



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 600 37 433 T2** 2008.12.04

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 212 800 B1**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **H01L 41/08** (2006.01)

(21) Deutsches Aktenzeichen: **600 37 433.5**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US00/19951**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **00 948 873.5**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2001/006575**

(86) PCT-Anmeldetag: **20.07.2000**

(87) Veröffentlichungstag  
der PCT-Anmeldung: **25.01.2001**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **12.06.2002**

(97) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung beim EPA: **12.12.2007**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **04.12.2008**

(30) Unionspriorität:

<b>144556 P</b>	<b>20.07.1999</b>	<b>US</b>
<b>153329 P</b>	<b>10.09.1999</b>	<b>US</b>
<b>161325 P</b>	<b>25.10.1999</b>	<b>US</b>
<b>181404 P</b>	<b>09.02.2000</b>	<b>US</b>
<b>184217 P</b>	<b>23.02.2000</b>	<b>US</b>
<b>187809 P</b>	<b>08.03.2000</b>	<b>US</b>
<b>192237 P</b>	<b>27.03.2000</b>	<b>US</b>

(73) Patentinhaber:

**SRI International, Menlo Park, Calif., US**

(74) Vertreter:

**Arnold und Kollegen, 80331 München**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT,  
LI, LU, MC, NL, PT, SE**

(72) Erfinder:

**PELRINE, Ronald E., Boulder, CO 94301, US;  
KORNBLUH, Roy D., Palo Alto, CA 94301, US; PEI,  
Qibing, Fremont, CA 94539, US; GARCIA, Pablo E.,  
Redwood City, CA 94061, US; ECKERLE, Joseph  
Stephen, Redwood City, CA 94025, US**

(54) Bezeichnung: **Elektroaktive Polymergeneratoren**

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****HINTERGRUND DER ERFINDUNG**

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft allgemein elektroaktive Polymergeneratoren, die zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie umwandeln. Insbesondere betrifft die vorliegende Erfindung Polymere und ihre Verwendung als Generatoren, Sensoren, in Aktuatoren und verschiedenen Anwendungen. Die vorliegende Erfindung betrifft auch zu einem Polymer hinzugefügte Additive, Lamine, die einen Wandler umfassen, und Wandler-Fertigungsverfahren.

**[0002]** Piezoelektrische Generatoren mit Polymeren werden von der US 4 518 555, der US 4 609 845 und J. Kymissis et al., Second International Symposium an Wearable Computers, ISBN 0-8186-9079-7, S. 132–139 offenbart.

**[0003]** Bei vielen Anwendungen ist es wünschenswert, zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie umzuwandeln. Beispielhafte Anwendungen, die eine Übersetzung von elektrischer in mechanische Energie erfordern, schließen Robotertechnik, Pumpen, Lautsprecher, allgemeine Automatisierung, Plattenlaufwerke und prothetische Vorrichtungen ein. Diese Anwendungen schließen einen oder mehrere Aktuatoren ein, die elektrische Energie in mechanische Arbeit umwandeln – auf einer makroskopischen oder mikroskopischen Ebene. Übliche elektrische Aktuator-Technologien, wie elektromagnetische Motoren und Magnetspulen, sind für viele dieser Anwendungen nicht geeignet, z. B. wenn die geforderte Vorrichtungsgröße klein ist (z. B. Maschinen im Mikro- oder Meso-Maßstab). Beispielhafte Anwendungen, die eine Übersetzung von mechanischer in elektrische Energie erfordern, schließen Sensoren für mechanische Eigenschaften und Fersenaufsetz-Generatoren ein. Diese Anwendungen schließen einen oder mehrere Wandler ein, die mechanische Energie in elektrische Energie umwandeln. Gebräuchliche elektrische Generator-Technologien, wie elektromagnetische Generatoren, sind für viele dieser Anwendungen ebenfalls nicht geeignet, z. B. wenn die geforderte Vorrichtungsgröße klein ist (z. B. im Schuh einer Person). Diese Technologien sind auch nicht ideal, wenn eine große Anzahl von Vorrichtungen in eine einzige Struktur integriert werden muss, oder unter verschiedenen Leistungsbedingungen, wie dann, wenn bei verhältnismäßig niedrigen Frequenzen eine Abgabe mit hoher Leistungsdichte erforderlich ist.

**[0004]** Mehrere 'intelligente Materialien' sind mit begrenztem Erfolg verwendet worden, um zwischen elektrischer und mechanischer Energie umzuwandeln. Diese intelligenten Materialien schließen piezoelektrische Keramikwerkstoffe, Formgedächtnis-

legierungen und magnetostruktive Materialien ein. Jedoch besitzt jedes intelligente Material eine Reihe von Einschränkungen, die seinen breiten Gebrauch verhindern. Gewisse piezoelektrische Keramikwerkstoffe, wie Blei-Zirkonium-Titanat (PZT) sind verwendet worden, um elektrische in mechanische Energie umzuwandeln. Während sie für einige wenige Anwendungen einen passenden Nutzen haben, sind diese piezoelektrischen Keramikwerkstoffe typischerweise auf eine Beanspruchung bzw. Dehnung unterhalb von etwa 1,6 Prozent beschränkt und sind häufig nicht für Anwendungen geeignet, die größere Beanspruchungen als diese erfordern. Zudem schließt die hohe Dichte dieser Materialien sie häufig von Anwendungen aus, die ein geringes Gewicht erfordern. Bestrahltes Polyvinylidendifluorid (PVDF) ist ein elektroaktives Polymer, von dem berichtet wurde, dass es eine Beanspruchung von bis zu 4 Prozent aufweist, wenn es von elektrischer in mechanische Energie umwandelt. Ähnlich wie die piezoelektrischen Keramikwerkstoffe ist das PVDF häufig nicht für Anwendungen geeignet, die Beanspruchungen von mehr als 4 Prozent erfordern. Formgedächtnislegierungen, wie Nitinol, sind zu großen Beanspruchungen und Kraftabgaben imstande. Eine breite Verwendung dieser Formgedächtnislegierungen ist durch unakzeptable Energieeffizienz, schlechte Ansprechzeit und prohibitive Kosten eingeschränkt worden.

**[0005]** Zusätzlich zu den Leistungseinschränkungen von piezoelektrischen Keramikwerkstoffen und bestrahltem PVDF, stellt ihre Fertigung häufig eine Barriere für die Akzeptanz dar. Piezoelektrische Einkristall-Keramikwerkstoffe müssen bei hohen Temperaturen gezüchtet werden, verbunden mit einem sehr langsamen Abkühlprozess. Bestrahltes PVDF muss zur Bearbeitung einem Elektronenstrahl ausgesetzt werden. Beide diese Verfahren sind teuer und kompliziert und können die Akzeptanz dieser Materialien einschränken.

**[0006]** In Anbetracht des Vorangehenden wären alternative Vorrichtungen wünschenswert, die zwischen elektrischer und mechanischer Energie umwandeln.

**ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG**

**[0007]** Die vorliegende Erfindung betrifft einen Generator und ein Verfahren, wie in den Ansprüchen definiert.

**[0008]** Diese und andere Merkmale und Vorteile der vorliegenden Erfindung werden in der nachfolgenden Beschreibung der Erfindung und den zugehörigen Figuren beschrieben.

## KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0009] Die [Fig. 1A](#) und [Fig. 1B](#) zeigen eine perspektivische Oberseitenansicht eines Wandlers vor und nach dem Anlegen einer Spannung.

[0010] [Fig. 1C](#) zeigt eine mit einer Textur versehene Oberfläche für ein elektroaktives Polymer mit einem wellenartigen Profil.

[0011] [Fig. 1D](#) zeigt ein elektroaktives Polymer, das eine mit einer Textur versehene Oberfläche mit einer zufälligen Texturierung einschließt.

[0012] [Fig. 1E](#) zeigt eine Querschnittsseitenansicht eines Membranwandlers, der ein elektroaktives Polymer einschließt, vor dem Anlegen einer Spannung.

[0013] [Fig. 1F](#) zeigt eine Querschnittsansicht der elektroaktiven Polymermembran aus [Fig. 1E](#) nach dem Anlegen einer Spannung.

[0014] Die [Fig. 2A](#) und [Fig. 2B](#) zeigen eine Vorrichtung zum Umwandeln zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie vor und nach einer Betätigung gemäß einer spezifischen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0015] [Fig. 2C](#) zeigt eine Vorrichtung zum Umwandeln zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie, die zusätzliche Komponenten einschließt, um die Auslenkung gemäß einer spezifischen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung zu verbessern.

[0016] [Fig. 2D](#) und [Fig. 2E](#) zeigen eine Vorrichtung zum Umwandeln zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie vor und nach einer Aktivierung gemäß einer spezifischen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0017] [Fig. 2F](#) zeigt eine Querschnittsseitenansicht eines Wandlers, der mehrere Polymerschichten einschließt.

