** Erfindungsgemäß erfolgt die Verschiebung, und damit die Einstellung von Phasen- und/oder Amplitudenwerten, durch Anlegen einer vorgegebenen Spannung, wobei die Phase des einfallenden oder reflektierten Lichts im Wertebereich zwischen 0 und  $m2\pi$  zur Phasenmodulation einstellbar ist.

**[0023]** Weiterhin kann im räumlichen Lichtmodulator eine Amplitudenmodulation von einfallendem oder reflektiertem Licht realisiert werden, indem mindestens ein Fluid opake, absorbierende Farbstoffe zum Ändern der Ölschichtdicke aufweist. In diesem Fall ist eines der verschiebbaren Fluid der EWOD-Zellen ein ölartiges Fluid.

**[0024]** Eine gekoppelte, nicht unabhängige Amplituden- und Phasenmodulation erfolgt für eine im Wertebereich zwischen 0 und  $2\pi$  modulierte Phase.

**[0025]** Es ist jedoch auch eine gleichzeitige entkoppelte Phasen- und Amplitudenmodulation mit  $m$  Amplitudenwerten durch das Verschieben der Fluide einstellbar, wobei die jeweiligen Amplituden- und Phasenwerte voneinander unabhängig sind. Damit kann eine komplexwertige Modulation von Licht durch den EWOD-SLM verwirklicht werden.

**[0026]** Erfindungsgemäß ist weiterhin vorgesehen, dass die Größe und Lage der eingeschalteten Elektrodenanordnungen einer EWOD-Zelle die Felder der Nanostrukturen bestimmen, in denen deren Benetzungszustand gezielt veränderbar ist.

**[0027]** Mit der Erfindung kann weiterhin eine räumliche Lichtmodulationsvorrichtung mit einem steuerbaren räumlichen EWOD-Lichtmodulator nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche realisiert werden, wobei die Lichtmodulationsvorrichtung transmittiv oder reflektiv betreibbar ist.

**[0028]** In einer weiteren Ausgestaltung weist die räumliche Lichtmodulationsvorrichtung vorteilhaft eine optisch reflektierende Flüssigkeit oder eine optisch transparente Flüssigkeit und einen mit der Matrix der EWOD-Zellen verbundenen Spiegel zum reflektiven Betrieb auf. Der Spiegel kann ein einzelner Spiegel sein, der fest mit der EWOD-Matrix verbunden ist, oder aus einzelnen Spiegelementen bestehen.

**[0029]** Die Erfindung umfasst weiterhin ein holographisches Display mit einer räumlichen Lichtmodulationsvorrichtung, die transmissiv oder reflektiv ausgebildet ist, um ein entsprechendes holographisches Displaygerät zu realisieren.

**[0030]** Eine optische Einrichtung mit einer Matrix von EWOD-Zellen kann allein oder in Kombination mit einem SLM zum Ablenken und/oder Modulieren von ausreichend kohärentem Licht in 3D Bildwiedergabe-einrichtungen genutzt werden. Derartige Einrichtungen können transmissiv oder reflektiv ausgeführt und z. B. in holographischen Displaygeräten angewendet werden.

**[0031]** Unter ausreichend kohärentem Licht ist im Dokument zu verstehen, dass im SLM nur der Bereich mit kohärentem Licht beleuchtet wird, der im SLM einen Objektpunkt oder eine Objektpunktgruppe rekonstruiert. Der Objektpunkt bzw. die Objektpunktgruppe sind im SLM als Subhologramm kodiert. Das bedeutet, dass das Kohärenzvolumen (zeitliche Kohärenzlänge  $\times$  räumliche Kohärenzlänge) so groß sein muss, dass mindestens ein Subhologramm kohärent rekonstruiert werden kann.

**[0032]** Es kann im EWOD-SLM im Gegensatz zum Stand der Technik eine Phasenänderung von durchgelassenem oder reflektiertem Licht im Wertebereich zwischen 0 und  $m \cdot 2\pi$  erzeugt werden, wobei  $m$  ganzzahlig und größer Null ist. Gleichzeitig wird durch die vorteilhafte Ausgestaltung ein lateraler Versatz des modulierten Lichts verhindert. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass eine Phasenmodulation mit nur einer in der EWOD-Zelle in unterschiedlicher Höhe einstellbaren optischen Grenzfläche erzeugt werden kann.

**[0033]** Ebenfalls kann im Gegensatz zum Stand der Technik eine komplexwertige Modulation mit dem erfindungsgemäßen EWOD-SLM nach dem beschriebenen EW-Prinzip realisiert werden.

[0034] Die Erfindung wird anhand von Ausführungsbeispielen näher beschrieben. In den dazugehörigen Zeichnungen zeigen schematisch

[0035] **Fig. 1a** die Benetzungsfähigkeit eines Flüssigkeitstropfens auf einer mit Nanostrukturen versehenen Oberfläche nach dem Wenzel-Modell in Schnittdarstellung,

[0036] **Fig. 1b** die Benetzungsfähigkeit eines Flüssigkeitstropfens auf einer mit Nanostrukturen versehenen Oberfläche nach dem Cassie/Baxter-Modell in Schnittdarstellung,

[0037] **Fig. 1c** eine Schaltungsanordnung eines Flüssigkeitstropfens im ein- und ausgeschalteten Zustand,

[0038] **Fig. 2** in Seitenansicht in einer Matrixzeile ausschnittsweise dargestellte EWOD-Zellen mit einer unterschiedlichen Füllstandshöhe zweier Fluide gemäß der Erfindung,

[0039] **Fig. 3** eine Ausbildung einer Seitenwand einer EWOD-Zelle mit Feldern von Nanostrukturen in Vorderansicht,

[0040] **Fig. 4a, b** jeweils ausschnittsweise dargestellte EWOD-SLM in transmissiver (**Fig. 4a**) bzw. reflektiver (**Fig. 4b**) Ausführung in Seitenansicht, und

[0041] **Fig. 5a, b** Beispiele von Nanoelementen mit überhängenden Strukturelementen in einer EWOD-Zelle in Schnittdarstellung.

[0042] Dem erfindungsgemäßen steuerbaren räumlichen Lichtmodulator liegt das im Stand der Technik beschriebene Wirkprinzip von EWOD-Zellen zugrunde, bei dem jedoch zusätzlich die Wenzel- und Cassie/Baxter-Zustände von Flüssigkeiten bei der Benetzung von Oberflächen von z. B. Nanostrukturen genutzt werden.

[0043] In den **Fig. 1a** und **Fig. 1b** sind schematisch verschiedene Benetzungszustände einer strukturierten Oberfläche durch einen Flüssigkeitstropfen in Schnittdarstellung zu sehen, wie sie aus dem Stand der Technik bekannt sind und in den erfindungsgemäßen EWOD-Zellen verwendet werden.

[0044] In **Fig. 1a** ist der Benetzungszustand nach Wenzel, auch Wenzel-Zustand genannt, dargestellt. Ein Fluid **1**, das wasserartig (z. B. ein Flüssigkeitstropfen) oder leitfähig ist, befindet sich in Kontakt mit einer Oberfläche mit Nanostrukturen **3**. Die Nanostrukturen **3** bestehen aus Nanoelementen **31** und sind z. B. in Rechteckzackenform ausgebildet, mit einer hydrophobischen Schicht **32** versehen und vollständig mit dem wasserartigen Fluid **1** benetzt.

