

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
3. Oktober 2013 (03.10.2013)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2013/144241 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
B01L 3/00 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2013/056585

(22) Internationales Anmeldedatum:
27. März 2013 (27.03.2013)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2012 204 925.8 27. März 2012 (27.03.2012) DE

(71) Anmelder: **INSTITUT FÜR MIKROTECHNIK
MAINZ GMBH** [DE/DE]; Carl-Zeiss-Straße 18 - 20,
55129 Mainz (DE).

(72) Erfinder: **BASSLER, Michael**; Im Borner Grund 10,
55127 Mainz (DE). **DRESE, Klaus, Stefan**; Am
Damsberg 82, 55130 Mainz (DE). **LATTA, Daniel**;
Michael-Müller-Ring 50, 55128 Mainz (DE).

(74) Anwalt: **MEHLER ACHLER**; Bahnhofstr. 67, 65185
Wiesbaden (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,

AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,
BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP,
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD,
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,
NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU,
RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ,
TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA,
ZM, ZW.

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

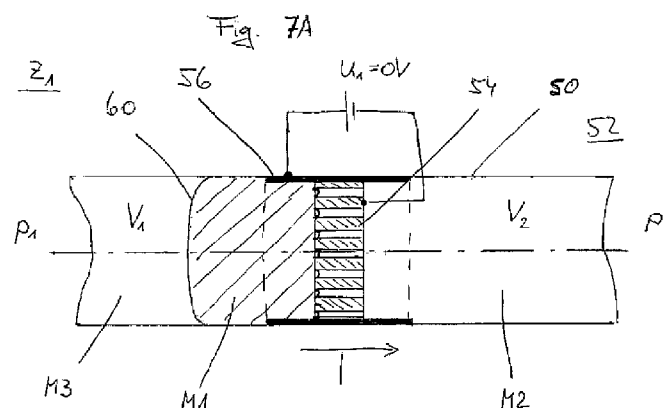
Erklärungen gemäß Regel 4.17:

— Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: FLUIDIC SYSTEM, USE, AND METHOD FOR OPERATING THE SAME

(54) Bezeichnung : FLUIDISCHES SYSTEM, VERWENDUNG UND VERFAHREN ZUM BETREIBEN DESSELBEN



(57) **Abstract:** The invention relates to a fluidic system having a first volume, a second volume and a membrane geometrically separating the two volumes, which has an open-pore microstructure for the passage of a first medium and a second medium. There is a contact angle (Θ) between the interface of the media and the pore surface. A first electrical field in the region of the membrane and a first electromagnetic radiation and a first heating of the membrane define a first state (Z_1), in which the membrane is not wetted or is less wetted by the first medium and is more heavily wetted by the second medium such that a first contact angle $\Theta_1 > 90^\circ$ is formed between the pore surface and the interface. The first medium and the second medium and the pore surface have a surface energy of which at least one surface energy can be reversibly changed in such a way that a second contact angle $\Theta_2 < \Theta_1$ occurs between the pore surface and the interface in a second state (Z_2).

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2013/144241 A2

**Veröffentlicht:**

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

Die Erfindung betrifft ein fluidisches System mit einem ersten Volumen, einem zweiten Volumen und einer die beiden Volumina geometrisch trennenden Membran, die eine offenporige Mikrostruktur für den Durchtritt eines ersten Mediums und eines zweiten Mediums bereitstellt. Zwischen der Grenzfläche der Medien und der Porenoberfläche besteht ein Kontaktwinkel (Θ). Ein erstes elektrisches Feld im Bereich der Membran und eine erste elektromagnetische Strahlung und eine erste Erwärmung der Membran definieren einen ersten Zustand (Z_1), in dem die Membran von dem ersten Medium nicht oder weniger benetzt und von dem zweiten Medium stärker benetzt, so dass sich zwischen der Porenoberfläche und der Grenzfläche ein erster Kontaktwinkel $\Theta_1 > 90^\circ$ ausbildet. Das erste Medium und das zweite Medium und die Porenoberfläche weisen eine Oberflächenenergie auf, von denen mindestens eine Oberflächenenergie derart reversibel veränderbar ist, dass sich in einem zweiten Zustand (Z_2) zwischen der Porenoberfläche und der Grenzfläche ein zweiter Kontaktwinkel $\Theta_2 < \Theta_1$ einstellt.

Fluidisches System, Verwendung und Verfahren zum Betreiben desselben

Beschreibung

5 Die Erfindung betrifft ein fluidisches System, insbesondere ein mikrofluidisches System, mit einem ersten Volumen, einem zweiten Volumen und einer die beiden Volumina geometrisch trennenden Membran, die eine offenporige Mikrostruktur mit einer Porenoberfläche für den Durchtritt eines ersten Mediums und eines zweiten Mediums bereitstellt, zwischen denen eine Grenzfläche ausgebildet ist,
10 wobei zwischen der Grenzfläche und der Porenoberfläche ein Kontaktwinkel besteht. Die Erfindung betrifft ferner die Verwendung eines fluidischen Systems und ein Verfahren zum Betreiben eines solchen.

Ein „fluidisches System“ im Sinne dieser Schrift setzt sich aus wenigstens drei
15 Komponenten zusammen: Einer formstabilen, körperlichen Einrichtung, also einem Festkörper, einem ersten Medium oder Fluid und einem zweiten Medium oder Fluid. Zu dem Festkörper gehört ein Substrat, in das eine oder mehrere Fluidleitungen eingearbeitet sind, und eine die Fluidleitung räumlich in zwei Abschnitte, nämlich das erste und das zweite Volumen, trennende Membran.

20

Als „Volumen“ im Sinne der vorliegenden Schrift wird im Allgemeinen ein Hohlraum zur räumlichen Einfassung der Medien verstanden, auch hierfür wird im Folgenden der Begriff „Fluidleitung“ synonym verwendet.

25

Als „Membran“ wird ganz allgemein ein Festkörper bezeichnet, der geeignet ist, jene räumliche oder geometrische Trennung und zugleich eine Barriere zu schaffen, die geeignet ist, wenigstens einem durchströmenden Medium einen erhöhten Strömungswiderstand entgegenzusetzen, genauer die beiden Medien unter verschiedenen Bedingungen passieren zu lassen. Eine unterschiedliche Bedingung,
30 unter denen die beiden Medien passieren, ist beispielsweise die zum Pas-

– 2 –

sieren benötigte Druckdifferenz. Damit die Medien passieren können, wird verlangt, dass die Membran eine „offenporige“ Struktur und genauer eine offenporige Mikro- oder Nanostruktur aufweist. Dementsprechend werden als „Poren“ allgemein für die Medien durchlässige Öffnungen bezeichnet. Eine Membran kann
5 beispielsweise in Form eines Gitters, eines Faserverbundes, eines Geflechts, einer waben- oder schwammartigen Struktur, eines Metallschaums oder dergleichen vorliegen. Wesentlich ist nur, dass die Strukturen eben offenporig sind. Die Membran und das Substrat der Fluidleitung sind bevorzugt nicht einstückig und auch nicht aus demselben Material gefertigt.

10 Die beiden Medien sind in der Fluidleitung benachbart angeordnet und definieren die „Grenzfläche“ oder auch „Phasengrenze“. Die beiden „Medien“ werden auch als Fluid oder Phase bezeichnet. Es kann sich dabei um zwei Flüssigkeiten, wie beispielsweise eine wasser- und eine ölbasierte Flüssigkeit, oder eine Flüssigkeit
15 und ein Gas, wie beispielsweise Luft, handeln. In letzterem Fall wird anstelle von einer Grenzfläche oder Phasengrenze auch von einer „Oberfläche“ gesprochen. Entscheidendes Kriterium ist, dass sich die beiden Medien nicht ineinander lösen, chemisch miteinander verbinden oder vollständig mischen.

20 Ein „mikrofluidisches System“ zeichnet sich durch die Handhabung von Flüssigkeitsvolumina im Bereich von 1ml und darunter, in der Regel jedoch nicht wesentlich unter einem μl aus. Dementsprechend sind darin Fluidkanäle vorgesehen, die mehrheitlich oder zumindest vielfach Querschnitte und/oder Strukturen mit Abmessungen im Bereich von 1 mm oder weniger aufweisen.

25 Die Erfindung setzt sich mit der Wechselwirkung zwischen den beiden Medien und dem Festkörpermateriale der Membran, genauer der Oberfläche der Membranporen auseinander.

Ein solches System ist beispielsweise in der Offenlegungsschrift DE 10 2009 045 403 A1 beschrieben. Die Vorrichtung dient dort zum Trennen von Gas und Flüssigkeit oder allgemeiner zum Abtrennen einer dispersen Phase von einer kontinuierlichen Phase und weist zu diesem Zweck einen Zuführkanal und einen Abführkanal für das Gas-Flüssigkeits-Gemisch auf. Zwischen den beiden Kanälen ist eine Membran in Form von mehreren Kapillarkanälen angeordnet, die den Zuführkanal mit dem Abführkanal verbinden. Die Trennung der beiden Phasen geschieht über eine Steuerung der Druckdifferenz zwischen dem ersten und dem zweiten Kanal unter Berücksichtigung der Kapillarkräfte in den Kapillarkanälen, wobei das Benetzungsverhalten dafür sorgt, dass das Gas aufgrund der Oberflächenspannung entweder vor oder in den Kapillarkanälen zurückgehalten und gesammelt wird, bis alle Kapillarkanäle durch die sich vergrößernde Gasblase versperrt sind. Hierauf folgt ein Druckanstieg, mit dem die Gasblase schließlich unter Überwindung der Oberflächenspannung durch die Kapillarkanäle entleert wird. Diese Vorrichtung kann einerseits zur Bestimmung der Position einer Gasansammlung, zur Bestimmung der Position eines Flüssigkeitstropfens oder zum Trennen des Gas-Flüssigkeits-Gemischs verwendet werden. Je nach Anwendung kann bei diesem oder ähnlichen Systemen nachteilig sein, dass die Membranen aufgrund des Benetzungsverhaltens den Transport der Flüssigkeit beim Eintritt in oder beim Austritt aus der Membran so sehr behindern, dass bei solchen Trocken-Nass-Trocken-Wechseln hohe Drücke bzw. Druckdifferenzen erforderlich sind. In manchen Anwendungen können die erforderlichen Druckdifferenzen in einem mikrofluidischen System nicht bereitgestellt werden oder die Membranen können diesen mechanisch nicht standhalten oder sie führen beim Durchbrechen der Flüssigkeit durch die Membran zu einem unkontrollierten Flüssigkeitstransport. Zudem kann es passieren, dass die Kapillarkanäle beim Durchbrechen nicht zwangsläufig vollständig geleert werden, sodass unerwünschte Flüssigkeitsreste an und in der Membran zurückbleiben.

– 4 –

Aufgabe der Erfindung ist es, in einem fluidischen System der eingangs genannten Art Mittel zur Verfügung zu stellen, die die Funktion der Membran bereitstellen und zugleich eine sichere Fluidkontrolle gewährleisten.

- 5 Die Aufgabe wird durch ein fluidisches System mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1, eine Verwendung mit den Merkmalen der Patentansprüche 27 und 28 sowie ein Verfahren mit den Merkmalen des Patentanspruchs 29 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung ist Gegenstand der Unteransprüche.
- 10 Das fluidische System der eingangs genannten Art ist wahlweise oder in Kombination gekennzeichnet durch Elektroden zum Anlegen eines elektrischen Feldes im Bereich der Membran, durch eine auf die Membran wirkende elektromagnetische Strahlungsquelle und durch Mittel zur Erwärmung oder Abkühlung der Membran. Die Membran weist in einem ersten Zustand Z_1 mit einem ersten elektrischen Feld
- 15 E_1 und einer ersten elektromagnetischen Einstrahlung S_1 und einer ersten Temperatur T_1 eine von dem ersten Medium nicht oder weniger benetzende und von dem zweiten Medium stärker benetzende Porenoberfläche auf, so dass sich zwischen der Porenoberfläche und der Grenzfläche im ersten Medium ein erster Kontaktwinkel $\Theta_1 > 90^\circ$ ausbildet. Das erste Medium und das zweite Medium und die
- 20 Porenoberfläche weisen jeweils eine spezifische Oberflächenenergie, die auch als freie Energie der Oberfläche bezeichnet wird und die bei flüssigen Medien mit deren Oberflächenspannung gleichgesetzt werden kann, auf, von denen mindestens eine Oberflächenenergie in Abhängigkeit von dem elektrischen Feld oder mittels elektromagnetischer Einstrahlung oder Temperaturänderung derart reversibel veränderbar ist, dass sich in einem zweiten Zustand Z_2 mit einem zweiten elektrischen Feld $E_2 \neq E_1$ und/oder einer zweiten elektromagnetischen Einstrahlung $S_2 \neq S_1$ und/oder einer zweiten Temperatur $T_2 \neq T_1$, zwischen der Porenoberfläche und der Grenzfläche ein zweiter Kontaktwinkel $\Theta_2 < \Theta_1$ einstellt.
- 25

Dieses System umfasst beispielsweise ein erstes Medium, beispielsweise Wasser, das eine stärkere Polarität als das zweite Medium, beispielsweise Öl oder Luft, aufweist. Zwischen den Medien und der Porenoberfläche stellen sich im ersten Zustand erfindungsgemäß Wechselwirkungen ein, aufgrund derer das erste Medium die Porenoberfläche weniger benetzt als das zweite Medium. Im zweiten Zustand stellen sich hingegen Wechselwirkungen ein, aufgrund derer das erste Medium die Porenoberfläche zumindest stärker benetzt als zuvor und idealer Weise sogar stärker benetzt als das zweite Medium. Das System beschreibt inso-

5 um die Porenoberfläche weniger benetzt als das zweite Medium. Im zweiten Zustand stellen sich hingegen Wechselwirkungen ein, aufgrund derer das erste Medium die Porenoberfläche zumindest stärker benetzt als zuvor und idealer Weise sogar stärker benetzt als das zweite Medium. Das System beschreibt inso-

10 weit aber auch den umgekehrten Fall, in dem das erste Medium, beispielsweise Öl oder Luft, weniger polar ist als das zweite Medium, beispielsweise Wasser, wobei sich zwischen den Medien und der Porenoberfläche aufgrund einer nun anderen Oberflächenenergie der Porenoberfläche im ersten Zustand wiederum Wechselwirkungen einstellen, aufgrund derer das unpolarere erste Medium die Porenoberfläche weniger benetzt als das zweite Medium. Die andere Oberflächenenergie der Porenoberfläche kann durch Verwendung eines anderen Ausgangsmaterials für die Porenoberfläche und/oder durch Wahl eines anderen Zustands Z_1 erzielt werden.

15 werden.

