



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 60 2005 003 671 T2 2008.04.30**

(12)

## Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 1 764 846 B1**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **H01L 41/24 (2006.01)**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **60 2005 003 671.7**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **05 255 753.5**

(96) Europäischer Anmeldetag: **16.09.2005**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **21.03.2007**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **05.12.2007**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **30.04.2008**

(73) Patentinhaber:

**Delphi Technologies, Inc., Troy, Mich., US**

(74) Vertreter:

**Manitz, Finsterwald & Partner GbR, 80336  
München**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB,  
GR, HU, IE, IS, IT, LI, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT, RO,  
SE, SI, SK, TR**

(72) Erfinder:

**Goat, Christopher A., Offham, Kent, ME19 5NU,  
GB; Cooke, Michael P., Gillingham, Kent, ME7  
1DR, GB**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Polarisierung ferroelektrischer Materialien**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Polen eines Körpers aus einem ferroelektrischen Material, das eine Vielzahl von ferroelektrischen Schichten umfasst, die in einem Stapel angeordnet sind, um eine Massenpiezoelektrizität zu induzieren. Insbesondere, jedoch nicht ausschließlich, betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Polen von mehrschichtigen ferroelektrischen Körpern von der Art, die zur Verwendung in piezoelektrischen Aktuatoren für Kraftstoffeinspritzsysteme für Verbrennungsmotoren geeignet ist.

**[0002]** [Fig. 1](#) ist eine schematische Darstellung eines piezoelektrischen Aktuators **2** von der Art, die üblicherweise verwendet wird, um eine Ventilnadel einer Kraftstoffeinspritzeinrichtung **5** (in [Fig. 2](#) gezeigt) für einen Kompressionszündungsverbrennungsmotor zu betätigen. Der Aktuator **2** umfasst einen gepolten piezoelektrischen Stapel **2a** mit einer Vielzahl von piezoelektrischen Schichten **4**, die durch eine Vielzahl von inneren Elektroden, die eine positive und eine negative Elektrodengruppe **6a** bzw. **6b** bilden, getrennt sind. Die Fig. ist lediglich illustrativ und in der Praxis würde der Stapel eine größere Anzahl an Schichten und Elektroden als die gezeigten umfassen. Pfeile, veranschaulicht durch die Pfeile **4a** und **4b**, zwischen benachbarten ineinander greifenden Elektroden **6a**, **6b** geben die Hauptrichtung der Restpolarisation der in den piezoelektrischen Schichten **4** enthaltenen Dipole an; wobei die Pfeilspitze eines jeden Pfeiles **4a**, **4b** die Position des negativen Pols eines jeden Dipols angibt, und das Pfeilende die Position des positiven Pols eines jeden Dipols angibt. Die Pfeile sind lediglich illustrativ und in der Praxis wären viel mehr Dipole vorhanden als in den Fig. angege-

**[0003]** Die Elektroden der positiven Gruppe **6a** greifen in die Elektroden der negativen Gruppe **6b**, wobei die Elektroden der positiven Gruppe **6a** mit einer positiven äußeren Elektrode **8a** verbunden sind und die Elektroden der negativen Gruppe **6b** mit einer negativen äußeren Elektrode **8b** verbunden sind. Die positive und die negative äußere Elektrode **8a**, **8b** nehmen im Gebrauch eine angelegte Spannung auf, die ein pulsierendes elektrisches Feld zwischen den benachbarten ineinander greifenden Elektroden **6a**, **6b** erzeugt. Das pulsierende elektrische Feld ändert sich schnell in Bezug auf seine Stärke. Dies wiederum bewirkt, dass sich der Stapel **2a** entlang der Richtung des angelegten Feldes ausdehnt und zusammenzieht.

**[0004]** Eine untere Endkappe **10b** befindet sich benachbart zu der untersten piezoelektrischen Schicht **4** des Stapels **2a**, und eine obere Endkappe **10a** befindet sich benachbart zu der obersten piezoelektrischen Schicht **4** des Stapels **2a**. Die untere Endkap-

pe **10b** ist mit einer Einspritzeinrichtungsventilnadel **7** (in [Fig. 2](#) gezeigt) entweder direkt oder über eine mechanische und/oder hydraulische Zwischenkupplung gekoppelt. Wenn sich der Stapel **2a** beim Anlegen des elektrischen Feldes ausdehnt oder zusammenzieht wird somit bewirkt, dass sich die Einspritzeinrichtungsventilnadel **7** bewegt, um die Einspritzung von unter Druck gesetztem Kraftstoff in einen zugeordneten Motorzylinder (nicht gezeigt) zu steuern.

**[0005]** Unter Bezugnahme auf [Fig. 2](#) liegt die Einspritzeinrichtungsventilnadel **7**, um ein Einspritzen von Kraftstoff in den Zylinder zu verhindern, fest an einem Einspritzeinrichtungsdüsensitz **15b** an; dadurch wird verhindert, dass Kraftstoff durch Kraftstoffkanäle **15** in der Düse **15** strömt. Dies wird dadurch erreicht, dass eine Spannung von 200 V an die Elektroden der positiven Gruppe **6a** angelegt wird, die bewirkt, dass sich der Stapel **2a** ausdehnt. Die Elektroden der negativen Gruppe **6b** werden bei 0 V gehalten. Da die Kraftstoffeinspritzung nur eine relativ kurze Zeitspanne in Anspruch nimmt, steht die Kraftstoffeinspritzeinrichtungsnadel **7** mit dem zugeordneten Sitz **15b** für etwa 95 % des Arbeitszyklus der Kraftstoffeinspritzeinrichtung auf die zuvor erwähnte Weise in Eingriff.

**[0006]** Um Kraftstoff in den Zylinder einzuspritzen, wird die an die Elektroden der positiven Gruppe **6a** angelegte Spannung schnell verringert, was somit bewirkt, dass sich der Stapel **2a** zusammenzieht. Der Betrag, um den die Spannung verringert wird, ist abhängig von dem Druck des Kraftstoffes. Beispielsweise fällt die Spannung, die an die Elektroden der positiven Gruppe **6a** angelegt ist, bei einem minimalen Druck von etwa 200 Bar (z.B. wenn der Motor im Leerlauf läuft) auf 20 V und fällt die an die Elektroden der positiven Gruppe **6a** angelegte Spannung bei einem maximalen Druck von etwa 2000 Bar auf -20 V, was die Elektroden der positiven Gruppe **6a** kurz negativ macht.

**[0007]** Damit sich der piezoelektrische Aktuator **2** auf die zuvor erwähnte Weise verhält, ist es notwendig, den piezoelektrischen Stapel **2a** zu polen. Ein bekanntes Verfahren zum Polen des piezoelektrischen Stapels **2a** wird unter Bezugnahme auf die [Fig. 3](#) bis [Fig. 5](#) beschrieben.

**[0008]** Ein Beispiel eines ungepolten, mehrschichtigen, ferroelektrischen Körpers, aus dem der piezoelektrische Stapel **2a** besteht, ist in [Fig. 3](#) schematisch gezeigt. Eine mehrschichtige Struktur **3** ist aus einer Vielzahl von relativ dünnen, ferroelektrischen, keramischen Schichten **4** gebildet, wie in [Fig. 1](#). Ein Beispiel für ein ferroelektrisches Material ist Bleizirkonat-Titanat, dem Fachmann auch als PZT bekannt.