[0045] In **Fig. 1b** ist der Benetzungszustand nach Cassie/Baxter, auch Cassie/Baxter-Zustand genannt, dargestellt. Der leitfähige Flüssigkeitstropfen, z. B. ein wasserbasierter Elektrolyt, ist hier nur teilweise in Kontakt mit den Nanostrukturen **3**. Letztere sind gegenüber **Fig. 1a** nur partiell benetzt.

[0046] **Fig. 1c** zeigt zwei Schaltungsanordnungen für ein leitfähiges Fluid **1** auf Nanostrukturen **3**. Wenn der Schalter **34** geöffnet ist (linke Darstellung), liegt keine Spannung am Fluid **1** und es liegt als ein wasserartiger Flüssigkeitstropfen auf den Nanostrukturen **3** (Cassie/Baxter-Zustand). Diese bestehen im Beispiel aus Silizium und sind mit einer Aluminiumoxidschicht als Dielektrikum **33** bedeckt. Das Dielektrikum **33** ist entweder selbst hydrophobisch oder mit einer hydrophobischen Schicht **32**, z. B. mit Fluorpolymer, versehen. Zwischen den einzelnen Nanoelementen **31** befindet sich als nicht leitfähiges Fluid **2** eine ölartige Flüssigkeit oder ein komprimierbares Gas.

[0047] Im eingeschalteten Zustand (rechte Darstellung) liegt eine Spannung zwischen dem Flüssigkeitstropfen und den Nanostrukturen **3** an. Dadurch wird die Benetzung des leitfähigen Fluids **1** verändert und ein Teil davon wird in die Hohlräume zwischen den Nanoelementen **31** verschoben. Verzugsweise erfolgt die Benetzung der Nanostrukturen **3** nur teilweise und kontinuierlich, so dass noch immer der Cassie/Baxter-Zustand vorliegt.

[0048] Der Veränderung des Benetzungszustandes zwischen der ein- und ausgeschalteten Konfiguration in **Fig. 1c** ist reversibel.

[0049] In **Fig. 2** ist ausschnittsweise eine Seitenansicht einer Matrixzeile von EWOD-Zellen mit unterschiedlichen Füllstandshöhen zweier Fluide gemäß der Erfindung zu sehen. Es sind beispielgebend für die Matrixzeile drei EWOD-Zellen **41**, **42** und **43** dargestellt. Die EWOD-Zellen **40** können ein- oder zweidimensional eine Matrix bilden. An den Seitenwänden **5** befinden sich die Nanostrukturen **3** mit den Nanoelementen **31**. Die Zellen **41**, **42** und **43** weisen unterschiedliche Füllstandshöhen  $t_{a0}$ ,  $t_{a1}$ ,  $t_{a2}$  des polaren leitfähigen Fluids **1** sowie einen unterschiedlichen Benetzungszustand der Nanoelemente **31** auf. Der unterschiedliche Benetzungszustand beruht auf den unterschiedlichen Eindringtiefen des Fluids **1** und ist abhängig von vorgegebenen, kontinuierlich einstellbaren Spannungswerten.

[0050] Pfeile geben die Richtung des durch die Zellen **40** durchtretenden Lichts an und  $\Phi_0$ ,  $\Phi_1$  und  $\Phi_2$  kennzeichnen die Absolutwerte der Phase des jeweiligen Lichtbündels. Wählt man einen der Phasenwerte als Bezugswert, dann gibt die Differenz zwischen diesem Bezugswert und der Absolutwerte der Phase der zwei anderen Zellen die relative Phasenverschiebung in der jeweiligen EWOD-Zelle an. Ist bei-

spielsweise  $\Phi_0$  der Bezugswert für die Absolutphase des Initialzustandes (Zelle **41**), ergibt sich die relativen Phasenverschiebungen  $\Delta\phi_1 = \Phi_0 - \Phi_0 = 0$  für die Zelle **41**,  $\Delta\phi_2 = \Phi_1 - \Phi_0$  für die Zelle **42** sowie  $\Delta\phi_3 = \Phi_2 - \Phi_0$  für Zelle **43**.

**[0051]** Nach dem leitfähigen Fluid **1** folgt im Lichtweg der Bereich einer Zelle, der mit einem Fluid **2** mit der Brechzahl  $n_b$  gefüllt ist. Im Bereich der Seitenwände **5** sind jeweils Elektrodenanordnungen **35** elektrisch isoliert angebracht. Durch diese erfolgt bei vorgegebener Spannung eines elektrischen Feldes, das durch Schließen des Schalters **34** (siehe **Fig. 1c**) erzeugt wird, die Verschiebung des Fluids **1** zwischen die Nanoelemente **31**. Anhand der Zellen **42** und **43** ist erkennbar, dass das Fluid **1** unterschiedlich tief in die Nanostrukturen **3** verschoben wurde.

**[0052]** Die Elektrodenanordnungen **35** können in unterschiedlichen Bereichen die Seitenwände **5** bedecken und unterschiedlich große Flächen aufweisen. In Zelle **43** ist die Elektrodenanordnung **35** z. B. über drei Felder **51** einer Seitenwand **5** verteilt. Allgemein sind die Bereiche der mit dem leitfähigen Fluid **1** benetzten Oberflächen der Nanostrukturen **3** in Abhängigkeit von den durch die Elektrodenanordnungen **35** vorgegebenen Spannungen in den EWOD-Zellen **41**, **42** und **43** einstellbar. Die Grundelektroden befinden sich an den unteren Abdeckungen dieser EWOD-Zellen.

**[0053]** In **Fig. 3** ist die Oberfläche einer Seitenwand **5** einer EWOD-Zelle mit drei getrennt steuerbaren Feldern **51** von Nanostrukturen **3** in regelmäßiger Anordnung in Vorderansicht dargestellt. Jedes Feld **51** weist eine unter den Nanostrukturen **3** liegende, elektrisch isoliert ausgeführte Elektrodenanordnung auf, die in dieser Ansicht nicht sichtbar ist. Eine Elektrodenanordnung kann in Größe und/oder Lage relativ zur darüber liegenden Nanostruktur unterschiedlich ausgebildet und/oder angeordnet sein.

**[0054]** Die Nanostrukturen **3** müssen nicht zwangsläufig einer Elektrodenanordnung in Feldern **51** zugeordnet sein. Sie können in einem weiteren Ausführungsbeispiel über der ganzen Seitenwand **5** oder Teilen davon regelmäßig oder unregelmäßig verteilt sein. Welche Bereiche der Nanostrukturen **3** beim Anlegen bzw. Einschalten einer Spannung gezielt in ihrem Benetzungszustand verändert werden, wird durch die Größe und Lage der darunter liegenden Elektrodenanordnung bestimmt.

**[0055]** Pro EWOD-Zelle können eine Elektrodenanordnung oder auch mehrere unabhängig voneinander schaltbare Elektrodenanordnungen vorgesehen sein.

**[0056]** Die **Fig. 4a** bis **Fig. 4c** zeigen schematisch jeweils einen ausschnittsweise dargestellten

EWOD-SLM in transmissiver (**Fig. 4a**) bzw. reflektiver (**Fig. 4b**, **Fig. 4c**) Ausführung in Seitenansicht.

**[0057]** Pfeile geben die Richtung des durch die Zellen **40** durchtretenden Lichts an, wobei die Zellen **40** ein leitfähiges Fluid **1** und ein nichtleitfähiges Fluid **2** enthalten. Die von nicht dargestellten Elektrodenanordnungen in den EWOD-Zellen **40** eingestellte und eben gehaltene Grenzfläche **6** weist in den einzelnen Zellen unterschiedliche Lagen auf.