[0018] [Fig. 2G](#) zeigt eine gestapelte mehrschichtige Vorrichtung als ein Beispiel von künstlichem Muskel.

[0019] [Fig. 2H](#) zeigt eine Vorrichtung zum Umwandeln zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie, umfassend eine elektroaktive Polymermembran gemäß einer anderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0020] [Fig. 2I](#) zeigt einen Aktuator vom Raupenspanner-Typ, der ein gerolltes elektroaktives Polymer einschließt.

[0021] [Fig. 2J](#) zeigt eine Vorrichtung zum Umwandeln zwischen elektrischer Energie und mechani-

scher Energie in einer Richtung gemäß einer anderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0022] [Fig. 2K](#) zeigt eine Vorrichtung zum Umwandeln zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie gemäß einer anderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0023] [Fig. 2L](#) zeigt die Vorrichtung aus [Fig. 2K](#) mit einem 90-Grad-Biegewinkel.

[0024] [Fig. 2M](#) zeigt eine Vorrichtung zum Umwandeln zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie, die zwei Polymerschichten einschließt.

[0025] Die [Fig. 2N](#) und [Fig. 2O](#) zeigen eine Vorrichtung zum Umwandeln zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie gemäß einer anderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0026] [Fig. 3](#) zeigt eine strukturierte Elektrode, die eine Nachgiebigkeit in einer Richtung gemäß einer spezifischen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung liefert.

[0027] [Fig. 4](#) zeigt ein vorbeanspruchtes Polymer, umfassend eine strukturierte Elektrode, die nicht richtungsabhängig nachgiebig ist, gemäß einer spezifischen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung.

[0028] [Fig. 5](#) zeigt mit einer Textur versehene Elektroden.

[0029] [Fig. 6](#) zeigt ein zweistufiges hintereinander geschaltetes Pumpen-System, das zwei Membran-Vorrichtung-Pumpen einschließt.

[0030] [Fig. 7A](#) zeigt einen Prozessablauf für die Fertigung einer elektromechanischen Vorrichtung, die wenigstens ein vorbeanspruchtes Polymer aufweist.

[0031] Die [Fig. 7B–F](#) zeigen ein Verfahren zur Fertigung einer elektromechanischen Vorrichtung, die mehrere Polymerschichten aufweist.

## AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG DER BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSFORMEN

[0032] Die vorliegende Erfindung wird nun mit Bezugnahme auf einige bevorzugte Ausführungsformen derselben, wie in den begleitenden Zeichnungen dargestellt, ausführlich beschrieben. In der nachfolgenden Beschreibung sind zahlreiche spezifische Einzelheiten angegeben, um für ein gründliches Verständnis der vorliegenden Erfindung zu sorgen, wie durch die Ansprüche definiert. Für einen Fachmann wird jedoch ersichtlich, dass die vorliegende Erfindung, wie durch die Ansprüche definiert, ohne einige oder

sämtliche dieser spezifischen Einzelheiten ausgeführt werden kann. In anderen Fällen sind wohlbekannte Prozessschritte und/oder Strukturen nicht ausführlich beschrieben worden, um die vorliegende Erfindung nicht unnötig zu verdecken.

## 1. ÜBERBLICK

**[0033]** Elektroaktive Polymere werden ausgelenkt, wenn sie durch elektrische Energie aktiviert werden. Ein elektroaktives Polymer bezieht sich auf ein Polymer, das als ein isolierendes Dielektrikum zwischen zwei Elektroden wirkt und beim Anlegen einer Spannungsdifferenz zwischen den zwei Elektroden ausgelenkt werden kann. Ein Aspekt der vorliegenden Erfindung betrifft Polymere, die vorbeansprucht sind, um die Umwandlung zwischen elektrischer und mechanischer Energie zu verbessern. Die Vorbeanspruchung verbessert das mechanische Ansprechen eines elektroaktiven Polymers im Verhältnis zu einem nicht-beanspruchten elektroaktiven Polymer. Das verbesserte mechanische Ansprechen ermöglicht für ein elektroaktives Polymer eine größere mechanische Arbeit, z. B. größere Auslenkungen und Aktivierungsdrücke. Zum Beispiel sind mit vorbeanspruchten Polymeren der vorliegenden Erfindung lineare Beanspruchungen von wenigstens etwa 200 Prozent und Flächenbeanspruchungen von wenigstens etwa 300 Prozent möglich. Die Vorbeanspruchung kann in verschiedenen Richtungen eines Polymers variieren. Die Kombination einer Richtungsveränderlichkeit der Vorbeanspruchung, von verschiedenen Wegen zum Beanspruchen eines Polymers, der Skalierbarkeit von elektroaktiven Polymeren sowohl auf Mikro- und Makro-Ebenen und verschiedenen Polymerausrichtungen (z. B. Rollen oder Stapeln von einzelnen Polymerschichten) erlaubt einen breiten Bereich von Aktuatoren, die elektrische Energie in mechanische Arbeit umwandeln. Diese Aktuatoren finden in einem weiten Bereich von Anwendungen Gebrauch.

**[0034]** Zur Erleichterung des Verständnisses wird die vorliegende Erfindung beschrieben und dargestellt, indem man sich auf eine einzige Richtung der Energieumwandlung konzentriert. Spezieller konzentriert sich die vorliegende Erfindung auf die Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische Energie. Jedoch ist es wichtig, festzustellen, dass in sämtlichen der Figuren und Erörterungen für die vorliegende Erfindung die Polymere und Vorrichtungen in beiden Richtungen zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie umwandeln können. Daher sind jegliche der hier beschriebenen Polymermaterialien, Polymer-Konfigurationen, Wandler, Vorrichtungen und Aktuatoren auch ein Wandler zum Umwandeln von mechanischer Energie in elektrische Energie (ein Generator) in der umgekehrten Richtung. Gleichfalls kann jegliche der hier beschriebenen beispielhaften Elektroden zusammen mit einem Generator der vorliegenden Erfindung verwendet

werden. Typischerweise schließt ein Generator ein Polymer ein, das in einer Weise angeordnet ist, die ansprechend auf eine Auslenkung eines Teils des Polymers eine Veränderung im elektrischen Feld bewirkt.

**[0035]** Daher können Polymer und Wandler als ein Aktuator verwendet werden, um von elektrischer in mechanische Energie umzuwandeln, oder als ein Generator, um von mechanischer in elektrische Energie umzuwandeln. Bei einem Wandler, der eine im Wesentlichen konstante Dicke besitzt, ist ein Mechanismus zum Unterscheiden der Funktionsweise des Wandlers als ein Aktuator oder als ein Generator die Veränderung der Nettofläche des Wandlers orthogonal zur Dicke während des Gebrauchs. Wenn bei diesen Wandlern die Nettofläche des Wandlers abnimmt, wirkt der Wandler als ein Generator. Wenn die Nettofläche des Wandlers zunimmt, wirkt der Wandler umgekehrt als ein Aktuator.

**[0036]** Da die elektroaktiven Polymere der vorliegenden Erfindung mit linearen Beanspruchungen von wenigstens etwa 200 Prozent ausgelenkt werden können, sollten an den Polymeren befestigte Elektroden ebenfalls ausgelenkt werden, ohne der mechanischen oder elektrischen Leistung zu schaden.

**[0037]** Entsprechend betrifft die vorliegende Erfindung in einem anderen nicht-einschränkenden Aspekt nachgiebige Elektroden, die sich an die Form eines elektroaktiven Polymers anpassen, an dem sie befestigt sind. Die Elektroden sind imstande, eine elektrische Verbindung selbst bei den hohen Auslenkungen aufrechtzuerhalten, die man mit vorbeanspruchten Polymeren der vorliegenden Erfindung antrifft. Beispielhaft sind Beanspruchungen von wenigstens etwa 50 Prozent mit Elektroden der vorliegenden Erfindung üblich. Bei einigen Ausführungsformen kann die von den Elektroden gelieferte Nachgiebigkeit mit der Richtung variieren.

**[0038]** Da die vorbeanspruchten Polymere zur Verwendung sowohl im Mikro- und Makro-Maßstab, in einer breiten Vielfalt von Aktuatoren und in einem breiten Anwendungsbereich geeignet sind, variieren mit der vorliegenden Erfindung verwendete Fertigungsprozesse stark. In einem anderen Aspekt stellt die vorliegende Erfindung Verfahren zur Fertigung von elektromechanischen Vorrichtungen bereit, die ein oder mehrere vorbeanspruchte Polymere einschließen. Die Vorbeanspruchung kann durch eine Reihe von Techniken erzielt werden, wie mechanisches Strecken eines elektroaktiven Polymers und Befestigen des Polymers an einem oder mehreren starren Elementen, während es gestreckt ist.