**[0009]** Die mehrschichtige Struktur **3** wird gepolt, indem eine Potenzialdifferenz über die positive und die

negative äußere Elektrode **8a**, **8b** angelegt wird, die wiederum die Potenzialdifferenz über die inneren Gruppen von positiven und negativen Elektroden **6a**, **6b** anlegen. Um eine Polung der in dem piezoelektrischen Material enthaltenen Dipole zu erreichen, müssen die Dipole einem elektrischen Feld ausgesetzt werden, das stark genug ist, um eine permanente kristallographische Neuausrichtung und Dipolneuorientierung zu bewirken. Die minimale elektrische Feldstärke, die erforderlich ist, um diese Änderung zu bewirken, wird als „koerzitive“ Feldstärke bezeichnet. Infolge der sich ändernden Polarität des inneren elektrischen Feldes ändert sich die Polungsrichtung der Dipole innerhalb des piezoelektrischen Materials über die gesamte Struktur, wie durch die Pfeile angegeben, die durch die Pfeile **4c** und **4d** veranschaulicht sind, orthogonal zu den inneren Gruppen von positiven und negativen Elektroden **6a**, **6b** in [Fig. 4](#).

**[0010]** Eine ferroelektrische Mehrschicht wird nur dann gepolt, wenn sie dem koerzitiven elektrischen Feld ausgesetzt wird. Wie in [Fig. 5](#) gezeigt, werden die mittleren Gebiete der ferroelektrischen Schichten **4**, die zwischen benachbarten, entgegengesetzt geladenen Elektroden **6a**, **6b** enthalten sind (als mittleres Gebiet **14** gezeigt), gepolt, sobald das koerzitive Feld an die mehrschichtige Struktur **3** angelegt worden ist. Allerdings sind die Enden der in den Seitengebieten **12** enthaltenen piezoelektrischen Schichten **4** keinem elektrischen Feld unterworfen, da sich benachbarte Elektroden in diesen Gebieten auf demselben Potenzial befinden; daher bleibt das piezoelektrische Material in den Seitengebieten **12** ungepolt. Dies führt zu einer ferroelektrischen Belastungsdiskontinuität zwischen den Gebieten gepolter und ungepolder Keramik, wodurch das ungepolte Material unter Zug gesetzt und das gepolte Material zusammengedrückt wird. Dies deshalb, da, wenn ein ferroelektrisches Material gepolt wird, die kristallographische Neuausrichtung eine permanente und eine temporäre Dehnung entlang der Achse des angelegten Feldes erzeugt. In der mehrschichtigen Struktur **3** tritt diese Dehnung nur innerhalb des ineinander greifenden mittleren Gebietes **14** auf. Infolgedessen ist das gepolte Material eingeklemmt, was den Hub des Aktuators verringern kann. Das ungepolte Material zeigt infolge der in ihm durch die Dehnung des mittleren Gebietes **14** erzeugten Zugkräfte die Tendenz, zu brechen und zu reißen. Diese Risse **16** sind in [Fig. 1](#) gekennzeichnet. Ferner kann eine Längsverschiebung auftreten, wenn das Einklemmen des gepolten Materials durch das ungepolte Material in den Seitengebieten **12** nicht gleichmäßig ist.

**[0011]** Wenn der Aktuator verwendet wird, werden die Risse **16** infolge der durch das schnell pulsierende elektrische Feld auferlegten wiederholten Zugspannung verschlimmert, was die Verbundstruktur in den Rändern weiter ermüdet. Zusätzlich zu der durch

das pulsierende Feld erzeugten temporären Dehnung des Stapels **2a** bewirken das permanente und das temporäre Dehnen des gepolten mittleren Gebietes **14**, dass die Endkappen **10a**, **10b** seitlich zusammengedrückt und gebogen werden, was sich in einer Kuppelbildung der Endkappen **10a**, **10b** manifestiert, wie durch die schattierten Bereiche der Endkappen **10a**, **10b** veranschaulicht ist.

**[0012]** Ferroelektrische Materialien und ihre Polung in Verbindung damit sind in der gemeinsam angehängten Patentanmeldung EP 1 516 373 A2 des Anmelders erläutert.

**[0013]** Die US 2002/0 117 153 offenbart ein Vorbehandlungsverfahren für einen elektromechanischen Umformer, bei dem der Umformer vor dem eigentlichen Betrieb mit einem elektrischen Vorbehandlungssignal betätigt wird, um einen vordefinierten Betriebspunkt in Übereinstimmung mit dem Vorbehandlungssignal festzulegen.

**[0014]** Die US 6 520 423 offenbart eine piezoelektrisch betätigte Kraftstoffeinspritzeinrichtung zum Betätigen eines Einspritzeinrichtungsventiles eines Verbrennungsmotors.

**[0015]** Es ist ein Ziel der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren zum Polen eines Körpers aus einem ferroelektrischen Material bereitzustellen, das die zuvor erwähnten Probleme beseitigt oder verringert.

**[0016]** Gemäß der vorliegenden Erfindung ist ein Verfahren zum Polen eines ferroelektrischen Körpers vorgesehen, der zur Verwendung in einer Kraftstoffeinspritzeinrichtung eines Verbrennungsmotors geeignet ist, wobei das Verfahren die Schritte umfasst: Bereitstellen eines ferroelektrischen Körpers, der einen Stapel aus ferroelektrischen Schichten aufweist, wobei benachbarte Schichten durch innere Elektroden, die eine erste Gruppe und eine zweite Gruppe von Elektroden bilden, getrennt sind; Aufbringen eines mehrachsigen Druckes auf den ferroelektrischen Körper; und Erzeugen eines elektrischen Feldes zwischen der ersten und der zweiten Gruppe von Elektroden, um den ferroelektrischen Körper zu polen.

**[0017]** Die Erfindung, wie in Anspruch 1 definiert, bietet den Vorteil, dass, wenn der Körper während des Polens einem mehrachsigen Druck ausgesetzt ist, eine gleichmäßige permanente kristallographische Neuausrichtung und Dipolorientierung stattfindet.

**[0018]** In einer bevorzugten Ausführungsform wird der mehrachsige Druck mit Hilfe eines Fluids aufgebracht. Zusätzlich kann das Fluid unter Druck gesetzt sein. Das Fluid kann ein dielektrisches Fluid wie z. B. Fluorinert™ sein oder alternativ kann das Fluid ein Kraftstoff wie z. B. Diesel sein.

**[0019]** Vorzugsweise umfasst das Verfahren ferner den Schritt, dass der ferroelektrische Körper innerhalb der Kraftstoffeinspritzeinrichtung positioniert wird, bevor das elektrische Feld zwischen der ersten und der zweiten Gruppe von Elektroden erzeugt wird. Dies ist von Vorteil, da ein Polen des Körpers innerhalb der Einspritzeinrichtung bequemer und möglicherweise kostengünstiger ist, als den Körper getrennt von der Einspritzeinrichtung zu polen und den gepolten Körper danach in der Kraftstoffeinspritzeinrichtung zu montieren.

**[0020]** Das Verfahren kann ferner den Schritt umfassen, dass das elektrische Feld zwischen der ersten und der zweiten Gruppe von Elektroden entfernt wird, bevor der mehrachsige Druck von dem ferroelektrischen Körper entfernt wird. Das elektrische Feld kann dadurch erzeugt werden, dass eine Potenzialdifferenz zwischen der ersten und der zweiten Gruppe von Elektroden angelegt wird. Darüber hinaus können die erste und die zweite Gruppe von Elektroden ineinander greifen.

**[0021]** In einer weiteren Ausführungsform kann das Verfahren ferner die Schritte umfassen: Bereitstellen einer ersten Elektrode an einer ersten Stirnfläche des Körpers; Bereitstellen einer zweiten Elektrode an einer zweiten Stirnfläche des Körpers, wobei die zweite Fläche der ersten Fläche entgegengesetzt ist; Erzeugen eines anfänglichen elektrischen Feldes zwischen den ersten und zweiten Elektroden als eine erste Stufe eines zweistufigen Polungsverfahrens; Entfernen des anfänglichen elektrischen Feldes zwischen den ersten und zweiten Elektroden; und Erzeugen des elektrischen Feldes zwischen der ersten und der zweiten Gruppe von Elektroden als eine zweite Stufe des zweistufigen Polungsverfahrens. Die zweistufige Polung des Körpers verringert ferner vorteilhafterweise die ferroelektrische Belastungsdiskontinuität innerhalb des Körpers.