**[0058]** In **Fig. 4b** wird ein reflektiver EWOD-SLM dadurch realisiert, dass das nicht leitfähige Fluid **2** der Zelle **40** optisch reflektierend gestaltet ist und die Grenzfläche **6** dadurch spiegelnd wirkt. In einer weiteren Ausbildung können optisch transparente Fluide **1** und **2** und ein fester Spiegel **7** an der Lichtaustrittsseite der Zelle **40** verwendet werden, um einen reflektiven EWOD-SLM zu schaffen.

**[0059]** **Fig. 5** zeigt in Schnittdarstellung Beispiele von Nanoelementen **31** mit in das leitfähige Fluid **1** überhängenden Strukturelementen. Die Oberflächen der Nanoelemente **31** sind superhydrophobisch oder superlyophobisch beschichtet, wodurch der Kontaktwinkel  $\theta_0$  des leitfähigen Fluids **1** zu den Nanoelementen **31** erweitert wird und ein Eindringen des Fluids **1** in die Bereiche zwischen den Nanoelementen **31** fördert.

**[0060]** Die Nanoelemente **31** haben z. B. die Form eines Nagels, wobei der Rand des „Nagelkopfes“ in vorteiliger Ausführung auch abgerundet sein kann. Der „Nagelkopf“ selbst stellt ein Überhangelement eines Nanoelements dar. Abgerundete Ränder sind erfindungsgemäß vorteilhaft, weil dadurch die an den Rändern auftretende Vergrößerung des elektrischen Feldes zwischen dem leitfähigen Fluid und der elektrisch isolierten Elektrodenanordnung reduziert werden kann und die potentielle Gefahr eines elektrischen Durchbruchs verringert wird.

**[0061]** Die Wirkungsweise eines erfindungsgemäßen EWOD-SLM mit einer Matrix von EWOD-Zellen wird nachfolgend näher erläutert.

**[0062]** Eine EWOD-Zelle ist mit mindestens zwei nicht mischbaren Fluiden gefüllt, von denen mindestens eines flüssig und leitfähig ist und zum anderen Fluid eine optisch ebene Grenzfläche ausbildet. Die Grenzfläche lässt sich vorherrschend senkrecht zur Ausbreitungsrichtung von einfallendem Licht verschieben. Die Fluide weisen einen unterschiedlichen Brechungsindex  $n$  für das zu modulierende kohärente Licht der Wellenlänge  $\lambda$  auf.

**[0063]** Mindestens eine Seitenwand einer EWOD-Zelle, die mindestens teilweise mit einem leitfähigen Fluid gefüllt ist, ist partiell oder vollständig mit mindestens einem Feld von leitfähigen dielektrisch isolierten

Nanostrukturen, die z. B. als Nanoposts oder Nanonails ausgebildete Nanoelemente enthalten, bedeckt. Dadurch ist die Oberfläche der Seitenwand superhydrophobisch oder superlyophobisch gegenüber dem leitfähigen Fluid ausgestaltet und von diesem gemäß Cassie/Baxter nur partiell benetzt.

**[0064]** Durch Anlegen einer Spannung zwischen den Nanostrukturen und dem Fluid kann der Kontaktwinkel  $\theta$  zwischen der Oberfläche und dem Fluid innerhalb der EWOD-Zelle auf über  $150^\circ$  vergrößert und die Benetzbarkeit bzw. der Benetzungszustand der Oberfläche gezielt verändert werden. Auf diese Weise lässt sich der Füllstand der leitfähigen Flüssigkeit in der EWOD-Zelle um sehr kleine Beträge verschieben. Der Füllstand kennzeichnet die Position der Grenzfläche bezüglich des Lichtweges. Der Betrag des Füllstands ist unabhängig von der Orientierung der Zellen im Raum. Da das Flüssigkeitsvolumen innerhalb einer Zelle konstant bleibt, senkt sich bei vorgegebener Spannung die Füllstandshöhe um das verschobene Flüssigkeitsvolumen, welches sich zwischen den Nanostrukturen verteilt. Eine veränderte Füllstandshöhe bewirkt eine Phasenverschiebung des transmittierten oder reflektierten Lichts bezüglich des Initialzustandes (siehe [Fig. 2](#)) bzw. eines vorhergehenden Schaltzustandes. Jede EWOD-Zelle kann auf diese Weise separat geschaltet und ein vorgegebener Phasenwert eingestellt werden.

**[0065]** Die Grenzfläche in der EWOD-Zelle wird von einer Elektrodenanordnung über eine Systemsteuerung derart gesteuert, dass das transmittierte oder reflektierte Licht eine einstellbare Phasenverschiebung  $\Delta\phi$  zwischen  $0$  und  $m \cdot 2\pi$  erfährt.

**[0066]** Die Grenzfläche ist eine optisch wirksame Grenzfläche, da sich durch Veränderung ihrer Lage die optische Weglänge und damit die Phase des durch die Zelle durchlaufenden Lichts verändern lässt. Die optische Weglänge ist definiert als das Produkt von geometrischer Dicke  $d$  und Brechungsindex  $n$ .

**[0067]** Eine Zelle mit einer geometrischen Dicke  $d$  entlang der Lichtausbreitungsrichtung sei anteilig mit zwei Fluiden von unterschiedlichem Brechungsindex  $n_a$  bzw.  $n_b$  gefüllt, welche eine geometrische Dicke  $t_a$  bzw.  $t_b$  aufweisen, wobei  $d = t_a + t_b$  ist.

**[0068]** Für eine transmissive Zelle ist die optische Weglänge (OWL) im Ausgangszustand durch  $OWL_0 = n_a t_{a0} + n_b t_{b0}$  gegeben. Im eingeschalteten Zustand ist die optisch wirksame Grenzfläche um  $\Delta t$  verschoben, wodurch sich nun eine geänderte optische Weglänge dieser Zelle von  $OWL_1 = n_a(t_{a0} - \Delta t) + n_b(t_{b0} + \Delta t)$  ergibt. Die Veränderung der optischen Weglänge wird als optische Wegdifferenz  $OPD = OWL_1 - OWL_0$  bezeichnet, die damit zu  $OPD = \Delta t(n_b - n_a)$  wird. Die optische Wegdifferenz geht mit einer Pha-

senverschiebung des Lichts einher, da die Beziehung  $\Delta\phi = 2\pi/\lambda \cdot OPD$  gilt. Für eine reflektive Zelle lässt sich die optische Wegdifferenz in ähnlicher Weise ableiten, wobei hier ein Fluid allerdings zweimal durchlaufen wird und eine Reflexion an der optisch wirksamen Grenzfläche erfolgt. Es ergibt sich dann eine optische Wegdifferenz von  $OPD = 2\Delta t n_a$  bzw.  $OPD = 2\Delta t n_b$ , je nachdem, welches der Fluide durchlaufen wird.

**[0069]** Diese optische Wegdifferenz ist im Sinne der erfindungsgemäßen Lösung individuell für die EWOD-Zellen des EWOD-SLM einstellbar.

**[0070]** Zwei Ausführungsbeispiele von EWOD-SLM auf der Basis von EWOD-Zellen mit superhydrophoben Flächen werden nachfolgend näher beschrieben.

**[0071]** Im ersten Ausführungsbeispiel erfolgt eine variable Benetzung der Oberfläche von Nanostrukturen in gasförmiger Umgebung unter Beibehaltung des Cassie/Baxter-Zustandes. Sowohl transmissive als auch reflektive räumliche Lichtmodulatoren können nach diesem Ausführungsbeispiel verwirklicht werden.