Der Kontaktwinkel zwischen der Grenzfläche beider Medien und der Oberfläche drückt das Verhältnis der Benetzbarkeit der Porenoberfläche mit dem ersten Medium zu der Benetzbarkeit der Porenoberfläche mit dem zweiten Medium aus. Ist die Porenoberfläche von dem ersten Medium, beispielsweise Wasser, weniger benetzbar als von dem zweiten Medium, beispielsweise Luft – ist die Oberfläche also hydrophob – so kann dieser Umstand durch einen Kontaktwinkel $> 90^\circ$ ausgedrückt werden. Dasselbe gilt bei umgekehrter Zuordnung: Ist das erste, weniger benetzende Medium Luft und das zweite stärker benetzende Medium Wasser – ist die Oberfläche also hydrophil – so wird auch dieser Umstand durch einen Kontaktwinkel $\Theta_1 > 90^\circ$ ausgedrückt. Dementsprechend ist der Kontaktwinkel zwischen der Porenoberfläche und der Grenzfläche Θ_1 wie auch Θ_2 nach vorstehen-

20

25

– 6 –

der Definition jeweils „im ersten Medium“ zwischen der Porenoberfläche und der Grenzfläche aufgetragen.

5 Das erste Medium wird also ohne äußere Druckeinwirkung nicht in die Poren der Membran eindringen. Um das Medium 1 in die Poren der Membran zu zwingen ist deshalb ein Überdruck oder eine Druckdifferenz erforderlich, deren Maß von den Oberflächenspannungen der Medien und der Porengeometrie abhängt.

10 Die Erfindung macht sich die Erkenntnis zu Nutze, dass die erforderliche Druckdifferenz aber auch durch ein Manipulieren des Kontraktwinkels beeinflusst werden kann.

15 Das Verändern der wenigstens einer Oberflächenenergie jener Porenoberfläche und/oder der Medien – es kommt dabei grundsätzlich auf eine relative Änderung der Oberflächenenergien zueinander an – und damit das Verändern der Benetzbarkeit ist beispielsweise in Form des „Electro-Wetting“ („Elektrobenetzen“) bekannt. Diesbezüglich wird beispielhaft auf die Schrift WO 2009/094626A1 verwiesen, die sich damit befasst, einen Tropfen in ein poröses Substrat mit einer anfangs nicht-benetzenden wabenförmigen Porenstruktur und einer darunterliegenden faserartigen benetzenden Dochtstruktur einsickern zu lassen. Die wabenförmige Porenstruktur ist aus einem metallischen Kerngerüst aufgebaut, welches mit einem dielektrischen Material und darüber mit einer nicht-benetzenden Beschichtung versehen ist. Die metallische Grundstruktur ist elektrisch kontaktiert. Eine elektrische Gegenelektrode wird mit dem Tropfen verbunden. Wird zwischen 20 der metallischen Grundstruktur und dem Tropfen eine Spannung angelegt, so schaltet der Zustand des Systems um und der Tropfen benetzt die Oberfläche der Wabenstruktur, dringt in diese ein und gelangt bis in die darunterliegende benetzende Dochtstruktur.

– 7 –

Auch die Schriften WO 96/12540 A1 und WO 96/12541 A1 erwähnen das Elektro-Wetting in einer anderen Anwendung. Es wird ein Verfahren zum Diffusionsaustausch zweier entlang einer Membran parallel geführter und dort in Berührung stehender Fluidströme beschrieben, bei dem durch eine Veränderung der Benetzung der Membranoberfläche die Effizienz des Austauschprozesses verbessert werden soll.

Das vorstehend beschriebene Phänomen des Elektrobenetzens ist nur eine von drei Möglichkeiten, die Oberflächenenergie dahingehend zu verändern, dass sich das Benetzungsverhalten der beiden Medien ändert. Alternativ wird eine auf die Membran wirkende elektromagnetische Strahlungsquelle vorgeschlagen, deren elektromagnetische eingestrahlte Energie beispielsweise eine Veränderung der Oberflächenenergie des Festkörpers hervorrufen kann, indem dessen molekulare Bindungsstruktur verändert wird. Der Vorteil dieser Ausführungsform gegenüber dem Elektro-Wetting ist, dass keine Kontaktierung notwendig ist. Das Umschalten kann berührungslos erfolgen.

Eine dritte Alternative sieht das Umschalten des Kontaktwinkels mittels Temperaturänderung vor. Der Effekt ist auch als „Thermokapillarität“ bekannt. Auch hierbei wird der Energiegehalt und infolgedessen die Oberflächenenergie der beteiligten Medien insbesondere unterschiedlich stark verändert. Auch diese Ausführungsform kann berührungslos ausgestaltet werden, indem beispielsweise ein thermischer Strahler eingesetzt und die Membranoberfläche absorbierend ausgeführt wird.

Die drei Alternativen werden materialabhängig nach Effizienz auszuwählen sein und können bei Bedarf auch kombiniert werden.

Die vorliegende Erfindung macht sich ungeachtet der eingesetzten Alternative deren gemeinsame Wirkung zu Nutze, nämlich die reversible Manipulation des

Kontaktwinkels. „Reversibel“ im Sinne der Erfindung soll auch teilweise reversible Vorgänge einschließen, bei denen eine Hysterese auftritt, sodass nach dem Zurückkehren in den Ausgangszustand nicht mehr das identische Benetzungsverhältnis und somit derselbe Kontaktwinkel vorliegen muss, zumindest aber eine
5 wesentliche Veränderung des Benetzungsverhaltens in umgekehrter Richtung eintritt.

Dementsprechend sieht das erfindungsgemäße Verfahren zum Betreiben eines fluidischen Systems mit einem ersten Volumen, einem zweiten Volumen und einer
10 die beiden Volumina geometrisch trennenden Membran, die eine offenporige Mikrostruktur mit einer Porenoberfläche bereitstellt, folgende Schritte vor:

- Einstellen eines ersten Zustands Z_1 mit einem ersten elektrischen Feld E_1 im Bereich der Membran und einer auf die Membran wirkenden ersten elektromagnetischen Einstrahlung S_1 und einer ersten Temperatur T_1 der
15 Membran, in dem die Porenoberfläche, ein erstes Medium und ein zweites Medium Oberflächenenergien aufweisen und in dem die Membran eine von dem ersten Medium nicht oder weniger benetzende und von dem zweiten Medium stärker benetzende Porenoberfläche aufweist,
20
- Fördern des ersten Mediums und des zweiten Mediums, zwischen denen eine Grenzfläche ausgebildet ist, von dem ersten Volumen durch die Membran in das zweite Volumen bis die Grenzfläche die Membran berührt, wobei sich zwischen der Porenoberfläche und der Grenzfläche im ersten
25 Medium ein erster Kontaktwinkel $\Theta_1 > 90^\circ$ einstellt und die Förderung stoppt, während das erste Medium im Wesentlichen noch in dem ersten Volumen und das zweite Medium im Wesentlichen schon im zweiten Volumen verweilen,

– 9 –

- Einstellen eines zweiten Zustands Z_2 mit einem zweiten elektrischen Feld $E_2 \neq E_1$ im Bereich der Membran und/oder einer zweiten auf die Membran wirkenden elektromagnetischen Einstrahlung $S_2 \neq S_1$ und/oder einer zweiten Temperatur $T_2 \neq T_1$ der Membran, in dem sich mindestens eine Oberflächenenergie derart reversibel verändert, dass sich ein zweiter Kontaktwinkel $\Theta_2 < \Theta_1$ zwischen der Porenoberfläche und der Grenzfläche einstellt,
- Weiterfördern des ersten und des zweiten Mediums, bis auch das erste Medium durch die Membran im Wesentlichen in das zweite Volumen überführt ist.

Die Zustandsänderung ist insbesondere in Bezug auf die Temperatur vorzugsweise insoweit einzuschränken, als keines der Medien (Fluide) einen Phasenübergang durchlaufen, insbesondere nicht fest werden darf.

Eine vorteilhafte Weiterbildung der Erfindung sieht vor, dass der zweite Kontaktwinkel $\Theta_2 < 90^\circ$ beträgt.

In diesem Fall bewirkt das Umschalten von dem Systemzustand Z_1 in den Zustand Z_2 , dass das zunächst weniger benetzende erste Medium zu einem stärker benetzenden ersten Medium wird. Dies ist freilich nicht notwendig, um das erste Medium unter geringerem Druckaufwand durch die Poren der Membran zu befördern als im Zustand Z_1 . Dennoch stellt diese Ausgestaltung einen vorteilhaften Spezialfall dar, der eine sicherere Prozessführung erlaubt.

Der erste Zustand ist bevorzugt durch ein erstes elektrisches Feld $E_1 = 0$, eine erste elektromagnetische Einstrahlung S_1 in Form von Tages- oder Raumbelichtung oder Dunkelheit und eine erste Temperatur T_1 im Bereich der Zimmertemperatur definiert.

Unter diesen Bedingungen, auch „Umgebungsbedingungen“ genannt, erfolgt das Einstellen des ersten Zustands Z_1 vorzugsweise nicht aktiv, sondern wird durch die Umgebungsbedingungen selbst definiert. Ein derart definierter erster Zustand erlaubt das Betreiben beispielsweise eines mikrofluidischen Chips mit dem erfindungsgemäßen mikrofluidischen System auf einfache Weise. Ohne zunächst aktiv einzugreifen, werden das erste Medium und das zweite Medium von dem ersten Volumen durch die Membran in das zweite Volumen gefördert bis die Grenzfläche die Membran berührt und die Förderung stoppt. Durch Einschalten eines elektrischen Feldes und/oder Einstrahlung zusätzlicher elektromagnetischer Energie und/oder Erhöhung oder Absenkung der Temperatur der Porenoberfläche wird dann der der Zustand Z_2 hergestellt, in dem die Membran dann für das erste Medium durchlässig wird.

Eine konkretes Ausführungsbeispiel des Systems bzw. Verfahrens sieht eine Porenoberfläche vor, die in dem ersten Zustand hydrophob ist, wobei das erste Medium eine wasserbasierende Flüssigkeit ist. Eine vorteilhafte Weiterbildung desselben sieht vor, dass das zweite Medium ein Gas, insbesondere Luft, ist. Alternativ kann das zweite Medium auch eine ölbasierte Flüssigkeit sein.

Alternativ zu diesem Ausführungsbeispiel ist die Porenoberfläche in dem ersten Zustand lipophob und das erste Medium eine ölbasierte Flüssigkeit. Das zweite Medium ist in dieser Ausgestaltung vorzugsweise entweder ein Gas, insbesondere Luft, oder alternativ eine wasserbasierte Flüssigkeit.

Als weitere Alternative ist die Porenoberfläche in dem ersten Zustand hydrophil und das zweite Medium eine wasserbasierte Flüssigkeit. Das erste Medium ist dann bevorzugt eine ölbasierte Flüssigkeit oder ein Gas, insbesondere Luft.

Noch eine weitere Alternative sieht vor, dass die Porenoberfläche in dem ersten Zustand lipophil und das zweite Medium eine ölbasiert Flüssigkeit ist. Das erste

– 11 –

Medium ist dann bevorzugt eine wasserbasierte Flüssigkeit oder ein Gas, insbesondere Luft.

5 Vorzugsweise weist das fluidische System eine Pumpe zur Förderung der Medien von dem ersten Volumen durch die Membran in das zweite Volumen auf.

Die Förderung kann volumengesteuert oder druckgesteuert erfolgen. Im ersten Fall erfolgt die Förderung bis zu einem maximalen Förderdruck $P_{\max}$ mit einem konstanten Volumenstrom V_c . Die Pumpe ist in dieser Ausgestaltung der Erfindung entsprechend eingerichtet.

15 Der erste Kontaktwinkel Θ_1 korrespondiert physikalisch mit einem Durchbruchdruck P_{dhi} , bei dem die Grenzfläche durch die Membran durchtritt. Als „Durchbruchdruck“ wird hierin grundsätzlich die Druckdifferenz vor und hinter der Grenzfläche, also die Differenz zwischen den Drücken in dem ersten und dem zweiten Medium bezeichnet. Der Durchbruchdruck steigt bedingt durch die Grenzflächen-
spannung der Medien mit wachsendem Kontaktwinkel und ist ansonsten im Wesentlichen Abhängigkeit von der Geometrie der Membranporen. Vorzugsweise sind der Durchbruchdruck P_{dhi} und der maximale Förderdruck $P_{\max}$ so gewählt,
20 dass der Durchbruchdruck P_{dhi} größer ist, als der maximale Förderdruck $P_{\max}$.

Bei dieser Konfiguration ist sichergestellt, dass die Förderung der Medien von dem ersten Volumen durch die Membran in das zweite Volumen stoppt, sobald die Grenzfläche zwischen den beiden Medien die Membran berührt.

25

In einer vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung korrespondiert der zweite Kontaktwinkel Θ_2 mit einem Durchbruchdruck P_{dlo} , bei dem die Grenzfläche durch die Membran durchtritt und der kleiner ist, als der maximale Förderdruck $P_{\max}$.

Der Zustand Z_2 und damit der Kontaktwinkel Θ_2 sowie der maximale Förderdruck $P_{\max}$ sind also so gewählt, dass durch Umschalten von dem Zustand Z_1 in den Zustand Z_2 unter Beibehaltung der Förderbedingung, also hier des konstanten Volumenstrom V_C bis zum maximalen Förderdruck $P_{\max}$, die zwischen den Medien ausgebildete Grenzfläche durch die Membran transportiert und das erste und zweite Medium durch die Membran in das zweite Volumen weitergefördert werden.

Weiterhin bevorzugt weist das fluidische System einen Drucksensor auf, der angeordnet und eingerichtet ist, eine Druckänderung in dem ersten oder zweiten Volumen zu detektieren und ein Druckänderungssignal auszugeben.

Vorteilhaft ist ferner eine Steuerung vorzusehen, die eingerichtet ist, in Antwort auf das Druckänderungssignal bei Überschreiten eines Schwellendrucks in dem ersten Volumen oder Unterschreiten eines Schwellendrucks in dem zweiten Volumen ein Schaltsignal an eine Spannungsversorgung für die Elektroden oder an die elektromagnetische Strahlungsquelle oder an die Mittel zur Erwärmung der Membran auszugeben.

Verfahrensseitig wird hiermit bezweckt, dass das erste Medium und das zweite Medium von dem ersten Volumen durch die Membran in das zweite Volumen gefördert werden, bis die Grenzfläche die Membran berührt, wobei die Förderung stoppt, während das erste Medium im Wesentlichen noch in dem Volumen und das zweite Medium im Wesentlichen schon im zweiten Volumen verweilen, weil in diesem Zustand der maximale Förderdruck $P_{\max}$ nicht ausreicht, die Grenzfläche durch die Membran zu treiben. Infolgedessen steigt der Druck im ersten Volumen bis auf dem maximalen Förderdruck rasch an. Entsprechend fällt er im zweiten Volumen. Diese Druckänderung wird detektiert und ein entsprechendes Signal an die Steuerung ausgegeben, die wiederum das Anlegen eines elektrischen Feldes im Bereich der Membran und/oder das Einstrahlen elektromagnetischer Strahlung

auf die Membran und/oder das Erwärmen der Membran in Antwort hierauf veranlasst, also den zweiten Zustands Z_2 einstellt, vorausgesetzt, ein vorher bestimmter und eingestellter Schwellendruck wird überschritten. Die Zustandsänderung kann je nach Verwendungszweck auch zeitverzögert in Gang gesetzt werden. Die
5 Zeitverzögerung kann wiederum durch die Steuerung automatisch veranlasst werden. Der Durchbruchsdruck fällt daraufhin unter den maximalen Förderdruck $P_{\max}$ auf den Wert P_{dlo} , sodass die ersten und zweiten Medien weitergefördert werden können, bis auch das erste Medium durch die Membran in das zweite Volumen überführt ist.

