(19) Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2024 110 069 A1** 2025.10.16

(12) # Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2024 110 069.9**
(22) Anmeldetag: **11.04.2024**
(43) Offenlegungstag: **16.10.2025**

(51) Int Cl.: ***B03C 5/00*** (2006.01)
C02F 1/48 (2023.01)
C02F 1/469 (2023.01)

(71) Anmelder:
Universität Bremen, Körperschaft des öffentlichen Rechts, 28359 Bremen, DE

(74) Vertreter:
BOEHMERT & BOEHMERT Anwaltspartnerschaft mbB - Patentanwälte Rechtsanwälte, 28359 Bremen, DE

(72) Erfinder:
Giesler, Jasper, 28213 Bremen, DE; Baune, Michael, Dr., 28215 Bremen, DE; Thöming, Jörg, 28355 Bremen, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

US	**2013 / 0 105 317**	**A1**
US	**2022 / 0 091 014**	**A1**

FARAGHAT, Shabnam A., et al.: High-throughput, low-loss, low-cost, and label-free cell separation using electrophysiology-activated cell enrichment.. In: Proceedings of the National Academy of Sciences, 114, 2017, 18, S. 4591-4596.

GIESLER, Jasper, et al.: Semi-continuous dielectrophoretic separation at high throughput using printed circuit boards.. In: Scientific Reports, 13, 2023, 1, S. 20696.

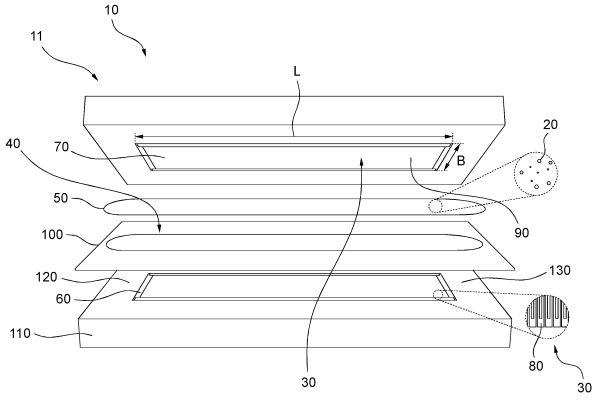
TADA, Shigeru, et al.: Enhancement of continuous-flow separation of viablenonviable yeast cells using a nonuniform alternating current electric field with complex spatial distribution.. In: Biomicrofluidics, 10, 2016, 3, S. 1-14.

Rechercheantrag gemäß § 43 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Trennvorrichtung zum Trennen zweier Arten von Partikel mittels Dielektrophorese und Trennverfahren**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Trennvorrichtung (10) zum Trennen von Partikeln einer ersten Art (21), die bei einer Frequenz von mehr als 500 kHz positiv dielektrophoretisch sind, von Partikeln einer zweiten Art (22), die bei einer Frequenz von mehr als 500 kHz negativ dielektrophoretisch sind, mittels Dielektrophorese, wobei die Trennvorrichtung (10) eine Felderzeugungsvorrichtung zum Erzeugen eines inhomogenen elektrischen Felds und einen durchströmbaren Kanal (40) aufweist, wobei die Trennvorrichtung (10) dazu eingerichtet ist, wenn der Kanal (40) von einem Medium (50) mit darin aufgenommenen Partikeln erster Art (21) und Partikeln zweiter Art (22) durchströmt wird, eine dielektrophoretische Kraft auf die Partikel erster Art (21) und die Partikel zweiter Art (22) durch das inhomogene elektrische Feld auszuüben und die Partikel erster Art (21) von den Partikeln zweiter Art (22) in dem Kanal (40) zu trennen, dadurch gekennzeichnet, dass die Felderzeugungsvorrichtung dazu eingerichtet ist, ein inhomogenes elektrisches Feld zu erzeugen, dessen Frequenz größer als 500 kHz ist. Die Erfindung betrifft zudem ein Verfahren.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Trennvorrichtung zum Trennen von Partikeln einer ersten Art von Partikeln einer zweiten Art mittels Dielektrophorese, und ein entsprechendes Verfahren.

[0002] Eine dielektrophoretische Kraft ist eine Kraft, die aus unterschiedlichen Polarisierbarkeiten von einem Partikel und einem umgebenen Medium sowie einem inhomogenen elektrischen Feld resultiert.

[0003] Dielektrophorese (DEP) kann anziehend wirken, sofern das Partikel besser als das umgebende Medium polarisierbar ist. Dies wird als positive DEP (pDEP) bezeichnet, bei der Partikel in Richtung von lokalen Maxima des inhomogenen elektrischen Feldes gelenkt werden. Ist die Polarisierbarkeit des Mediums höher, so wird von negativer DEP (nDEP) gesprochen und die Partikel werden von lokalen Feldmaxima weggedrückt.

[0004] Die Polarisierbarkeit setzt sich aus den Eigenschaften der Partikel, den Eigenschaften eines Fluids bzw. Mediums, in dem die Partikel aufgenommen sind, und der Frequenz des elektrischen Feldes. zusammen Als Materialeigenschaften sind insbesondere die elektrische Leitfähigkeit und die relative Permittivität maßgebend. Ein Maß für die relative Polarisierbarkeit ist der sogenannte Realteil des Clausius-Mossotti Faktors (Re(CM))

$$Re(CM) = Re\left(\frac{\tilde{\varepsilon}_p - \tilde{\varepsilon}_m}{\tilde{\varepsilon}_p + 2\,\tilde{\varepsilon}_m}\right)$$

[0005] Hierbei ist $\tilde{\varepsilon}$ die komplexe Permittivität vom Medium (Index m) bzw. vom Partikel (Index p). Ist der Realteil des Clausius-Mossotti Faktors positiv, tritt pDEP auf, wohingegen bei negativem Vorzeichen nDEP auftritt. Die komplexe Permittivität ist definiert als

$$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_0 \varepsilon_r + j\omega\sigma$$

[0006] Dabei entspricht ε_0 der Permittivität des Vakuums, ε_r der relativen Permittivität, j der imaginären Zahl, ω der Kreisfrequenz und σ der Materialleitfähigkeit. Der Realteil des Clausius-Mossotti Faktors kann somit frequenzabhängig sein, und in Abhängigkeit von Material- und Feldeigenschaften sein Vorzeichen ändern. Ein Partikel, was bei einer ersten Frequenz pDEP zeigte, kann nun bei einer zweiten Frequenz nDEP zeigen und somit abgestoßen werden. Die Frequenz, bei der dieser Umschlag passiert, wird Crossover-Frequenz genannt. Fängt man eine Art von Partikel mithilfe von pDEP in oder in der Nähe von Feldmaxima und stößt eine andere Art von Partikeln ab, so kann eine Trennung erfolgen.

[0007] Dielektrophorese wird beispielsweise zur biologischen oder auch medizinischen Analyse verwendet. Derartige Detektionsverfahren basieren üblicherweise auf Mikrofluidik, wobei eine Skalierung der Prozesse zum Prozessieren größerer Mengen oder von weniger werthaltigen Produkten wünschenswert ist.

[0008] Bei der Skalierung der Aufbauten treten aber mehrere technische Probleme auf. In skalierten DEP Aufbauten werden deutlich größere Leistungen (Produkt aus Spannung und Strom) eingebracht, als es bei mikrofluidischen Aufbauten der Fall ist, da die Gesamtimpedanz mit gesteigerter Größe der Aufbauten sinkt. Gleichzeitig stellt dies eine technische Herausforderung dar, da mit steigendem Strom/-Spannung oder der Frequenz des Feldes die notwendige Slew rate (V/s oder A/s) steigt. Dies ist von den handelsüblichen Verstärkern nur unter bestimmten Bedingungen leistbar und schränkt den Raum von verwendbarer Frequenz, Spannungen und Stromstärken ein.

[0009] Im Allgemeinen gibt es zwei Arten von DEP-Aufbauten, welche darin unterschieden werden, wie das inhomogene elektrische Feld erzeugt wird. Einerseits gibt es die elektrodenbasierten Aufbauten (eDEP), welche durch die Art der Elektrodenanordnung ein inhomogenes elektrisches Feld erzeugen. Andererseits kann das Feld auch gestört werden, indem isolierende Strukturen das Feld so beeinflussen, dass lokale Feldmaxima entstehen (iDEP). In iDEP-Aufbauten ist der Elektrodenabstand eher größer und die benötigten Spannungen höher. Bei eDEP-Aufbauten liegen die verwendeten Spannungen häufig niedriger, da die Elektroden näher beieinander liegen und somit sich die Feldstärke erhöht. Jedoch ist hier der benötigte Strom meist höher.

[0010] Eine Trennvorrichtung, die Partikel bei einer Frequenz von bis zu 200 kHz trennt, ist aus der Veröffentlichung „High-throughput dielecrophoretic separator based on printed circuit boards“, Giesler et al., Electrophoresis, Vol. 44 Issue 1-2, doi: 10.1002/elps.202200131 bekannt.

[0011] Eine Trennung kann mit bekannten Vorrichtungen und Verfahren in kHz-Frequenzbereichen durchgeführt werden, ist jedoch bei Partikel die allesamt pDEP zeigen nicht materialselektiv. Für Partikel, die weder isolierend oder hoch leitfähig sind, kann der für eine materialselektive Trennung wichtige Wechsel von pDEP zu nDEP (Crossover) bei Frequenzen oberhalb von 1 MHz liegen. Voraussetzung für einen Crossover ist hierbei, dass das Medium eine höhere Permittivität als das Partikel hat, aber eine geringere Leitfähigkeit. Beispiele für dieses Verhalten sind etwa Halbleiter in Medien mit geringer elektrischer Leitfähigkeit aber hoher Permittivität (etwa Reinstwasser oder Ethanol).

[0012] Der MHz Bereich ist somit für die Trennung von technisch relevanten Partikeln äußerst attraktiv, kann jedoch bei den hier betrachteten Durchsätzen von 1 ml/min (Hochdurchsatz) oder mehr bisher nicht erreicht werden, da Spannung und Strom zu groß werden. Der erhöhte Leistungseintrag bei diesen Frequenzen macht es notwendig, Verstärker und Trennapparat spezifisch aufeinander abzustimmen, da andernfalls die benötigte Spannung nicht am Kanal anliegt und somit keine Trennung erfolgen kann. Die Trennung von Halbleitern und Leitern oder Halbleitern und Halbleitern ist im Hochdurchsatz mithilfe von DEP ein unerforschtes Feld.

[0013] Es ist Aufgabe der Erfindung, diese Nachteile zu überwinden. Die Aufgabe wird durch eine Trennvorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 1, sowie durch ein Trennverfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 9 gelöst. Die abhängigen Ansprüche betreffen jeweils vorteilhafte Ausführungsformen.