**[0022]** In einer noch weiteren Ausführungsform kann das Verfahren ferner den Schritt umfassen, dass das anfängliche elektrische Feld von zwischen den ersten und zweiten Elektroden vor dem Schritt des Aufbringens des mehrachsigen Druckes auf den ferroelektrischen Körper entfernt wird. Vorzugsweise deckt die erste Elektrode die Oberfläche der ersten Stirnfläche ab und die zweite Elektrode deckt die Oberfläche der zweiten Stirnfläche ab. Das anfängliche elektrische Feld kann dadurch erzeugt werden, dass eine Potenzialdifferenz zwischen den ersten und zweiten Elektroden angelegt wird.

**[0023]** Die Erfindung wird nun, lediglich beispielhaft, unter Bezugnahme auf die beiliegenden Zeichnungen beschrieben, in denen:

**[0024]** [Fig. 1](#) einen gepolten piezoelektrischen Aktuator zur Verwendung in einer Kraftstoffeinspritzein-

richtung veranschaulicht, der piezoelektrische Schichten umfasst, die durch ineinander greifende Elektroden getrennt sind;

**[0025]** [Fig. 2](#) eine Kraftstoffeinspritzeinrichtung für einen Verbrennungsmotor von der Art veranschaulicht, in der der piezoelektrische Aktuator von [Fig. 1](#) verwendet werden kann;

**[0026]** [Fig. 3](#) einen ungepolten, mehrschichtigen, ferroelektrischen Körper veranschaulicht, aus dem der Aktuator von [Fig. 1](#) besteht;

**[0027]** [Fig. 4](#) den mehrschichtigen ferroelektrischen Körper von [Fig. 3](#) nach dem Polen veranschaulicht, wobei die Polungsrichtung der Dipole über den gesamten Körper schematisch gezeigt ist;

**[0028]** [Fig. 5](#) eine vergrößerte Ansicht eines Teils des mehrschichtigen Körpers der [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) ist;

**[0029]** [Fig. 6](#) einen piezoelektrischen Aktuator ähnlich dem Aktuator von [Fig. 1](#) während eines bekannten Polungsverfahrens veranschaulicht, wobei die Polungsrichtung der Dipole über den gesamten Körper schematisch gezeigt ist;

**[0030]** [Fig. 7](#) einen piezoelektrischen Aktuator ähnlich dem Aktuator von [Fig. 1](#) während des Polens gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung veranschaulicht, wobei die Polungsrichtung der Dipole über den gesamten Körper schematisch gezeigt ist;

**[0031]** [Fig. 8](#) den piezoelektrischen Stapel von [Fig. 7](#) nach einem einstufigen Polen veranschaulicht; und

**[0032]** [Fig. 9](#) einen piezoelektrischen Stapel von [Fig. 7](#) nach einem zweistufigen Polen veranschaulicht.

**[0033]** Im Hinblick auf das zuvor erwähnte Problem des Reißens wurde vorgeschlagen, während des Polens einen einachsigen Druck auf den Stapel **2a** aufzubringen, wie in [Fig. 6](#) gezeigt. Druck wird auf den Stapel **2a** entlang der Achse des elektrischen Feldes aufgebracht, wie durch die Pfeile **18** gezeigt ist. Dieser Druck wirkt der Dehnung des Stapels **2a** teilweise entgegen, sodass die zuvor beschriebene Dehnungsbelastung während des Polens begrenzt ist. Somit ist die Neigung des ferroelektrischen Materials zu reißen im Wesentlichen verringert, da die ungepolten Gebiete eine geringere Zugbeanspruchung erfahren. Allerdings begrenzt die Kraft, die notwendig ist, um ein Reißen zu verhindern, die Dipolneuorientierung, was nur zu einer teilweisen Polung führt. Dies ist in [Fig. 6](#) schematisch als Zwischenräume **20** in der Polungsrichtung der Dipole veranschaulicht.

Dem Fachmann ist gut bekannt, dass die Dipole in einem ungepolten ferroelektrischen Material zufällig orientiert und verteilt sind. Ein Aufbringen eines Druckes auf ein ferroelektrisches Material entlang einer Achse verhindert daher eine Neuausrichtung einiger der Dipole entlang dieser Achse. Es wurde festgestellt, dass das Anlegen eines stärkeren elektrischen Feldes an den Stapel **2a** dieses Problem in einem gewissen Ausmaß vermindert. Wenn das starke elektrische Feld jedoch entfernt wird, entpolt der einachsige Druck das ferroelektrische Material des Stapels **2a** ferroelastisch.

**[0034]** Die vorliegende Erfindung sieht ein Verfahren zum Polen eines ferroelektrischen Körpers vor, sodass das Material zur Verwendung in einem piezoelektrischen Aktuator geeignet ist, wobei die zuvor erwähnten Probleme überwunden sind.

**[0035]** In einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, wie in [Fig. 7](#) gezeigt, wird der piezoelektrische Stapel **2a** während des Polungsprozesses einem Druck über seine gesamte Oberfläche ausgesetzt, wie durch die schattierten Pfeile **22** angegeben, und unter Verwendung eines einstufigen Polungsprozesses gepolt. Eine Möglichkeit, diese mehrachsige Kraft aufzubringen, besteht darin, den Stapel **2a** in ein unter Druck gesetztes Fluid einzutauchen. Typischerweise wird das verwendete Fluid ein dielektrisches Fluid wie z. B. Fluorinert™ sein. Während der Stapel **2a** unter hydrostatischem Druck steht, wird eine Potenzialdifferenz, die groß genug ist, um das koerzitive elektrische Feld zu übersteigen, über die inneren positiven und negativen Elektroden **6a**, **6b** angelegt. Die koerzitive elektrische Feldstärke liegt typischerweise zwischen 1 und 2 kV/mm. Ein Erhöhen der Temperatur des Stapels **2a** während des Polens reduziert jedoch die koerzitive Feldstärke unter 1 kV/mm. Nachdem das Polen erfolgt ist, wird das koerzitive elektrische Feld entfernt, bevor der Stapel **2a** aus dem unter Druck gesetzten Fluid entnommen wird. Wenn der Druck entfernt wird, während das koerzitive elektrische Feld auf den Stapel **2a** wirkt, findet eine temporäre Dehnung des Stapels **2a** statt, die bewirkt, dass sich in dem ferroelektrischen Material Risse bilden.

**[0036]** Wie aus [Fig. 8](#) ersichtlich, erzeugt das Aufbringen eines Druckes über die gesamte Oberfläche des Stapels **2a** eine gleichmäßige permanente kristallografische Neuausrichtung und Dipolneuorientierung und nicht die teilweise Polung, die mit dem Polen des Stapels **2a** unter einem einachsigen Druck verbunden ist. Dies ist durch die Einheitlichkeit der Pfeile, veranschaulicht durch die Pfeile **4c** und **4d**, veranschaulicht, die die Polungsrichtung der Dipole innerhalb des piezoelektrischen Materials angeben. Eine gleichmäßige Neuausrichtung erfolgt deshalb, da die zufällig orientierten Dipole in allen Richtungen dem gleichen Druck unterworfen sind, sodass kein

einachsiger Nettodruck auf irgendeinem Dipol vorhanden ist, der eine Kraft erzeugt, die seine Neuausrichtung verhindert.

**[0037]** Im Gebrauch ist der piezoelektrische Stapel **2a**, der unter Verwendung des Verfahrens der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung gepolt wurde, weniger anfällig gegenüber einem Reißen, da der Stapel **2a** hydrostatisch begrenzt ist; vorteilhafterweise verhindert die hydrostatische Begrenzung nicht die Domänenneuorientierung.