10

Auf diese Weise kann mit einfachen Mitteln eine automatische Änderung des Kontaktwinkels zwischen der Porenoberfläche und der Grenzfläche eingeleitet werden.

15

Im Fall der druckgesteuerten Förderung erfolgt das Fördern mit einem konstanten Förderdruck P_C . Die Pumpe ist in dieser Ausgestaltung der Erfindung entsprechend eingerichtet.

20

Vorteilhaft ist es in diesem Fall, wenn der erste Kontaktwinkel Θ_1 mit einem Durchbruchsdruck P_{dhi} korrespondiert, bei dem die Grenzfläche durch die Membran durchtritt und der größer ist, als der konstante Förderdruck P_C . Weiterhin bevorzugt ist es, wenn der zweite Kontaktwinkel Θ_2 mit einem Durchbruchsdruck P_{dlo} korrespondiert, bei dem die Grenzfläche durch die Membran durchtritt und der kleiner ist als der konstante Förderdruck P_C .

25

Zum Zwecke einer automatischen Drucksteuerung ist in dieser Ausführungsform des fluidischen Systems ein Volumenstromsensor vorgesehen, der angeordnet und eingerichtet ist, eine Volumenstromänderung in dem zweiten Volumen zu detektieren und ein Volumenstromänderungssignal auszugeben.

30

Weiterhin bevorzugt ist in dem fluidischen System eine Steuerung vorgesehen, die eingerichtet ist, in Antwort auf das Volumen des Stromänderungssignals bei Unterschreiten eines Schwellenvolumenstromes ein Schaltsignal an eine Spannungsversorgung für die Elektroden oder an die elektromagnetische Strahlungsquelle oder an die Mittel zur Erwärmung der Membran auszugeben.

Verfahrensseitig werden somit das erste Medium und das zweite Medium von dem ersten Volumen durch die Membran in das zweite Volumen gefördert, bis die Grenzfläche die Membran berührt, wobei die Förderung stoppt, während das erste Medium im Wesentlichen noch in dem Volumen und das zweite Medium im Wesentlichen schon im zweiten Volumen verweilen, weil in diesem Zustand der konstante Förderdruck P_C nicht ausreicht, die Grenzfläche durch die Membran zu treiben. Infolgedessen reißt der Volumenstrom sehr rasch ab und es wird eine Volumenstromänderung detektiert und ein entsprechendes Signal an die Steuerung ausgegeben, die wiederum das Anlegen eines elektrischen Feldes im Bereich der Membran und/oder das Einstrahlen elektromagnetischer Strahlung auf die Membran und/oder das Erwärmen der Membran in Antwort hierauf veranlasst, also den zweiten Zustands Z_2 einstellt, vorausgesetzt, ein vorher bestimmter und eingestellter Schwellenvolumenstrom wird unterschritten. Die Zustandsänderung kann je nach Verwendungszweck auch zeitverzögert in Gang gesetzt werden. Die Zeitverzögerung kann wiederum durch die Steuerung automatisch veranlasst werden. Der Durchbruchsdruck fällt daraufhin unter den konstanten Förderdruck P_C auf den Wert P_{dlo} , sodass die ersten und zweiten Medien weitergefördert werden können, bis auch das erste Medium durch die Membran in das zweite Volumen überführt ist.

Eine vorteilhafte Weiterbildung des Verfahrens sieht vor, dass das erste Medium ein begrenztes Volumen aufweist und in Bezug auf die Förderrichtung an dessen Ende eine zweite Grenzfläche zu einem dritten Medium ausgebildet ist, wobei das Weiterfördern des ersten Mediums durch die Membran in das zweite Volumen

stoppt, wenn die zweite Grenzfläche die Membran berührt und zwischen der zweiten Grenzfläche und der Porenoberfläche ein dritter Kontaktwinkel Θ_3 steht.

Das Verfahren weist dann vorteilhafterweise die weiteren Schritte auf:

5

- Einstellen eines dritten Zustands Z_3 mit einem dritten elektrischen Feld $E_3 \neq E_2$ im Bereich der Membran und/oder einer dritten auf die Membran wirkenden elektromagnetischen Einstrahlung $S_3 \neq S_2$ und/oder einer dritten Temperatur $T_3 \neq T_2$ der Membran, in dem sich durch Veränderung mindestens eine Oberflächenenergie ein vierter Kontaktwinkel $\Theta_4 > \Theta_3$ zwischen

10

der Porenoberfläche und der Grenzfläche einstellt,

- Weiterfördern des ersten Mediums in dem zweiten Volumen.

15

Auf die genannte Weise wird ein Ablösen der zweiten Grenzfläche zwischen dem ersten und dem dritten Medium auf dieselbe Weise erzielt, auf die bereits der Durchtritt der ersten Grenzfläche durch die Membran bewirkt wurde.

Das zweite und das dritte Medium sind vorzugsweise gleich, sodass auch der dritte Kontaktwinkel Θ_3 gleich dem zweiten Kontaktwinkel Θ_2 ist, jeweils bezogen auf das erste Medium.

20

Besonders bevorzugt sind der erste Zustand Z_1 und der dritten Zustand Z_3 gleich ($Z_1 = Z_3$). Lagen im ersten Zustand Z_1 vereinfachend Umgebungsbedingungen vor, dann wird der Zustand Z_3 eingestellt, indem das im Zustand Z_2 zugeschaltete elektrische Feld und/oder die im Zustand Z_2 zugeschaltete elektromagnetische Strahlung und/oder die im Zustand Z_2 zugeschaltete Wärmezufuhr, einfach wieder abgeschaltet werden.

25

Besonders sind das fluidische System und das Verfahren so ausgebildet, dass beim Einstellen des ersten Zustands Z_1 der erste Kontaktwinkel $\Theta_1 > 90^\circ$ und beim Einstellen des zweiten Zustands Z_2 der zweite Kontaktwinkel $\Theta_2 < 90^\circ$ beträgt. Weiterhin bevorzugt beträgt beim Einstellen des zweiten Zustand Z_2 der dritte Kontaktwinkel $\Theta_3 < 90^\circ$ und beim Einstellen des dritten Zustands Z_3 der vierte Kontaktwinkel $\Theta_4 > 90^\circ$.

Unter der Annahme, dass das zweite Medium und das dritte Medium gleich sind und dass der erste Zustand und der dritte Zustand gleich sind, ergibt sich dies zwangsläufig aus der Forderung, dass der erste Kontaktwinkel $\Theta_1 > 90^\circ$ und der zweite Kontaktwinkel $\Theta_2 < 90^\circ$ beträgt, weil dann nämlich der dritte Kontaktwinkel Θ_3 identisch mit dem zweiten Kontaktwinkel Θ_2 und der vierte Kontaktwinkel Θ_4 gleich dem ersten Kontaktwinkel Θ_1 ist.

In dem fluidischen System wird eine erste der Elektroden bevorzugt durch ein leitendes Substrat der Membran oder einer leitenden Beschichtung der Membran gebildet.

Beispielsweise kann dies ein Metallgitter oder Metallgewebe oder Metallschaum oder eine solche Substratstruktur aus einem leitfähigen Polymer sein. Alternativ kann die Substratstruktur auch aus einem nicht leitenden Material gefertigt sein, wie beispielsweise einer Keramik oder einem nicht leitenden Polymer, das mit einer leitenden Schicht überzogen oder beschichtet ist.

Auf der ersten Elektrode, also dem leitenden Substrat oder der leitenden Beschichtung der Membran, wird bevorzugt eine Schicht eines Dielektrikums aufgebracht.

Das Dielektrikum bildet besonders bevorzugt unmittelbar die Porenoberfläche. Alternativ kann auf dem Dielektrikum das die Oberfläche bildende Material als weitere Schicht aufgetragen werden.

- 5 Als Beschichtungsverfahren kommen zum Beispiel plasmaunterstützte Abscheidung aus der Gasphase, Schichtabscheidung aus der Flüssigphase, Bedampfen oder Besputtern in Frage. Die die Porenoberfläche bildende Beschichtung weist vorzugsweise Politetrafluorethylen (PTFE), Perflourisobuthen (PFIB), Parylene auf. Eine geeignete Beschichtung wird unter dem Markennamen „lipocer“ von der
10 Firma Plasma Electronic GmbH angeboten.

Besonders bevorzugt ist in dem ersten und dem zweiten Volumen jeweils unmittelbar benachbart zu der Membran eine zweite Elektrode angeordnet.

- 15 Elektrodenanordnungen entlang einer Membran in fluidischen Systemen sind aus anderen Anwendungen grundsätzlich bekannt. So ist in der DE 10 2006 008 324 B3 beispielsweise eine Elektrodenanordnung zur Kontaktierung einer Flüssigkeit beidseits einer Membran zum Zweck des Filterns leitender Partikel beschrieben. Aus der DE 10 2005 015 562 A1 wird die Anordnung einer Messelektrode über
20 einer Filtermembran zur Bestimmung des Filterzustandes diskutiert.

- Es kommt vorliegend allerdings grundsätzlich nicht auf eine elektrisch leitende Verbindung zwischen der zweiten Elektrode und dem Medium an. Jedes elektrische Feld im Bereich des Kontaktes zwischen den Medien und der Porenoberfläche der Membran sorgt im Fall des Elektrobenetzens für eine Ladungsverschiebung und damit für eine Manipulation des Kontaktwinkels. Allerdings ist die direkte Kontaktierung der Medien sehr effizient, weil sich das Feld dadurch sehr lokal über
25 dem Dielektrikum und damit dem Ort der Oberflächengrenzen aufbaut. Die zweite Elektrode dient deshalb in dieser bevorzugten Ausgestaltung der unmittelbaren Kontaktierung der Medien. Die unmittelbare Nähe der beiden Elektroden bewirkt
30

am Ort der Oberflächengrenzen eine hohe Feldstärke bei geringer Spannung. Während im Zustand Z_1 vorzugsweise das erste elektrische Feld $E_1 = 0$ V/m beträgt, hat im Zustand Z_1 das zweite elektrische Feld E_2 vorzugsweise eine Feldstärke von 1 V/m bis 10 kV/m.

5

Steht beispielsweise vor der Membran ein Wassertropfen an, der durch die Membran hindurch transportiert werden soll, so muss die Positionierung der zweiten Elektrode so gewählt sein, dass der Tropfen während des Durchtretens durch die Membran ständigen Kontakt mit der zweiten Elektrode hat. Zu diesem Zweck ist
10 die zweite Elektrode in dem ersten und dem zweiten Volumen jeweils unmittelbar benachbart zu der Membran angeordnet. Anders gesagt umspannt die zweite Elektrode den Membranbereich der Gestalt, dass sie aus zwei (zusammenhängenden oder unzusammenhängenden) Teilen gebildet wird, deren Abstand nicht größer ist als die Länge des Tropfens in dem Abschnitt der Fluidleitung zwischen
15 den beiden Teilen, damit er während des Transportes durch die Membran zumindest zu einem Teil der zweiten Elektrode stets elektrischen Kontakt hat. Beispielsweise ist die zweite Elektrode in Form eines zusammenhängenden Metallrings an der Innenwand der Fluidleitung im Bereich der Membran ausgebildet und weist vor und hinter der Membran eine freie Oberfläche zum Kontakt mit den Medien auf.
20 Alternativ können zwei unzusammenhängende Kontakte vor und hinter der Membran vorgesehen sein, die elektrisch leitend verbunden oder auch an separate Spannungsversorgungen angeschlossen sind.

25

Die elektromagnetische Strahlungsquelle ist bevorzugt eingerichtet, Licht einer Wellenlänge zwischen $0,1 \mu\text{m}$ und $3 \mu\text{m}$ zu emittieren. Vorzugsweise weist die elektromagnetische Strahlungsquelle eine oder mehrere LED's oder Laser auf.

Die Mittel zur Erwärmung der Membran sind bevorzugt ein Substratwerkstoff der Membran oder eine Membranbeschichtung mit einer oder mehreren

Absorptionsbanden und eine thermische Strahlungsquelle, die eingerichtet ist, thermische Strahlung im Bereich der Absorptionsbanden zu emittieren.

Alternativ kann auch das Substrat des Festkörpers, in das die Fluidleitung eingearbeitet ist, beispielsweise das Substrat eines mikrofluidischen Chips, lokal um die Membran herum oder vollständig aus einem absorbierenden Werkstoff gebildet sein, sofern eine Erwärmung der Fluide in dem Substrat unkritisch ist.

Gemäß einer weiteren Alternative kann die Membran mittels Durchleiten von Strom direkt widerstandsbeheizt sein oder es kann im Bereich der Membran eine externe Heizquelle (z.B. indirekte Widerstandsheizung) und eine thermisch leitende Verbindung von dieser zur Membran vorgesehen sein.

Die Aufgabe wird schließlich durch die Verwendung eines fluidischen Systems der vorstehend beschriebenen Art als Filter in einem fluidischen, insbesondere mikrofluidischen System, beispielsweise zur Trennung von Flüssigkeitssäulen, Erzeugung und Vereinigung von Tröpfchen in der Tröpfchenfluidik oder dergleichen gelöst.

In einer anderen erfindungsgemäßen Verwendung kommt das fluidische System der vorstehend beschriebenen Art als Ventil in einem fluidischen, insbesondere einem mikrofluidischen System zum Einsatz.

Der Vorteil gegenüber herkömmlichen Ventilen ist, dass das fluidische System der vorstehend genannten Art ohne bewegliche Komponenten auskommt und deshalb weniger verschleißanfällig ist.

Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung werden nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen erläutert. In den Figuren zeigen:

Figuren 1A-B eine schematische Darstellung zur Erläuterung des „Elektro-Wetting“;

Figur 2 ein Diagramm der Abhängigkeit des Kontaktwinkels von einer Potenzialdifferenz;

Figuren 3A-C eine Modellierung einer Membranpore zur Beschreibung der Position der Grenzfläche in Abhängigkeit von dem Druck in den Medien;

Figur 4 ein Diagramm des Druckverlaufs beim Durchtritt der Grenzfläche durch eine Membranpore für verschiedene Kontaktwinkel;

Figur 5 eine schematische Darstellung des Verfahrens zum Betreiben des fluidischen Systems in einer Sequenz von 7 aufeinanderfolgenden Momentaufnahmen;

Figur 6A-B eine Druck- und Volumenstromverlaufskurve zu der Sequenz gemäß Figur 5;

Figur 7A-C das fluidische System in schematischer Darstellung;

Figur 8A-G ein Anwendungsbeispiel für das fluidische Systems als Ventil in einer Sequenz verschiedener Schaltzustände.