## 2. ALLGEMEINE STRUKTUR VON VORRICHTUNGEN

**[0039]** Die [Fig. 1A](#) und [Fig. 1B](#) zeigen eine perspektivische Oberseitenansicht eines Wandlers **100**. Der Wandler **100** schließt ein Polymer **102** zum Umwandeln zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie ein. Eine obere und eine untere Elektrode **104** und **106** sind an dem elektroaktiven Polymer **102** auf seiner Ober- bzw. Unterseite befestigt, um über einen Teil des Polymers **102** eine Spannungsdifferenz zu liefern. Mit einer Veränderung in dem von der oberen und der unteren Elektrode **104** und **106** gelieferten elektrischen Feld wird das Polymer **102** ausgelenkt. Die Auslenkung des Wandlers **100** ansprechend auf eine von den Elektroden **104** und **106** bereitgestellte Veränderung im elektrischen Feld wird als Aktivierung bezeichnet. Wenn das Polymer **102** seine Größe verändert, kann die Auslenkung genutzt werden, um mechanische Arbeit zu erzeugen.

**[0040]** [Fig. 1B](#) zeigt eine perspektivische Oberseitenansicht des Wandlers **100** einschließlich einer Auslenkung ansprechend auf eine Veränderung im elektrischen Feld. Allgemein gesagt, bezieht sich Auslenkung auf jegliche Verlagerung, Ausdehnung, Kontraktion, Torsion, lineare oder Flächenbeanspruchung oder jegliche andere Verformung eines Teils des Polymers **102**. Die Veränderung im elektrischen Feld, die der von den Elektroden **104** und **106** erzeugten Spannungsdifferenz entspricht, erzeugt innerhalb des vorbeanspruchten Polymers **102** einen mechanischen Druck. In diesem Fall werden die von den Elektroden **104** und **106** erzeugten ungleichen elektrischen Ladungen zueinander hin angezogen und liefern eine Kompressionskraft zwischen den Elektroden **104** und **106** sowie in Ebenenrichtungen **108** und **110** eine Expansionskraft auf das Polymer **102**, was bewirkt, dass das Polymer **110** zwischen den Elektroden **104** und **106** komprimiert und in den Ebenenrichtungen **108** und **110** gestreckt wird.

**[0041]** In einigen Fällen bedecken die Elektroden **104** und **106** einen begrenzten Teil des Polymers **102** im Verhältnis zur Gesamtfläche des Polymers. Dies kann gemacht werden, um einen elektrischen Durchbruch um den Rand des Polymers **102** herum zu verhindern, oder um in gewissen Teilen des Polymers maßgefertigte Auslenkungen zu erzielen. So, wie der Begriff hier verwendet wird, ist ein aktiver Bereich als ein Teil des Polymermaterials **102** mit einer ausreichenden elektrostatischen Kraft definiert, um eine Auslenkung des Teils zu ermöglichen. Wie unten beschrieben wird, kann ein Polymer der vorliegenden Erfindung mehrere aktive Bereiche besitzen. Polymermaterial **102** außerhalb eines aktiven Bereichs kann während der Auslenkung als äußere Federkraft auf den aktiven Bereich wirken. Spezieller kann Material außerhalb des aktiven Bereichs durch seine

Kontraktion oder Expansion einer Auslenkung des aktiven Bereichs einen Widerstand entgegensetzen. Eine Beseitigung der Spannungsdifferenz und der induzierten Ladung bewirkt die umgekehrten Effekte.

**[0042]** Die Elektroden **104** und **106** sind nachgiebig und verändern ihre Form mit dem Polymer **102**. Die Ausbildung des Polymers **102** und der Elektroden **104** und **106** sorgt für ein zunehmendes Ansprechen des Polymers **102** mit der Auslenkung. Während der Wandler **100** ausgelenkt wird, bringt spezieller die Kompression des Polymers **102** die entgegengesetzten Ladungen der Elektroden **104** und **106** näher zusammen, und das Strecken des Polymers **102** trennt ähnliche Ladungen in jeder Elektrode. Bei einer Ausführungsform ist eine der Elektroden **104** und **106** gerundet.

**[0043]** Allgemein gesagt, wird der Wandler **100** weiter ausgelenkt, bis mechanische Kräfte mit den die Auslenkung treibenden elektrostatischen Kräften im Gleichgewicht stehen. Die mechanischen Kräfte schließen elastische Rückstellkräfte des Polymermaterials **102**, die Nachgiebigkeit der Elektroden **104** und **106** sowie jeglichen äußeren Widerstand ein, der von einer mit dem Wandler **100** verbundenen Vorrichtung und/oder Last geliefert wird. Die resultierende Auslenkung des Wandlers **100** infolge der angelegten Spannung kann auch von einer Reihe von anderen Faktoren abhängen, wie der Dielektrizitätskonstante des Polymers **102** und der Größe des Polymers **102**.

**[0044]** Elektroaktive Polymere gemäß der vorliegenden Erfindung sind zu einer Auslenkung in einer beliebigen Richtung imstande. Nach dem Anlegen der Spannung zwischen den Elektroden **104** und **106** nimmt die Größe des elektroaktiven Polymers **102** in beiden Ebenenrichtungen **108** und **110** zu. In einigen Fällen ist das elektroaktive Polymer **102** inkompressibel, z. B. weist unter Belastung ein im Wesentlichen konstantes Volumen auf. In diesem Fall nimmt die Dicke des Polymers **102** infolge der Ausdehnung in den Ebenenrichtungen **108** und **110** ab. Es sollte festgestellt werden, dass die vorliegende Erfindung nicht auf inkompressible Polymere beschränkt ist und dass eine Auslenkung des Polymers **102** nicht einer solchen einfachen Beziehung entsprechen mag.

**[0045]** Das Anlegen einer relativ großen Spannungsdifferenz zwischen den Elektroden **104** und **106** an dem in [Fig. 1A](#) dargestellten Wandler **100** wird bewirken, dass sich die Form des Wandlers in eine dünnere Form mit größerer Fläche verändert, wie in [Fig. 1B](#) dargestellt. Auf diese Weise wandelt der Wandler elektrische Energie in mechanische Energie um. Der Wandler **100** wandelt auch mechanische Energie in elektrische Energie um.

**[0046]** Die [Fig. 1A](#) und [Fig. 1B](#) können benutzt wer-

den, um eine Art und Weise zu zeigen, in welcher der Wandler **100** mechanische in elektrische Energie umwandelt. Wenn zum Beispiel der Wandler **100** durch äußere Kräfte in eine dünnere Form mit größerer Fläche mechanisch gestreckt wird, wie diejenige, die in [Fig. 1B](#) dargestellt ist, und eine relativ kleine Spannungsdifferenz zwischen den Elektroden **104** und **106** angelegt wird, wird sich der Wandler **100** in dem Bereich zwischen den Elektroden in eine Form, wie in [Fig. 1A](#), zusammenziehen, wenn die äußeren Kräfte beseitigt werden. Das Strecken des Wandlers bezieht sich allgemein auf ein Auslenken des Wandlers aus seiner anfänglichen Ruhestellung – typischerweise um eine größere Nettofläche zwischen den Elektroden zu haben, z. B. in der durch die Richtungen **108** und **110** definierten Ebene zwischen den Elektroden. Die Ruhestellung bezieht sich auf die Stellung des Wandlers **100** ohne eine äußere elektrische oder mechanische Beaufschlagung und kann jegliche Vorbeanspruchung im Polymer einschließen. Sobald der Wandler **100** gestreckt wird, wird die relativ kleine Spannungsdifferenz bereitgestellt, so dass die resultierenden elektrostatischen Kräfte unzureichend sind, um die elastischen Rückstellkräfte der Streckung auszugleichen. Daher zieht sich der Wandler **100** zusammen, und er wird dicker und weist in der durch die Richtungen **108** und **110** definierten Ebene (orthogonal zur Dicke zwischen den Elektroden) eine kleinere Ebenenfläche auf. Wenn das Polymer **102** dicker wird, trennt es die Elektroden **104** und **106** und ihre entsprechenden ungleichen Ladungen, wodurch die elektrische Energie der Ladung erhöht wird. Wenn sich die Elektroden **104** und **106** auf eine kleinere Fläche zusammenziehen, werden außerdem gleiche Ladungen innerhalb von jeder Elektrode zusammengedrückt, was ebenfalls die elektrische Energie der Ladung erhöht. Mit unterschiedlichen Ladungen auf den Elektroden **104** und **106** erhöht daher eine Kontraktion aus einer Form, wie derjenigen, die in [Fig. 1B](#) dargestellt ist, in eine, wie diejenige, die in [Fig. 1A](#) dargestellt ist, die elektrische Energie der Ladung. Das heißt, die mechanische Auslenkung wird in elektrische Energie umgewandelt, und der Wandler **100** wirkt als Generator.