[0014] Die Erfindung betrifft eine Trennvorrichtung zum Trennen von Partikeln einer ersten Art, die bei einer Frequenz von mehr als 500 kHz positiv dielektrophoretisch sind, von Partikeln einer zweiten Art, die bei einer Frequenz von mehr als 500 kHz negativ dielektrophoretisch sind, mittels Dielektrophorese, wobei die Trennvorrichtung eine Felderzeugungsvorrichtung zum Erzeugen eines inhomogenen elektrischen Felds und einen durchströmbaren Kanal aufweist, wobei die Trennvorrichtung dazu eingerichtet ist, wenn der Kanal von einem Medium mit darin aufgenommenen Partikeln erster Art und Partikeln zweiter Art durchströmt wird, eine dielektrophoretische Kraft auf die Partikel erster Art und die Partikel zweiter Art durch das inhomogene elektrische Feld auszuüben und die Partikel erster Art von den Partikeln zweiter Art in dem Kanal zu trennen, dadurch gekennzeichnet, dass die Felderzeugungsvorrichtung dazu eingerichtet ist, ein inhomogenes elektrisches Feld zu erzeugen, dessen Frequenz größer als 500 kHz ist.

[0015] Damit lassen sich Partikel erster Art und Partikel zweiter Art trennen, die ein jeweiliges entsprechendes dielektrophoretisches Verhalten erst bei Frequenzen größer als 500 kHz zeigen. Beispielsweise können leitende Partikel voneinander getrennt werden. Auch eine Trennung von leitenden und halbleitenden Partikeln, und/oder halbleitenden Partikeln von halbleitenden Partikeln kann ermöglicht sein.

[0016] Mit „Partikel erster Art“ kann gemeint sein, dass die entsprechenden Partikel ein erstes Material aufweisen und/oder aus einem ersten Material bestehen. Mit „Partikel zweiter Art“ kann gemeint sein, dass die entsprechenden Partikel ein zweites Material aufweisen und/oder aus einem zweiten Material bestehen. Das erste Material kann von dem zweiten Material verschieden sein, und/oder mindestens eine verschiedene Materialeigenschaft haben.

[0017] Es kann vorgesehen sein, dass die Partikel erster Art eine Crossover-Frequenz haben können, die größer als 500 kHz sein kann. In einigen Ausführungsformen kann die Crossover-Frequenz der Partikel erster Art größer als 1 Mhz, oder größer als 1,3 Mhz sein. Es kann vorgesehen sein, dass die Partikel zweiter Art eine Crossover-Frequenz haben können, die größer als 500 kHz sein kann. In einigen Ausführungsformen kann die Crossover-Frequenz der Partikel zweiter Art größer als 1 Mhz, oder größer als 1,3 Mhz sein.

[0018] Es kann vorgesehen sein, dass die Partikel erster Art eine höhere Leitfähigkeit als die Partikel zweiter Art haben können. In einigen Ausführungsformen können die Partikel erster Art beispielsweise Graphitpartikel sein oder aufweisen, und/oder Graphit umfassen. In einigen Ausführungsformen können die Partikel zweiter Art beispielsweise Lithium-Eisenphosphat-Partikel sein oder aufweisen, und/oder Lithium-Eisenphosphat umfassen. Die Partikel zweiter Art können alternativ oder zusätzlich beispielsweise Polystyrolpartikel sein oder aufweisen, und/oder Polystyrol umfassen.

[0019] In einigen Ausführungsformen können die Partikel erster Art leitend sein, und/oder ein leitendes Material umfassen. In einigen Ausführungsformen können die Partikel erster Art metallisch sein, und/oder ein Metall umfassen. In einigen Ausführungsformen können die Partikel erster Art Halbleiter sein, und/oder ein halbleitendes Material umfassen.

[0020] In einigen Ausführungsformen können die Partikel zweiter Art Halbleiter sein oder aufweisen, und/oder ein halbleitendes Material umfassen. In einigen Ausführungsformen können die Partikel zweiter Art leitend sein, und/oder ein leitendes Material umfassen. In einigen Ausführungsformen können die Partikel zweiter Art metallisch sein, und/oder ein Metall umfassen.

[0021] In einigen Ausführungsformen können die Partikeln erster Art bei einer Frequenz von mehr als 1 MHz positiv dielektrophoretisch sein. In einigen Ausführungsformen können die Partikeln erster Art bei einer Frequenz von mehr als 1,3 MHz positiv dielektrophoretisch sein. In einigen Ausführungsformen können die Partikeln zweiter Art bei einer Frequenz von mehr als 1 MHz negativ dielektrophoretisch sein. In einigen Ausführungsformen können die Partikeln zweiter Art bei einer Frequenz von mehr als 1,3 MHz negativ dielektrophoretisch sein.

[0022] Die Partikel erster Art und die Partikel zweiter Art können in dem Medium suspendiert sein. Das Medium kann ein Fluid und/oder flüssig sein. Die

Leitfähigkeit des Mediums kann geringer als die Leitfähigkeit der suspendierten Partikel, und/oder die Leitfähigkeit der Partikel erster Art und der Partikel zweiter Art, sein. Das Medium kann eine wässrige Salzlösung sein oder umfassen. Das Medium kann Wasser sein oder umfassen.

[0023] Ein inhomogenes elektrisches Feld kann ein Feld sein, dessen Feldstärke zeitlich und/oder räumlich variieren sein kann. Ein inhomogenes elektrisches Feld kann ein Feld sein, dessen Feldstärke lokal verschieden sein kann.

[0024] Die Trennvorrichtung kann einen oder mehrere elektrodenbasierten Aufbauten (elektrodenbasierte Dielektrophorese, eDEP) aufweisen, und/oder dazu eingerichtet sein, Partikel mittels eDEP zu trennen. Alternativ oder zusätzlich kann die Trennvorrichtung einen oder mehrere isolatorbasierte Aufbauten (isolatorbasierte Dielektrophorese, iDEP) aufweisen, und/oder dazu eingerichtet sein, Partikel mittels iDEP zu trennen.

[0025] Die Trennvorrichtung kann eine Leistungsanpassung aufweisen. Es kann vorgesehen sein, dass die Leistungsanpassung eine Blindstromkompensation ist oder aufweist. Alternativ oder zusätzlich kann die Leistungsanpassung eine Impedanzanpassung sein oder aufweisen. Durch die Leistungsanpassung können Reflektionen und/oder stehende Wellen reduziert sein oder werden.

[0026] In einigen Ausführungsformen kann die Leistungsanpassung und/oder Impedanzanpassung durch eine geeignete Wahl der Materialen und/oder Dimensionen der Trennvorrichtung, eines Aufbaus der Trennvorrichtung, Kabel, des Mediums und/oder der Partikel erfolgen. Alternativ oder zusätzlich kann eine Blindstromkompensation vorgesehen sein.

[0027] Die Leistungsanpassung kann mindestens eine Spule umfassen. In einigen Ausführungsformen kann die Spule parallel zu der Felderzeugungsvorrichtung geschaltet sein. Die Felderzeugungsvorrichtung kann einen Verstärker aufweisen. Die Spule kann beispielsweise parallel zu einem oder dem Verstärker der Felderzeugungsvorrichtung geschaltet sein. In einigen Ausführungsformen kann genau eine Spule vorgesehen sein.

[0028] Die Leistungsanpassung kann in einigen Ausführungsformen mehr als eine Spule aufweisen. In einigen Ausführungsformen können mindestens fünf Spulen, oder genau fünf Spulen, vorgesehen sein. In einigen Ausführungsformen können mindestens fünfzehn Spulen, oder genau fünfzehn Spulen, vorgesehen sein. Mindestens eine der Spulen kann parallel geschaltet sein, beispielsweise parallel zu mindestens einer anderen Spule, der Felderzeugungsvorrichtung und/oder einem oder dem Verstärker der Felderzeugungsvorrichtung. Mindestens eine der Spulen kann in Reihe geschaltet sein, beispielsweise in Reihe mit mindestens einer anderen Spule, mit der Felderzeugungsvorrichtung und/oder mit einem oder dem Verstärker der Felderzeugungsvorrichtung.

[0029] Es kann vorgesehen sein, dass die Blindstromkompensation durch die Spule, und/oder andere Bauteile wie Widerstände und/oder Kondensatoren, erfolgen kann, und/oder die diese umfassen kann.

[0030] Die Trennvorrichtung, und/oder die Felderzeugungsvorrichtung, kann dazu eingerichtet sein, eine positive dielektrophoretische Kraft auf die Partikel erster Art und eine negative dielektrophoretische Kraft auf die Partikel zweiter Art auszuüben, wenn der Kanal von einem Medium mit darin aufgenommenen Partikeln erster Art und Partikeln zweiter Art durchströmt wird.

[0031] Der Kanal kann einen Strömungsquerschnitt aufweisen, der größer als 1 mm^2 sein kann. Die Trennvorrichtung kann damit insbesondere für einen nicht-mikrofluidischen Durchfluss ausgelegt sein, und/oder nicht-mikrofluidisch sein. Die Strömung kann nicht mikro-fluidisch sein. Damit können auch vergleichsweise große Volumenströme vorgesehen sein, und/oder vergleichsweise große Mengen von Partikeln getrennt sein oder werden. Ebenso kann eine Trennung erfolgen, wenn die Partikeldichte der Partikel erster Art und/oder zweiter Art in dem Medium gering ist, so dass vergleichsweise hohe Volumenströme durch die Trennvorrichtung geführt werden müssen. Insbesondere ist auch eine Trennung von weniger werthaltigen Produkten möglich.

[0032] Die Trennvorrichtung kann eine Platine aufweisen. Die Platine kann an oder bei dem Kanal angeordnet sein. Die Felderzeugungsvorrichtung kann eine Elektrode zum Erzeugen einer dielektrophoretischen Kraft aufweisen. Die Elektrode kann an, auf oder in der Platine angeordnet sein.

[0033] Die Trennvorrichtung kann eine zweite Platine und eine zwischen der Platine und der zweiten Platine angeordnete Schicht aufweisen. Die Schicht kann eine Ausnehmung aufweisen, die den Kanal bilden kann. Es kann vorgesehen sein, dass sich die Ausnehmung in eine Längsrichtung der Trennvorrichtung erstrecken kann. Dadurch kann sich eine vergleichsweise flache Anordnung bzw. Trennvorrichtung ergeben. Die Trennvorrichtung kann vergleichsweise klein sein. Zudem kann die Trennvorrichtung einfach und unkompliziert gefertigt werden.