Anhand der Figuren 1 A und 1 B wird das Benetzungsverhalten zwischen einem ersten Medium M1, beispielsweise eines Flüssigkeitstropfens, und einem zweiten Medium M2, zum Beispiel eines den Flüssigkeitstropfen umgebenden Gases, und einer zu benetzenden Oberfläche 11 eines Körpers beschrieben. Zur Änderung des Benetzungsverhaltens wird von dem Phänomen des Elektrobenetzens Ge-

– 21 –

brauch gemacht. Die zu benetzende Oberfläche 11 des Körpers weist zu diesem Zweck ein elektrisch leitendes Substrat 12 auf, das eine erste Elektrode bildet, auf die eine Schicht eines Dielektrikums 14 aufgebracht ist. Eine zweite Elektrode 16 ist unmittelbar in das erste Medium M1 eingetaucht. Die Elektroden 12 und 16 sind mit einer Spannungsquelle 18 verbunden.

Figur 1A zeigt einen Zustand Z_1 , in dem die Oberfläche 10 von dem ersten Medium M1 weniger benetzt wird, sodass sich ein erster Kontaktwinkel $\Theta_1 > 90^\circ$ ausbildet. Zwischen den Elektroden 12 und 16 liegt keine Spannung an. In dem Zustand Z_1 beträgt das elektrische Feld deshalb $E_1 = 0$ V/m.

Die Figur 1B beschreibt einen Zustand Z_2 , in dem eine Spannung zwischen den beiden Elektroden 12 und 16 angelegt wird. Dies bewirkt eine Ladungsverschiebung innerhalb des die Oberfläche 11 bereitstellenden Dielektrikums 14, sodass sich beispielsweise die Oberflächenenergie des Dielektrikums 14 gegenüber dem Zustand Z_1 verändert. Die Oberfläche 11 benetzt in Folge dessen im Zustand Z_2 stärker mit dem Medium M1, oder anders gesagt, der Kontaktwinkel Θ_2 zwischen der Grenzfläche 10 und der Oberfläche 11 verkleinert sich gegenüber dem Kontaktwinkel Θ_1 im Ausgangszustand Z_1 . Im gezeigten Fall gilt sogar $\Theta_2 < 90^\circ$.

Der Kontaktwinkel Θ_1 und Θ_2 ist im Sinne dieser Schrift stets auf das erste Medium bezogen, er wird also immer zwischen der Oberfläche 11 und der Grenzfläche 10 innerhalb des Mediums M1 aufgetragen.

Wie bereits an anderer Stelle erwähnt, kommt es grundsätzlich nicht darauf an, dass die Medien unmittelbar kontaktiert werden, wie in Figur 1 illustriert. Jedes elektrische Feld im Bereich des Kontaktes zwischen den Medien und der Oberfläche der Membran sorgt im Fall des Elektrobenetzens für eine Ladungsverschiebung und damit für eine Manipulation des Kontaktwinkels. Allerdings ist die direkte Kontaktierung sehr effizient, weil sich das Feld sehr lokal über dem Dielektrikum

aufbaut, dessen Molekularstruktur für die Änderung des Kontaktwinkels verantwortlich ist.

In Figur 2 ist das Verhalten des Kontaktwinkels Θ , genauer die Differenz ($\cos \Theta_2 - \cos \Theta_1$) gegenüber der zwischen den Elektroden 12 und 16 anliegenden Spannung aufgetragen. In dem konkreten Beispiel wird ein Substrat mit einer elektrisch leitenden Beschichtung aus Chrom und Gold und einer darauf aufgetragenen dielektrischen Beschichtung aus Parylene C mit einer Dicke von $7,5 \pm 1 \mu\text{m}$ untersucht. Es zeigt sich, dass der Kontaktwinkel von $\Theta_1 = 89^\circ$ im Zustand Z_1 bis zu $\Theta_2 = 74^\circ$ im Zustand Z_2 variiert. Dabei erreicht er bei einer Spannung von ca. 100 V über das $7,5 \mu\text{m}$ dicke Dielektrikum eine Sättigung. Eine weitere Spannungserhöhung verkleinert den Kontaktwinkel nicht mehr wesentlich. Hieraus resultiert eine maximale Differenz ($\cos \Theta_2 - \cos \Theta_1$) von 0,26.

Anhand der Figuren 3A bis 3C wird die Veränderung der Position der Grenzfläche in Abhängigkeit der Druckverhältnisse ohne Manipulation des Kontaktwinkels erläutert. Als vereinfachende Annahme ist hier eine Pore mit einem minimalen Durchmesser d zwischen zwei im Schnitt kreisförmigen Elementen 20 eine Membran gezeigt. Die kreisförmigen Elemente repräsentieren beispielsweise Schnitte durch Drähte einer Membran in Form eines Drahtgewebes oder dergleichen. Die beiden Elemente definieren eine Membranebene 22.

Jeweils im Wesentlichen oberhalb der Membranebene 22 befindet sich ein Medium M_1 . Unterhalb der Ebene 22 befindet sich ein Medium M_2 . Zwischen den beiden Medien ist die Grenzfläche 24 ausgebildet. In dem Medium M_1 herrscht ein Druck P_1 . In dem Medium M_2 herrscht ein Druck P_2 . Im Zustand der Figur 3A gilt $P_1 < P_2$. Hierdurch bedingt wölbt sich die Grenzfläche 24 konkav in das Medium M_1 hinein.

Oberhalb der Mittelebene 22 befinden sich in einem Abstand a Kontaktpunkte 26 der Grenzfläche 24 mit der Oberfläche der Membranelemente 20. Äquivalent zu dem Abstand a ist ein Winkel α zwischen der Membranebene 22 und der Verbindungslinie zwischen dem Mittelpunkt des kreisförmigen Elements 20 und dem
5 Kontaktpunkt 26. Der Abstand a und der Winkel α haben bei dem Druckverhältnis $P_1 < P_2$ ein negatives Vorzeichen.

Der Kontaktwinkel Θ ergibt sich als Zwischenwinkel zwischen der Tangente an die Oberfläche des Membranelements 20 und der Tangente T an die Grenzfläche 24
10 in dem Kontaktpunkt 26 und wird wie vorstehend definiert innerhalb des Mediums M_1 aufgetragen.

In Figur 3B ist ein Zustand mit einem anderen Druckverhältnis gezeigt. Hier gilt $P_1 = P_2$, sodass die Grenzfläche 24' eben und parallel zu der Membranebene 22
15 verläuft. Die Grenzfläche 24 verläuft noch immer oberhalb der Membranebene 22 und hat deshalb weiterhin einen negativen Abstand a' , der allerdings dem Betrag nach kleiner ist als a . Dies liegt daran, dass die Benetzbarkeit der Medien M_1 und M_2 unterschiedlichen ist, oder anders gesagt, dass der Kontaktwinkel Θ größer als 90° ist. Der Kontaktwinkel Θ hat sich indes nicht zwischen dem Zustand gemäß
20 Figur 3A und dem Zustand gemäß Figur 3B geändert.

In Figur 3C ist schließlich ein Zustand dargestellt, in dem der Druck P_1'' im ersten Medium M_1 größer ist, als der Druck P_2'' im Medium M_2 . Hieraus resultiert eine Grenzfläche 24'' mit konvexer Krümmung aus dem Medium M_1 heraus. Der Kon-
25 taktpunkt 26'' der Grenzfläche 24'' mit der Oberfläche der Membranelemente 20 weist nun erstmals einen positiven Abstand a'' zur Membranebene 22 auf, was einem Winkel α'' mit ebenfalls positivem Vorzeichen entspricht. Weiterhin wird von einem unveränderten Kontaktwinkel Θ ausgegangen.

– 24 –

Der Druckverlauf, genauer der Verlauf der Druckdifferenz $P_1 - P_2 = \Delta P$ kann in diesem Model als Funktion des Winkels Alpha wie folgt beschrieben werden:

$$\Delta p(\alpha) = - \frac{2\gamma \cos(\Theta - \alpha)}{0,5d r(1 - \cos \alpha)}$$

5 Hierin stehen ΔP für die Druckdifferenz $P_1 - P_2$, α für den Winkel zur Parametrisierung der Position der Grenzfläche relativ zur Membranebene, γ für die Oberflächen- oder Grenzflächenspannung, Θ für den Kontaktwinkel, d für den minimalen Porendurchmesser und r für den Krümmungsradius der simulierten Membranelemente.

10

In Figur 4 ist jene Druckdifferenz ΔP gegenüber dem Parameter a aufgetragen und zwar für verschiedene Kontaktwinkel Θ zwischen 180° und 50° . Es zeigt sich, dass bei einem Kontaktwinkel $\Theta = 180^\circ$, was einer vollständigen Unbenetzbarkeit der Membranoberfläche mit dem Medium M1 entspräche, eine maximale Druckdifferenz einstellen würde, wenn die Kontaktpunkte 26 in der Membranebene 22 lägen. Mit zunehmender Benetzbarkeit und damit mit abnehmendem Kontaktwinkel Θ nimmt die maximale Druckdifferenz ab. Zugleich wandert das Maximum hin zu einem positiven Wert von a . Ferner ist zu beobachten, dass sich bei kleinem a sogar eine negative Druckdifferenz einstellt, d. h., dass die Grenzflächenspannung bzw. Oberflächenenergien dafür sorgt, dass das Medium M1 ein Stück weit in die Porenöffnung hineingezogen wird. Diese Erkenntnis wird zum Verständnis der nun folgenden Prozessbeschreibung beitragen.

15

20

25

Anhand der Figuren 5 und 6 werden Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen fluidischen Systems sowie des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Betreiben desselben erläutert. Figur 5 zeigt eine Sequenz von 7 aufeinanderfolgenden Momentaufnahmen des fluidischen Systems in schematisch stark vereinfachter Form. In allen Momentaufnahmen ist derselbe Ausschnitt gezeigt. Dieses weist im

Wesentlichen eine von einer Oberfläche 30 eines Substrats begrenzte Fluidleitung und eine die Fluidleitung in ein erstes Volumen V1 und ein zweites Volumen V2 geometrisch trennende Membran 32 auf. Die Membran 32 wird durch kreisförmige Membranelemente repräsentiert, zwischen denen offene Poren 34 ausgebildet sind.

In der Fluidleitung befindet sich links der Membran 32 ein erstes Medium M1 und im Wesentlichen rechts der Membran 32 ein zweites Medium M2. Zwischen den beiden Medien M1 und M2 ist eine Grenzfläche 36 ausgebildet. Weiterhin befindet sich links des ersten Mediums M1 ein drittes Medium M3, zwischen dem und dem ersten Medium M1 eine zweite Grenzfläche 42 ausgebildet ist. Das erste Medium M1 weist also zwischen den Grenzflächen 36 und 42 ein begrenztes Volumen auf.

Das fluidische System weist weiterhin eine erste Elektrode in Form eines leitenden Substrats der Membran 32 oder eine leitende Beschichtung der Membran 32 (jeweils nicht dargestellt) und andererseits eine zweite unmittelbar benachbart zu der Membran 32 angeordnete Elektrode 38 auf. Die erste und die zweite Elektrode sind mit einer Spannungsquelle verbunden. Zwischen den beiden Elektroden ist in der Momentaufnahme „1“ keine Spannung angelegt, was einen ersten Zustand Z_1 im Wesentlichen beschreibt. Der Zustand Z_1 ist darüber hinaus naturgemäß durch eine erste elektromagnetische Einstrahlung S_1 und eine erste Temperatur T_1 definiert, Letztere Parameter spielen jedoch in dem vorliegenden Ausführungsbeispiel keine Rolle, weil sie nicht variiert werden, und sind deshalb hier nicht angegeben. In der Momentaufnahme „1“ liegt ferner ein Druck P_1 in dem ersten Medium M1 und ein Druck P_2 in dem zweiten Medium M2 an. Die Druckdifferenz $\Delta P = P_1 - P_2$ ist der Antrieb zur Bewegung der Medien M1 und M2 und der Grenzfläche 36 in Richtung des Pfeils 40 auf die Membran 32 zu.

In dem Diagramm der Figur 6A ist der Verlauf der Druckdifferenz ΔP über der Zeit aufgetragen. Die Momentaufnahme „1“ befindet sich in dem mit „1“ markierten

– 26 –

Abschnitt des Diagramms. Die Druckdifferenz ΔP ist hier konstant auf niedrigem Niveau, weil dem Vortrieb der Grenzfläche 36 in Richtung der Membran kein wesentlicher Widerstand entgegengesetzt wird.

- 5 Dies ändert sich bei Erreichen der Membran 32, was in der Momentaufnahme „2“ dargestellt ist. Noch immer befindet sich das System in dem Zustand Z_1 ohne Potenzialdifferenz zwischen den beiden Elektroden. Das System ist so konfiguriert, dass die Porenoberfläche der Membran 32 von dem ersten Medium nicht oder weniger benetzt und von dem zweiten Medium M 2 stärker benetzt wird.
- 10 Weiterhin ist das System aber bestrebt den Volumenstrom durch die Fluidleitung konstant zu halten, wodurch der Druck bereits kurz nach der Berührung der Grenzfläche 36 mit der Membran 32 stark ansteigt. Hieraus resultiert in der Momentaufnahme „2“ eine starke konvexe Wölbung der Grenzfläche 36 zwischen den Membranelementen, ähnlich der Figur 3C, an der auch der Kontaktwinkel
- 15 $\Theta_1 > 90^\circ$ abzulesen ist.

Korrespondierend mit der Momentaufnahme „2“ ist in dem Diagramm der Figur 6A in Abschnitt „2“ zu erkennen, dass die Druckdifferenz bis zu einem Maximum $P_{\max}$ ansteigt. Bei genauer Betrachtung der Druckkurve sieht man, dass in dem Mo-

20 ment, in dem die vordere Grenzfläche 36 die Membran erreicht, die initiale Benetzung der Membran zu einer durch die Grenzflächenspannung bedingten beschleunigten Bewegung des Mediums M 2 in Richtung der Membran und infolgedessen zu einem leichten Druckabfall führt, weil sich die Medien schneller bewegen, als es der Volumenförderung des Systems entspricht. Dies gilt zumindest für

25 alle (realen) Kontaktwinkel $< 180^\circ$. Erst anschließend steigt der Druck bis auf $P_{\max}$ an. Dann ist das erste Medium bis zu einer maximalen Tiefe in die Poren eingedrungen, bei der die Grenzflächen 36 benachbarter Poren aber nicht in Kontakt kommen, sodass die Grenzfläche der Flüssigkeit nicht durch die Membran dringen kann.