**[0038]** Auch wenn der piezoelektrische Stapel **2a**, der unter Verwendung der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung gepolt wurde, weniger anfällig gegenüber einem Reißen ist, kann er dennoch einer gewissen Restspannung unterworfen sein. In einer zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung werden diese Spannungen verbessert und weitere Vorteile werden erzielt, indem der piezoelektrische Stapel **2a** in ein unter Druck gesetztes Fluid eingetaucht wird, wie oben beschrieben, und dann ein zweistufiger Polungsprozess durchgeführt wird.

**[0039]** Die erste Stufe des Prozesses umfasst das Anbringen einer Elektrode an jeder der entsprechenden äußeren Flächen **11a**, **11b** der Endkappen **10a**, **10b** des piezoelektrischen Stapels **2a**, wobei jede Elektrode eine Querschnittsfläche aufweist, die ausreicht, um die Endkappen **10a**, **10b** abzudecken. Dann wird ein erstes koerzitives elektrisches Feld zwischen den Elektroden angelegt, wodurch der gesamte Stapel **2a** einschließlich der Seitengebiete **12** und der Endkappen **10a**, **10b** gepolt wird. Danach wird das erste koerzitive Feld von dem Stapel **2a** entfernt, während der hydrostatische Druck aufrecht erhalten wird.

**[0040]** In einer alternativen Ausführungsform, die die zweistufige Polung verwendet, kann das erste koerzitive Feld ohne das Aufbringen eines hydrostatischen Druckes angelegt werden. Allerdings verringert das Eintauchen des Stapels **2a** in ein dielektrisches Fluid das Risiko, dass die Oberfläche des Stapels abbricht. Nachdem das erste koerzitive Feld entfernt ist, wird dann ein zweites koerzitives Feld über die inneren Elektroden **6a**, **6b** angelegt.

**[0041]** Das zweite Anlegen eines Feldes, das höher ist als das koerzitive Feld, erzeugt die wechselnde Polungsrichtung in dem Stapel **2a**, wie zuvor beschrieben. Daher besitzen abwechselnde Schichten des Stapels **2a** ein koerzitives elektrisches Feld, das in der entgegengesetzten Richtung zu dem ersten koerzitativen Feld wirkt. Dies bewirkt, dass die Dipole in diesen Schichten eine Polungsrichtungsumkehr erfahren. Wenn der zweistufige Polungsprozess jedoch unter einem einachsigen Druck ausgeführt wird, wie im Stand der Technik, wird die Dipolrichtungsumkehr

auf eine ähnliche Weise verhindert, wie zuvor für eine einstufige Polung unter einem einachsigen Druck beschrieben ist. Das Anordnen des Stapels **2a** unter einem mehrachsigen Druck während der zweistufigen Polung erlaubt daher eine ungehinderte gleichmäßige Dipolrichtungssumkehr. Der hydrostatische Druck stellt auch sicher, dass die umkehrenden ferroelektrischen Schichten zusammengedrückt bleiben. Dies reduziert das Risiko eines Reißens oder Ablösens der ferroelektrischen/inneren Elektroden-schichten.

**[0042]** Zusätzlich zum gleichmäßigen Polen des piezoelektrischen Stapels **2a** erzeugt das Kombinieren der zweistufigen Polung mit einem mehrachsigen Druck eine kleinere ferroelektrische Belastungsdiskontinuität zwischen den Seitengebieten **12** und dem mittleren Gebiet **14** und reduziert das Risiko eines Reißens oder Ablösens weiter. Dies deshalb, da die Schichten, die die Dipole enthalten, die keine Richtungssumkehr erfahren haben, dieselbe permanente Dehnung entlang der Richtung des ersten koerzitativen Feldes erfahren, wie das ferroelektrische Material in den Seitengebieten **12**. Dies ist in [Fig. 9](#) veranschaulicht, in der die Pfeile **24** die Polungsrichtung der Dipole in den Seitengebieten **12** angeben, und die Pfeile **4c**, **4d** die Polungsrichtung der Dipole in dem mittleren Gebiet **14** angeben.

**[0043]** Eine Anwendung des piezoelektrischen Aktuators der zuvor erwähnten Art ist ein Aktuator für eine Kraftstoffeinspritzeinrichtung, wie der in der gleichzeitig anhängigen Europäischen Patentanmeldung EP 0 995 901 A1 des Anmelders beschriebene (wie in [Fig. 2](#) gezeigt). Wie oben stehend beschrieben, ist der Aktuator **2** hier in einem Kunststoffmantel oder -gehäuse **9** aufgenommen, um ihn vor seiner Umgebung zu schützen. Der eingehauste Aktuator **2** ist in einem Kraftstoffvolumen angeordnet, das als das Stapelvolumen **13** bezeichnet wird und im Gebrauch mit Kraftstoff bei Einspritzdrücken gefüllt ist.

**[0044]** Ein Polen des piezoelektrischen Stapels **2a** – entweder durch eine einstufige oder eine zweistufige Polung – unter hydrostatischem Druck reproduziert den Druck, den der Stapel **2a** im Gebrauch erfährt. Wie einzusehen ist, verleiht das Polen des Stapels **2a** unter ähnlichen Bedingungen wie den im Gebrauch erfahrenen dem Aktuator **2** eine größere Stabilität und es reduziert die Wahrscheinlichkeit von Rissbildungen während des Gebrauches. Demgemäß ist die Lebensdauer des Aktuators **2** erhöht, was der Einspritzeinrichtung **5** größere Zuverlässigkeit gibt.

**[0045]** In einer dritten Ausführungsform der Erfindung kann die hydrostatische Polung des piezoelektrischen Stapels **2a** mit dem Montageprozess der Kraftstoffeinspritzeinrichtung **5** integriert sein, wodurch die Herstellungskosten vorteilhafterweise reduziert sind und die Produktion vereinfacht ist. Der ungeladene Stapel **2a** wird in der Einspritzeinrichtung **5**

montiert, bevor unter Druck gesetztes Fluid wie z. B. Diesel oder Fluorinert™ in das Stapelvolumen **13** eingeleitet wird. Wenn der Stapel **2a** in der Einspritzrichtung **5** montiert ist, kann entweder eine einstufige Polung oder die zweite Stufe einer zweistufigen Polung stattfinden. Der Kunststoffmantel **9** verhindert vorteilhafterweise, dass während des Polens und im Gebrauch das äußere Fluid in die Elektroden und/oder das piezoelektrische Material des Stapels eindringt.

**[0046]** Die Erfindung kann in Kombination mit einem anderen bekannten Verfahren verwendet werden, das Oberflächenüberschlag-Effekte verhindert. Durch Aufbringen einer Form von Passivierung auf die Oberfläche eines piezoelektrischen Aktuators **2** wie z. B. ein Polymergehäuse mit einer relativ hohen Isolationsfestigkeit und indem der Aktuator **2** dann einem mehrachsigen Druck unterworfen wird, wird die Passivierung in engeren Kontakt mit dem piezoelektrischen Aktuator **2** gedrückt und reduziert dadurch das Risiko von Oberflächenüberschlag-Effekten weiter.