[0034] Die Felderzeugungsvorrichtung kann eine Elektrode und eine zweite Elektrode aufweisen, die

an sich gegenüberliegenden Seiten des Kanals angeordnet sein können. Alternativ oder zusätzlich kann die Elektrode an, auf oder in einer oder der Platine und die zweite Elektrode an, auf oder in einer oder der zweiten Platine angeordnet sein. Die Trennvorrichtung kann mehr als eine Elektrode, und/oder mehr als eine zweite Elektrode aufweisen.

[0035] Die Trennvorrichtung kann eine Pumpe aufweisen, die dazu eingerichtet sein kann, das Medium durch den Kanal zu fördern. In einigen Ausführungsformen kann die Pumpe dazu eingerichtet sein, das Medium mit einem Volumenstrom von mindestens 1 ml/min durch den Kanal zu fördern. Die Pumpe kann dazu eingerichtet sein, einen Volumenstrom zu fördern, insbesondre durch den Kanal zu fördern, der nicht mehr mikrofluidisch ist.

[0036] Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein Verfahren zum Trennen von Partikeln einer ersten Art von Partikeln einer zweiten Art mittels Dielektrophorese, wobei die Partikel erster Art und die Partikel zweiter Art in einem Medium aufgenommen sind, wobei die Partikel erster Art bei einer Frequenz größer als 500 kHz positiv dielektrophoretisch und die Partikel zweiter Art bei einer Frequenz größer als 500 kHz negativ dielektrophoretisch sind, wobei das Verfahren die Schritte umfasst:

- Durchströmen des Mediums mit den Partikeln erster Art und den Partikeln zweiter Art durch einen Kanal einer Trennvorrichtung;

- Wählen einer Frequenz größer als 500 kHz, wobei die Frequenz so gewählt wird, dass die Partikel erster Art bei der gewählten Frequenz positiv dielektrophoretisch sind und die Partikel zweiter Art bei der gewählten Frequenz negativ dielektrophoretisch sind;

- Erzeugen eines inhomogenen elektrischen Felds mit einer Felderzeugungsvorrichtung der Trennvorrichtung, wobei das inhomogene elektrische Feld eine Frequenz hat, die der gewählten Frequenz entspricht; und

- Ausüben einer dielektrophoretischen Kraft auf die Partikel erster Art und auf die Partikel zweiter Art in dem Kanal, und trennen der Partikel erster Art und der Partikel zweiter Art.

[0037] Das Verfahren kann von einer erfindungsgemäßen Trennvorrichtung durchgeführt sein oder werden. Eine erfindungsgemäße Trennvorrichtung kann dazu eingerichtet sein, das Verfahren durchzuführen.

[0038] Bei dem Verfahren kann eine Leistungsanpassung durchgeführt werden. Beim Durchführen der Leistungsanpassung kann eine Blindstromkompensation und/oder eine Impedanzanpassung durchgeführt werden.

[0039] Es kann vorgesehen sein, dass eine Impedanz eines Verstärkers der Felderzeugungsvorrichtung an eine Impedanz des Kanals mit dem darin aufgenommenen Medium angepasst werden kann.

[0040] Beim Ausüben einer dielektrophoretischen Kraft kann eine positive dieelektrophoretische Kraft auf die Partikel erster Art und eine negative dielektrophoretische Kraft auf die Partikel zweiter Art ausgeübt werden.

[0041] Das Verfahren kann nach dem Trennen der Partikel erster Art und der Partikel zweiter Art weiter umfassen:

- Ändern der Frequenz des inhomogenen elektrischen Felds oder Abschalten des inhomogenen elektrischen Felds; und

- Resuspendieren getrennter Partikel, bevorzugt getrennter Partikel erster Art.

[0042] Das Medium kann flüssig sein, wobei die Partikel erster Art eine höhere elektrische Leitfähigkeit als die Partikel zweiter Art aufweisen können. Das Medium kann eine wässrige Salzlösung sein oder aufweisen. Es kann vorgesehen sein, dass die Partikel erster Art Graphit aufweisen können. Alternativ oder zusätzlich können die Partikel zweiter Art Lithium-Eisenphosphat aufweisen.

[0043] Das Medium kann den Kanal mit einem Volumenstrom von mindestens 1 ml/min durchströmen. Die Strömung kann einen Volumenstrom haben, der nicht mehr mikrofluidisch ist.

[0044] Die Erfindung wird anhand der nachfolgenden Figuren weiter erläutert. Es zeigen:

Fig. 1: ein Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Vorrichtung;

Fig. 2: einen Querschnitt durch einen Kanal eines Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen Vorrichtung;

Fig. 3: ein Diagramm (**Fig.** 3a) der Impedanz und Reflektion und ein entsprechendes Smith-Diagramm (**Fig.** 3b), ohne Leistungsanpassung; und

Fig. 4: ein Diagramm (**Fig.** 4a) der Impedanz und Reflektion und ein entsprechendes Smith-Diagramm (**Fig.** 4b), mit Leistungsanpassung.

[0045] **Fig.** 1 zeigt eine beispielhafte Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Trennvorrichtung 10.

[0046] Die Trennvorrichtung 10 weist einen Kanal 40 auf. Durch den Kanal 40 kann ein Medium 50, beispielsweise ein Fluid, geströmt werden. Die Trennvorrichtung 10 weist weiterhin eine Felderzeugungsvorrichtung 30 auf. Die Felderzeugungsvorrichtung

30 ist dazu eingerichtet, ein inhomogenes elektrisches Feld zu erzeugen. Die Trennvorrichtung 10 ist dazu eingerichtet, eine dieelektrophoretische Kraft auf die durch den Kanal 40 in Durchströmen der Partikel 20, 21, 22 auszuüben. Die dieelektrophoretische Kraft kann durch die Felderzeugungsvorrichtung 30, und/oder ein von der Felderzeugungsvorrichtung 30 erzeugtes Feld, ausgeübt sein oder werden.

[0047] In dem Medium 50 können Partikel 20 aufgenommen und/oder enthalten sein. Die Partikel 20 können in dem Medium 50 suspendiert sein. Die Partikel 20 können Partikel erster Art 21 und/oder Partikeln zweiter Art 22 sein oder aufweisen. Insbesondere kann die Trennvorrichtung 10 dazu eingerichtet sein, Partikel erster Art 21 von Partikeln zweiter Art 22 mittels Dielektrophorese zu trennen.

[0048] Das Medium 50 kann ein Fluid sein. Das Medium 50 kann flüssig sein. In einigen Ausführungsformen kann das Medium 50 eine wässrige Salzlösung sein oder aufweisen. In einigen Ausführungsformen kann das Medium 50 Wasser sein oder aufweisen.

[0049] Mit „Partikel erster Art“ kann gemeint sein, dass die entsprechenden Partikel ein erstes Material aufweisen und/oder aus einem ersten Material bestehen. Mit „Partikel zweiter Art“ kann gemeint sein, dass die entsprechenden Partikel ein zweites Material aufweisen und/oder aus einem zweiten Material bestehen. Das erste Material kann von dem zweiten Material verschieden sein, und/oder mindestens eine verschiedene Materialeigenschaft haben.

[0050] Die Partikel erster Art 21 können Partikel einer solchen Art sein, die bei einer Frequenz von mehr als 500 kHz negativ dielektrophoretisch sind. Die Partikel zweiter Art können Partikel einer solchen Art sein, die bei einer Frequenz von mehr als 500 kHz positiv dielektrophoretisch sind.

[0051] In einigen Ausführungsformen können die Partikeln erster Art 21 bei einer Frequenz von mehr als 1 MHz positiv dielektrophoretisch sein. In einigen Ausführungsformen können die Partikeln erster Art 21 bei einer Frequenz von mehr als 1,3 MHz positiv dielektrophoretisch sein. In einigen Ausführungsformen können die Partikeln zweiter Art 22 bei einer Frequenz von mehr als 1 MHz negativ dielektrophoretisch sein. In einigen Ausführungsformen können die Partikeln zweiter Art 22 bei einer Frequenz von mehr als 1,3 MHz negativ dielektrophoretisch sein.

[0052] Es kann vorgesehen sein, dass die Partikel erster Art 21 eine Crossover-Frequenz haben können, die größer als 500 kHz sein kann. In einigen Ausführungsformen kann die Crossover-Frequenz der Partikel erster Art 21 größer als 1 Mhz, oder größer als 1,3 Mhz sein. Es kann vorgesehen sein, dass die Partikel zweiter Art 22 eine Crossover-Frequenz haben können, die größer als 500 kHz sein kann. In einigen Ausführungsformen kann die Crossover-Frequenz der Partikel zweiter Art 22 größer als 1 Mhz, oder größer als 1,3 Mhz sein.

[0053] Es kann vorgesehen sein, dass die Partikel erster Art 21 eine höhere Leitfähigkeit als die Partikel zweiter Art 22 haben können. In einigen Ausführungsformen können die Partikel erster Art 21 beispielsweise Graphitpartikel sein oder aufweisen, und/oder Graphit umfassen. In einigen Ausführungsformen können die Partikel zweiter Art 22 beispielsweise Lithium-Eisenphosphat-Partikel sein oder aufweisen, und/oder Lithium-Eisenphosphat umfassen. Die Partikel zweiter Art 22 können alternativ oder zusätzlich beispielsweise Polystyrolpartikel sein oder aufweisen, und/oder Polystyrol umfassen.

[0054] In einigen Ausführungsformen können die Partikel erster Art 21 leitend sein, und/oder ein leitendes Material umfassen. In einigen Ausführungsformen können die Partikel erster Art 21 metallisch sein, und/oder ein Metall umfassen. In einigen Ausführungsformen können die Partikel erster Art 21 Halbleiter sein, und/oder ein halbleitendes Material umfassen.

[0055] In einigen Ausführungsformen können die Partikel zweiter Art 22 Halbleiter sein oder aufweisen, und/oder ein halbleitendes Material umfassen. In einigen Ausführungsformen können die Partikel zweiter Art 22 leitend sein, und/oder ein leitendes Material umfassen. In einigen Ausführungsformen können die Partikel zweiter Art 22 metallisch sein, und/oder ein Metall umfassen.

[0056] Die Trennvorrichtung 10 kann dazu eingerichtet sein, wenn der Kanal 40 von einem Medium 50 mit Partikeln erster Art 21 und Partikeln zweiter Art 22 durchströmt wird, eine positive dieelektrophoretische Kraft auf die Partikel erster Art 21 und eine negative dielektrophoretische Kraft auf die Partikel zweiter Art 22 auszuüben. Damit kann die Trennvorrichtung 10 die Partikel erster Art 21 von den Partikeln zweiter Art 22 trennen.