Der sogenannte maximale Förderdruck $P_{\max}$ ist systemisch bedingt und wird durch die Dimensionierung der Förderpumpe oder durch Mittel zur Druckbegrenzung eingestellt. Offenkundig bricht die Grenzfläche 36 bei dem maximalen Förderdruck noch nicht durch die Poren der Membran durch, weil die Grenzflächenspannung noch größeren Drücken standhält. Der sogenannte Durchbruchdruck liegt im Zustand Z_1 also wesentlich höher. Er korrespondiert mit dem ersten Kontaktwinkel Θ_1 näherungsweise wie es im Diagramm der Figur 4 illustriert ist. Nimmt man beispielsweise an, dass der Kontaktwinkel Θ_1 im Zustand Z_1 130° beträgt, so korrespondiert dies bei der dort angenommenen Porengeometrie und Grenzflächenspannung mit einem Durchbruchdruck von 2.000 mbar.

Wird das System in den Zustand Z_2 geändert, verändert dies wenigstens eine der Oberflächenenergie der Porenoberfläche der Membran 32, sodass sich ein zweiter Kontaktwinkel $\Theta_2 < \Theta_1$ zwischen der Porenoberfläche und der Grenzfläche 36 einstellt. In dem Ausführungsbeispiel gemäß Figur 5 unterscheidet sich der Zustand Z_2 von dem Zustand Z_1 durch ein elektrisches Feld $E_2 \neq E_1$ bzw. durch eine Potenzialdifferenz $V \neq 0$. Der Moment nach dem Umschalten ist in der Momentaufnahme „3“ dargestellt. Die Porenoberfläche wird nun stärker mit dem Medium M1 benetzt und die Wölbung der Grenzfläche 36 reduziert sich.

In dem Druck-Zeit-Diagramm gemäß Figur 6A ist das Verhalten in dem Abschnitt „3“ gezeigt. Die Druckdifferenz beginnt unmittelbar nach Einschalten des elektrischen Feldes – die Spannungskurve ist als Rechteck unterhalb der Druckkurve zu sehen – zu fallen. Der Grund hierfür ist, dass nach dem Einstellen des Zustands Z_2 sich ein veränderter Kontaktwinkel Θ_2 einstellt, der mit einem Durchbruchdruck P_{dlo} korrespondiert, bei dem die Grenzfläche durch die Membran durchtritt, wobei der Durchbruchdruck P_{dlo} nun kleiner ist als der maximale Förderdruck $P_{\max}$.

Unter diesen Bedingungen kann das erste Medium M1 tiefer in die Poren 34 eindringen bis sich die Flüssigkeitsoberflächen aus benachbarten Poren vereinen und

eine gemeinsame neue vordere Grenzfläche ausbilden. Die Membran ist vollständig von dem Medium M1 benetzt und umspült. Die Medien werden also weitergefordert, was in der Momentaufnahme „4“ dargestellt ist. Die Druckdifferenz ist bis auf einen während des Abschnittes „4“ konstanten Wert abgefallen, der geringfügig höher ist als die Druckdifferenz zum Zeitpunkt der Momentaufnahme „1“. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die Membran 32 dem Medium M1 in diesem Beispiel einen größeren Strömungswiderstand entgegensetzt, als dem Medium M2. Mithin hat in diesem Ausführungsbeispiel das M1 eine höhere Viskosität als das Medium M2.

Die Momentaufnahme „5“ zeigt das Verhalten des fluidischen Systems, welches sich weiterhin im Zustand Z_2 befindet, in dem Moment, in dem die zweite Grenzfläche 42 die Membran 32 berührt, woraufhin das Fördern der Medien M2, M1 und M3 durch die Poren der Membran erneut stoppt. Das Stoppen wird in dem korrespondierenden Abschnitt „5“ des Diagramms gemäß Figur 6 durch einen Druckanstieg bis hin zum maximalen Förderdruck $P_{\max}$ quittiert. Ursache hierfür ist, dass der zwischen der Grenzfläche 42 und der Porenoberfläche ausgebildete dritte Kontaktwinkel Θ_3 mit einem Durchbruchdruck P_{dhi} korrespondiert, der ebenfalls größer ist, als der maximale Förderdruck $P_{\max}$. Analog wie in Abschnitt „2“ gilt auch in Abschnitt „5“, dass bei Erreichen der Membran die initiale Benetzung mit dem Medium M3 für alle Kontaktwinkel $> 0^\circ$ zunächst zu einem Druckabfall führt, wie die Kurve des Diagramms gemäß Figur 6A erkennen lassen.

Der Durchbruchdruck P_{dhi} für die Grenzfläche 42 ist in der Regel nicht gleich dem Durchbruchdruck für die Grenzfläche 36. Gleich sind diese nur, wenn gilt: $\Theta_3 = 180 - \Theta_1$. Offenkundig benetzt das Medium M1 also die Porenoberfläche der Membran 32 stärker als das Medium M3, was mit einem dritten Kontaktwinkel $\Theta_3 < 90^\circ$ einhergeht. Aus der Perspektive des Mediums M3, stellt sich die Situation an der Grenzfläche zum Medium M1 ähnlich dar, wie in der Momentaufnahme „2“ aus Sicht des Mediums M1 an der Grenzfläche zum Medium M2.

Damit sich auch die hintere Grenzfläche 42 von der Membran 32 lösen kann, wird das fluidische System in einen Zustand Z_3 mit einem elektrischen Feld $E_3 \neq E_2$ umgeschaltet, was in der Momentaufnahme „6“ dargestellt ist. Dies führt erneut zu einem sofortigen Druckabfall, weil sich durch Veränderung wenigstens einer der Oberflächenenergien der Porenoberfläche der Membran 32 und/oder der Medien ein vierter Kontaktwinkel $\Theta_4 > \Theta_3$ zwischen der Porenoberfläche und der Grenzfläche 42 einstellt, der mit einem Durchbruchdruck P_{dlo} korrespondiert, welcher kleiner ist als der maximale Förderdruck P_{max} . Danach können die Medien M3, M1 und M2 unter Aufbringung eines geringeren Förderdrucks weiter in Richtung des Pfeils 40 transportiert werden, vgl. Momentaufnahme „7“, wobei der notwendige Förderdruck, von der Viskosität des Mediums M3 abhängig, anders ausfallen kann als in den Momenten „1“ oder „4“.

Die Figuren 5 und 6 zeigen, dass die Erfindung es ermöglicht, das Medium M1 in kontrollierter Form durch die Membran 32 zu transportieren, indem eine Umschaltung der Zustände, hier des elektrischen Feldes bzw. der zwischen den Elektroden 38 und der Membran 32 angelegten Spannung, vorgenommen wird. In einem typischen Anwendungsfall handelt es sich bei dem Medium M1 um einen Tropfen einer Flüssigkeit, während die Medien M2 und M3 Gase, vorzugsweise dasselbe Gas, sind. Dementsprechend ist es sinnvoll, die Zustände in Z_3 und Z_1 identisch zu wählen.

Vor dem Ein- oder Ausschalten der Spannung bei den Zustandswechseln von Z_1 nach Z_2 sowie von Z_2 nach Z_3 kann es aufgrund des sehr schnellen Druckabfalls sinnvoll sein, den Förderdruck zunächst zu reduzieren, um eine schlagartige Bildung der vereinten neuen Grenzflächen 36 bzw. 42 zu verhindern.

Es handelt sich bei dem anhand der Figur 6 geschilderten Ausführungsbeispiel um den Fall der Volumensteuerung, bei dem das System bestrebt ist, das transportier-

te Volumen konstant zu halten, wobei das Umschalten der Zustände nach Erreichen des maximalen Förderdrucks erfolgt. Alternativ hierzu kann das System aber auch eingerichtet sein, die Zustände zur Entlastung des Systems bereits vorher bei Erreichen eines Schwellendrucks automatisch durchzuführen. Der Förderdruck muss zu diesem Zweck mittels eines Drucksensors überwacht werden und bei Überschreiten des Schwellendrucks in dem ersten Volumen V_1 mittels einer Steuerung automatisch den zweiten Zustand einstellen. Der Schwellendruck kann frei gewählt werden, ist aber jedenfalls kleiner als der maximale Förderdruck.

In Figur 6B ist als Alternative ein druckgesteuertes fluidisches System dargestellt. Dieses System ist bestrebt, die Druckdifferenz konstant zu halten. Dies geschieht mittels Überwachung des Volumenstroms V . In dem Abschnitt „1“ gemäß Figur 5 ist der Volumenstrom konstant. Erreicht die vordere Grenzfläche 36 zwischen dem Medium M1 und Medium M2 die Porenoberfläche der Membran 32, so führt dies – abgesehen von einer initialen kurzzeitigen Erhöhung des Volumenstroms dann zu einem sehr raschen Abfall desselben, bis hin zum vollständigen Stopp des Transports im Abschnitt 2 des Diagramms, weil der Förderdruck nicht ausreicht die Grenzflächenspannung zu überwinden.

Der konstante Förderdruck P_c ist wiederum systemisch bedingt und wird durch die Dimensionierung der Förderpumpe oder durch Mittel zur Druckbegrenzung eingestellt.

Nach Umschalten des Zustandes von Z_1 nach Z_2 , was durch die gestrichelte Spannungskurve 44 dargestellt wird, steigt der Volumenstrom in dem Abschnitt „3“ wieder an, bis ein dem konstanten Förderdruck P_c entsprechender Volumenstrom erreicht ist, der aufgrund eines anderen Strömungswiderstandes des Mediums M1 geringer ausfällt als im Abschnitt „1“. Erreicht die hintere Grenzfläche 42 zwischen dem Medium M1 und dem anschließenden Medium M3 die Membran, bricht der Volumenstrom nach einem kurzzeitigen initialen Anstieg erneut zusammen, weil

der konstante Förderdruck P_c erneut kleiner ist als der mit dem Kontaktwinkel Θ_3 korrespondierende Durchbruchdruck P_{dhi} . Diese Konfiguration wird im Abschnitt „5“ solange beibehalten, bis die Spannung, respektive das elektrische Feld, wieder abgeschaltet und ein Zustand Z_3 herbeigeführt wird, in dem sich auch die hintere Grenzfläche 42 von der Membran 32 ablösen kann, vgl. Abschnitt „6“ in dem Diagramm der Figur 6B. Der Volumenstrom steigt nun wieder an. Sind die Medien M2 und M3 identisch oder haben sie zumindest die gleiche Viskosität, dann ist der Volumenstrom im Abschnitt „7“ gleich dem in Abschnitt „1“.

In den Figuren 7A bis 7C ist das fluidische System nochmals schematisch aber etwas detaillierter dargestellt. Die Oberfläche der Fluidleitung 50 ist in einem Substrat beispielsweise eines im wesentlichen ebenen mikrofluidischen Chips 52 wie gezeigt beispielsweise als Kanal in der Ebene des Substrats 52 gebildet. Abweichend hiervon ist es auch möglich, die Membran in einem Abschnitt der Fluidleitung anzuordnen, in dem diese senkrecht zur Substratebene einen Seitenwechsel vollzieht. Vorzugsweise senkrecht zur Leitungsrichtung ist eine Membran 54 eingebracht, welche die Fluidleitung 50 in ein erstes Volumen V1 und ein zweites Volumen V2 geometrisch trennt. Die Membran 54, genauer der hier nicht explizit dargestellte Kern der Membran, oder eine tieferliegende Schicht der Membran 54 ist elektrisch leitfähig und an eine Spannungsquelle angeschlossen. Die Oberfläche der Fluidleitung 50 ist in unmittelbarer Umgebung der Membran 54 mit einer zweiten Elektrode versehen. Diese Elektrode kann die Membran 54 beispielsweise ringförmig umgeben. Sie kann auf die Innenoberfläche der Fluidleitung 50 aufgedampft oder anderweitig als Schicht aufgebracht sein. Voraussetzung dieser zweiten Elektrode 56 ist, dass diese in das erste Volumen V 1 und in das zweite Volumen V 2 hineinragt, um dort einen Kontakt mit den in diesen Volumina befindlichen Medien herstellen zu können. Wird eine Spannungsdifferenz zwischen der ersten Elektrode in der Membran 54 und der zweiten Elektrode 56 angelegt, so bildet sich im Bereich der Membran 54 ein elektrisches Feld aus. Dieses elektrische Feld wird in der vorstehend beschriebenen Weise genutzt, um

den Kontaktwinkel zwischen der Porenoberfläche der Membran 54 und einer Grenzfläche 58 zwischen einem ersten Medium M1 und einem zweiten Medium M2 zwischen der Porenoberfläche der Membran 54 bzw. einer zweiten Grenzfläche 60 zwischen dem ersten Medium M1 und einem dritten Medium M3 zu manipulieren.

In den Figuren 8A bis 8G ist ein Verwendungsbeispiel des erfindungsgemäßen fluidischen Systems gezeigt, welches hier als Ventil ohne mechanisch bewegliche Komponenten genutzt wird. Das fluidische System weist in diesem Fall vier Volumina V1, V2, V3 und V4 auf. Das zweite Volumen V2 ist von dem ersten Volumen V1 mittels einer ersten Membran 80, von dem dritten Volumen V3 mittels einer zweiten Membran 82 und von dem vierten Volumen V4 mittels einer dritten Membran 84 geometrisch getrennt. Das erste Volumen V1 ist zusammen mit dem zweiten Volumen V2 und der ersten Membran 80 Teil eines ersten fluidischen Systems 86 der vorstehend beschriebenen Art, das zweite Volumen V2 zusammen mit dem dritten Volumen V3 und der zweiten Membran 82 Teil eines zweiten fluidischen Systems 88 und das zweite Volumen V2 zusammen mit dem vierten Volumen V4 und der dritten Membran 84 Teil eines dritten fluidischen Systems 90. Alle drei Membranen sind identisch aufgebaut und weisen daher in jeweils gleichem Zustand gleiche Oberflächenenergien auf.

Das erste fluidische System 86 befindet sich gemäß der Figur 8A in einem Zustand Z_2 , bei dem eine Potenzialdifferenz U zwischen der ersten und der zweiten Elektrode der ersten Membran 80 angelegt wird; das zweite fluidische System 88 befindet sich in einem Zustand Z_1 , bei dem keine Potenzialdifferenz U zwischen der ersten und der zweiten Elektrode der zweiten Membran 82 angelegt wird; und das dritte fluidische System 90 befindet sich in einem Zustand Z_1 , bei dem keine Potenzialdifferenz U zwischen der ersten und der zweiten Elektrode der dritten Membran 84 angelegt wird. Steht in dem ersten Volumen V1 ein erstes Medium M1 unter Druck an, so kann es aufgrund der Benetzbarkeit der ersten Membran 80

diese passieren und bis zur zweiten und dritten Membran vordringen. In dem dritten Volumen V3 und dem vierten Volumen V4 steht ein zweites Medium M2 an und das jeweils eine Grenzfläche mit dem ersten Medium M1 an der zweiten, dritten Membran 82, 84 ausbildet. Es wird angenommen, dass das Medium M1 die Porenoberfläche der zweiten und dritten Membranen im Zustand Z_1 weniger be-
5 netzt, als das Medium M2, sodass hier ein Kontaktwinkel $\Theta_1 > 90^\circ$ aus Sicht des Mediums M1 entsteht. Die Förderung der Medien aus dem Volumen V2 in die Volumina V3 und V4 stoppt unter der Bedingung, dass der Förderdruck den Durchbruchsdruck an der Membran 82 nicht übersteigt. Gleiches gilt an der dritten
10 Membran 84.