**[0047]** Die vorliegende Erfindung kann in anderen spezifischen Formen ausgeführt sein, ohne von ihren wesentlichen Merkmalen abzuweichen. Demgemäß wird auf die Ansprüche verwiesen, die den Umfang der Erfindung angeben.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Polen eines ferroelektrischen Körpers (**2a**), der zur Verwendung in einer Kraftstoffeinspritzeinrichtung (**5**) eines Verbrennungsmotors geeignet ist, wobei das Verfahren die Schritte umfasst:

Bereitstellen eines ferroelektrischen Körpers (**2a**), der einen Stapel aus ferroelektrischen Schichten (**4**) aufweist, wobei benachbarte Schichten (**4**) durch innere Elektroden (**6a**, **6b**), die eine erste Gruppe (**6a**) und eine zweite Gruppe (**6b**) von Elektroden bilden, getrennt sind;

Aufbringen eines mehrachsigen Druckes (**22**) auf den ferroelektrischen Körper (**2a**); und Erzeugen eines elektrischen Feldes zwischen der ersten (**6a**) und der zweiten (**6b**) Gruppe von Elektroden, um den ferroelektrischen Körper (**2a**) zu polen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der mehrachsige Druck (**22**) mit Hilfe eines Fluids aufgebracht wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei das Fluid unter Druck gesetzt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, wobei das Fluid ein dielektrisches Fluid wie z. B. Fluorinert™ ist.

5. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, wobei das

Fluid ein Kraftstoff wie z. B. Diesel ist.

den ersten und zweiten Elektroden angelegt wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Verfahren ferner den Schritt umfasst, dass der ferroelektrische Körper (**2a**) innerhalb der Kraftstoffeinspritzeinrichtung (**5**) positioniert wird, bevor das elektrische Feld zwischen der ersten (**6a**) und der zweiten (**6b**) Gruppe von Elektroden erzeugt wird.

Es folgen 8 Blatt Zeichnungen

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, ferner umfassend den Schritt, dass das elektrische Feld zwischen der ersten (**6a**) und der zweiten (**6b**) Gruppe von Elektroden entfernt wird, bevor der mehrachsige Druck (**22**) von dem ferroelektrischen Körper (**2a**) entfernt wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das elektrische Feld dadurch erzeugt wird, dass eine Potenzialdifferenz zwischen der ersten (**6a**) und der zweiten (**6b**) Gruppe von Elektroden angelegt wird.

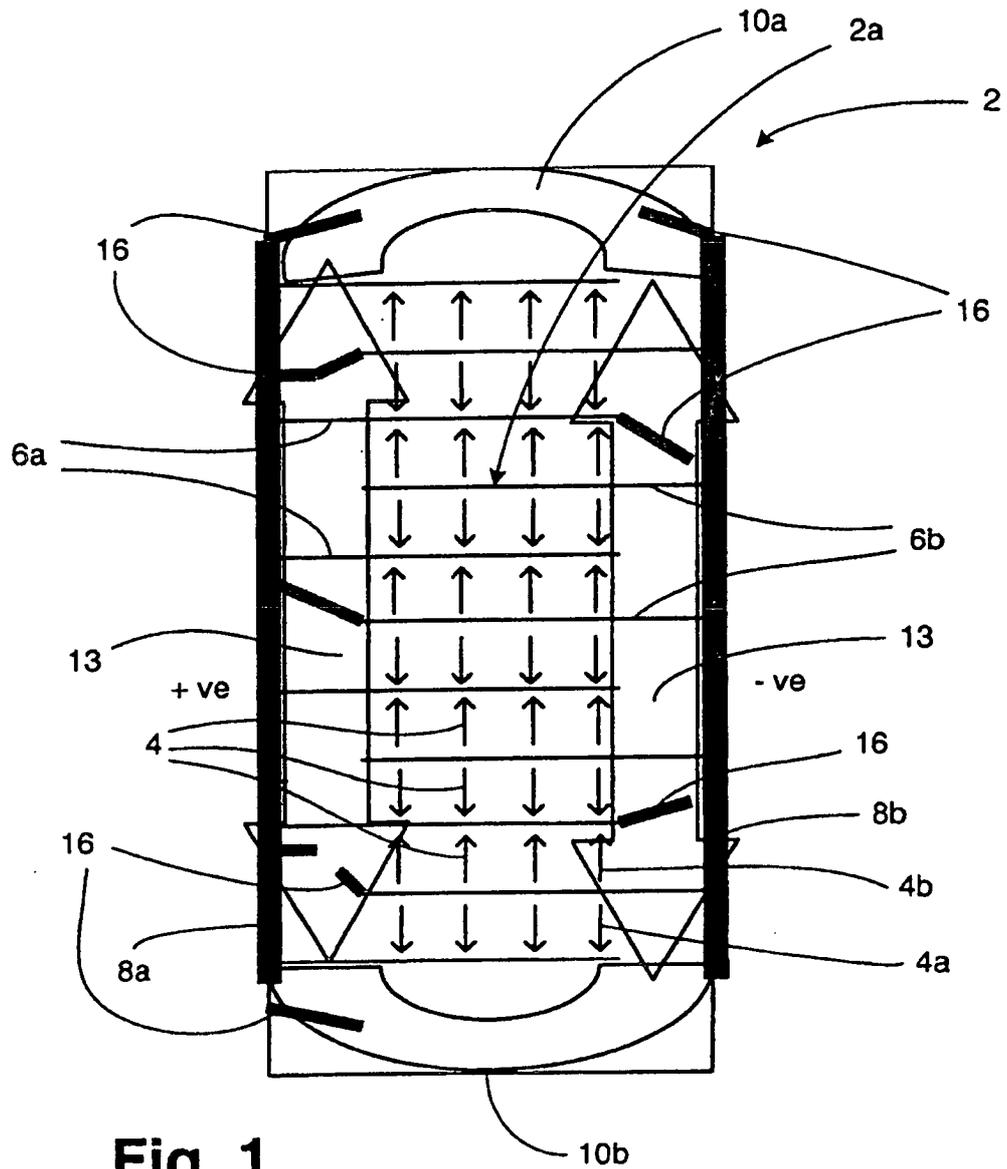
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die erste (**6a**) und die zweite (**6b**) Gruppe von Elektroden ineinander greifen.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, ferner umfassend die Schritte:  
Bereitstellen einer ersten Elektrode an einer ersten Stirnfläche (**10a**) des Körpers;  
Bereitstellen einer zweiten Elektrode an einer zweiten Stirnfläche (**10b**) des Körpers, wobei die zweite Fläche (**10b**) der ersten Fläche (**10a**) entgegengesetzt ist;  
Erzeugen eines anfänglichen elektrischen Feldes zwischen den ersten und zweiten Elektroden als eine erste Stufe eines zweistufigen Polungsverfahrens;  
Entfernen des anfänglichen elektrischen Feldes zwischen den ersten und zweiten Elektroden; und  
Erzeugen des elektrischen Feldes zwischen der ersten (**6a**) und der zweiten (**6b**) Gruppe von Elektroden als eine zweite Stufe des zweistufigen Polungsverfahrens.