[0057] Die Trennvorrichtung 10 kann einen Einlass 120 haben, durch den das Medium 50 in den Kanal 40 einströmen kann. Die Trennvorrichtung 10 kann ein Auslass 31 haben, durch den das Medium 50 aus den Kanal 40 ausströmen kann. Der Kanal 40 kann sich in eine Längsrichtung L der Trennvorrichtung 10 erstrecken.

[0058] Um den Kanal 40 herum kann eine Dichtung 100 vorgesehen sein. Alternativ oder zusätzlich kann der Kanal 40 in der Dichtung 100 angeordnet sein.

[0059] Die Felderzeugungsvorrichtung 30 kann einen Verstärker aufweisen. Der Verstärker kann eine Spannung zum Erzeugen des elektrischen Felds bereitstellen. Die Spannung kann eine sinusförmige Spannung sein, und/oder sinusförmig verlaufen.

[0060] In einigen Ausführungsformen kann eine Platine 60 vorgesehen sein. Die Platine 60 kann an oder bei dem Kanal 40 angeordnet sein. Die Platine 60 kann an oder bei einer oder der Dichtung 100, Schicht, und/oder Ausnehmung angeordnet sein. Wenn nur eine Platine 60 vorgesehen ist, so kann beispielsweise zwischen der Platine 60 und einer gegenüberliegenden weiteren Schicht eine oder die Schicht, z.B. eine oder die Dichtung 100, angeordnet sein kann. Die zwischen der Platine 60 und gegenüberliegenden weiteren Schicht angeordnete Schicht kann eine Ausnehmung aufweisen, die den Kanal 40 bilden kann.

[0061] Mindestens eine Elektrode 80 kann an, auf oder in der Platine 60 angeordnet sein. Mindestens eine Elektrode 80 kann an oder bei dem Kanal 40 angeordnet sein. Die Felderzeugungsvorrichtung kann die Elektrode 80 aufweisen.

[0062] Wenn die Trennvorrichtung nur eine Platine aufweist, so kann die Elektrode 80 eines, mehrere oder alle Merkmale oder Vorteile der als „erste“ Elektrode 80 bezeichneten Elektrode aufweisen. Die Elektrode 80 kann eine oder die erste Elektrode 80 sein. Wenn die Trennvorrichtung nur eine Platine aufweist, so kann die Platine 60 eines, mehrere oder alle Merkmale oder Vorteile der als „erste“ Platine 60 bezeichneten Platine aufweisen. Die Platine 60 kann eine oder die erste Platine 60 sein.

[0063] In einigen Ausführungsformen kann die Trennvorrichtung 100 eine (erste) Platine 60 und eine zweite Platine 70 aufweisen. Der Kanal 40 kann zwischen der (ersten) Platine 60 und der zweiten Platine 70 angeordnet sein. Es kann vorgesehen sein, dass zwischen der (ersten) Platine 60 und der zweiten Platine 70 eine Schicht, z.B. eine oder die Dichtung 100, angeordnet sein kann, wobei die Schicht eine Ausnehmung aufweisen kann, die den Kanal 40 bilden kann.

[0064] Die Felderzeugungsvorrichtung 30 kann eine (erste) Elektrode 80 und eine zweite Elektrode 90 aufweisen. In einigen Ausführungsformen kann vorgesehen sein, dass der Kanal 40 zwischen der (ersten) Elektrode 80 und der zweiten Elektrode 90 angeordnet sein kann. Die (erste) Elektrode 80 und die zweite Elektrode 90 können an sich gegenüberliegenden Seiten des Kanals 40 angeordnet sein. In einigen Ausführungsformen kann vorgesehen sein, dass die (erste) Elektrode 60 an, auf oder in einer oder der (ersten) Platine 80 angeordnet sein kann. Alternativ oder zusätzlich kann vorgesehen sein, dass die zweite Elektrode 90 an, auf oder in einer oder der zweiten Platine 70 angeordnet sein kann. In einigen Ausführungsformen kann die (erste) Platine 60 die (erste) Elektrode 80 aufweisen. Die zweite Platine 70 kann die zweite Elektrode 90 aufweisen.

[0065] Alternativ oder zusätzlich kann, wenn nur eine Platine 60 vorgesehen ist, die Elektrode 80 nur an oder bei einer Seite des Kanals 40 angeordnet sein.

[0066] Die (erst)e Elektrode 80 und/oder die zweite Elektrode 90 kann mit dem Verstärker elektrisch verbunden sein.

[0067] Der Kanal 40, und/oder die (erste) Platine 60 und/oder die zweite Platine 70, kann in einigen Ausführungsformen eine Länge von etwa 150 mm aufweisen. Der Kanal 40, und/oder die (erste) Platine 60 und/oder die zweite Platine 70, kann in einigen Ausführungsformen eine Breite B von etwa 45 mm aufweisen. Es kann vorgesehen sein, dass der Kanal einen Strömungsquerschnitt aufweist, der größer als 1 mm^2 sein kann. Die Dimension der Trennvorrichtung 10, des Kanals 40, der (ersten) Platine 60 und/oder der zweiten Platine 70 ist aber nicht auf solche Abmessung beschränkt.

[0068] Es kann vorgesehen sein, dass der Kanal 40, die Dichtung 50, die (erste) Platine 60, die zweite Platine 70, die (erste) Elektrode 80 und/oder die zweite Elektrode 90 zwischen Schichten und/oder Substraten 110 der Trennvorrichtung 10 angeordnet sein können, und/oder in eine oder mehrere Schichten und/oder Substrate 110 eingebettet sein können.

[0069] Die Trennvorrichtung 10 kann eine nicht in den Figuren gezeigte Pumpe aufweisen. Die Pumpe kann dazu eingerichtet sein, dass Medium 50 durch den Kanal 40 zu fördern. In einigen Ausführungsformen kann die Pumpe dazu eingerichtet sein, einen Volumenstrom von mindestens 1 ml/min durch den Kanal zu fördern. Die Pumpe kann fluidisch vor dem Einlass 120 angeordnet sein. Die Pumpe 120 kann dazu eingerichtet sein, einen Volumenstrom zu fördern, insbesondere durch den Kanal 40 zu fördern, der nicht mehr mikrofluidisch ist. Die Trennvorrichtung 10 und/oder das Trennverfahren kann damit nicht mehr mikrofluidisch sein.

[0070] Bei einem erfindungsgemäßen Verfahren zum Trennen von Partikeln einer ersten Art 21 von Partikeln einer zweiten Art 22 mittels Dielektrophorese wird ein oder das Medium 50 mit den Partikeln erster Art 21 und den Partikeln zweiter Art 22 durch den Kanal 40 der Trennvorrichtung 10 hindurchgeströmt. Die Partikel erster Art 21 können bei einer Frequenz größer als 500 kHz positiv dielektrophoretisch sein, und die Partikel zweiter Art können bei

einer Frequenz größer als 500 kHz negativ dielektrophoretisch ssein.

[0071] Es wird eine Frequenz größer als 500 kHz gewählt, wobei die Frequenz so gewählt wird, dass die Partikel erster Art 21 bei der gewählten Frequenz positiv dielektrophoretisch sind und die Partikel zweiter Art 22 bei der gewählten Frequenz negativ dielektrophoretisch sind. Ein elektrisches Feld wird mit einer Felderzeugungsvorrichtung 30 der Trennvorrichtung 10 erzeugt, wobei das elektrische Feld eine Frequenz hat, die der gewählten Frequenz entspricht. Eine dielektrophoretischen Kraft wird auf die Partikel erster Art 21 und auf die Partikel zweiter Art 22 in dem Kanal 40 ausgeübt, und die Partikel erster Art 21 und die Partikel zweiter Art22 getrennt.

[0072] Das elektrische Feld kann ein inhomogenes elektrisches Feld sein oder aufweisen.

[0073] Beim Ausüben einer dielektrophoretischen Kraft kann eine positive dieelektrophoretische Kraft auf die Partikel erster Art 21 und eine negative dielektrophoretische Kraft 22 auf die Partikel zweiter Art ausgeübt werden.

[0074] In einigen Ausführungsformen kann vorgesehen sein, dass nach dem Trennen der Partikel erster Art 21 und der Partikel zweiter Art 22 die Frequenz des elektrischen Felds geändert werden kann. Die Frequenz kann derart geändert werden, dass getrennte Partikel 20, bevorzugt getrennte Partikel erster Art 21, resuspendieren können.

[0075] In einigen Ausführungsformen kann vorgesehen sein, dass nach dem Trennen der Partikel erster Art 21 und der Partikel zweiter Art 22 das elektrische Feld abgeschaltet werden kann. Es kann vorgesehen sein, dass nach dem Abschalten des elektrischen Felds getrennte Partikel 20, bevorzugt getrennte Partikel erster Art 21, resuspendieren können.

[0076] Die Trennvorrichtung 10 kann eine Leistungsanpassung aufweisen. Die Leistungsanpassung kann eine Blindstromkompensation sein oder aufweisen, und/oder dazu eingerichtet sein, eine Blindstromkompensation durchzuführen. Alternativ oder zusätzlich kann die Leistungsanpassung eine Impedanzanpassung sein oder aufweisen, und/oder dazu eingerichtet sein, eine Impedanzanpassung durchzuführen.

[0077] **Fig.** 2 zeigt beispielhaft ein Querschnitt durch einen Kanal 40 eines Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen Trennvorrichtung 10. In dem Medium 50 können Partikel erster Art 21 und Partikel zweiter Art 22 vorhanden sein. Die Partikel erster Art 21 können bei einer Frequenz von mehr als 500 kHz positiv die dielektrophoretisch sein. Die Partikel zweiter Art 22 können bei einer Frequenz von mehr als 500 kHz negativ dielektrophoretisch sein.

[0078] Bei einer Erzeugung eines elektrischen Feldes bei einer entsprechend gewählten Frequenz von mehr als 500 kHz können die Partikel erster Art 21 zu der Felderzeugungsvorrichtung 30, der (ersten) Platine 60 und/oder der zweiten Platine 70, und/oder der (ersten) Elektrode 80 und zweiten Elektrode 90, hin bewegt sein oder werden. Die Partikel erster Art 21 können zu den Seitenwänden des Kanals 40 hin bewegt sein oder werden. Die entsprechende Bewegung der Partikel erster Art 21 kann aufgrund einer entsprechenden positive dieelektrophoretische Kraft auf die Partikel erster Art 21 erfolgen.