Dies ändert sich gemäß Figur 8B, wenn das System durch Änderung der Potenzi-
aldifferenz an der zweiten Membran 82 in einen Zustand Z_2 umgeschaltet wird. Hieraufhin benetzt das Medium M1 die Porenoberfläche der Membran 80 in der
15 zuvor beschriebenen Weise und kann durch die Poren der Membran hindurch in das Volumen V3 ohne Erhöhung des Förderdrucks gefördert werden. Es wird in dem Zustand gemäß Figur 8B davon ausgegangen, dass sich die Verhältnisse an der dritten Membran 84 indes nicht geändert haben, sodass diesbezüglich weiter-
hin kein Transport des Mediums M1 in das Volumen V4 stattfinden kann.

20 In Figur 8C wird die Spannung im Bereich der ersten Membran 80 wieder zurück-
gesetzt, sodass der Transport des Mediums M1 durch die erste Membran 80 stoppt. Gleichzeitig wird der bereits durch die Membran 80 transportierte Anteil des Mediums M1 mit Hilfe des Mediums M2 aus dem vierten Volumen V4 weiter in
25 das Volumen V3 gefördert. Der Vorgang stoppt, wenn die Grenzfläche zwischen dem ersten und dem zweiten Medium die zweite Membran 84 erreicht. Durch Zurückschalten des Systems 88 an der zweiten Membran 82 in den Zustand Z_1 , vgl. Figur 8D, kann das erste Medium M1 in dem dritten Volumen V3 weiter geför-
dert werden, bis beispielsweise der Ausgangszustand wieder hergestellt ist, wie er
30 in Figur 8A dargestellt ist. Gemäß Figuren 8E bis 8G wiederholt sich die Um-

schaltschaltsequenz in zwischen den Zuständen Z_1 und Z_2 mit umgekehrter Polarität an den zweiten und dritten Membranen 82 und 84, sodass ein begrenztes Volumen des Mediums M1 nun durch das Volumen V4 abtransportiert wird.

- 5 Auf diese konstruktiv einfache Weise kann ein fluidisches System zur Trennung von Flüssigkeitssäulen ohne mechanische Ventile geschaffen werden. Das Betreiben eines solchen Ventils durch Spannungsbeaufschlagung ist konstruktiv wesentlich einfacher, als mechanische Ventile, welche mechanische Aktuatoren erfordern. Auch ist es weniger fehler- und verschleißanfällig.
- 10 Eine andere Anwendungsform des erfindungsgemäßen fluidischen Systems ist die Nutzung als schaltbare Filter zum Trennen zweier nicht ineinander lösbarer und mischbarer Medien.
- 15 Obgleich vorstehend nur Ausführungsbeispiele beschrieben sind, die sich des Elektrobenetzens bedienen sei nochmals betont, dass dieses Phänomen nur beispielhaft angeführt ist und durch eine elektromagnetische Bestrahlung oder Temperaturerhöhung an der Membran gleichwirkend ersetzt werden kann.

– 35 –

Bezugszeichenliste

	10	Grenzfläche
	11	Substratoberfläche
5	12	Substratelektrode/1. Elektrode
	14	Dielektrische Schicht
	16	zweite Elektrode
	18	Spannungsversorgung
10	20	Membranelement
	22	Membranebene
	24, 24', 24''	Grenzfläche
	26, 26', 26''	Kontaktpunkt
15	30	Fluidleitung
	32	Membran
	34	Membranpore
	36	erste Grenzfläche
	38	zweite Elektrode
20	40	Transportrichtung
	42	zweite Grenzfläche
	44	Spannungssignal
25	50	Fluidleitung
	52	Substrat eines mikrofluidischen Chips
	54	Membran
	56	zweite Elektrode
	58	erste Grenzfläche
30		

– 36 –

	60	zweite Grenzfläche
	80	erste Membran
	82	zweite Membran
5	84	dritte Membran
	86	erstes fluidisches System
	88	zweites fluidisches System
	90	drittes fluidisches System
10	M1	erstes Medium
	M2	zweites Medium
	M3	drittes Medium
	V1	erstes Volumen
15	V2	zweites Volumen
	V3	drittes Volumen
	V4	viertes Volumen
	Z ₁	erster Zustand
	Z ₂	zweiter Zustand
20	Z ₃	dritter Zustand
	$\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$	Kontaktwinkel
	P_1, P_1', P_1''	Druck im ersten Medium
	P_2, P_2', P_2''	Druck im zweiten Medium
25	a, a', a''	Abstand der Kontaktpunkte von der Membranebene
	$\alpha, \alpha', \alpha''$	Winkel der Kontaktpunkte zur Membranebene
	r	Radius des Membranelements
	d	minimaler Porendurchmesser
	$P_{\max}$	maximaler Förderdruck

Patentansprüche

1. Fluidisches System mit einem ersten Volumen, einem zweiten Volumen und einer die beiden Volumina geometrisch trennenden Membran, die eine
5 offenporige Mikrostruktur mit einer Porenoberfläche für den Durchtritt eines ersten Mediums und eines zweiten Mediums bereitstellt, zwischen denen eine Grenzfläche ausgebildet ist, wobei zwischen der Grenzfläche und der Porenoberfläche ein Kontaktwinkel besteht,
gekennzeichnet durch Elektroden zum Anlegen eines elektrischen Feldes
10 im Bereich der Membran und/oder eine auf die Membran wirkende elektromagnetische Strahlungsquelle und/oder Mittel zur Erwärmung oder Abkühlung der Membran,
wobei die Membran in einem ersten Zustand Z_1 mit einem ersten elektrischen Feld E_1 und einer ersten elektromagnetischen Einstrahlung S_1 und
15 einer ersten Temperatur T_1 eine von dem ersten Medium nicht oder weniger benetzende und von dem zweiten Medium stärker benetzende Porenoberfläche aufweist, so dass sich zwischen der Porenoberfläche und der Grenzfläche im ersten Medium ein erster Kontaktwinkel $\Theta_1 > 90^\circ$ ausbildet, und
20 wobei das erste Medium und das zweite Medium und die Porenoberfläche eine Oberflächenenergie aufweisen, von denen mindestens eine Oberflächenenergie in Abhängigkeit von dem elektrischen Feld oder mittels elektromagnetischer Einstrahlung oder mittels Temperaturänderung derart reversibel veränderbar ist, dass sich in einem zweiten Zustand Z_2 mit einem
25 zweiten elektrischen Feld $E_2 \neq E_1$ und/oder einer zweiten elektromagnetischen Einstrahlung $S_2 \neq S_1$ und/oder einer zweiten Temperatur $T_2 \neq T_1$, zwischen der Porenoberfläche und der Grenzfläche ein zweiter Kontaktwinkel $\Theta_2 < \Theta_1$ einstellt.

– 38 –

2. Fluidisches System nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet, dass der erste Zustand Z_1 durch ein erstes elektrisches Feld $E_1 = 0$, eine erste elektromagnetische Einstrahlung S_1 in Form von Tages- oder Raumbeleuchtung oder Dunkelheit und eine erste Temperatur T_1 im Bereich gewöhnlicher Zimmertemperatur definiert ist.
3. Fluidisches System nach einem der vorstehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass die Porenoberfläche in dem ersten Zustand hydrophob ist und das erste Medium eine wasserbasierte Flüssigkeit ist.
4. Fluidisches System nach Anspruch 3,
dadurch gekennzeichnet, dass das zweite Medium ein Gas, insbesondere Luft, oder eine ölbasierte Flüssigkeit ist.
5. Fluidisches System nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet, dass die Porenoberfläche in dem ersten Zustand lipophob ist und das erste Medium eine ölbasierte Flüssigkeit ist.
6. Fluidisches System nach Anspruch 5,
dadurch gekennzeichnet, dass das zweite Medium ein Gas, insbesondere Luft, oder eine wasserbasierte Flüssigkeit ist.
7. Fluidisches System nach einem der vorstehenden Ansprüche,
gekennzeichnet durch eine Pumpe zur Förderung der Medien von dem ersten Volumen durch die Membran in das zweite Volumen.

8. Fluidisches System nach Anspruch 7,
dadurch gekennzeichnet, dass die Pumpe eingerichtet ist, bis zu einem maximalen Förderdruck $P_{\max}$ einen konstanten Volumenstrom V_c zu fördern.

5

9. Fluidisches System nach Anspruch 8,
dadurch gekennzeichnet, dass der erste Kontaktwinkel Θ_1 mit einem Durchbruchdruck P_{dhi} korrespondiert, bei dem die Grenzfläche durch die Membran durchtritt und der größer ist als der maximale Förderdruck $P_{\max}$.

10

10. Fluidisches System nach Anspruch 9,
dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Kontaktwinkel Θ_2 mit einem Durchbruchdruck P_{dlo} korrespondiert, bei dem die Grenzfläche durch die Membran durchtritt und der kleiner ist als der maximale Förderdruck $P_{\max}$.

15

11. Fluidisches System nach einem der Ansprüche 8 bis 10,
gekennzeichnet durch einen Drucksensor, der angeordnet und eingerichtet ist, eine Druckänderung in dem ersten oder zweiten Volumen zu detektieren und ein Druckänderungssignal auszugeben.

20

12. Fluidisches System nach Anspruch 11,
gekennzeichnet durch eine Steuerung, die eingerichtet ist, in Antwort auf das Druckänderungssignal bei Überschreiten eines Schwellendruckes in dem ersten Volumen oder Unterschreiten eines Schwellendruckes in dem zweiten Volumen ein Schaltsignal an eine Spannungsversorgung für die Elektroden oder an die elektromagnetische Strahlungsquelle oder an die Mittel zur Erwärmung der Membran auszugeben.

25

13. Fluidisches System nach Anspruch 7,

dadurch gekennzeichnet, dass die Pumpe eingerichtet ist, mit einem konstanten Förderdruck P_c zu fördern.

14. Fluidisches System nach Anspruch 13,

5 **dadurch gekennzeichnet**, dass der erste Kontaktwinkel Θ_1 mit einem Durchbruchdruck P_{dhi} korrespondiert, bei dem die Grenzfläche durch die Membran durchtritt und der größer ist als der konstante Förderdruck P_c .

15. Fluidisches System nach Anspruch 14,

10 **dadurch gekennzeichnet**, dass der zweite Kontaktwinkel Θ_2 mit einem Durchbruchdruck P_{dlo} korrespondiert, bei dem die Grenzfläche durch die Membran durchtritt und der kleiner ist als der konstante Förderdruck P_c .

16. Fluidisches System nach einem der Ansprüche 13 bis 15,

15 **gekennzeichnet durch** einen Volumenstromsensor, der angeordnet und eingerichtet ist, eine Volumenstromänderung in dem zweiten Volumen zu detektieren und ein Volumenstromänderungssignal auszugeben.

17. Fluidisches System nach Anspruch 16,

20 **gekennzeichnet durch** eine Steuerung, die eingerichtet ist, in Antwort auf das Volumenstromänderungssignal bei Unterschreiten eines Schwellenvolumenstromes ein Schaltsignal an eine Spannungsversorgung für die Elektroden oder an die elektromagnetische Strahlungsquelle oder an die Mittel zur Erwärmung der Membran auszugeben.

25

18. Fluidisches System nach einem der vorstehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, dass eine erste der Elektroden durch ein leitendes Substrat der Membran oder eine leitende Beschichtung der Membran gebildet wird.

30

– 41 –

19. Fluidisches System nach Anspruch 18,
dadurch gekennzeichnet, dass die Membran auf der ersten Elektrode eine Schicht eines Dielektrikums aufweist.

5 20. Fluidisches System nach Anspruch 19,
dadurch gekennzeichnet, dass das Dielektrikums die Porenoberfläche bildet.

10 21. Fluidisches System nach einem der Ansprüche 18 bis 20,
dadurch gekennzeichnet, dass in dem ersten und dem zweiten Volumen jeweils unmittelbar benachbart zu der Membran eine zweite Elektrode angeordnet ist.

15 22. Fluidisches System nach einem der vorstehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass die elektromagnetische Strahlungsquelle eingerichtet ist, Licht einer Wellenlänge zwischen 0,1 μm und 3 μm zu emittieren.

20 23. Fluidisches System nach einem der vorstehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass die Mittel zur Erwärmung der Membran ein Substratwerkstoff oder eine Beschichtung der Membran mit einer oder mehreren Absorptionsbanden und eine thermische Strahlungsquelle aufweisen, die eingerichtet ist, thermische Strahlung im Bereich der Absorptionsbanden zu emittieren.

25 24. Fluidisches System nach einem der vorstehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass die Porenoberfläche auf Basis von Polytetrafluorethylen (PTFE), Perflourisobuten (PFIB) oder Parylene gebildet wird.

30

25. Verwendung eines fluidischen Systems nach einem der vorstehenden Ansprüche als Filter in einem fluidischen, insbesondere mikrofluidischen System.
- 5 26. Verwendung eines fluidischen Systems nach einem der Ansprüche 1 bis 24 als Ventil in einem fluidischen, insbesondere einem mikrofluidischen System.
- 10 27. Verfahren zum Betreiben eines fluidischen Systems mit einem ersten Volumen, einem zweiten Volumen und einer die beiden Volumina geometrisch trennenden Membran, die eine offenporige Mikrostruktur mit einer Porenoberfläche bereitstellt, mit den Schritten:
- Einstellen eines ersten Zustands Z_1 mit einem ersten elektrischen Feld E_1 im Bereich der Membran und einer auf die Membran wirkenden ersten elektromagnetischen Einstrahlung S_1 und einer ersten Temperatur T_1 der Membran, in dem die Porenoberfläche, ein erstes Medium und ein zweites Medium Oberflächenenergien aufweisen und in dem die Membran eine von dem ersten Medium nicht oder weniger benetzende und von dem zweiten Medium stärker benetzende Porenoberfläche aufweist,
 - 15 – Fördern des ersten Mediums und des zweiten Mediums, zwischen denen eine Grenzfläche ausgebildet ist, von dem ersten Volumen durch die Membran in das zweite Volumen bis die Grenzfläche die Membran berührt, wobei sich zwischen der Porenoberfläche und der Grenzfläche im ersten Medium ein erster Kontaktwinkel $\Theta_1 > 90^\circ$ einstellt und die Förderung stoppt, während das erste Medium im Wesentlichen noch in dem ersten Volumen und das zweite Medium im Wesentlichen schon im zweiten Volumen verweilen,
 - 20 – Einstellen eines zweiten Zustand Z_2 mit einem zweiten elektrischen Feld $E_2 \neq E_1$ im Bereich der Membran und/oder einer zweiten auf die
- 25 30

Membran wirkenden elektromagnetischen Einstrahlung $S_2 \neq S_1$ und/oder einer zweiten Temperatur $T_2 \neq T_1$ der Membran, in dem sich mindestens eine Oberflächenenergie derart reversibel verändert, dass sich ein zweiter Kontaktwinkel $\Theta_2 < \Theta_1$ zwischen der Porenoberfläche und der Grenzfläche einstellt,

- Weiterfördern des ersten und des zweiten Mediums bis auch das erste Medium im Wesentlichen durch die Membran in das zweite Volumen überführt ist.