**[0047]** In einigen Fällen kann der Wandler **100** elektrisch als veränderlicher Kondensator beschrieben werden. Die Kapazität nimmt ab, wenn sich die Form von derjenigen, die in [Fig. 1B](#) dargestellt ist, in diejenige verändert, die in [Fig. 1A](#) dargestellt ist. Typischerweise wird die Spannungsdifferenz zwischen den Elektroden **104** und **106** durch Kontraktion erhöht. Dies ist normalerweise der Fall, zum Beispiel wenn während des Kontraktionsvorgangs keine zusätzliche Ladung zu den Elektroden **104** und **106** hinzugefügt oder von diesen weggenommen wird. Die Zunahme der elektrischen Energie  $U$  kann durch die Formel  $U = 0,5 Q^2/C$  veranschaulicht werden, wobei  $Q$  die Menge an positiver Ladung auf der positiven Elektrode ist, und  $C$  die veränderliche Kapazität ist,

die mit den intrinsischen dielektrischen Eigenschaften des Polymers **102** und seiner Geometrie zusammenhängt. Wenn  $Q$  fest ist und  $C$  abnimmt, dann nimmt die elektrische Energie  $U$  zu. Die Zunahme der elektrischen Energie und der Spannung kann zurückgewonnen oder in einer geeigneten, in elektrischer Verbindung mit den Elektroden **104** und **106** stehenden Vorrichtung oder elektronischen Schaltung genutzt werden. Zudem kann der Wandler **100** mit einer mechanischen Beaufschlagung mechanisch gekoppelt werden, die das Polymer auslenkt und mechanische Energie liefert.

**[0048]** Der Wandler **100** wird mechanische Energie in elektrische Energie umwandeln, wenn er sich zusammenzieht. Einige oder sämtliche der Ladung und Energie kann entnommen werden, wenn der Wandler **100** in der durch die Richtungen **108** und **110** definierten Ebene ganz zusammengezogen ist, oder Ladung und Energie können während der Kontraktion entnommen werden. Wenn während der Kontraktion der elektrische Felddruck zunimmt und mit den elastischen Rückstellbelastungen ein Gleichgewicht erreicht, wird die Kontraktion vor einer vollständigen Kontraktion anhalten, und es wird keine weitere elastische mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt. Die Entnahme von einem Teil der Ladung und der gespeicherten elektrischen Energie verringert den elektrischen Felddruck, wodurch es ermöglicht wird, dass die Kontraktion andauert und weiter mehr mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt wird. Das exakte elektrische Verhalten des Wandlers **100**, wenn er als Generator arbeitet, hängt von jeglichen elektrischen und mechanischen Lasten sowie den intrinsischen Eigenschaften des Polymers **102** und der Elektroden **104** und **106** ab.

**[0049]** Das elektroaktive Polymer **102** ist vorbeansprucht. Die Vorbeanspruchung eines Polymers kann in einer oder mehreren Richtungen als die Veränderung der Abmessung in dieser Richtung nach der Vorbeanspruchung im Verhältnis zur Abmessung in dieser Richtung vor der Vorbeanspruchung beschrieben werden. Die Vorbeanspruchung kann eine elastische Verformung des Polymers **102** umfassen und kann zum Beispiel durch Strecken des Polymers unter Spannung und Fixieren von einem oder mehreren der Ränder, während es gespannt ist, erzeugt werden. Die Vorbeanspruchung verbessert die Umwandlung zwischen elektrischer und mechanischer Energie. Bei einer Ausführungsform verbessert die Vorbeanspruchung die Spannungsfestigkeit des Polymers. Bei dem Wandler **100** gestattet es die Vorbeanspruchung, dass das elektroaktive Polymer **102** stärker ausgelenkt wird und eine größere mechanische Arbeit liefert, wenn elektrische in mechanische Energie umgewandelt wird. Bei einem Generator gestattet es die Vorbeanspruchung, dass mehr Ladung auf die Elektroden **104** und **106** gebracht wird, was zu mehr erzeugter elektrischer Energie führt, z. B. in einem



Zyklus der Auslenkung des Wandlers **100**. Bei einer Ausführungsform ist die Vorbeanspruchung elastisch. Nach der Aktivierung könnte ein elastisch vorbeanspruchtes Polymer im Prinzip gelöst werden und in seinen ursprünglichen Zustand zurückkehren. Die Vorbeanspruchung kann unter Verwendung eines starren Rahmens an den Begrenzungen auferlegt werden, oder kann für einen Teil des Polymers lokal realisiert werden.

**[0050]** Bei einer Ausführungsform wird die Vorbeanspruchung gleichförmig über einen Teil des Polymers **102** aufgebracht, um ein isotropes vorbeanspruchtes Polymer zu erzeugen. Beispielfhaft kann ein elastomeres Acryl-Polymer in beiden Ebenenrichtungen um 200–400 Prozent gestreckt werden. Bei einer anderen Ausführungsform wird die Vorbeanspruchung für einen Teil des Polymers **102** in verschiedenen Richtungen ungleich aufgebracht, um ein anisotrop vorbeanspruchtes Polymer zu erzeugen. In diesem Fall kann das Polymer **102** in einer Richtung stärker als in einer anderen ausgelenkt werden, wenn es aktiviert wird. Obwohl man nicht durch Theorie gebunden sein möchte, wird angenommen, dass die Vorbeanspruchung eines Polymers in einer Richtung die Steifigkeit des Polymers in der Vorbeanspruchungsrichtung vergrößern kann. Entsprechend ist das Polymer in der Richtung der hohen Vorbeanspruchung im Verhältnis steifer und in der Richtung der geringen Vorbeanspruchung nachgiebiger, und bei einer Aktivierung findet der größte Teil der Auslenkung in der Richtung der geringen Vorbeanspruchung statt. Bei einer Ausführungsform verbessert der Wandler die Auslenkung in der Richtung **108**, indem eine große Vorbeanspruchung in der dazu senkrechten Richtung **110** ausgenutzt wird. Beispielfhaft kann ein elastomeres Acryl-Polymer, das als Wandler **100** verwendet wird, um 100 Prozent in der Richtung **108** und um 500 Prozent in der dazu senkrechten Richtung **110** gestreckt werden. Die Konstruktion des Wandlers **100** und die geometrischen Randbeschränkungen können die gerichtete Auslenkung ebenfalls beeinflussen, wie unten im Hinblick auf Aktuatoren beschrieben werden wird.

**[0051]** Eine anisotrope Vorbeanspruchung kann auch die Leistung eines Wandlers beim Umwandeln von mechanischer in elektrische Energie in einem Generatormodus verbessern. Zusätzlich dazu, dass sie die dielektrische Durchbruchfestigkeit des Polymers vergrößert und es gestattet, mehr Ladung auf das Polymer aufzubringen, kann eine hohe Vorbeanspruchung die mechanische in elektrische Kopplung in der Richtung der geringen Vorbeanspruchung verbessern. Das heißt, mehr von der mechanischen Beaufschlagung in die Richtung der geringen Vorbeanspruchung kann in elektrische Abgabe umgewandelt werden, womit der Wirkungsgrad des Generators erhöht wird.

**[0052]** Das Maß der Vorbeanspruchung für ein Polymer kann auf dem elektroaktiven Polymer und der gewünschten Leistung des Polymers in einem Aktuator oder einer Anwendung basieren. Für einige Polymere der vorliegenden Erfindung kann die Vorbeanspruchung in einer oder mehreren Richtungen von –100 Prozent bis 600 Prozent reichen. Beispielfhaft können für ein VHB-Acryl-Elastomer mit isotroper Vorbeanspruchung Vorbeanspruchungen von wenigstens etwa 100 Prozent und vorzugsweise zwischen etwa 200–400 Prozent in jeder Richtung verwendet werden. Bei einer Ausführungsform wird das Polymer um einen Faktor im Bereich von etwa 1,5 mal bis 50 mal der ursprünglichen Fläche vorbeansprucht. Für ein anisotropes Acryl, das vorbeansprucht wurde, um die Aktivierung in einer nachgiebigen Richtung zu verbessern, können Vorbeanspruchungen zwischen etwa 400–500 Prozent in der versteiften Richtung verwendet werden, und Vorbeanspruchungen zwischen etwa 20–200 Prozent können in der nachgiebigen Richtung verwendet werden. In einigen Fällen kann in einer Richtung eine Vorbeanspruchung hinzugefügt werden, so dass in einer anderen Richtung eine negative Vorbeanspruchung auftritt, z. B. 600 Prozent in einer Richtung, verbunden mit – 100 Prozent in einer dazu orthogonalen Richtung. In diesen Fällen ist die Nettoveränderung der Fläche auf Grund der Vorbeanspruchung typischerweise positiv.

**[0053]** Die Vorbeanspruchung kann andere Eigenschaften des Polymers **102** beeinflussen. Große Vorbeanspruchungen können die elastischen Eigenschaften des Polymers verändern und es in einen steiferen Bereich mit geringeren viskoelastischen Verlusten bringen. Für einige Polymere vergrößert die Vorbeanspruchung die elektrische Durchbruchfestigkeit des Polymers, was es gestattet, höhere elektrische Felder innerhalb des Polymers zu verwenden – was höhere Aktivierungsdrücke und höhere Auslenkungen zulässt.