[0079] Bei einer Erzeugung eines elektrischen Feldes bei einer entsprechend gewählten Frequenz von mehr als 500 kHz können die Partikel zweiter Art 22 von der Felderzeugungsvorrichtung 30, der (ersten) Platine 60 und/oder der zweite Platine 70, und/oder der (ersten) Elektrode 80 und zweiten Elektrode 90, weg bewegt sein oder werden. Die Partikel zweiter Art 22 können zu der Mitte des Kanals 40 hin bewegt sein oder werden. Die entsprechende Bewegung der Partikel erster Art 21 kann aufgrund einer entsprechenden positive dieelektrophoretische Kraft auf die Partikel erster Art 21 erfolgen.

[0080] Damit kann eine Trennung der Partikel erster Art 21 von den Partikeln zweiter Art 22 erfolgen. Es kann vorgesehen sein, die Frequenz des elektrischen Feldes derart zu wählen, dass sich ein guter Trennungsgrad der Partikel erster Art 21 und Partikel zweiter Art 22 ergeben kann. Es kann vorgesehen sein, die Frequenz des elektrischen Feldes in Abhängigkeit der Art der Partikel 20, insbesondere der in Abhängigkeit der Art der Partikel erster Art 21 und der Art der Partikel zweiter Art 22 zu wählen.

[0081] In einigen Ausführungsformen kann, wenn nur eine Platine 60 vorgesehen ist, anstatt der zweiten Platine 70 eine der Platine 60 gegenüberliegende weitere Schicht vorgesehen sein. In einigen Ausführungsformen kann keine Elektrode an, in oder auf der gegenüberliegende weitere Schicht angeordnet sein. Es kann vorgesehen sein, dass Partikel erster Art 21 und/oder zweiter Art 22 entsprechend zu der Platine 60 und/oder der Elektrode 80 hin oder wegbewegt sein oder werden können. Es kann vorgesehen sein, dass die gegenüberliegende weitere Schicht bezüglich der Partikel „neutral“ sein kann, insbesondere keine Kraft aus Richtung von der gegenüberliegende weitere Schicht und/oder ausgehend von der gegenüberliegenden weiteren Schicht auf die Partikel wirkt.

[0082] Damit eine Trennvorrichtung 10 mit einer ausreichenden Spannung versorgt werden kann, müssen die bei der gewählten Frequenz von mehr

als 500 kHz auftretenden Reflexionen bzw. stehenden Wellen in den Leitungen und am Aufbau 11 auf ein Minimum reduziert werden.

[0083] Der Aufbau 11 kann ein Teil der Trennvorrichtung 10 sein, und/oder die Trennvorrichtung 10 den Aufbau 11 aufweisen. Mit Aufbau 11 kann derjenige Teil der Trennvorrichtung 10 ohne einen oder den Verstärker gemeint sein. Der Aufbau 11 kann dabei den Kanal 40, die (erste) Platine 60 und/oder zweite Platine 70, und/oder die (erste) Elektrode 80 und/oder zweite Elektrode 90 umfassen. Der Aufbau 11 kann eines oder mehrere Kabel umfassen. Es kann vorgesehen sein, dass der Aufbau 11 einen oder den Verstärker nicht umfasst. In einigen Ausführungsformen kann der Aufbau 11 auch das in dem Kanal 40 aufgenommene Medium 50, und/oder die in dem Medium 50 aufgenommenen Partikel 20, 21, 22 umfassen. Ein beispielhafter Aufbau 11 kann in **Fig.** 1 gezeigt sein.

[0084] In einigen Ausführungsformen kann dies kann geschehen, indem eine Leistungsanpassung durchgeführt und/oder vorgesehen sein kann. Bei oder mit der Leistungsanpassung kann die Impedanz des Aufbaus 11 auf die Ausgangsimpedanz des Verstärkers angepasst werden. Die Ausgangsimpedanz des Verstärkers beträgt üblicherweise 50 Ω, ist aber nicht zwingend auf einen solchen Wert beschränkt.

[0085] Es kann vorgesehen sein, dass der Aufbau 11 und/oder dessen Impedanz angepasst werden kann. Die Impedanz des Aufbaus 11 kann beispielsweise von der Leitfähigkeit des Mediums 50 und der Partikel 20, 21, 22 abhängen. Die Leitfähigkeit des Mediums 50 und die Konzentration der Partikel 20, 21, 22 können hierbei genutzt werden, um die Impedanz des Aufbaus 11 anzupassen, wodurch der ohmsche Widerstand des Aufbaus beeinflusst werden kann. Bei sehr hohen Frequenzen werden jedoch zunehmend kapazitive Eigenschaften des Aufbaus 11 wichtig, da die Elektroden 80, 90 das Medium 50 im Kanal 40 polarisieren können, wodurch ein Verschiebungsstrom entstehen kann.

[0086] Um diese kapazitiven Eigenschaften des Aufbaus 11 anzupassen, und um die Impedanz des Aufbaus 11 möglichst nahe an die des Verstärkers zu anzugleichen, kann in einigen Ausführungsformen beispielsweise ein Elektrodenabstand, z.B. zwischen der (ersten) Elektrode 80 und der zweiten Elektrode 90, oder zwischen jeweiligen Elektroden der (ersten) Elektrode 80 und/oder zweiter Elektrode 90, geeignet gewählt sein oder werden. Alternativ oder zusätzlich kann vorgesehen sein, dass die Elektrodenoberfläche der (ersten) Elektrode 80 und/oder zweiten Elektrode 90 geeignet gewählt werden kann. In einigen Ausführungsformen kann die Anzahl der (ersten) Elektroden 80 und/oder zweiten Elektroden 90, und/oder deren Breite und/oder Dicke, geeignet gewählt werden.

[0087] Alternativ oder zusätzlich kann vorgesehen sein, dass die Permittivität des Mediums 50 geeignet gewählt sein oder werden kann, um die kapazitiven Eigenschaften des Aufbaus anzupassen und/oder einzustellen, und/oder ein Medium 50 mit einer entsprechenden Permittivität zu wählen.

[0088] In einigen Ausführungsformen kann alternativ oder zusätzlich vorgesehen sein, die Frequenz des elektrischen Feldes anzupassen und/oder geeignet zu wählen, und/oder elektrische Zuleitungen mit passendem Wellenwiderstand zu wählen, um die kapazitiven Eigenschaften des Aufbaus 11 anzupassen und/oder einzustellen.

[0089] Wenn die Trennvorrichtung 10 einen oder mehrere iDEP-Aufbauten aufweist, und/oder der Aufbau 11 ein iDEP-Aufbau ist oder aufweist, so kann vorgesehen sein, ein Material und/oder eine Oberfläche der Schüttung, und/oder ein Material und/oder eine Oberfläche einer isolierenden Struktur, geeignet zu wählen oder anzupassen, um die kapazitiven Eigenschaften des Aufbaus 11 anzupassen und/oder einzustellen.

[0090] Wenn die Trennvorrichtung 10 einen oder mehrere eDEP-Aufbauten aufweist, und/oder der Aufbau 11 ein eDEP-Aufbau ist oder aufweist, so kann vorgesehen sein, eine geeignete Isolation auf einer oder mehrerer Oberflächen der (ersten) Elektrode 80 und/oder der zweiten Elektrode 90 aufzubringen, um die kapazitiven Eigenschaften des Aufbaus 11 anzupassen und/oder einzustellen.

[0091] Alternativ oder zusätzlich kann eine Blindstromkompensation durchgeführt sein oder werden, und/oder eine Blindstromkompensation vorgesehen sein. Die Leistungsanpassung kann eine oder die Blindstromkompensation sein oder umfassen.

[0092] Bei der Leistungsanpassung und/oder Blindstromkompensation können Kondensatoren, Spulen, Induktivitäten, Widerstände oder Kombinationen dieser parallel oder in Reihe zum anzupassenden Element, d.h. dem Aufbau geschaltet sein oder werden. Die Leistungsanpassung kann eine oder mehrere Spulen, Kondensatoren, Induktivitäten, Widerstände oder Kombinationen dieser aufweisen.

[0093] Die **Fig.** 3 und 4, insbesondere **Fig.** 3a, 3b und **Fig.** 4a, 4b, zeigen mit einem Netzwerkanalysator gemessenen Betrag der Impedanz 210, Reflexion 220 und Impedanz 220 eines Aufbaus 11 einer Trennvorrichtung 10 ohne Leistungsanpassung und/oder Blindstromkompensation (**Fig.** 3a und 3b), und eines Aufbaus 11 einer Trennvorrichtung 10 mit Leistungsanpassung und/oder Blindstromkompen-

sation (**Fig.** 4a und **Fig.** 4b). Die **Fig.** 3a und 4a zeigen dabei den Betrag der Impedanz 210 und die Reflexion 220 in dB als Funktion der Frequenz. Die **Fig.** 3b und 4b zeigen ein Smith-Diagramm der Impedanz 220.

[0094] Die Reflexion 220 entspricht der Eingangsreflexion S11. Die Eingangsreflexion S11 kann z.B. eine Eingangsreflexion des Verstärkers und/oder des Aufbaus 11 sein.

[0095] Beispielhaft wurde bei dem Aufbau 11 der **Fig.** 4a und 4b zur Blindstromkompensation und/oder Leistungsanpassung eine Spule mit einer Induktivität vom 1 µH (1 µH Spule) parallel zu dem Verstärker geschaltet. Es sind aber auch Schaltungen mehr Spulen, und/oder mindestens einer Spule mit einer davon verschiedenen Induktivität, möglich. Alternativ oder zusätzlich kann eine oder die Spule in einigen Ausführungsformen in Reihe geschaltet sein. Die Blindstromkompensation und/oder Leistungsanpassung kann in einigen Ausführungsformen alternativ oder zusätzlich andere oder weitere elektrische Komponenten aufweisen, z.B. Widerstände und/oder Kondensatoren.

[0096] Es kann vorgesehen sein, dass eine oder die Spule, z.B. die 1 µH Spule, parallel zum Aufbau 11 geschaltet ist.

[0097] Vergleicht man **Fig.** 3a (d.h. nur der Aufbau 11 ohne Spule) mit **Fig.** 4a (Aufbau 11 mit parallel geschalteter 1 µH Spule), ist ein deutlicher Abfall der Reflexion 221 bei einer Frequenz von 1.3 MHz erkennbar, vgl. Punkt P1. Zudem hat in **Fig.** 4a hat der Betrag der Impedanz 200 dort einen (kleinen) Peak bei P1 bzw. bei der entsprechenden Frequenz von etwa 1,3 MHz. Dies entspricht der Blindstromkompensation. Die Spule kompensiert hier die kapazitiven Ströme des Aufbaus, und der Betrag der Impedanz 210 springt um mehr als eine Größenordnung nach oben, verglichen mit der Messung ohne Kompensation.