- 10 28. Verfahren nach Anspruch 27,
dadurch gekennzeichnet, dass im zweiten Zustand Z_2 der zweite Kontaktwinkel $\Theta_2 < 90^\circ$ beträgt.
- 15 29. Verfahren nach einem der Ansprüche 27 oder 28,
dadurch gekennzeichnet, dass der erste Zustand Z_1 durch ein erstes elektrisches Feld $E_1 = 0$, eine erste elektromagnetische Einstrahlung S_1 in Form von Tages- oder Raumbeleuchtung oder Dunkelheit und eine erste Temperatur T_1 im Bereich gewöhnlicher Zimmertemperatur definiert ist.
- 20 30. Verfahren nach einem der Ansprüche 27 bis 29,
dadurch gekennzeichnet, dass das Fördern bis zu einem maximalen Förderdruck $P_{\max}$ mit einem konstanten Volumenstrom V_c erfolgt.
- 25 31. Verfahren nach Anspruch 30,
dadurch gekennzeichnet, dass der erste Kontaktwinkel Θ_1 mit einem Durchbruchdruck P_{dhi} korrespondiert, bei dem die Grenzfläche durch die Membran durchtritt und der größer ist als der maximale Förderdruck $P_{\max}$.

32. Verfahren nach Anspruch 31,
dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Kontaktwinkel Θ_2 mit einem Durchbruchdruck P_{dlo} korrespondiert, bei dem die Grenzfläche durch die Membran durchtritt und der kleiner ist als der maximale Förderdruck P_{max} .
- 5 33. Verfahren nach einem der Ansprüche 30 bis 32,
gekennzeichnet durch das Detektieren einer Druckänderung in dem ersten oder zweiten Volumen und Ausgeben eines Druckänderungssignals.
- 10 34. Verfahren nach Anspruch 33,
dadurch gekennzeichnet, dass das Einstellen eines zweiten Zustand Z_2 in Antwort auf das Druckänderungssignal bei Überschreiten eines Schwellendrucks in dem ersten Volumen oder Unterschreiten eines Schwellendrucks in dem zweiten Volumen erfolgt.
- 15 35. Verfahren einem der Ansprüche 27 bis 29,
dadurch gekennzeichnet, dass das Fördern mit einem konstanten Förderdruck P_c erfolgt.
- 20 36. Verfahren nach Anspruch 35,
dadurch gekennzeichnet, dass der erste Kontaktwinkel Θ_1 mit einem Durchbruchdruck P_{dhi} korrespondiert, bei dem die Grenzfläche durch die Membran durchtritt und der größer ist als der konstante Förderdruck P_c .
- 25 37. Verfahren nach Anspruch 36,
dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Kontaktwinkel Θ_2 mit einem Durchbruchdruck P_{dlo} korrespondiert, bei dem die Grenzfläche durch die Membran durchtritt und der kleiner ist als der konstante Förderdruck P_c .

38. Verfahren nach einem der Ansprüche 35 bis 38,
gekennzeichnet durch das Detektieren einer Volumenstromänderung in
dem zweiten Volumen und das Ausgeben eines Volumenstromänderungs-
signals.

5

39. Verfahren nach Anspruch 38,
dadurch gekennzeichnet, dass das Anlegen eines elektrischen Feldes im
Bereich der Membran oder das Einstrahlen elektromagnetischer Strahlung
auf die Membran oder das Erwärmen der Membran in Antwort auf das Vo-
lumenstromänderungssignal bei Unterschreiten eines Schwellenvolumen-
stromes erfolgt.

10

40. Verfahren nach einem der Ansprüche 27 bis 39,
dadurch gekennzeichnet, dass das erste Medium ein begrenztes Volu-
men aufweist und in Bezug auf die Förderrichtung an dessen Ende eine
zweite Grenzfläche zu einem dritten Medium ausgebildet ist, wobei das
Weiterfördern des ersten Mediums durch die Membran in das zweite Vo-
lumen stoppt, wenn die zweite Grenzfläche die Membran berührt und zwi-
schen der zweiten Grenzfläche und der Porenoberfläche ein dritter Kon-
taktwinkel Θ_3 entsteht.

15

20

41. Verfahren nach Anspruch 40,
mit den weiteren Schritten:

- Einstellen eines dritten Zustands Z_3 mit einem dritten elektrischen
Feld $E_3 \neq E_2$ im Bereich der Membran und/oder einer dritten auf die
Membran wirkenden elektromagnetischen Einstrahlung $S_3 \neq S_2$
und/oder einer dritten Temperatur $T_3 \neq T_2$ der Membran, in dem sich
durch Veränderung mindestens eine Oberflächenenergie ein vierter
Kontaktwinkel $\Theta_4 > \Theta_3$ zwischen der Porenoberfläche und der Grenz-
fläche einstellt,

25

30

– 46 –

– Weiterfördern des ersten Mediums in dem zweiten Volumen.

42. Verfahren nach Anspruch 41,
dadurch gekennzeichnet, dass im zweiten Zustand Z_2 der dritte Kontakt-
5 winkel $\Theta_3 < 90^\circ$ und im dritten Zustand Z_3 der vierte Kontaktwinkel $\Theta_4 > 90^\circ$
beträgt.
43. Verfahren nach einem der Ansprüche 40 bis 42,
dadurch gekennzeichnet, dass das zweite Medium und das dritte Medium
10 gleich sind.
44. Verfahren nach einem der Ansprüche 41 bis 43,
dadurch gekennzeichnet, dass das der erste Zustand Z_1 und der dritten
15 Zustand Z_3 gleich sind.
45. Verfahren nach einem der Ansprüche 27 bis 44,
dadurch gekennzeichnet, dass das zweite elektrische Feld E_2 im Be-
reich der Membran mit einer Feldstärke von 1 V/m bis 10 kV/m angelegt
20 wird.
46. Verfahren nach einem der Ansprüche 27 bis 45,
dadurch gekennzeichnet, dass Licht einer Wellenlänge zwischen 0,1 μm
und 3 μm auf die Membran eingestrahlt wird.
- 25 47. Verfahren nach einem der Ansprüche 27 bis 46,
dadurch gekennzeichnet, dass die Membran auf eine Temperatur T_2 zwi-
schen 10°C und 100°C aufgewärmt wird.

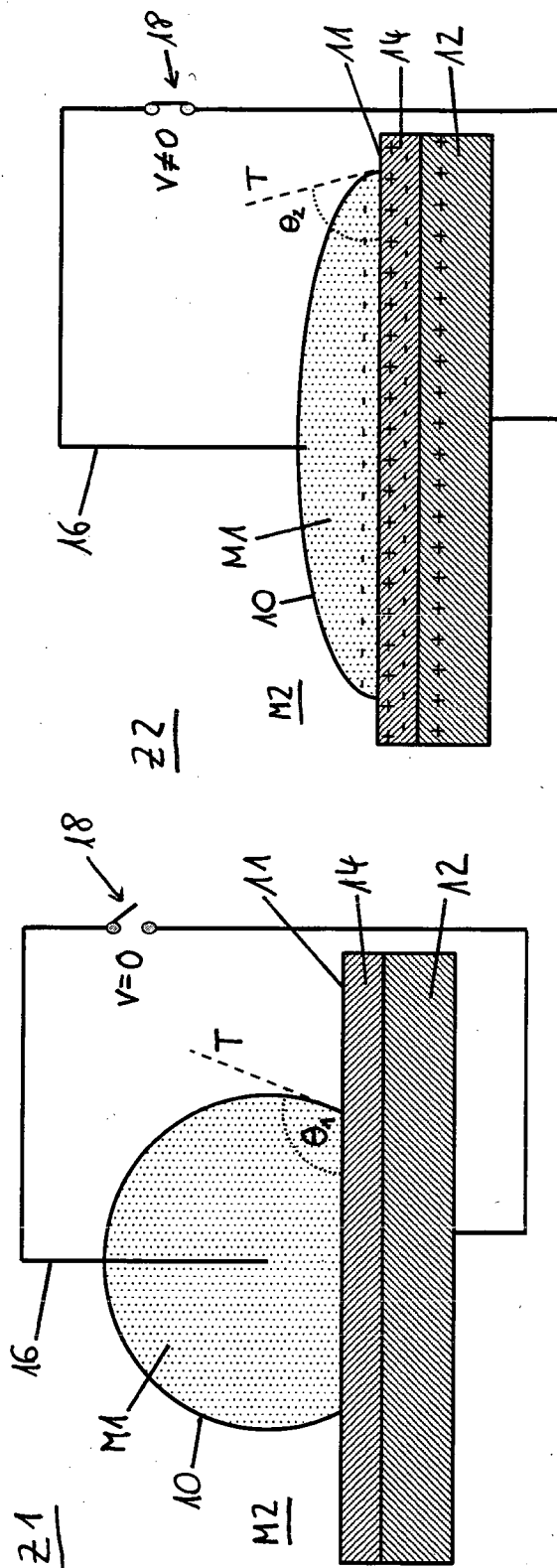
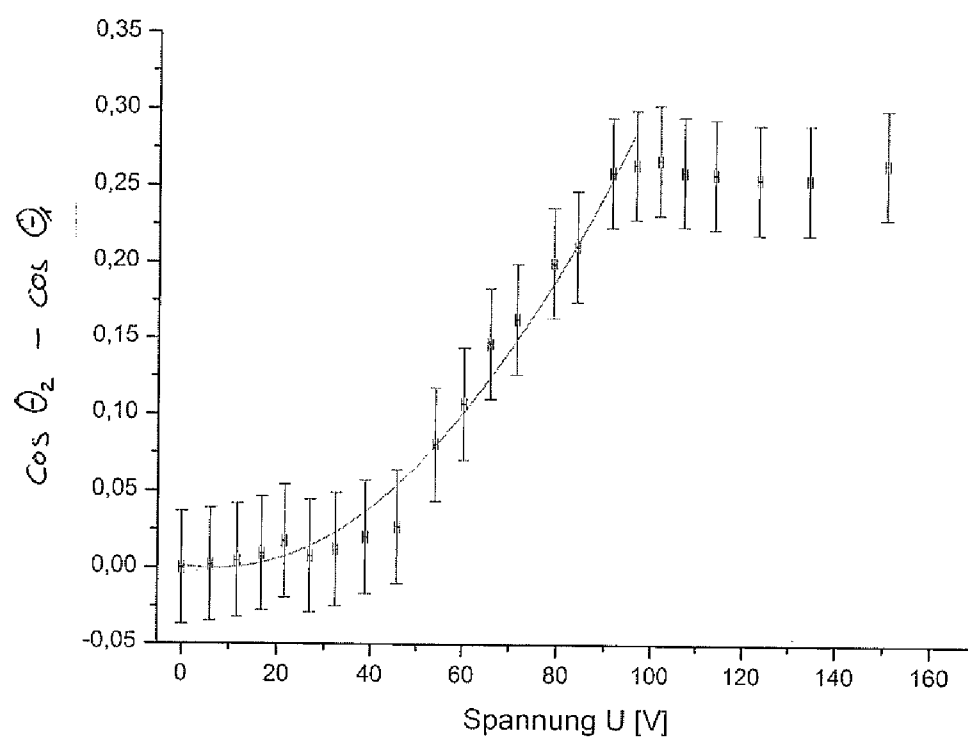


Fig. 1A

Fig. 1B

2/8

Fig. 2



3 / 8

Fig. 3A

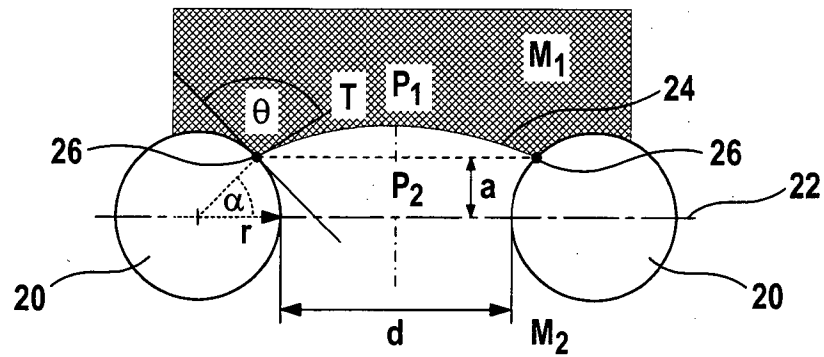


Fig. 3B

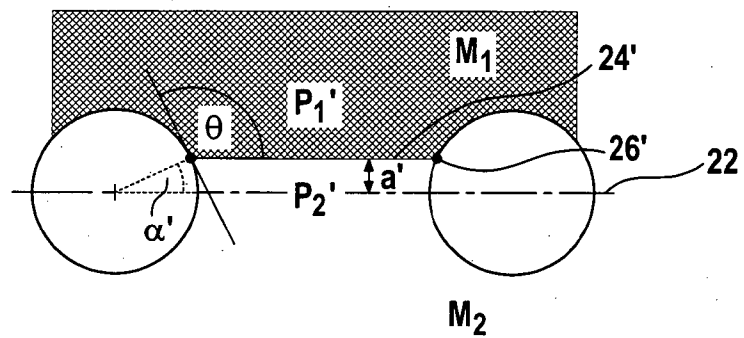
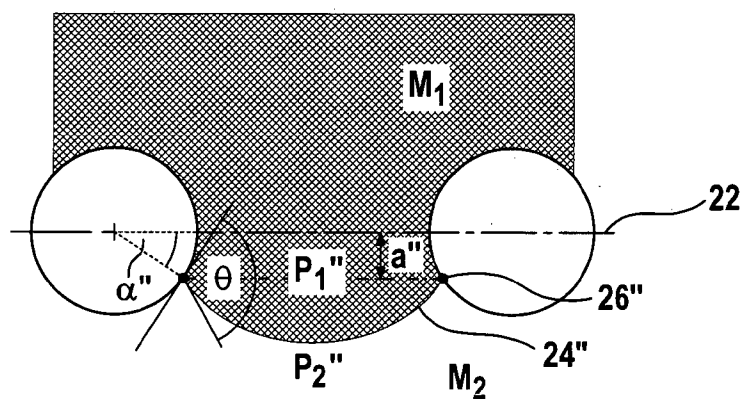