**[0054]** Eine lineare Beanspruchung und eine Flächenbeanspruchung können verwendet werden, um die Auslenkung eines vorbeanspruchten Polymers zu beschreiben. So, wie der Begriff hier verwendet wird, bezieht sich die lineare Vorbeanspruchung eines vorbeanspruchten Polymers auf die Auslenkung pro Längeneinheit entlang einer Auslenkungslinie in Bezug zum nicht-aktivierten Zustand. Maximale lineare (Zug- oder Druck-)Beanspruchungen von wenigstens etwa 50 Prozent sind für vorbeanspruchte Polymere der vorliegenden Erfindung üblich. Selbstverständlich kann ein Polymer mit einer kleineren Beanspruchung als dem Maximum ausgelenkt werden, und die Beanspruchung kann eingestellt werden, indem man die angelegte Spannung einstellt. Für einige vorbeanspruchte Polymere sind maximale lineare Beanspruchungen von wenigstens etwa 100 Prozent üblich. Für Polymere, wie VHB 4910, wie es von der 3

M Corporation, St. Paul, MN, erzeugt wird, sind maximale lineare Beanspruchungen im Bereich von 40 bis 215 Prozent üblich. Eine Flächenbeanspruchung eines elektroaktiven Polymers bezieht sich auf die Veränderung der Ebenenfläche, z. B. die Veränderung der durch die Richtungen **108** und **110** in den [Fig. 1A](#) und [Fig. 1B](#) definierten Ebene pro Flächeneinheit des Polymers nach einer Aktivierung in Bezug zum nicht-aktivierten Zustand. Maximale Flächenbeanspruchungen von wenigstens etwa 100 Prozent sind für vorbeanspruchte Polymere der vorliegenden Erfindung möglich. Für einige vorbeanspruchte Polymere sind maximale Flächenbeanspruchungen im Bereich von 70 bis 330 Prozent üblich.

**[0055]** Nachdem das Polymer vorbeansprucht ist, kann es allgemein an einem oder mehreren Objekten fixiert werden. Jedes Objekt kann ausreichend steif sein, um das Maß der gewünschten Vorbeanspruchung im Polymer aufrechtzuerhalten. Das Polymer kann an dem einen oder den mehreren Objekten gemäß einem beliebigen konventionellen, auf dem Fachgebiet bekannten Verfahren fixiert werden, wie einem chemischen Kleber, einer Kleberschicht oder einem Klebmaterial, mechanischer Befestigung, usw..

**[0056]** Wandler und vorbeanspruchte Polymere der vorliegenden Erfindung sind nicht auf irgendeine spezielle Geometrie oder lineare Auslenkung beschränkt. Zum Beispiel können das Polymer und die Elektroden in eine beliebige Geometrie oder Gestalt geformt werden, einschließlich Röhren und Rollen, gestreckte Polymere, die zwischen mehreren starren Strukturen befestigt werden, gestreckte Polymere, die über einem Rahmen mit einer beliebigen Geometrie – einschließlich gekrümmte oder komplexe Geometrien, über einem Rahmen mit einem oder mehreren Gelenken, usw. befestigt werden. Die Auslenkung eines Wandlers gemäß der vorliegenden Erfindung schließt eine lineare Ausdehnung und Kompression in einer oder mehreren Richtungen, eine Biegung, eine axiale Auslenkung, wenn das Polymer gerollt ist, eine Auslenkung aus einer in einem Substrat vorgesehenen Öffnung heraus, usw. ein. Die Auslenkung eines Wandlers kann dadurch beeinflusst werden, wie das Polymer durch einen Rahmen oder starre Strukturen, die am Polymer befestigt sind, eingeschränkt wird. Bei einer Ausführungsform wird ein flexibles Material, das in seiner Längenausdehnung steifer ist als das Polymer, an einer Seite eines Wandlers befestigt und induziert eine Biegung, wenn das Polymer aktiviert wird. Bei einer anderen Ausführungsform wird ein Wandler, der aus der Ebene heraus ausgelenkt wird, als eine Membran bezeichnet. Eine Membran-Vorrichtung zum Umwandeln zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie wird ausführlicher mit Bezug auf die [Fig. 1E](#) und [Fig. 1F](#) beschrieben.

**[0057]** Elektroaktive Polymere können eine mit einer Textur versehene Oberfläche einschließen. [Fig. 1C](#) zeigt eine mit einer Textur versehene Oberfläche **150** für ein elektroaktives Polymer **152** mit einem wellenartigen Profil. Die mit einer Textur versehene Oberfläche **150** gestattet es, dass das Polymer **152** unter Ausnutzung einer Biegung der Oberflächenwellen **154** ausgelenkt wird. Eine Biegung der Oberflächenwellen **154** sorgt für eine gerichtete Nachgiebigkeit in einer Richtung **155**, mit einem geringeren Widerstand als ein Strecken des gesamten Volumens für eine am Polymer **152** befestigte steife Elektrode in der Richtung **155**. Die mit einer Textur versehene Oberfläche **150** kann durch Täler und Bergrücken charakterisiert werden, zum Beispiel etwa 0,1 Mikrometer bis 40 Mikrometer breit und etwa 0,1 Mikrometer bis 20 Mikrometer tief. In diesem Fall ist die Wellenbreite und -tiefe wesentlich kleiner als die Dicke des Polymers. Bei einer spezifischen Ausführungsform sind die Täler und Bergrücken ungefähr 10 Mikrometer breit und 6 Mikrometer tief, auf einer Polymerschicht mit einer Dicke von 200 Mikrometern.

**[0058]** Bei einer Ausführungsform ist eine dünne Schicht aus einem steifen Material **156**, wie eine Elektrode, am Polymer **152** befestigt, um das wellenartige Profil bereitzustellen. Während der Fertigung wird das elektroaktive Polymer mehr gestreckt, als es sich strecken kann, wenn es aktiviert wird, und die dünne Lage aus steifem Material **156** wird an der Oberfläche des gestreckten Polymers **152** befestigt. Anschließend wird das Polymer **152** entlastet, und die Struktur beult sich aus, um die mit der Textur versehene Oberfläche bereitzustellen.

**[0059]** Allgemein kann eine mit einer Textur versehene Oberfläche eine beliebige ungleichförmige oder unebene Oberflächentopographie umfassen, die es einem Polymer erlaubt, unter Verformung in der Polymeroberfläche ausgelenkt zu werden. Beispielfhaft zeigt [Fig. 1D](#) ein elektroaktives Polymer **160**, das eine aufgeraute Oberfläche **161** mit einer zufälligen Texturierung einschließt. Die aufgeraute Oberfläche **160** gestattet eine Ebenenauslenkung, die nicht richtungsabhängig nachgiebig ist. Vorteilhaft kann die Verformung der Oberflächentopographie die Auslenkung einer steifen Elektrode mit weniger Widerstand als eine Streckung oder Kompression des gesamten Volumens erlauben. Es sollte festgestellt werden, dass die Auslenkung eines vorbeanspruchten Polymers mit einer mit einer Textur versehenen Oberfläche eine Kombination einer Oberflächenverformung und einer Streckung des gesamten Volumens des Polymers umfassen kann.

**[0060]** Mit einer Textur versehene oder ungleichförmige Oberflächen für das Polymer können auch die Verwendung einer Sperrschicht und/oder von Elektroden gestatten, die sich auf eine Verformung der mit



der Textur versehenen Oberflächen verlassen. Die Elektroden können Metalle einschließen, die sich entsprechend der Geometrie der Polymeroberfläche biegen. Die Sperrschicht kann verwendet werden, um Ladung im Fall eines lokalen elektrischen Durchbruchs im vorbeanspruchten Polymermaterial zu blockieren.

**[0061]** Materialien, die zur Verwendung als vorbeanspruchtes Polymer mit der vorliegenden Erfindung geeignet sind, können irgend ein im Wesentlichen isolierendes Polymer oder Kautschuk (oder Kombination davon) einschließen, das/der sich ansprechend auf eine elektrostatische Kraft verformt oder dessen Verformung zu einer Veränderung im elektrischen Feld führt. Ein geeignetes Material ist NuSil CF19-2186, wie es von der NuSil Technology Carpenteria, CA, geliefert wird. Allgemeiner schließen zur Verwendung als vorbeanspruchtes Polymer geeignete beispielhafte Materialien Silikon-Elastomere, Acryl-Elastomere, Polyurethane, thermoplastische Elastomere, PVDF umfassende Copolymere, druckempfindliche Klebstoffe, Fluor-Elastomere, Silikon- und Acryl-Komponenten umfassende Polymere und dergleichen ein. Silikon- und Acryl-Komponenten umfassende Polymere können zum Beispiel Silikon- und Acryl-Komponenten einschließende Copolymere, ein Silikon-Elastomer und ein Acryl-Elastomer umfassende Polymermischungen einschließen. Offensichtlich können Kombinationen von einigen dieser Materialien in Wandlern dieser Erfindung als das Polymer verwendet werden.