[0098] Damit kann eine entsprechende Frequenz von 1.3 MHz angelegt werden, wenn diese 1 µH Spule parallel zum Verstärker geschaltet wird, um entsprechend ein elektrisches Feld mit einer hohen Frequenz von mehr als 500 kHz bei einer Minimierung von Reflektionen zu erzeugen. Damit können durch eine Trennvorrichtung 10 und ein entsprechendes Trennverfahren Partikel erster Art 21, die bei einer Frequenz von mehr als 1,3 MHz positiv dielektrophorisch sind, von Partikeln zweiter Art 21, die bei einer Frequenz von mehr als 1,3 MHz negativ dielektrophorisch sind, getrennt werden.

[0099] Der zweite hohe Peak bei etwa 15 MHz (Punkt P2 in **Fig.** 3a und 4a) des Betrags der Impedanz 200 ist durch das Kabel der Anordnung erzeugt. Bei dem Ausführungsbeispiel müsste damit für hohe Frequenzen (>1.5 MHz) ein anderes Kabel bspw. Koaxialkabel verwendet werden.

[0100] Für die den **Fig.** 3 und 4 entsprechenden Trennvorrichtungen 10 und Verfahren wurde ein Abscheidegrad von Partikeln erster Art 21 und Partikel zweiter Art 22 bestimmt. Als Partikel zweiter Art 22 wurden Polystyrolpartikel (PS) gewählt. PS Partikel zeigen ein frequenzabhängiges Verhalten in Suspensionen mit niedriger Leitfähigkeit und hoher Permittivität. PS Partikel können als Modellpartikel für Halbleiter angesehen werden. Die Partikel können z.B. einen Durchmesser von 500 nm haben. Als Partikel erster Art 21 wurden Graphitpartikel gewählt. Graphitpartikel können insbesondere leitfähige Partikel sein.

[0101] Ohne Blindstromkompensation wurden als Frequenzen 100 kHz und 500 kHz gewählt. Mit Blindstromkompensation und/oder 1 µH Spule wurde als Frequenz zusätzlich 1,3 MHz gewählt.

[0102] Als Medium 50 wurde Wasser mit einer Leitfähigkeit von 1,2 µS/cm verwendet. Angestrebt wird eine möglichst hohe Abscheideeffizienz bei Partikeln erster Art 21, z.B. den Graphitpartikeln, zu haben und eine geringe bei den Partikeln zweiter Art 22, z.B. den PS Partikeln, um eine Trennung zu ermöglichen. Als Verstärker kam ein 50 Ω Verstärker (A1020-75-400, Dr. Hubert GmbH) zum Einsatz, dessen Ausgabespannung mit einem Oszilloskop überwacht wurde. Der Volumenstrom betrug dabei 1 ml/min und die Spannung 90 Vpp (Volt peak to peak).

[0103] Hinsichtlich der Partikel zweiter Art 22, bzw. den PS Partikeln, wurden 71.3% bei 100 kHz und 17.6 % bei 500 kHz (Mittelwert aus drei Messungen) abgeschieden. Der Rückgang beim Abscheidegrad von 100kHz auf 500 kHz ist mit der frequenzabhängigen Polarisierbarkeit der Partikel zu erklären und setzt sich bei noch höheren Frequenzen fort. Dies ist auf das halbleitende Verhalten der PS Partikel zurückzuführen.

[0104] Bei einer Frequenz von 1,3 MHz konnte kein Rückhalt der Partikel zweiter Art 22, z.B. den PS Partikeln, mehr detektiert werden, was auf negative Dielektrophorese schließen lässt. Der Umschlagspunkt von positiver zu negativer Dielektrohorese konnte somit durch die Blindstromkompensation überschritten werden. Das Signal stieg sogar beim Anlegen der Spannung leicht an (~10 %) was darauf hindeuten könnte, dass zuvor immobilisierte Partikel zweiter Art 22 im Kanal 40 nun unter dem Einfluss von negativer Dielektrophorese den Kanal 40 verlassen können.

[0105] Weiterhin müssen zudem aber auch die Partikel erster Art 21, bzw. die Graphitpartikel, bei hohen

Frequenzen zurückgehalten werden, um eine Trennung zu ermöglichen. Als Rückhalt wurde 98.3% (100 kHz), 92.67% (500 kHz) und 91 % (1,3 MHz) gemessen. Damit ergibt sich eine gute Trennung der Partikel erster Art 21 und der Partikel zweiter Art 22 bei einer Frequenz von 1,3 MHz, mithin bei einer Frequenz größer als 500 kHz.

[0106] Durch die Blindstromkompensation konnte damit der Frequenzbereich deutlich erweitert werden, so dass auch Partikel mit einer Crossover-Frequenz von mehr als 500 kHz, bevorzugt mehr als 1 MHz, getrennt werden können.

[0107] In einigen Ausführungsformen kann genau eine Spule vorgesehen sein. In einigen Ausführungsformen kann mindestens eine Spule vorgesehen sein. In einigen Ausführungsformen können mindestens fünf, oder genau fünf, Spulen vorgesehen sein. In einigen Ausführungsformen können mindestens fünfzehn, oder genau fünfzehn, Spulen vorgesehen sein.

[0108] Je nach Verschaltung, Anzahl und/oder Anordnung der Spulen kann die Frequenz, bei oder mit der die Partikel getrennt sein oder werden können, eingestellt und/oder gewählt sein oder werden. In einer beispielhaften Ausführungsform mit fünfzehn Spulen kann die Frequenz bei etwa 11 MHz liegen und/oder etwa 11 MHz betragen. In einigen Ausführungsformen kann die Frequenz bis zu 11 MHz betragen. Die erläuterten Ausführungsformen sind lediglich beispielhaft. Die Frequenz kann in einigen Ausführungsformen auch mehr oder weniger als 11 MHz sein. Die Frequenz kann in einigen Ausführungsformen in Abhängigkeit der zu trennenden Partikel gewählt sein oder werden, beispielsweise in Abhängigkeit des Materials und/oder der Art der zu trennenden Partikel.

[0109] Die in den Ansprüchen, der Beschreibung und/oder den Figuren offenbarten Merkmale können einzeln oder in beliebiger Kombination für die Verwirklichung der Erfindung wesentlich sein.

Bezugszeichenliste

10	Trennvorrichtung
11	Aufbau
20	Partikel
30	Felderzeugungsvorrichtung
40	Kanal
50	Medium
60	Platine
70	zweite Platine
80	Elektrode
90	zweite Elektrode
100	Dichtung
110	Substrat
120	Einlass
130	Auslass
200	Betrag der Impedanz
210	Reflektion
220	Impedanz
L	Länge
B	Breite
P1	Punkt
P2	Punkt

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 Nicht-Patentliteratur

- High-throughput dielecrophoretic separator based on printed circuit boards“, Giesler et al., Electrophoresis, Vol. 44 Issue 1-2, doi: 10.1002/elps.202200131 [0010]

Patentansprüche

1. Trennvorrichtung (10) zum Trennen von Partikeln einer ersten Art (21), die bei einer Frequenz von mehr als 500 kHz positiv dielektrophoretisch sind, von Partikeln einer zweiten Art (22), die bei einer Frequenz von mehr als 500 kHz negativ dielektrophoretisch sind, mittels Dielektrophorese, wobei die Trennvorrichtung (10) eine Felderzeugungsvorrichtung zum Erzeugen eines inhomogenen elektrischen Felds und einen durchströmbaren Kanal (40) aufweist, wobei die Trennvorrichtung (10) dazu eingerichtet ist, wenn der Kanal (40) von einem Medium (50) mit darin aufgenommenen Partikeln erster Art (21) und Partikeln zweiter Art (22) durchströmt wird, eine dielektrophoretische Kraft auf die Partikel erster Art (21) und die Partikel zweiter Art (22) durch das inhomogene elektrische Feld auszuüben und die Partikel erster Art (21) von den Partikeln zweiter Art (22) in dem Kanal (40) zu trennen, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Felderzeugungsvorrichtung dazu eingerichtet ist, ein inhomogenes elektrisches Feld zu erzeugen, dessen Frequenz größer als 500 kHz ist.

2. Trennvorrichtung (10) nach Anspruch 1, die eine Leistungsanpassung, bevorzugt eine Blindstromkompensation und/oder eine Impedanzanpassung, aufweist.

3. Trennvorrichtung (10) nach Anspruch 2, wobei die Leistungsanpassung mindestens eine Spule umfasst, die bevorzugt parallel zu der Felderzeugungsvorrichtung geschaltet ist, besonders bevorzugt parallel zu einem Verstärker der Felderzeugungsvorrichtung, wobei bevorzugt die Leistungsanpassung mindestens fünf Spulen, besonders bevorzugt mindestens fünzehn Spulen, umfasst.

4. Trennvorrichtung (10) nach einem der vorangegangenen Ansprüche, die dazu eingerichtet ist, eine positive dielektrophoretische Kraft auf die Partikel erster Art (21) und eine negative dielektrophoretische Kraft auf die Partikel zweiter Art (22) auszuüben, wenn der Kanal (40) von einem Medium (50) mit darin aufgenommenen Partikeln erster Art (21) und Partikeln zweiter Art (22) durchströmt wird.

5. Trennvorrichtung (10) nach einem der vorangegangenen Ansprüche, bei der der Kanal (40) einen Strömungsquerschnitt aufweist, der größer als 1 mm^2 ist.

6. Trennvorrichtung (10) nach einem der vorangegangenen Ansprüche, wobei die Trennvorrichtung (10) eine Platine (60) aufweist, die an oder bei dem Kanal (40) angeordnet ist, wobei die Felderzeugungsvorrichtung eine Elektrode (80) zum Erzeugen einer dielektrophoretischen Kraft aufweist, wobei die Elektrode (80) an, auf oder in der Platine (60) angeordnet ist.

7. Trennvorrichtung (10) nach Anspruch 6, wobei die Trennvorrichtung (10) eine zweite Platine (70) und eine zwischen der Platine (60) und der zweiten Platine (70) angeordnete Schicht aufweist, wobei die Schicht eine Ausnehmung aufweist, die den Kanal (40) bildet, wobei sich die Ausnehmung bevorzugt in eine Längsrichtung (L) der Trennvorrichtung (10) erstreckt, wobei bevorzugt die Felderzeugungsvorrichtung eine zweite Elektrode (90) aufweist, wobei bevorzugt die Elektrode (80) und die zweite Elektrode (90) an sich gegenüberliegenden Seiten des Kanals (40) angeordnet sind, und/oder wobei bevorzugt die zweite Elektrode (90) an, auf oder in der zweiten Platine (70) angeordnet ist.