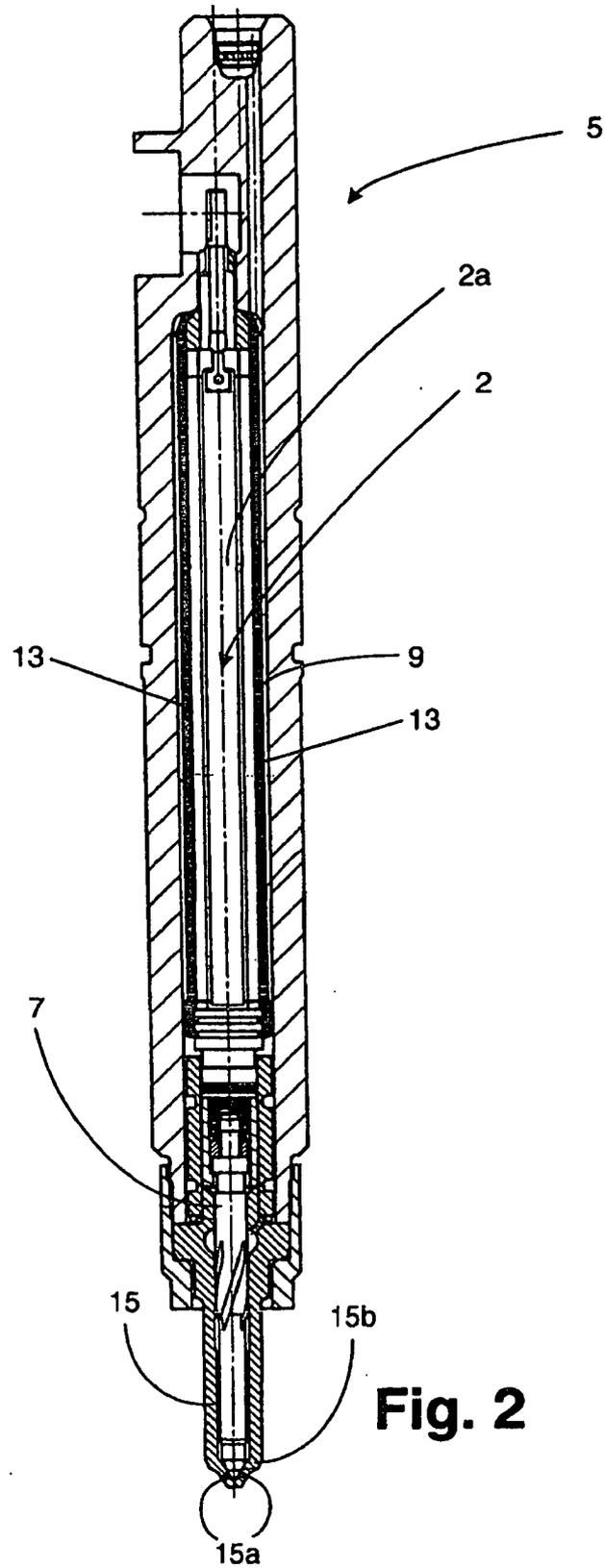
11. Verfahren nach Anspruch 10, ferner umfassend den Schritt, dass das anfängliche elektrische Feld von zwischen den ersten und zweiten Elektroden vor dem Schritt des Aufbringens des mehrachsigen Druckes (**22**) auf den ferroelektrischen Körper (**2a**) entfernt wird.

12. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, wobei die erste Elektrode die Oberfläche der ersten Stirnfläche (**10a**) abdeckt und die zweite Elektrode die Oberfläche der zweiten Stirnfläche (**10b**) abdeckt.

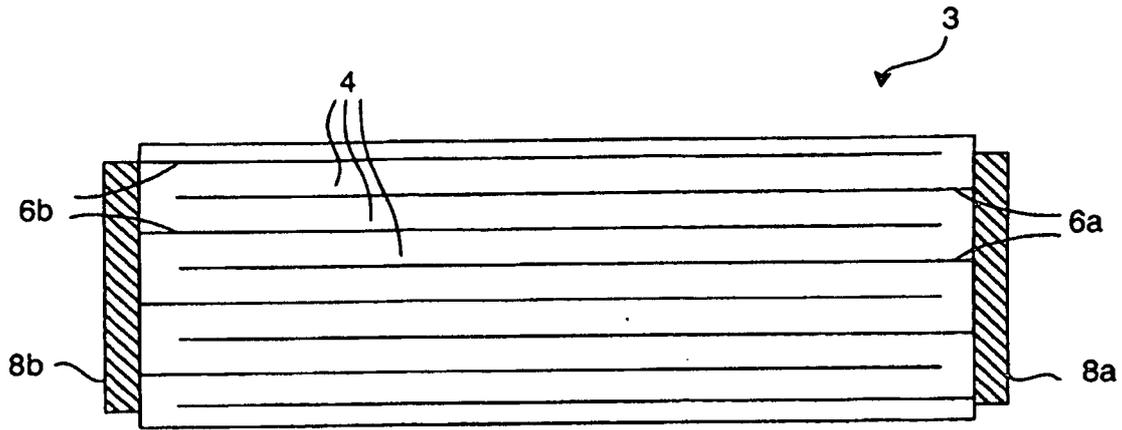
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 10 bis 12, wobei das anfängliche elektrische Feld dadurch erzeugt wird, dass eine Potenzialdifferenz zwischen