**[0062]** Ein Beispiel eines geeigneten Silikon-Elastomers ist Dow Corning HS3, wie es von Dow Corning, Wilmington, Delaware, geliefert wird. Ein Beispiel eines geeigneten Fluor-Silikons ist Dow Corning 730, wie es von Dow Corning, Wilmington, Delaware, geliefert wird. Ein geeignetes Beispiel eines thermoplastischen Elastomers ist Styrol-Butadien-Styrol(SBS)-Block-Copolymer.

**[0063]** Einige Acryle, wie irgendein Acryl in der 4900 VHB Acryl-Reihe, wie sie von der 3 M Corp., St. Paul, MN geliefert wird, haben Eigenschaften, die zur Verwendung als Wandlerpolymer für diese Erfindung geeignet sind. Daher können bei einigen Ausführungsformen Polymere, die zur Verwendung mit der vorliegenden Erfindung geeignet sind, aus irgend einem monoethylenisch ungesättigten Monomer (oder Kombination von Monomeren) hergestellt werden, das homopolymerisierbar ist, um ein Polymer zu bilden, das eine Glasübergangstemperatur von höchstens etwa 0 Grad Celsius besitzt. Bevorzugte monoethylenisch ungesättigte Monomere schließen Isooctylacrylat, 2-Ethylhexylacrylat, Decylacrylat, Dodecylacrylat, Hexylacrylat, Isononylacrylat, Isooctylmethacrylat und 2-Ethylhexylmethacrylat ein. Jegliches der Monomere kann auch ein oder mehrere Halogene, wie Fluor, enthalten.

**[0064]** Ein Beispiel eines geeigneten Copolymers schließt sowohl Silikon- und Acryl-Elastomer-Komponenten ein. In einigen Fällen können Materialien, die zur Verwendung mit der vorliegenden Erfindung geeignet sind, Kombinationen von einem oder mehreren der oben angegebenen Materialien enthalten. Zum Beispiel ist ein geeignetes Polymer eine Mischung, die ein Silikon-Elastomer und ein Acryl-Elastomer enthält.

**[0065]** In vielen Fällen, sind Materialien, die gemäß der vorliegenden Erfindung verwendet werden, kommerziell erhältliche Polymere. Die kommerziell erhältlichen Polymere können zum Beispiel irgend ein kommerziell verfügbares Silikon-Elastomer, Polyurethan, PVDF-Copolymer und klebendes Elastomer einschließen. Die Verwendung von kommerziell erhältlichen Materialien liefert preiswerte Alternativen für Wandler und zugehörige Vorrichtungen der vorliegenden Erfindung. Die Verwendung von kommerziell erhältlichen Materialien kann auch die Fertigung vereinfachen. Bei einer spezifischen Ausführungsform ist das kommerziell erhältliche Polymer ein kommerziell erhältliches Acryl-Elastomer, das Mischungen von aliphatischem Acrylat umfasst, die während der Fertigung photogehärtet werden. Die Elastizität des Acryl-Elastomers resultiert aus einer Kombination der verzweigten aliphatischen Gruppen und der Vernetzung zwischen den Acryl-Polymer-Ketten.

**[0066]** Materialien, die als vorbeanspruchtes Polymer verwendet werden, können basierend auf einer oder mehreren Materialeigenschaften ausgewählt werden, wie einer hohen elektrischen Durchbruchfestigkeit, einem niedrigen Elastizitätsmodul -(für große oder kleine Verformungen), einer hohen Dielektrizitätskonstante, usw.. Bei der vorliegenden Erfindung wird das Polymer so ausgewählt, dass es ein Elastizitätsmodul von höchstens etwa 100 MPa aufweist. Das Polymer kann so ausgewählt werden, dass es einen maximalen Aktivierungsdruck zwischen etwa 0,05 MPa und etwa 10 MPa aufweist, und vorzugsweise zwischen etwa 0,3 MPa und etwa 3 MPa. Bei einem anderen Beispiel wird das Polymer so ausgewählt, dass es eine Dielektrizitätskonstante zwischen etwa 2 und etwa 20 besitzt, und vorzugsweise zwischen etwa 2,5 und etwa 12. Für einige Anwendungen wird ein elektroaktives Polymer basierend auf einer oder mehreren Anwendungs-Anforderungen ausgewählt, wie ein weiter Temperatur- und/oder Feuchtigkeitsbereich, Wiederholbarkeit, Genauigkeit, geringes Kriechen, Zuverlässigkeit und Ausdauer. Häufig haben halogenierte Polymere, wie fluorierte oder chlorierte Polymere, eine höhere Dielektrizitätskonstante als das Ausgangspolymer. In einem Beispiel kann ein hochgradig dielektrisches Polyurethan aus teilweise fluorierten Urethanmonomeren hergestellt werden.

**[0067]** Elektroaktive Polymere können auch ein

oder mehrere Additive einschließen, um verschiedene Eigenschaften zu verbessern. Beispiele von geeigneten Materialklassen schließen Weichmacher, Antioxidantien und partikelförmige Feststoffe mit hoher Dielektrizitätskonstante ein. Beispiele von geeigneten Weichmachern schließen Kohlenwasserstoff-Öle mit hohem Molekulargewicht, Kohlenwasserstoff-Fette mit hohem Molekulargewicht, Pentalyn-H, Piccovar® AP Kohlenwasserstoff-Harze, Admex 760, Plastolein 9720, Silikon-Öle, Silikon-Fette, Floral 105, Silikon-Elastomere, nicht-ionische oberflächenaktive Stoffe und dergleichen ein. Natürlich können Kombinationen dieser Materialien verwendet werden. Bei einer Ausführungsform ist das Antioxidans ein nicht-flüchtiges festes Antioxidans.

**[0068]** Bei einer bevorzugten Ausführungsform verbessern die Additive die Fähigkeit des Polymers, zwischen mechanischer Energie und elektrischer Energie umzuwandeln. Allgemein können die Additive jegliche Polymereigenschaft oder jeglichen Parameter verbessern, der mit der Fähigkeit des Parameters in Beziehung steht, zwischen mechanischer Energie und elektrischer Energie umzuwandeln. Polymermaterial-Eigenschaften und Parameter, die mit der Fähigkeit des Polymers in Beziehung stehen, zwischen mechanischer Energie und elektrischer Energie umzuwandeln, schließen zum Beispiel die dielektrische Durchbruchfestigkeit, maximale Beanspruchung, Dielektrizitätskonstante, Elastizitätsmodul, Eigenschaften, die mit dem viskoelastischen Verhalten verbunden sind, Eigenschaften, die mit Kriechen verbunden sind, Ansprechzeit und Aktivierungsspannung ein. Die Zugabe eines Weichmachers kann zum Beispiel das Funktionieren eines Wandlers dieser Erfindung verbessern, indem das Elastizitätsmodul des Polymers verringert und/oder die dielektrische Durchbruchfestigkeit des Polymers erhöht wird.

**[0069]** Bei einer Ausführungsform ist ein Additiv in einem Polymer enthalten, um die dielektrische Durchbruchfestigkeit des Polymers zu verbessern. Eine Verbesserung der dielektrischen Durchbruchfestigkeit gestattet die Verwendung von größeren elektrisch aktivierten Beanspruchungen für das Polymer. Beispielfähig kann ein weichmachendes Additiv zu einem Polymer hinzugefügt werden, um die dielektrische Durchbruchfestigkeit des Polymers zu erhöhen. Alternativ kann ein synthetisches Harz zu einem Styrol-Butadien-Styrol-Block-Copolymer hinzugefügt werden, um die dielektrische Durchbruchfestigkeit des Copolymers zu verbessern. Zum Beispiel wurde Pentalyn-H, wie es von Hercules, Inc., Wilmington, DE hergestellt wird, zu Kraton D2104, wie es von Shell Chemical, Houston, TX hergestellt wird, hinzugefügt, um die dielektrische Durchbruchfestigkeit des Kraton D2104 zu verbessern. Weitere Einzelheiten der Fertigung von Polymeren, die ein Hinzufügen von einem oder mehreren Additiven einschließen, werden unten geliefert. In diesem Fall

kann das Verhältnis des hinzugefügten Pentalyn-H von etwa 0 bis 2:1 Gewichtsanteile reichen. Bei einer anderen Ausführungsform wird ein Additiv eingeschlossen, um die Dielektrizitätskonstante eines Polymers zu erhöhen. Zum Beispiel können partikelförmige Feststoffe mit hoher Dielektrizitätskonstante, wie feine Keramikpulver, hinzugefügt werden, um die Dielektrizitätskonstante eines kommerziell erhältlichen Polymers zu erhöhen. Alternativ können Polymere, wie Polyurethan, teilweise fluoriert werden, um die Dielektrizitätskonstante zu erhöhen.