**[0072]** Im superhydrophoben Zustand nach Cassie/Baxter kann nach dem EWOD-Prinzip der erweiterte Kontaktwinkel  $\theta_0$  über kleine Bereiche innerhalb der EWOD-Zelle verändert werden (siehe [Fig. 3](#)). Die Nanoelemente **3** weisen dafür ein überhängendes Strukturelement auf, das den Cassie/Baxter-Zustand stabilisiert. Dadurch wird das leitfähige Fluid **1** daran gehindert, in die Hohlräume zwischen den Nanoelementen zu tief einzudringen. Die Hohlräume sind z. B. mit komprimierbarem Gas gefüllt.

**[0073]** Durch eine externe Systemsteuerung wird ein elektrisches Feld, das für jede Zelle einzeln schaltbar ist, zwischen einer oder mehreren elektrisch isolierten Elektrodenanordnungen und dem leitfähigen Fluid angelegt und verändert den erweiterten Kontaktwinkel  $\theta_0$  an den Nanoelementen **31** (siehe [Fig. 5a, b](#)). Das elektrische Feld wird zwischen den dielektrisch isolierten Nanostrukturen (eine Elektrode?) und dem leitfähigen Fluid aufgebaut. Eine Veränderung des Spannungswertes ruft dann an den einzelnen Nanostrukturelementen eine Veränderung des erweiterten Kontaktwinkels  $\theta_0$  hervor. Dadurch wird die leitfähige Flüssigkeit in die Hohlräume zwischen den Nanostrukturen gezogen, ohne diese jedoch vollständig zu benetzen bzw. auszufüllen (siehe [Fig. 2](#)). Befindet sich ein Gas zwischen den Nanoelementen **31**, wird es dabei entweder leicht komprimiert oder es erfolgt ein Druckausgleich wenn das Gas zwischen den Nanostrukturen und dem restlichen Zellenvolumen nicht über eine Gasbarriere voneinander getrennt ist. Es findet eine Volumenverschiebung des leitfähigen Fluids **1** statt. Die elektrostatische Kraft, die durch das

elektrische Feld wirkt, ist hier größer als die zur Gasverschiebung oder Gaskompression benötigte Kraft.

**[0074]** Die Volumenverschiebung des leitfähigen Fluids wird ausgenutzt, um den Füllstand der EWOD-Zelle mit einer Flüssigkeit zu verändern. Der Term „Füllstand“ bezeichnet die Länge der Flüssigkeitssäule zwischen der unteren Abdeckung der Zelle und der Flüssigkeits- bzw. Gas-Grenzfläche. Er dient hier nur zur Veranschaulichung der Wirkungsweise und ist nicht auf die Orientierung der Zelle im Raum oder auf die Erdgravitation bezogen. Um eine Phasenverschiebung von  $2\pi$  mit der EWOD-Zelle einzustellen, welche in einfacher Transmission eingesetzt wird, ist eine Änderung des Füllstands um den Betrag

$$\Delta h = \frac{\lambda}{n_{\text{liquid}} - 1}$$

erforderlich.

**[0075]** Dazu ein Beispiel: Mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 500$  nm und einer Brechzahl von  $n_{\text{Liquid}} = 1,33$  ist eine Füllstandsänderung  $\Delta h = 1,515$   $\mu\text{m}$  einzustellen, um einen maximalen Phasenhub von  $2\pi$  zu erreichen. Bei einer angenommenen Größe einer Zelle von  $30$   $\mu\text{m} \times 30$   $\mu\text{m}$  entspricht dies einer Volumenverschiebung innerhalb der Zelle von  $V = 1364$   $\mu\text{m}^3$ . Nimmt man an, dass alle vier Seitenwände der Zelle mit Feldern von Nanostrukturen versehen sind, die einen Flächenanteil von 50% aufweisen (Flächenverhältnis von Lücken zu Strukturen gleich 1:1) und nimmt man weiterhin an, dass der Füllstand dieser Zelle im Initialzustand  $15$   $\mu\text{m}$  beträgt, muss die Grenze zwischen den Fluiden um den mittleren Betrag  $\Delta s = 1,515$   $\mu\text{m}$  zwischen die Nanelemente verschoben werden (siehe [Fig. 2](#)).

**[0076]** Dieses Beispiel kann ebenso einer reflektiven Ausgestaltung des ersten Ausführungsbeispiels zugrunde gelegt werden. Reflektive Ausgestaltungen basieren auf den eingangs dargestellten Prinzipien und Merkmalen.

**[0077]** Im zweiten Ausführungsbeispiel wird eine variable Benetzung der Oberfläche einer EWOD-Zelle in flüssiger Umgebung realisiert. Beide Fluide sind nicht mischbar und mindestens eines ist elektrisch leitfähig. Sowohl transmissive als auch reflektive EWOD-SLM können nach diesem Ausführungsbeispiel verwirklicht werden.

**[0078]** Ein reversibler Prozess einer steuerbaren Benetzung auf superhydrophobischen Oberflächen ist bisher bei Zwei-Liquid Systemen bekannt (siehe Dhinsa, M. S.; Smith, N. R.; Heikenfeld, J.; Rack, P. D.; Fowlkes, J. D.; Doktycz, M. J.; Melechko, A. V. & Simpson, M. L.: Electrostatically Induced Wetting of Vertically Aligned Superhydrophobic Carbon Na-

nofibers, Langmuir 2006, 22, 9030–9034). Die Nanostrukturen können hier dielektrisch isolierte und mit einer hydrophobischen Schicht (z. B. Flourpolymer) versehene Nanofasern sein, welche durch Aufwuchsprozesse auf ein Substrat gebracht werden. Die Nanostrukturen bedecken wiederum die Seitenwände der EWOD-Zellen. Die Hohlräume zwischen den Nanofasern werden mit einer ölartigen Flüssigkeit gefüllt, z. B. durch Selfassembling Befüllungsprozesse. Da die Nanofasern hydrophob beschichtet sind, wird die ölartige Flüssigkeit in den dazwischen liegenden Hohlräumen festgehalten. Die restliche Zelle wird wieder mit einem leitfähigen Fluid befüllt. Gleichzeitig enthält die obere oder untere Abdeckung der Zelle eine dünne Schicht der ölartigen Flüssigkeit. Sie ist über Kanäle oder direkt mit der ölartigen Flüssigkeit zwischen den Nanofasern verbunden. Ölartige und leitfähige Flüssigkeit (z. B. ein wasserbasierter Elektrolyt) weisen einen unterschiedlichen Brechungsindex  $n$  auf.

**[0079]** Kohärentes Licht, welches eine transmissive EWOD-Zelle durchläuft, legt einen optischen Weg von  $OWL = n_{\text{wasser}} \cdot h_{\text{wasser}} + n_{\text{öl}} \cdot h_{\text{öl}}$  zurück. Beim Anlegen eines elektrischen Feldes zwischen der leitfähigen Flüssigkeit und den Nanofasern ändert sich der Benetzungszustand der Nanofasern. Die wasserartige Flüssigkeit dringt teilweise zwischen die Nanofasern und verdrängt einen Teil der ölartigen Flüssigkeit in Richtung der dünnen Ölschicht an der Abdeckung der Zelle. Dadurch ändern sich sowohl die Dicke der ölartigen als auch die Dicke der leitfähigen Schicht. Durch die unterschiedlichen Brechungsindizes  $n$  und die unterschiedlichen Schichtdicken ändert sich der optische Lichtweg im Vergleich zum vorhergehenden Schaltzustand.