8. Trennvorrichtung (10) nach einem der vorangegangenen Ansprüche, die eine Pumpe aufweist, die dazu eingerichtet ist, das Medium (50) durch den Kanal zu fördern, bevorzugt mit einem Volumenstrom von mindestens 1 ml / min.

9. Verfahren zum Trennen von Partikeln einer ersten Art (21) von Partikeln einer zweiten Art (22) mittels Dielektrophorese, wobei die Partikel erster Art (21) und die Partikel zweiter Art (22) in einem Medium (50) aufgenommen sind, wobei die Partikel erster Art (21) bei einer Frequenz größer als 500 kHz positiv dielektrophoretisch und die Partikel zweiter Art (22) bei einer Frequenz größer als 500 kHz negativ dielektrophoretisch sind, wobei das Verfahren die Schritte umfasst:
- Durchströmen des Mediums (50) mit den Partikeln erster Art (21) und den Partikeln zweiter Art (22) durch einen Kanal (40) einer Trennvorrichtung (10);
- Wählen einer Frequenz größer als +500 kHz, wobei die Frequenz so gewählt wird, dass die Partikel erster Art (21) bei der gewählten Frequenz positiv dielektrophoretisch sind und die Partikel zweiter Art (22) bei der gewählten Frequenz negativ dielektrophoretisch sind;
- Erzeugen eines inhomogenen elektrischen Felds mit einer Felderzeugungsvorrichtung der Trennvorrichtung (10), wobei das inhomogene elektrische Feld eine Frequenz hat, die der gewählten Frequenz entspricht; und
- Ausüben einer dielektrophoretischen Kraft auf die Partikel erster Art (21) und auf die Partikel zweiter Art (22) in dem Kanal, und trennen der Partikel erster Art (21) und der Partikel zweiter Art (22).

10. Verfahren nach Anspruch 9, bei dem eine Leistungsanpassung, bevorzugt eine Blindstromkompensation und/oder eine Impedanzanpassung, durchgeführt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, bei dem eine Impedanz eines Verstärkers der Felderzeu-

gungsvorrichtung an eine Impedanz des Kanals (40) mit dem darin aufgenommenen Medium (50) angepasst wird.

12. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche 9 bis 11, bei dem beim Ausüben einer dielektrophoretischen Kraft eine positive dieelektrophoretische Kraft auf die Partikel erster Art (21) und eine negative dielektrophoretische Kraft auf die Partikel zweiter Art (22) ausgeübt wird.

13. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche 9 bis 12, das nach dem Trennen der Partikel erster Art (21) und der Partikel zweiter Art (22) weiter umfasst:
- Ändern der Frequenz des inhomogenen elektrischen Felds oder Abschalten des inhomogenen elektrischen Felds; und
- Resuspendieren getrennter Partikel, bevorzugt getrennter Partikel erster Art (21).

14. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche 9 bis 13, bei dem das Medium (50) flüssig ist, bevorzugt eine wässrige Salzlösung aufweist, und wobei die Partikel erster Art (21) eine höhere elektrische Leitfähigkeit als die Partikel zweiter Art (22) aufweisen, wobei bevorzugt die Partikel erster Art (21) Graphit aufweisen und/oder bevorzugt die Partikel zweiter Art (22) Lithium-Eisenphosphat aufweisen.

15. Verfahren nach einem der vorangegangenen Ansprüche 9 bis 14, bei dem das Medium (50) mit einem Volumenstrom von mindestens 1 ml / min den Kanal (40) durchströmt.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