**[0070]** Alternativ kann ein Additiv in einem Polymer enthalten sein, um das Elastizitätsmodul des Polymers zu verringern. Eine Verringerung des Elastizitätsmoduls ermöglicht größere Beanspruchungen für das Polymer. Bei einer spezifischen Ausführungsform wurde Mineralöl zu einer Lösung von Kraton D hinzugefügt, um das Elastizitätsmodul des Polymers zu verringern. In diesem Fall kann das Verhältnis des hinzugefügten Mineralöls im Bereich von etwa 0 bis 2:1 Gewichtsanteile liegen. Spezifische Materialien, die enthalten sind, um das Elastizitätsmodul eines Acryl-Polymers der vorliegenden Erfindung zu verringern, schließen Acrylsäuren, Acryl-Kleber, Acryle, die flexible Seitengruppen enthalten, wie Isooctyl-Gruppen und 2-Ethylhexyl-Gruppen, oder irgend ein Copolymer von Acrylsäure und Isooctylacrylat ein.

**[0071]** Mehrere Additive können in einem Polymer enthalten sein, um die Leistung von einer oder mehreren Materialeigenschaften zu verbessern. Bei einer Ausführungsform wurden sowohl Mineralöl und Pentalyn-H zu einer Lösung von Kraton D2104 hinzugefügt, um die dielektrische Durchbruchfestigkeit zu erhöhen und das Elastizitätsmodul des Polymers zu verringern. Alternativ kann bei einem kommerziell erhältlichen Silikon-Kautschuk, dessen Steifigkeit durch feine Kohlenstoffpartikel erhöht worden ist, die verwendet worden sind, um die Dielektrizitätskonstante zu erhöhen, die Steifigkeit durch das Hinzufügen eines mit Kohlenstoff oder Silber gefüllten Silikon-Fetts verringert werden.

**[0072]** Ein Additiv kann auch in einem Polymer enthalten sein, um für eine zusätzliche Eigenschaft für den Wandler zu sorgen. Die zusätzliche Eigenschaft ist nicht notwendigerweise mit der Polymerleistung beim Umwandeln zwischen mechanischer und elektrischer Energie verbunden. Beispielfähig kann Pentalyn-H zu Kraton D2104 hinzugefügt werden, um dem Polymer eine klebende Eigenschaft zu verleihen. In diesem Fall trägt das Additiv auch zur Umwandlung zwischen mechanischer und elektrischer Energie bei. Bei einer spezifischen Ausführungsform lieferten Polymere, die Kraton D2104, Pentalyn-H, Mineralöl umfassten und unter Verwendung von Butylacetat gefertigt wurden, ein klebendes Polymer und eine maximale lineare Beanspruchung im Bereich von etwa 70 bis 200 Prozent.

**[0073]** Geeignete Aktivierungsspannungen für vorbeanspruchte Polymere, die für die vorliegende Erfindung geeignet sind, können basierend auf dem elektroaktiven Polymermaterial und seinen Eigenschaften (z. B. der Dielektrizitätskonstante) sowie den Abmessungen des Polymers (z. B. der Dicke zwischen Elektroden) variieren. Beispielfhaft können elektrische Aktivierungsfelder für das Polymer **102** in [Fig. 1A](#) in ihrer Größe von etwa 0 V/m bis etwa 440 Megavolt/Meter reichen. Aktivierungsspannungen in diesem Bereich können einen Druck im Bereich von etwa 0 Pa bis etwa 10 MPa erzeugen. Um einen Wandler zu erzielen, der zu höheren Kräften imstande ist, kann die Dicke des Polymers vergrößert werden. Alternativ können mehrere Polymerschichten realisiert werden. Aktivierungsspannungen für ein bestimmtes Polymer können verringert werden, indem man zum Beispiel die Dielektrizitätskonstante erhöht, die Polymerdicke verkleinert und das Elastizitätsmodul verringert.

**[0074]** Vorbeanspruchte Polymere der vorliegenden Erfindung können einen weiten Bereich von Dicken abdecken. Bei einer Ausführungsform kann die Polymerdicke im Bereich zwischen etwa 1 Mikrometer und 2 Millimeter liegen. Typische Dicken vor der Vorbeanspruchung schließen 50–225 Mikrometer für HS3, 25–75 Mikrometer für NuSil CF19-2186, 50–1000 Mikrometer für SBS, und 100–1000 Mikron für ein beliebiges Acryl-Polymer der 3 M VHB 4900-Reihe ein. Polymerdicken können verkleinert werden, indem man den Film in einer oder beiden Ebenenrichtungen streckt. In vielen Fällen können vorbeanspruchte Polymere der vorliegenden Erfindung als Dünnschichten gefertigt und realisiert werden. Dicken, die für diese Dünnschichten geeignet sind, können unterhalb von 50 Mikrometern liegen.

**[0075]** Wandler zum Umwandeln zwischen mechanischer und elektrischer Energie der vorliegenden Erfindung umschließen auch mehrschichtige Lamine. Bei einer Ausführungsform bezieht sich ein mehrschichtiges Laminat auf eine Struktur, die zusätzlich zu einem einzelnen elektroaktiven Polymer und seinen entsprechenden Elektroden eine oder mehrere Schichten enthält. Bei einer Ausführungsform bezieht sich ein mehrschichtiges Laminat auf eine Struktur mit einem Wandler, der ein elektroaktives Polymer und seine entsprechenden Elektroden einschließt, einer Schicht, die auf wenigstens eine der Elektroden und das Polymer laminiert ist, und die mechanisch mit einem Teil des Wandlers gekoppelte Schicht. Mehrschichtige Lamine können entweder als extern oder intern bezeichnet werden. Bei externen mehrschichtigen Laminen liegen die eine oder mehreren zusätzlichen Schichten nicht zwischen den Elektroden. Bei internen mehrschichtigen Laminen liegen die eine oder mehreren zusätzlichen Schichten zwischen den Elektroden. Für entweder externe oder interne Schichten können die Schichten zum

Beispiel unter Verwendung eines Klebers oder einer Leimschicht festgeklebt werden.

**[0076]** Interne mehrschichtige Lamine können für eine breite Vielfalt von Zwecken verwendet werden. In einem internen mehrschichtigen Laminat kann auch eine Schicht enthalten sein, um irgend eine mechanische oder elektrische Eigenschaft des Wandlers zu verbessern, z. B. Steifigkeit, elektrischen Widerstand, Reißfestigkeit, usw.. Interne mehrschichtige Lamine können eine Schicht mit einer größeren dielektrischen Durchbruchfestigkeit einschließen. Interne mehrschichtige Lamine können mehrere Schichten von verträglichen Materialien einschließen, die durch leitende oder halbleitende Schichten (z. B. metallische oder Polymer-Schichten) getrennt sind, um die Durchbruchfestigkeit des Laminat-Wandlers zu erhöhen. Verträgliche Materialien beziehen sich auf Materialien, welche dasselbe oder ein im Wesentlichen ähnliches Material umfassen oder dieselben oder im Wesentlichen ähnliche Eigenschaften (z. B. mechanische und/oder elektrische Eigenschaften) besitzen. Interne Lamine aus verträglichen Materialien in Bezug zum Polymer können verwendet werden, um Herstellungsfehler im Polymer zu kompensieren und für eine größere Wandler-Gleichförmigkeit zu sorgen. Beispielfhaft kann ein 100 Mikrometer dickes einschichtiges Polymer einen Defekt aufweisen, der die gesamten 100 Mikrometer Dicke beeinflussen kann. In diesem Fall kann ein Laminat aus zehn Schichten verwendet werden, von denen jede eine Dicke von 10 Mikrometern besitzt, so dass jegliche Herstellungsdefekte lokal auf ein 10-Mikrometer-Polymer begrenzt sind – womit eine vergleichbare 100 Mikrometer dicke Laminatstruktur bereitgestellt wird, jedoch mit größerer Gleichförmigkeit und Fehlertoleranz, verglichen mit dem einschichtigen Polymer. Interne Lamine aus verträglichen Materialien in Bezug zum Polymer können auch verwendet werden, um jeglichen durchgehenden Einzieh-Effekt zu verhindern. Ein durchgehender Einzieh-Effekt bezieht sich darauf, dass wenn die elektrostatischen Kräfte zwischen sich nähernden Elektroden schneller zunehmen als die elastischen Widerstandskräfte des Polymers. In solchen Fällen kann der Wandler elektromagnetisch instabil werden, was zu einem schnellen lokalen Dünnerwerden und einem elektrischen Durchbruch führt. Eine interne Schicht kann auch verwendet werden, um eine Schutzschicht (elektrisch oder mechanisch) für eine andere Schicht im Verbundwerkstoff zu bieten. Bei einer Ausführungsform ist eine elektrische Sperrschicht mechanisch zwischen eine Elektrode und das Polymer gekoppelt, um die Auswirkung von jeglichem örtlich begrenztem Durchbruch im Polymer zu minimieren. Ein Durchbruch kann als derjenige Punkt definiert werden, an dem das Polymer die angelegte Spannung nicht mehr aushalten kann. Die Sperrschicht ist typischerweise dünner als das Polymer und weist eine höhere Dielektrizitätskonstante auf als das Polymer, so dass

der Spannungsabfall hauptsächlich über das Polymer auftritt. Es ist häufig von Vorzug, dass die Sperrschicht eine hohe dielektrische Durchbruchfestigkeit besitzt.