**[0080]** Wird das elektrische Feld abgeschaltet, gehen die Flüssigkeit und die Ölschicht sprunghaft in ihren Ausgangszustand der Benetzung zurück und das Öl füllt wieder die Hohlräume zwischen den Nanofasern.

**[0081]** Die Schichtdicken von Öl und Wasser ändern sich wieder entsprechend dem aktuell vorgegebenen Schaltzustand. Mit den jeweils neu eingestellten Spannungswerten bzw. bei jedem neuen Schaltzustand verändert sich innerhalb der Zelle der optische Weg des hindurch tretenden Lichts, wodurch eine Phasenänderung realisiert wird. Das EWOD-Prinzip wird hier im Sinne einer Mikropumpe eingesetzt, um einen definierten Phasenwert einzustellen.

**[0082]** Absolute Phase und optische Weglänge OWL sind über die Beziehung  $= 2\pi/\lambda \cdot OWL$  miteinander verknüpft, wobei  $\Phi$  die Phase des aus der EWOD Zelle austretenden Lichts ist (siehe [Fig. 2](#)).

**[0083]** Durch Anordnen von vielen EWOD-Zellen in Form einer Matrix kann ein steuerbarer räumli-

cher Lichtmodulator nach dem EWOD-Prinzip realisiert werden. Ein  $90^\circ$ -Kontaktwinkel der Grenzfläche senkrecht zum Lichtweg kann sicher eingestellt werden. Das kann durch entweder den Einsatz geeigneter Füllmaterialien in der Zelle (Flüssigkeit, Öl), eine geeignete Oberflächenmorphologie der Nanostrukturen oder durch Zusatzelektroden, welche die Grenzfläche eben und parallel zur Ober- und Unterseite der EWOD-Zelle halten, erreicht werden.

**[0084]** Es kann auch ein gradueller Übergang für die Kontaktwinkel  $\theta_0$  der Strukturelemente der Nanoelemente eingestellt und damit ein kontinuierliches Ansteuern der EWOD-Zellen verwirklicht werden.

**[0085]** Gegenüber dem Stand der Technik ist der Benetzungsprozess der beschichteten Oberflächen der EWOD-Zellen reversibel und elektrisch steuerbar.

**[0086]** Ebenfalls kann eine räumliche Lichtmodulationsvorrichtung nach dem EWOD-Prinzip geschaffen werden, die sowohl transmittiv mit optisch transparenten Fluiden als auch reflektiv mit optisch reflektierenden Fluiden oder optisch transparenten Fluiden und einem Spiegel betrieben und durch entsprechend ausgestaltete Komponenten realisierbar ist.

**[0087]** Die bevorzugte Modulation des erfindungsgemäßen EWOD-SLM ist eine Phasenmodulation des Lichts. Das zugrundeliegende Prinzip eignet sich auch für eine Amplitudenmodulation. Eine Kombination von Phasen- und Amplitudenmodulation ist ebenfalls möglich, um eine komplexwertige Modulation in einem SLM zu realisieren. Die kennzeichnenden Merkmale der verschiedenen Modulationsarten sind im Folgenden zusammengefasst:

(1) Eine Phasenmodulation kann erreicht werden durch:

- (a) Verwendung mindestens eines leitfähigen Fluids und eines Gases,
- (b) Verwendung mindestens eines ersten leitfähigen Fluids und mindestens eines weiteren Fluids, das mit dem ersten nicht mischbar ist.

Bei beiden Varianten ergibt sich eine relative Phasenverschiebung durch eine Füllstandsänderung in der EWOD-Zelle. Es ist hier ausreichend, die Phase des Lichts im Wertebereich von  $0 \dots 2\pi$  zu modulieren.

(2) Eine Amplitudenmodulation kann erreicht werden durch:

Einfärben der von mindestens eines der Fluide mit opaken, absorbierenden Farbstoffen, wodurch sich eine variable Absorption des durchtretenden oder reflektierten Lichts ergibt, wenn sich die Dicke der zu durchlaufenden Schicht ändert.

(3) Es kann eine voneinander unabhängige Phasen- und Amplitudenmodulation gleichzeitig durchgeführt werden, wenn die einstellbare absolute Phasenmodulation größer als  $2\pi$  ist:

Bei der oben genannten Lösung (2) – Einfärben der ölartigen Fluide mit opaken, absorbierenden Farbstoffen – tritt eine gekoppelte, nicht unabhängige Amplituden- und Phasenmodulation auf, solange die Phase nur im Wertebereich  $0 \dots 2\pi$  moduliert wird.

Bei Erweiterung des Phasenmodulationsbereiches auf  $0 \dots m2\pi$  können verschiedene Paarungen von geeigneten Amplituden- und Phasenwerten ermittelt werden. Die relative Phase ist nur im Wertebereich von  $0 \dots 2\pi$  eindeutig definiert. Ganzzahlige Vielfache eines Phasenwertes ergeben denselben relativen Phasenwert. Bei Erweiterung des Modulationsbereiches der Phasen auf  $0 \dots m2\pi$  tritt eine  $m$ -fache Redundanz in den einstellbaren Phasenwerten auf. Dagegen nimmt die Absorption des Lichts mit zunehmender Dicke des absorbierenden Fluids zu (Intensitätsabschwächung gemäß dem Lambert-Beerschen-Gesetz). Bei einer Füllstandsänderung, die einer Phasenmodulation im Bereich von  $0 \dots m2\pi$  entspricht, lassen sich somit auch  $m$  Amplitudenwerte einstellen, wenn das Fluid absorbierend ist. Eine entkoppelte Phasen- und Amplitudenmodulation kann dadurch realisiert werden. Legt man die Absorption des absorbierenden Fluids relativ niedrig aus, dann tritt eine vollständige Absorption des Lichts vorteilhaft erst bei einer höheren Ordnungszahl  $m$  der Phasenmodulation auf. Damit kann die Anzahl möglicher Amplitudenwerte bestimmt werden.

## 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 7529012 B2 [0009]
- GB 2453815 B [0010]

### Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Verplanck, N.; Coffinier, Y.; Thomy, V.; Boukherroub, R.: Wettability Switching Techniques an Superhydrophobic Surfaces; Nanoscale Research Letters, 2007, 2, 577–596 [0005]
- Krupenkin, et al., Langmuir 2008, 24, 9–14 [0005]
- Dhinsa, M. S.; Smith, N. R.; Heikenfeld, J.; Rack, P. D.; Fowlkes, J. D.; Doktycz, M. J.; Melechko, A. V. & Simpson, M. L.: Electrostatically Induced Wetting of Vertically Aligned Superhydrophobic Carbon Nanofibers, Langmuir 2006, 22, 9030–9034 [0078]

## Patentansprüche

1. Steuerbarer räumlicher Lichtmodulator mit einer Matrix von regelmäßig angeordneten Elektrobenetzungszellen und mit Elektrodenanordnungen, wobei jede Elektrobenetzungszelle (EW-Zelle) mindestens zwei nicht mischbare Fluide sowie zwischen den Fluiden eine von einer Elektrodenanordnung in ihrer Lage innerhalb der EW-Zelle einstellbare Grenzfläche aufweist, wobei mindestens ein Fluid flüssig und leitfähig ist, und ausreichend kohärentes Licht den räumlichen Lichtmodulator beleuchtet, **dadurch gekennzeichnet**, dass jede EW-Zelle als eine EWOD-Zelle (Elektrowetting-on-dielectrics) (40) ausgebildet ist, bei der die Oberfläche mindestens einer Seitenwand (5) partiell oder vollständig mit mindestens einem Feld (51) von leitfähigen, dielektrisch isolierten steuerbaren Nanostrukturen (3) bedeckt ist, wobei das Feld (51)

- zwischen den Nanostrukturen (3) mit einem verschiebbaren Fluid (2) ausgestattete Bereiche zur Aufnahme eines Teils des leitfähigen Fluids (1) aufweist,
- eine unter den Nanostrukturen (3) elektrisch isoliert angeordnete Elektrodenanordnung (35) zum Ändern des Benetzungszustands der Nanostrukturen (3) aufweist,
- außerhalb des Lichtwegs angeordnet ist, und jede EWOD-Zelle (40) der Matrix einzeln steuerbar ist.