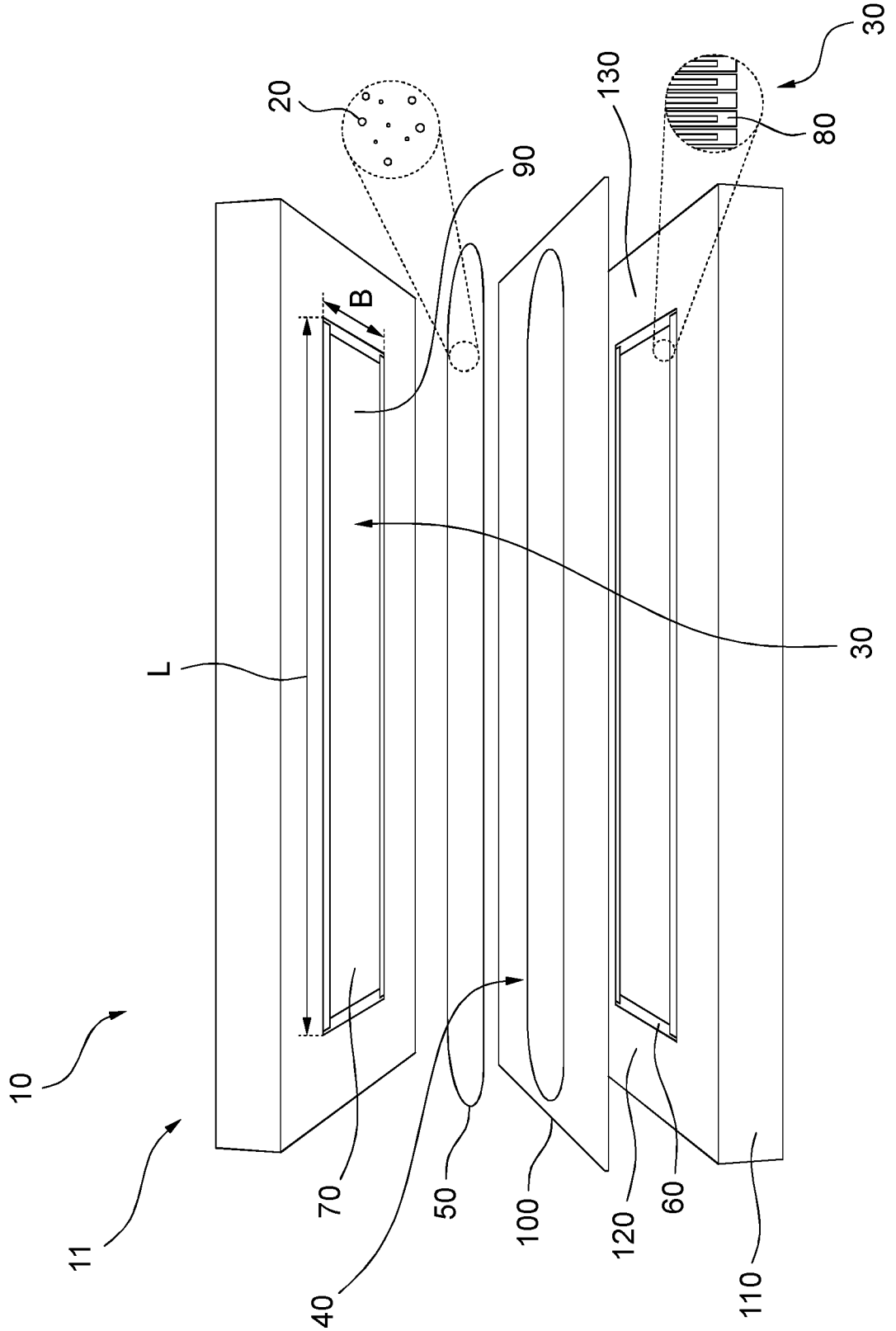


FIG. 1

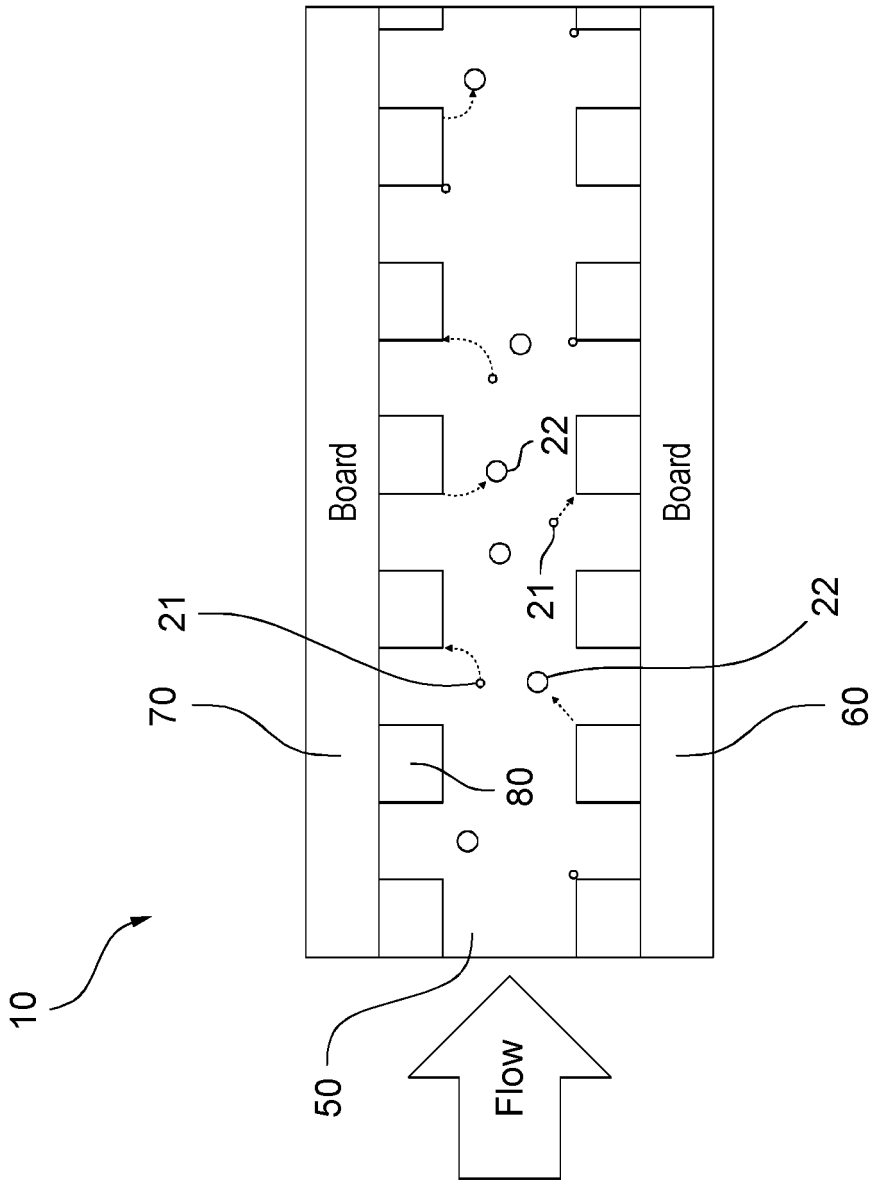


FIG. 2

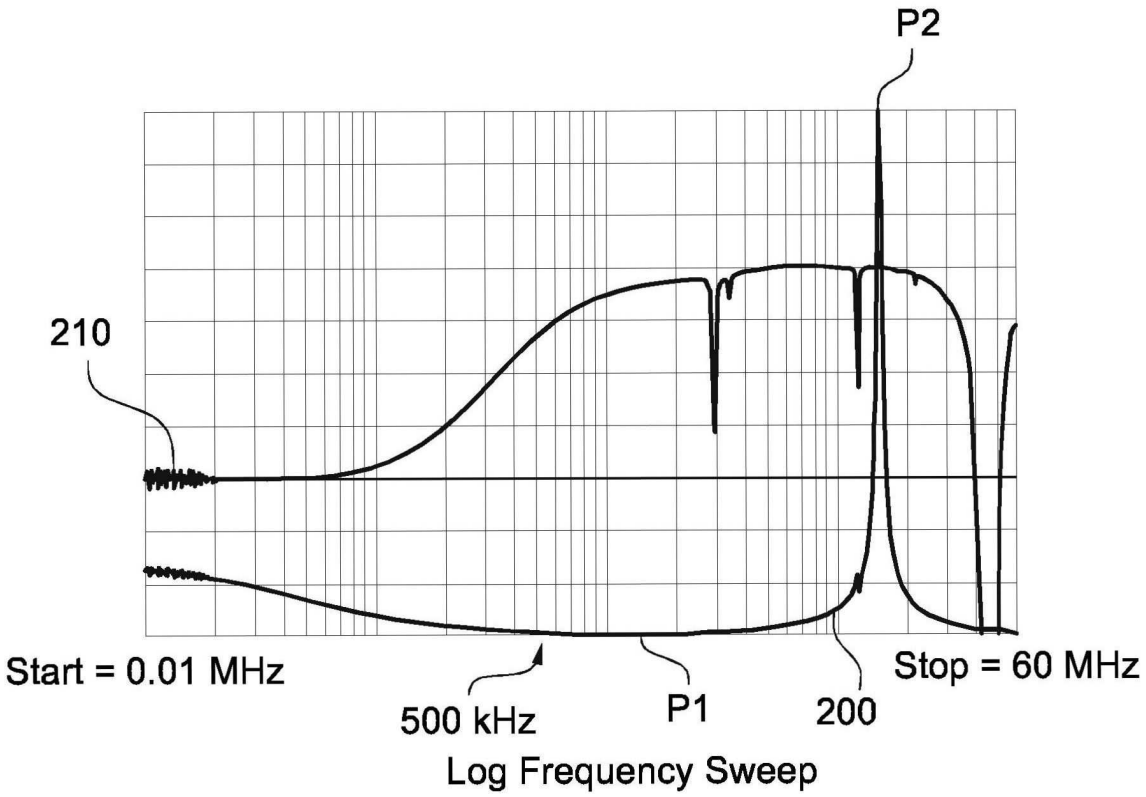

P2
210
Start = 0.01 MHz
500 kHz
P1
200
Stop = 60 MHz
Log Frequency Sweep

FIG. 3a

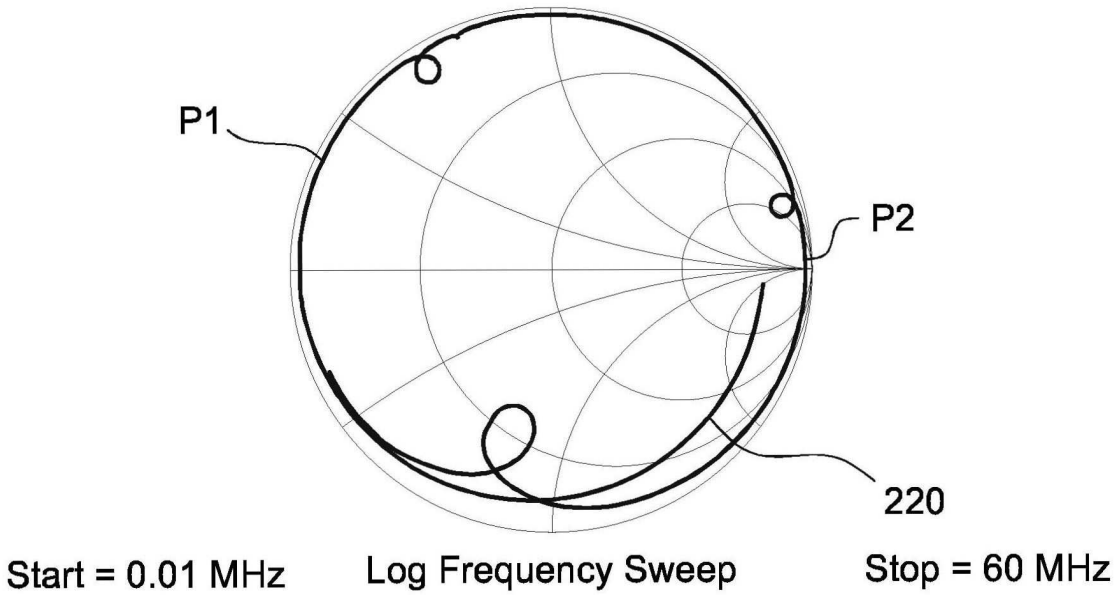

P1
P2
220
Start = 0.01 MHz
Log Frequency Sweep
Stop = 60 MHz

FIG. 3b

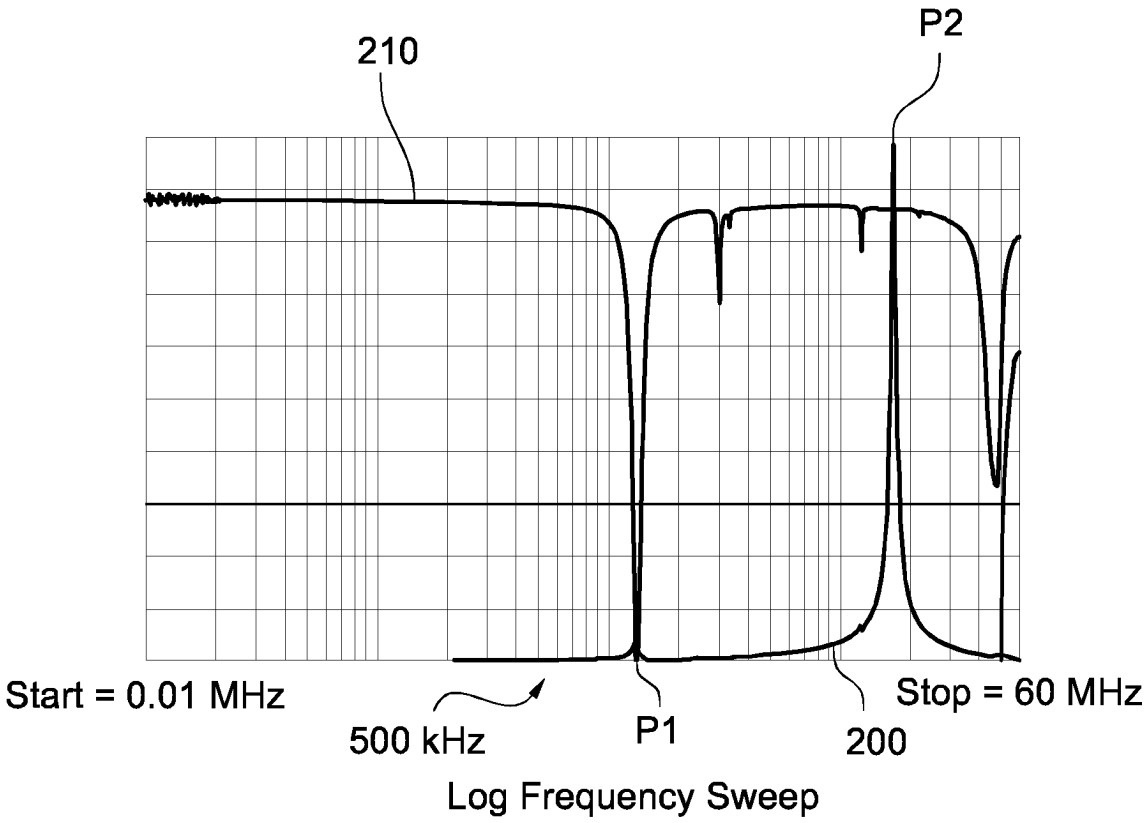


FIG. 4a

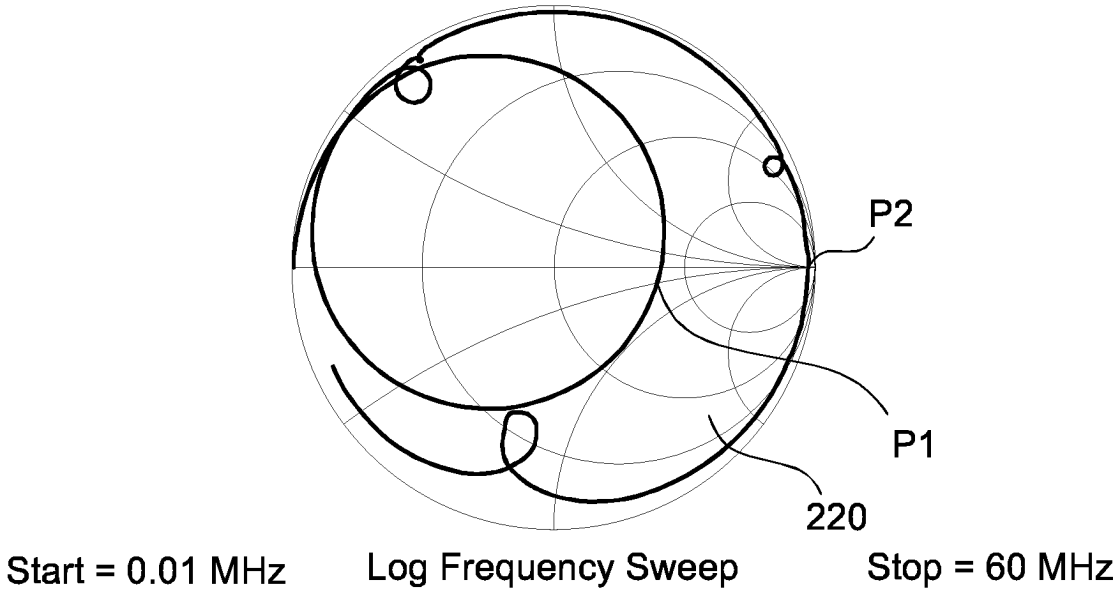


FIG. 4b

 Das Dokument wurde durch die Firma Luminess hergestellt.