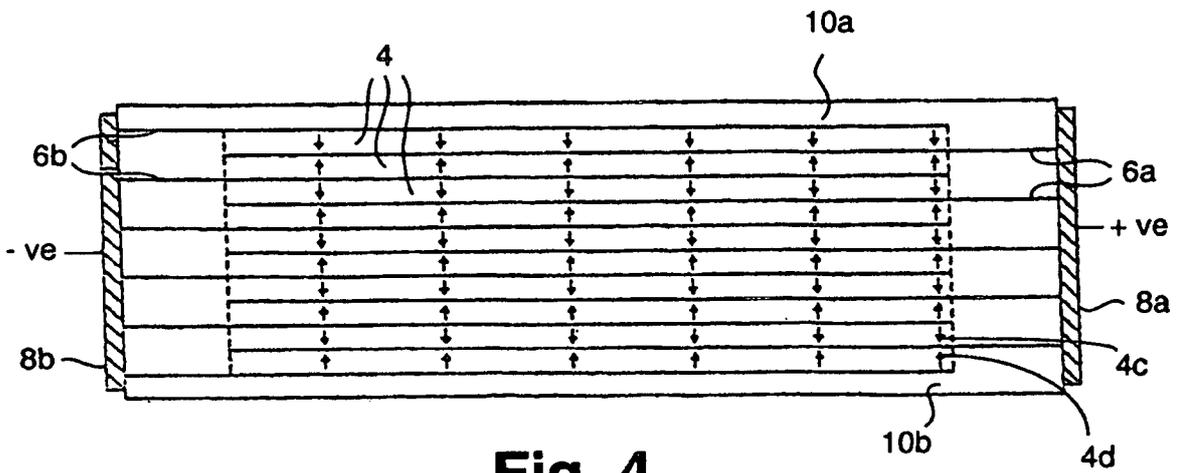
**Fig. 1**



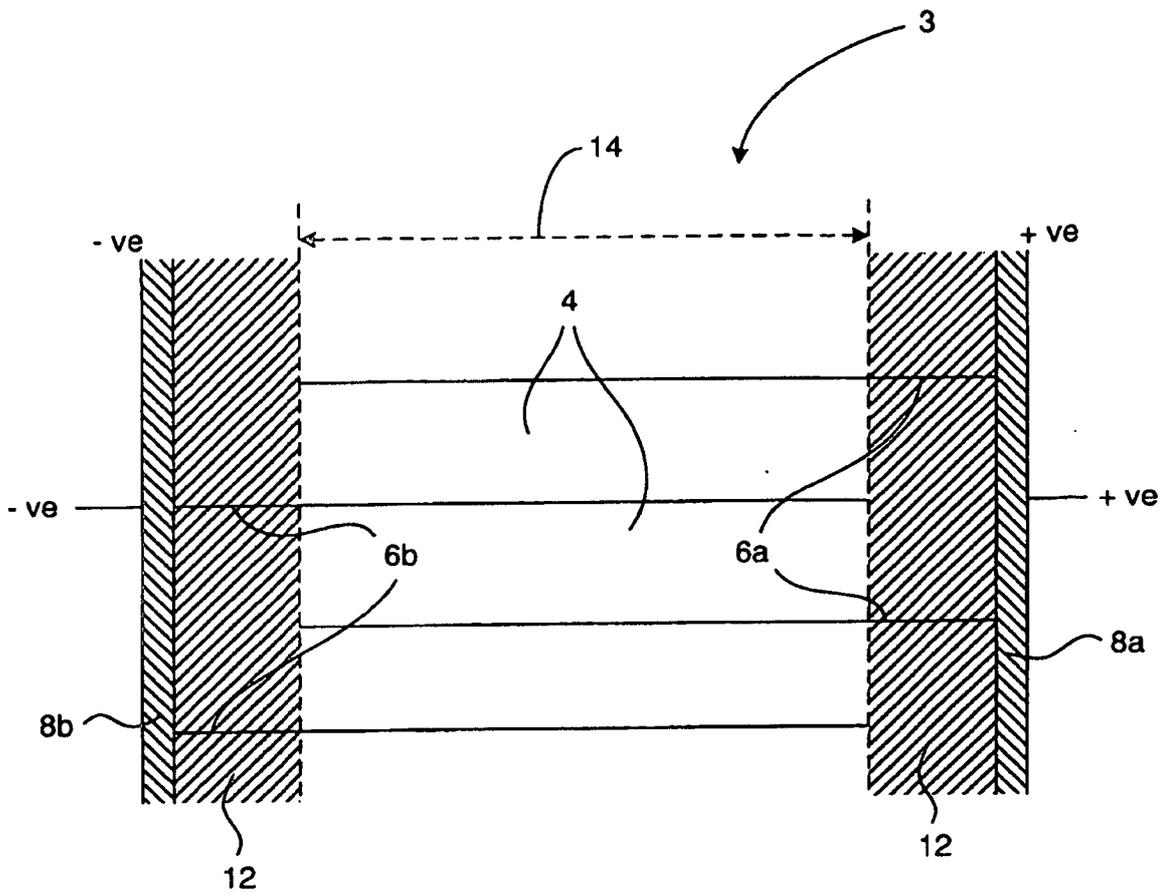
**Fig. 2**



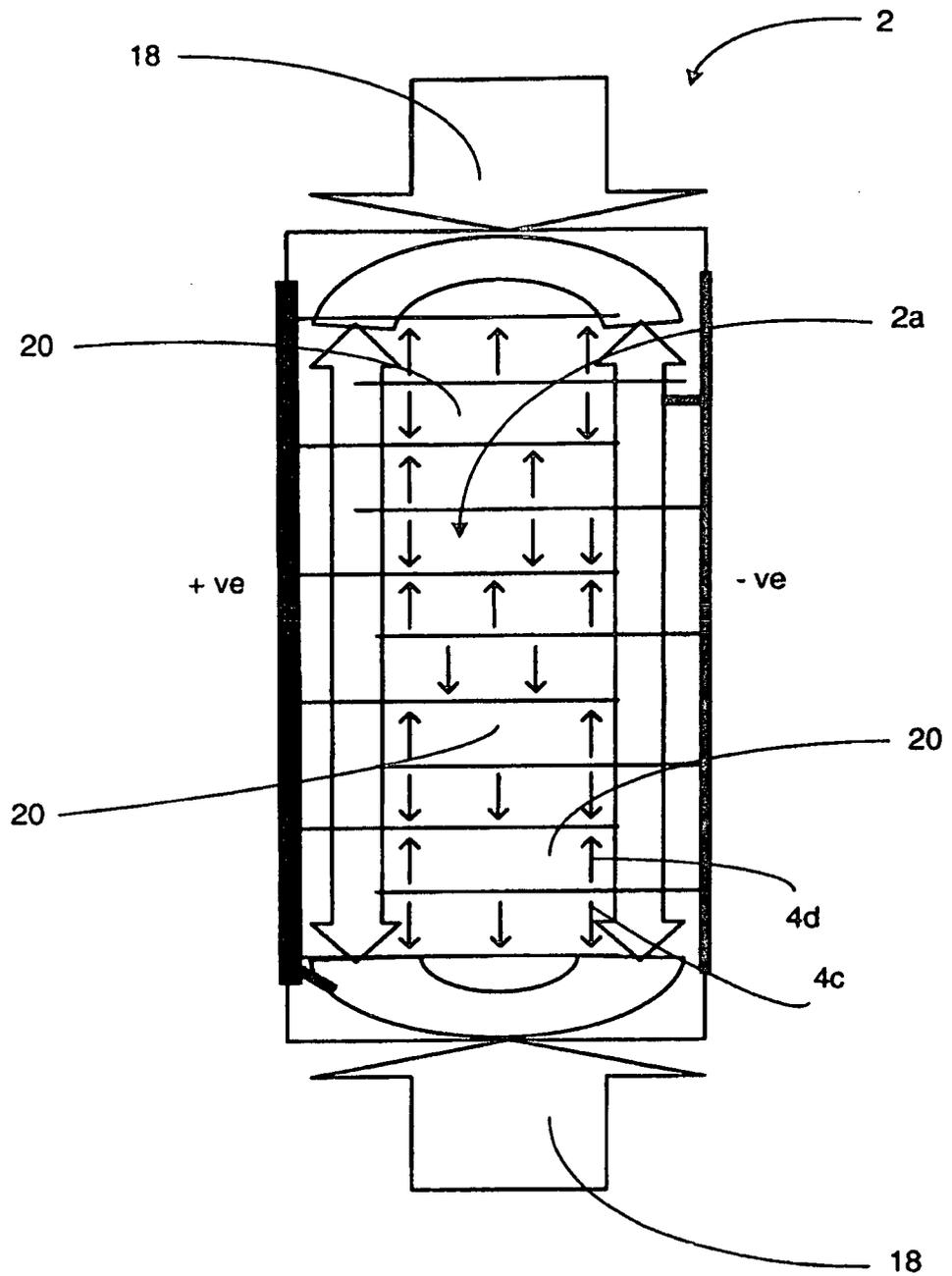
**Fig. 3**



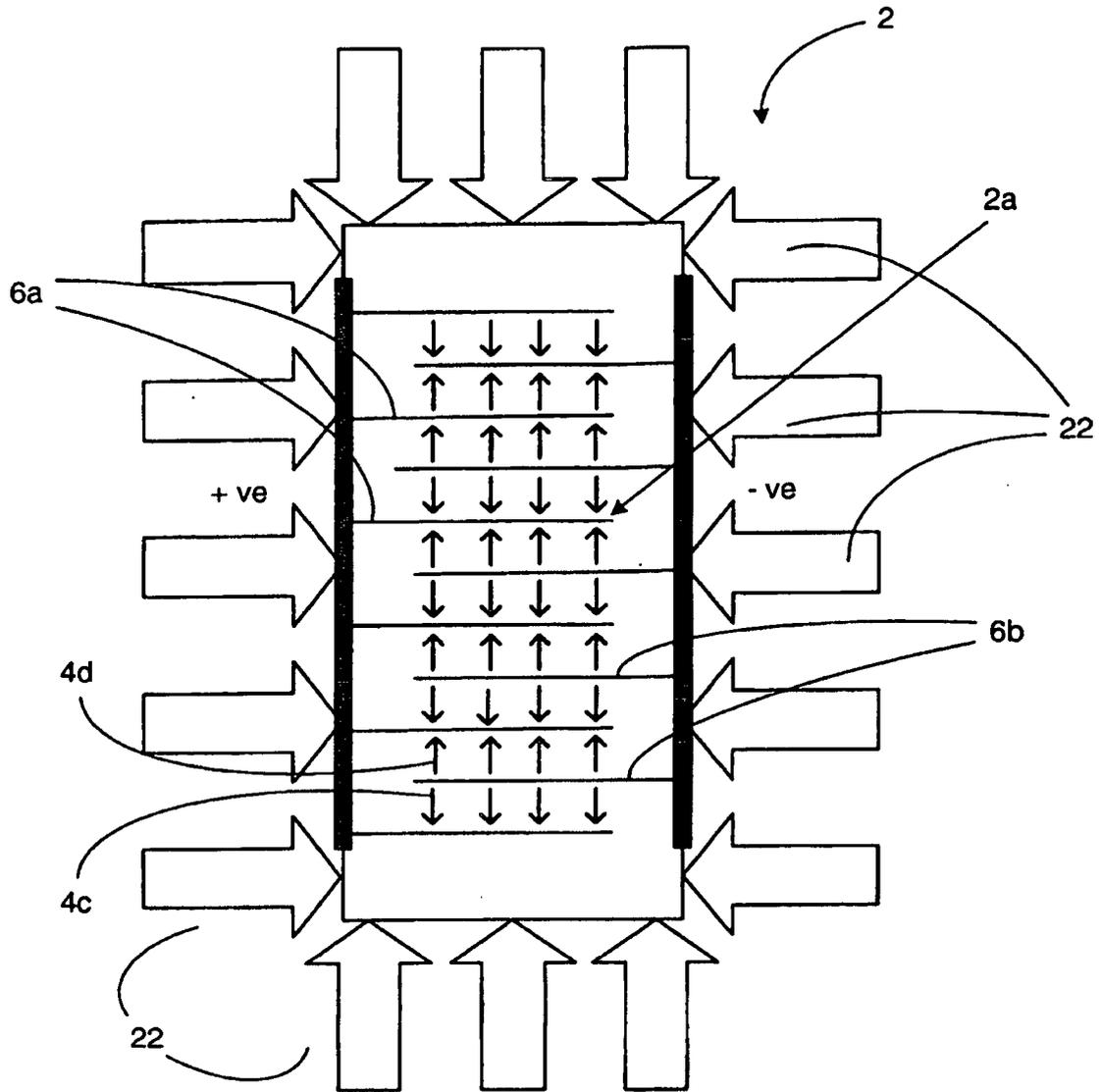