2. Steuerbarer räumlicher Lichtmodulator nach Anspruch 1, bei dem die Felder (51) von Nanostrukturen (3) senkrecht zu einer oberen oder einer unteren Abdeckung der EWOD-Zelle (40) angeordnet sind.

3. Steuerbarer räumlicher Lichtmodulator nach Anspruch 2, bei dem die Nanostrukturen (3) regelmäßig ausgebildete oder statistisch verteilte Nanoelemente (31) aufweisen, die aus hydrophobem Material bestehen oder hydrophob beschichtet sind.

4. Steuerbarer räumlicher Lichtmodulator nach Anspruch 2, bei dem das verschiebbare Fluid (2) ein komprimierbares Gas oder eine ölartige Flüssigkeit ist.

5. Steuerbarer räumlicher Lichtmodulator nach Anspruch 4, bei dem die obere oder untere Abdeckung zusätzlich mit einem ölartigen Fluid beschichtet ist, das mit dem ölartigen Fluid zwischen den Nanostrukturen (3) bei angelegter Spannung eine Verbindung herstellt.

6. Steuerbarer räumlicher Lichtmodulator nach Anspruch 1, der transmissiv oder reflektiv ausgebildet ist, wobei das leitfähige Fluid (1) optisch transparent oder optisch reflektierend ausgeführt ist.

7. Steuerbarer räumlicher Lichtmodulator nach Anspruch 6, bei dem die Grenzfläche (6) eben ausgebil-

det und ihre Lage senkrecht zur Ausbreitungsrichtung von einfallendem oder reflektiertem Licht verschiebbar ist.

8. Steuerbarer räumlicher Lichtmodulator nach Anspruch 7, bei dem die Verschiebung durch Anlegen einer vorgegebenen Spannung erfolgt, wobei die Phase des einfallenden oder reflektierten Lichts im Wertebereich zwischen 0 und  $m2\pi$  zur Phasenmodulation einstellbar ist.

9. Steuerbarer räumlicher Lichtmodulator nach Anspruch 4, bei dem mindestens ein Fluid opake, absorbierende Farbstoffe zum Ändern der Ölschichtdicke aufweist, wodurch eine Amplitudenmodulation von einfallendem oder reflektiertem Licht realisierbar ist.

10. Steuerbarer räumlicher Lichtmodulator nach Anspruch 9, bei dem eine gekoppelte, nicht unabhängige Amplituden- und Phasenmodulation für eine im Wertebereich zwischen 0 und  $2\pi$  modulierte Phase erfolgt.

11. Steuerbarer räumlicher Lichtmodulator nach Anspruch 9, bei dem eine gleichzeitige entkoppelte Phasen- und Amplitudenmodulation mit  $m$  Amplitudenwerten einstellbar ist, wobei die jeweiligen Amplituden- und Phasenwerte voneinander unabhängig sind.

12. Steuerbarer räumlicher Lichtmodulator nach Anspruch 1, bei dem die Größe und Lage der eingeschalteten Elektrodenanordnungen (35) einer EWOD-Zelle (40) die Felder (51) der Nanostrukturen (3) bestimmen, in denen der Benetzungszustand gezielt veränderbar ist.

13. Räumliche Lichtmodulationsvorrichtung mit einem steuerbaren räumlichen Lichtmodulator nach mindestens einem der vorhergehenden Ansprüche, welche transmittiv oder reflektiv betreibbar ist.

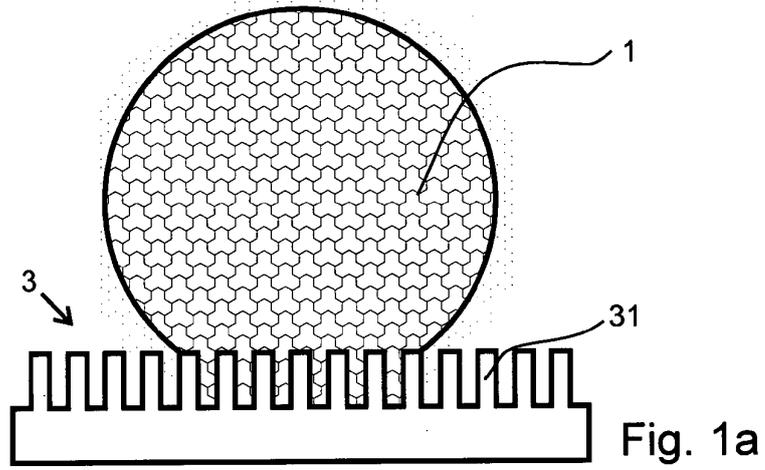
14. Räumliche Lichtmodulationsvorrichtung nach Anspruch 13, die mit einer optisch reflektierenden Flüssigkeit oder mit einer optisch transparenten Flüssigkeit und einem mit der Matrix der EWOD-Zellen (40) verbundenen Spiegel (7) reflektiv betreibbar ist.

15. Holographisches Display, das eine räumliche Lichtmodulationsvorrichtung nach Anspruch 13 aufweist und ein transmissiv oder reflektiv ausgebildetes holographisches Displaygerät realisiert.

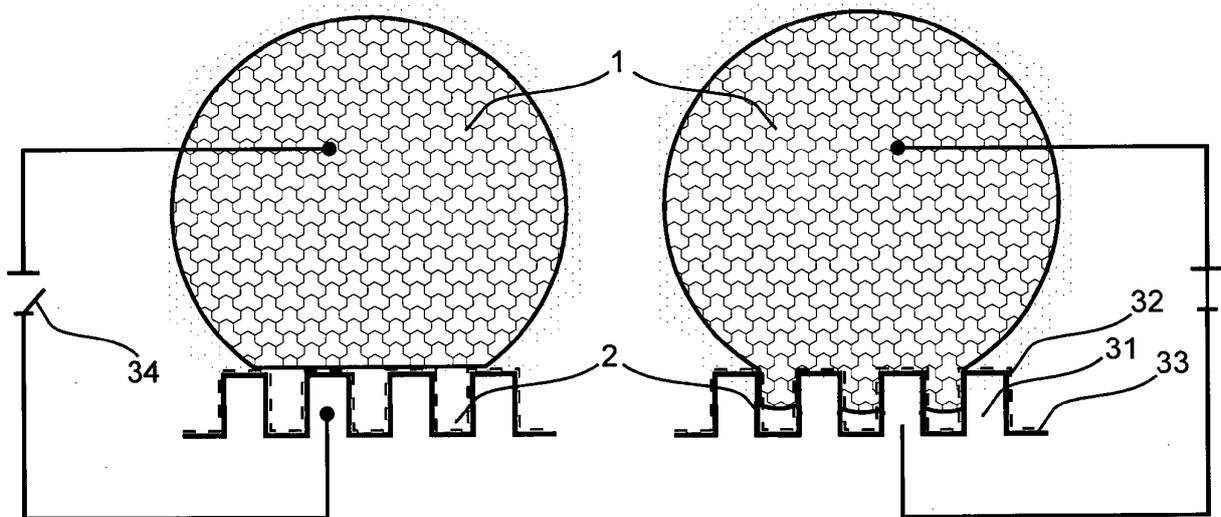
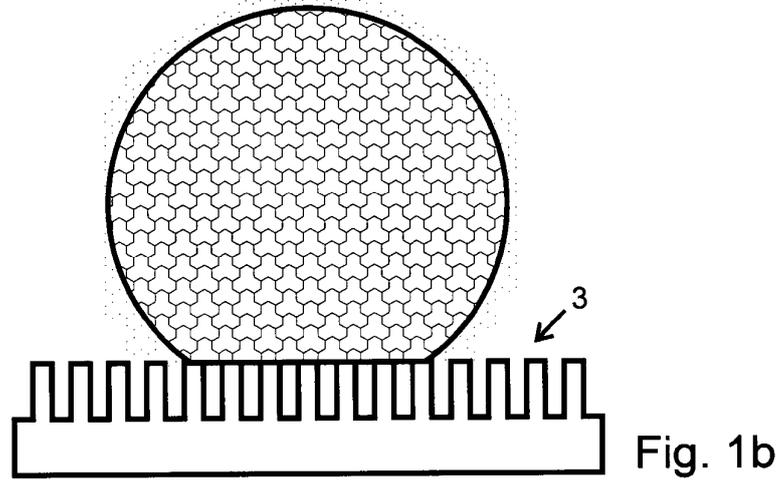
Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Wenzel