Fig. 3C



4/8

Fig. 4

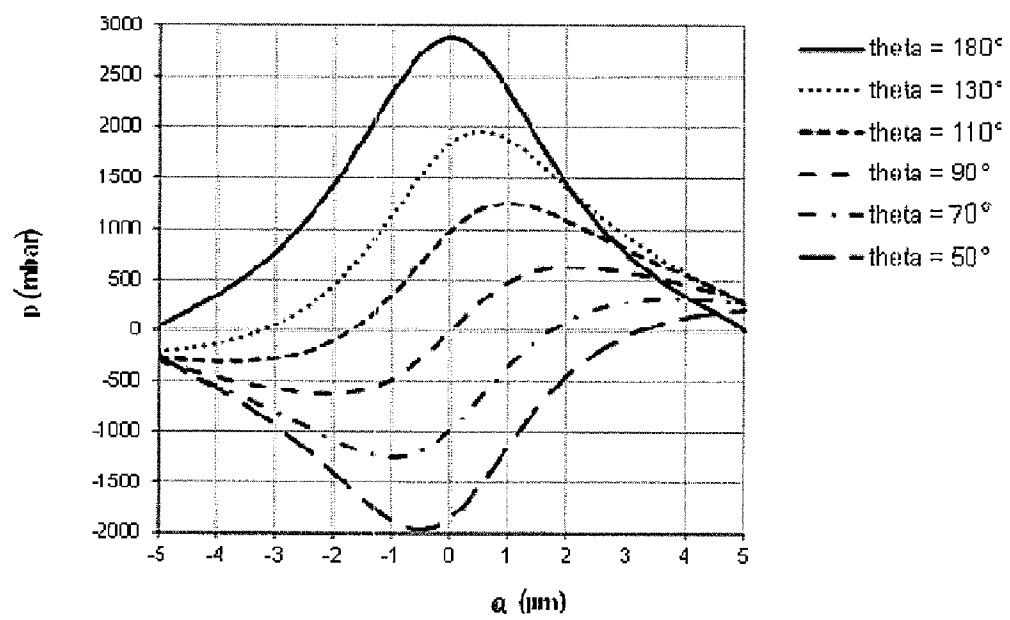
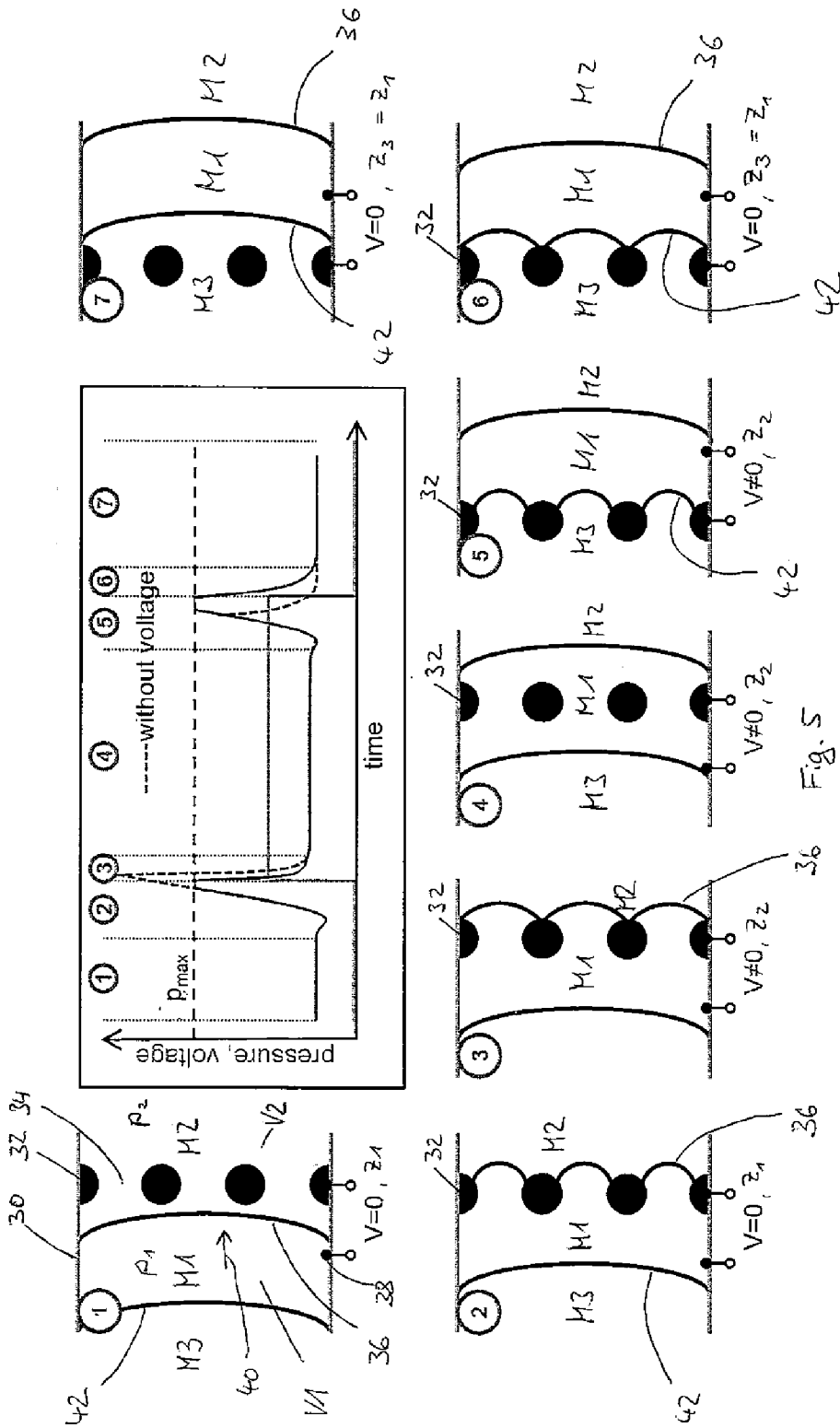
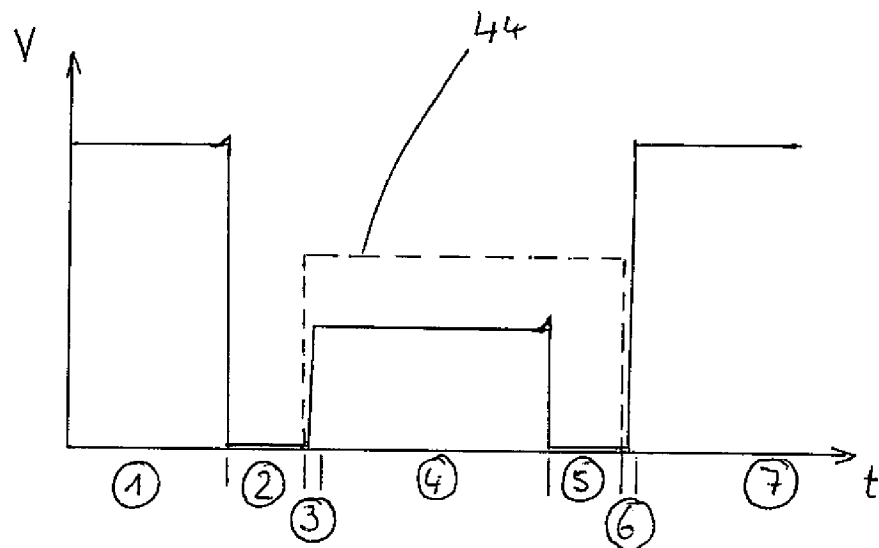


Fig. 6A

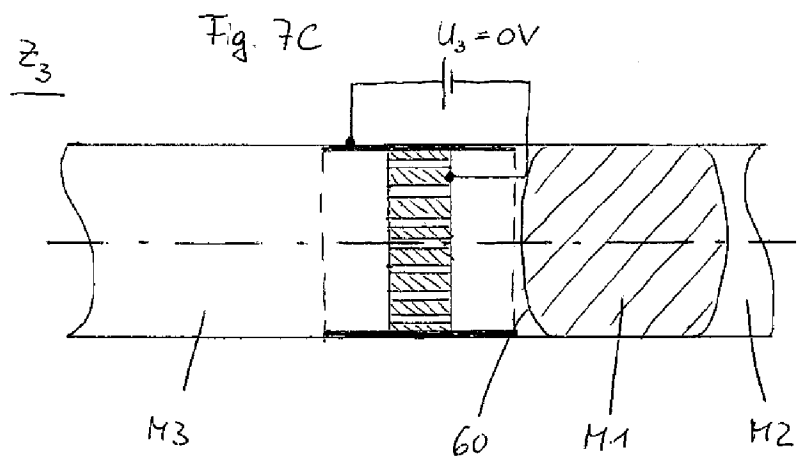
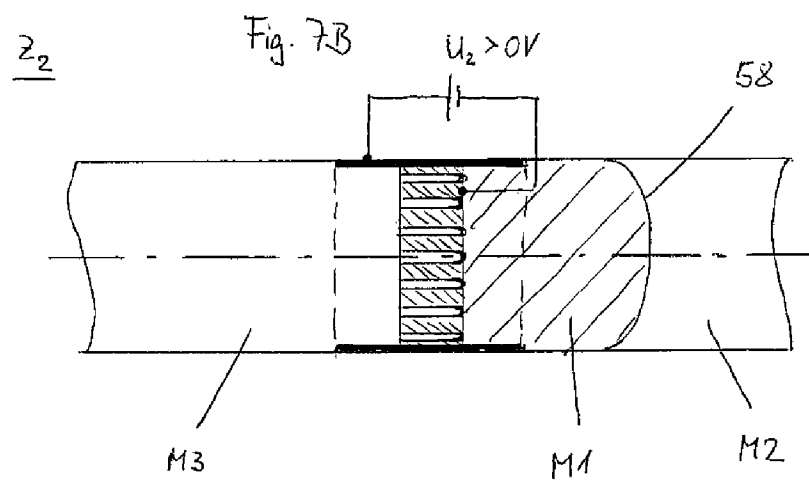
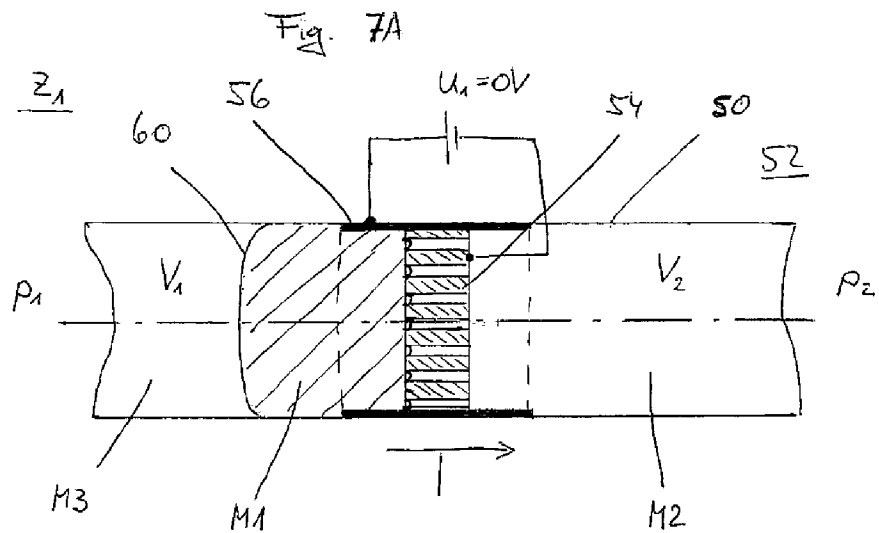


6/8

Fig. 6B



7/8



8/8

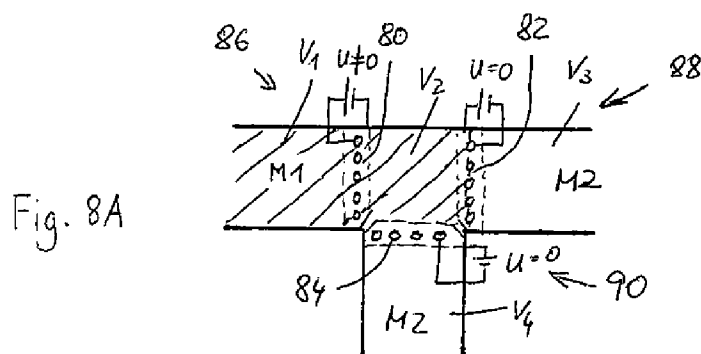


Fig. 8B

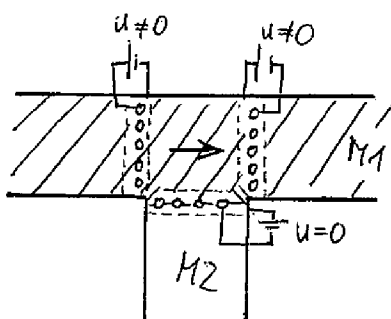


Fig. 8E

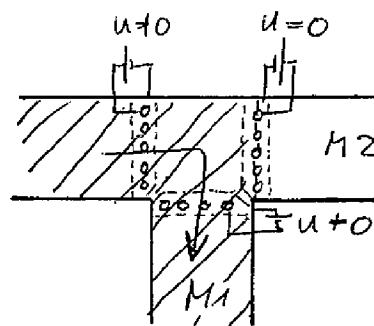


Fig. 8C

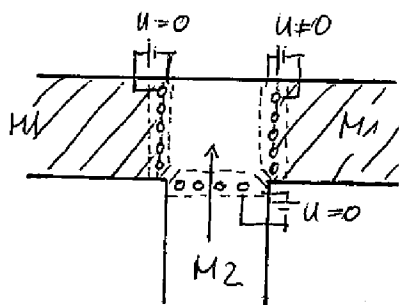


Fig. 8F

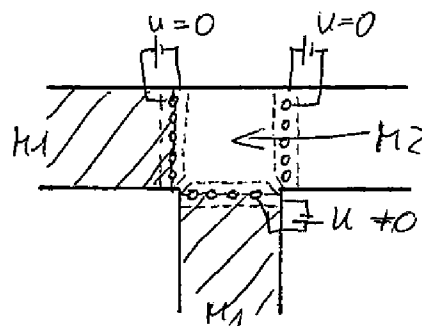


Fig. 8D

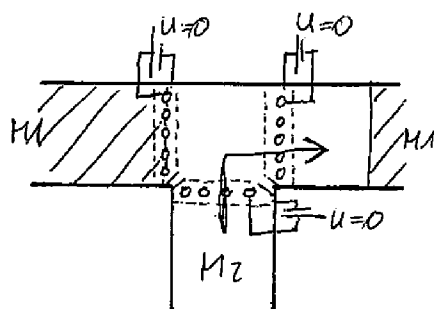


Fig. 8G