**Fig. 4**



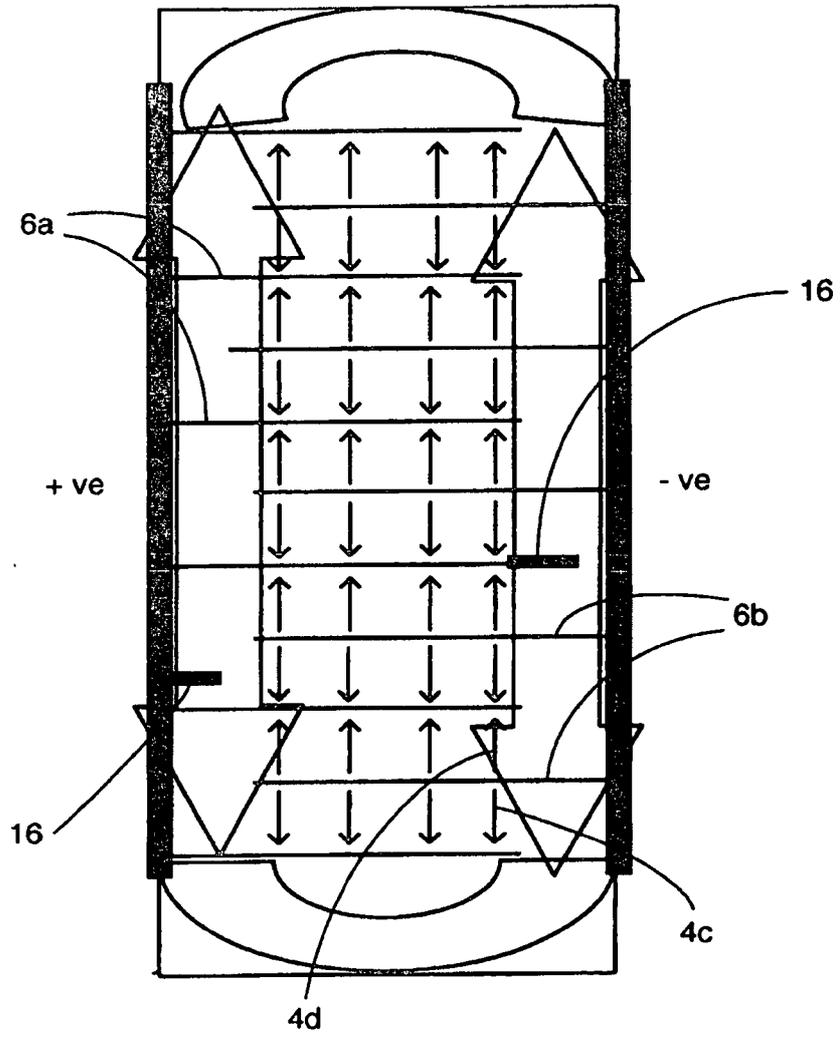
**Fig. 5**



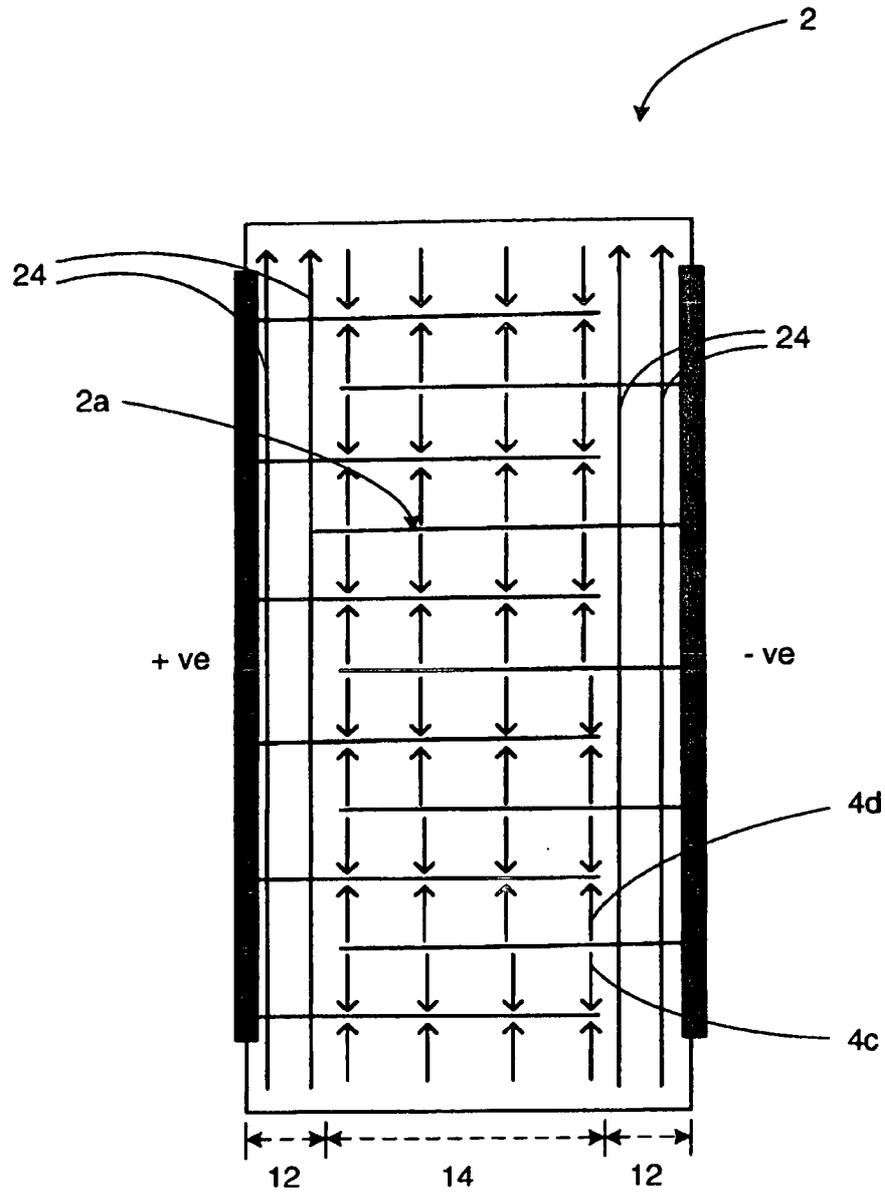
**Fig. 6**



**Fig. 7**



**Fig. 8**



**Fig. 9**