Cassie/Baxter



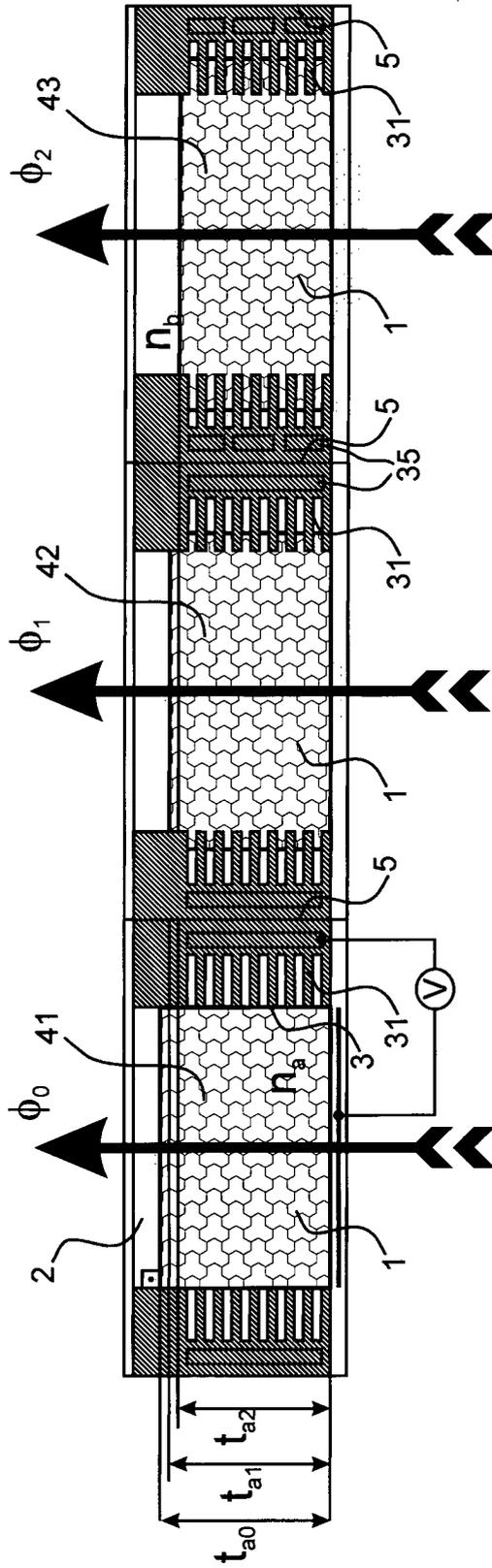


Fig. 2

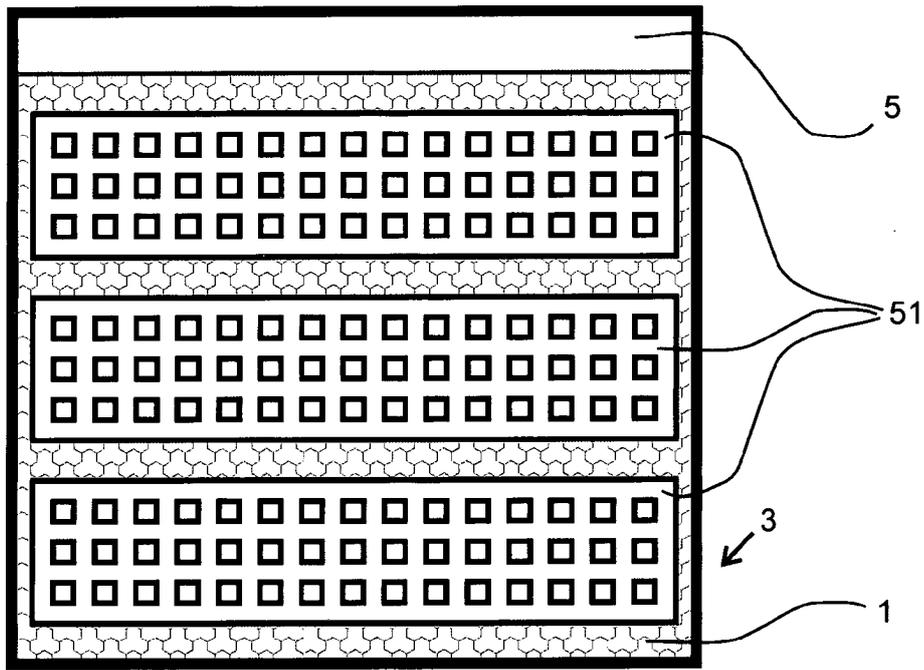


Fig. 3

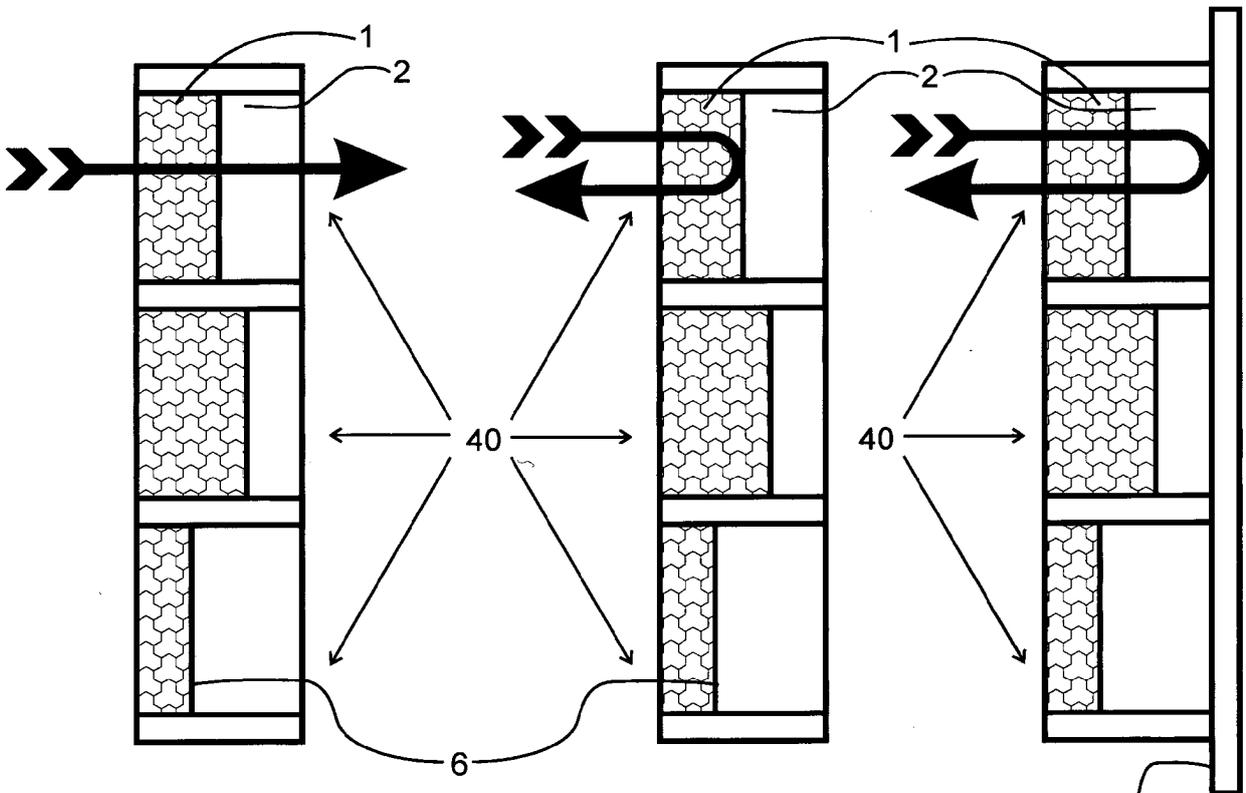


Fig. 4a

Fig. 4b

7 Fig. 4c

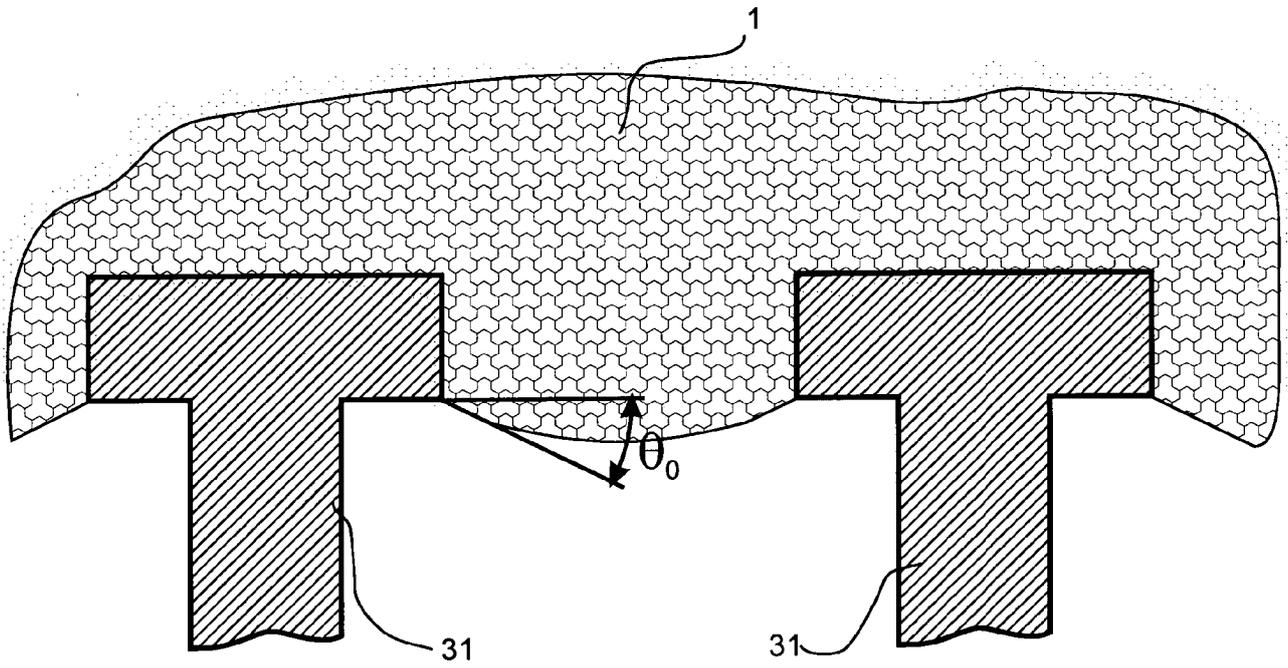


Fig. 5a

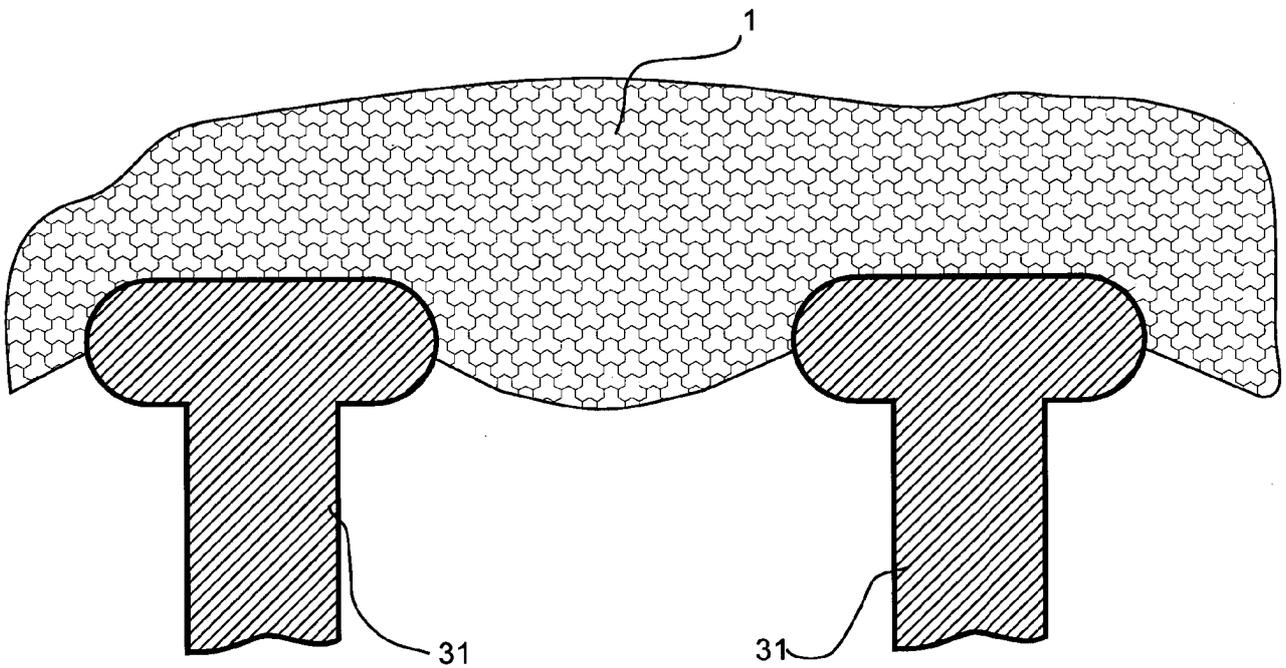


Fig. 5b