**[0077]** Externe mehrschichtige Lamine können für eine breite Vielfalt von Zwecken verwendet werden. Bei einer Ausführungsform enthält ein externer mehrschichtiger Verbundwerkstoff eine Schicht, um Steifigkeit, Kriechen zu steuern, um Last während der Auslenkung gleichförmiger zu verteilen, um die Reißfestigkeit zu erhöhen, oder um einen durchgehenden Einzieh-Effekt zu verhindern. Externe Lamine aus verträglichen Polymeren, die Elektroden enthalten, können verwendet werden, um die Last über jede der Polymerschichten zu verteilen oder die Polymer-Gleichförmigkeit während der Auslenkung zu vergrößern. In einem externen Laminat kann auch eine Schicht enthalten sein, die eine höhere Steifigkeit als das Polymer aufweist, z. B. ein Material mit einer höheren Steifigkeit oder einem anderen Maß an Vorbeanspruchung für ein verträgliches Material, um eine Membran, eine Pumpe oder einen Biegebalken vorzuspannen. In einem Generatormodus kann sich ein gestreckter Wandler zusammenziehen und elektrische Energie erzeugen, solange die elektrischen Feld-Belastungen geringer sind als die elastischen Rückstell-Belastungen. In diesem Fall kann es das Hinzufügen einer Versteifungsschicht gestatten, dass sich der Wandler entgegen größeren Feld-Belastungen zusammenzieht, wodurch seine Energieabgabe pro Hub erhöht wird. Eine externe Schicht kann auch verwendet werden, um eine Schutzschicht (elektrisch oder mechanisch) für eine andere Schicht im Verbundwerkstoff zu bieten. Bei einer anderen spezifischen Ausführungsform enthält ein externer Verbundwerkstoff eine Schaumstoffschicht, um eine kleine Pumpe oder Membran vorzuspannen. Die Schaumstoffschicht kann einen offenporigen Schaumstoff umfassen, der es gestattet, dass sich Fluide in den Schaum hinein und aus diesem heraus bewegen. Eine externe Schicht mit einer geringen Steifigkeit kann auch für eine elektrische Abschirmung ohne das Einbringen von übermäßigen mechanischen Energieverlusten verwendet werden.

**[0078]** Ein Verbundwerkstoff kann durch Rollen oder Falten eines Polymers gebildet werden, um einen Wandler mit einer hochdichten Packung zu erzeugen. Um bei Laminaten, die gefaltete Schichten enthalten, nachteilige elektrische Felder in der Nachbarschaft von Falten zu vermeiden, können Elektroden auf dem Polymer in einem Muster vorgesehen werden, so dass jegliches Polymer in der Nähe der Falten keine sich überlappenden entgegengesetzten Elektroden besitzt. Zusätzlich können das Polymer und die Elektroden so gerollt oder gefaltet werden, dass die äußere freiliegende Elektrode oder Elektroden dieselbe Polarität besitzen. Die Fertigung kann derart ausgeführt werden, dass Elektroden von ent-

gegengesetzter Polarität durch Polymer getrennt sind. Zum Beispiel kann ein gerollter Aktuator hergestellt werden, indem man zwei Polymerschichten mit Elektroden aufrollt, oder eine einzelne Schicht kann zuerst gefaltet, dann gerollt werden. Zudem kann die äußere freiliegende Elektrode geerdet werden, um die Sicherheit des Wandlers zu erhöhen. Eine externe laminierte äußere Hautschicht kann ebenfalls hinzugefügt werden, um die Sicherheit weiter zu erhöhen.

### 3. AKTUATOR- UND GENERATOR-VORRICHTUNGEN

**[0079]** Die Auslenkung eines vorbeanspruchten Polymers kann in einer Vielfalt von Wegen verwendet werden, um mechanische Energie zu erzeugen oder zu erhalten. Allgemein gesagt, können elektroaktive Polymere mit einer Vielfalt von Aktuatoren und Generatoren realisiert werden – einschließlich konventionelle Aktuatoren und Generatoren, die nachträglich mit einem vorbeanspruchten Polymer ausgestattet worden sind, und maßgefertigte Aktuatoren und Generatoren, die speziell für ein oder mehrere vorbeanspruchte Polymere ausgelegt worden sind. Konventionelle Aktuatoren und Generatoren schließen Dehnvorrichtungen, Biegebalken, Stapel, Membranen, usw. ein. Mehrere verschiedene beispielhafte maßgefertigte Aktuatoren und Generatoren gemäß der vorliegenden Erfindung werden nun erörtert.

**[0080]** [Fig. 1E](#) zeigt eine Querschnittsseitenansicht einer Membran-Vorrichtung **130**, die ein vorbeanspruchtes Polymer **131** enthält, vor einer elektrischen Aktivierung gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Das vorbeanspruchte Polymer **131** ist an einem Rahmen **132** befestigt. Der Rahmen **132** enthält eine nicht-kreisförmige Öffnung **133**, die eine Auslenkung des Polymers **131** senkrecht zur Fläche der nicht-kreisförmigen Öffnung **133** gestattet. Die nicht-kreisförmige Öffnung **133** kann ein rechteckiger Schlitz, eine Öffnung mit maßgefertigter Geometrie, usw. sein. In einigen Fällen kann ein nicht-kreisförmiger langgestreckter Schlitz für eine Membran-Vorrichtung vorteilhaft sein, verglichen mit einer kreisförmigen Öffnung. Zum Beispiel ist eine Dicken-Beanspruchung bei einem langgestreckten Schlitz gleichförmiger, verglichen mit einer Öffnung. Nicht-gleichförmige Beanspruchungen beschränken die Gesamt-Leistung, da der elektrische Durchbruch eines Polymers typischerweise durch den dünnsten Punkt bestimmt wird. Die Membran-Vorrichtung **130** schließt Elektroden **134** und **136** auf jeder Seite des Polymers **131** ein, um für eine Spannungsdifferenz über einen Teil des Polymers **131** zu sorgen.

**[0081]** In der Konfiguration von [Fig. 1E](#) mit abgeschalteter Spannung wird das Polymer **131** gestreckt und unter Spannung am Rahmen **132** befestigt, um eine Vorbeanspruchung zu erzielen. Beim Anlegen

einer geeigneten Spannung an den Elektroden **134** und **136** dehnt sich der Polymerfilm **131** weg von der Ebene des Rahmens **132** aus, wie in [Fig. 1F](#) dargestellt. Die Elektroden **134** und **136** sind nachgiebig und verändern ihre Form mit dem vorbeanspruchten Polymer **131**, während es ausgelenkt wird.

**[0082]** Die Membran-Vorrichtung **130** ist zu einer Ausdehnung in beiden Richtungen weg von der Ebene imstande. Bei einer Ausführungsform schließt die Unterseite **141** des Polymers **131** einen Vorspanndruck ein, der die Ausdehnung des Polymerfilms **131** beeinflusst, um ihn dauernd nach oben zu in Richtung der Pfeile **143** ([Fig. 1F](#)) zu aktivieren. Bei einer anderen Ausführungsform wird ein Quellmittel, wie eine kleine Menge an Silikon-Öl, auf die Unterseite **141** aufgebracht, um die Ausdehnung des Polymers **131** in Richtung der Pfeile **143** zu beeinflussen. Das Quellmittel verursacht eine leichte dauerhafte Auslenkung in einer Richtung, wie während der Fertigung festgelegt, z. B. indem ein leichter Drucks zur Unterseite **141** zugeführt wird, wenn das Quellmittel aufgebracht wird. Das Quellmittel gestattet es, dass die Membran dauernd in einer gewünschten Richtung aktiviert wird, ohne dass ein Vorspanndruck verwendet wird.

**[0083]** Das Maß der Ausdehnung bei der Membran-Vorrichtung **130** wird basierend auf einer Reihe von Faktoren variieren, einschließlich des Polymermaterials **131**, der angelegten Spannung, dem Maß der Vorbeanspruchung, jeglichem Vorspanndruck, der Nachgiebigkeit der Elektroden **134** und **136**, usw.. Bei einer Ausführungsform ist das Polymer **131** zu Auslenkungen bis zu einer Höhe **137** imstande, die wenigstens etwa 50 Prozent des Öffnungsdurchmessers **139** entspricht, und kann bei großen Auslenkungen eine halbkugelförmige Gestalt einnehmen. In diesem Fall kann ein zwischen dem Polymer **131** und dem Rahmen **132** gebildeter Winkel **147** kleiner als 90 Grad sein.

**[0084]** Die Membran-Vorrichtung **130** kann auch als Generator verwendet werden. In diesem Fall dient ein Druck, wie ein Fluidruck, als mechanische Beaufschlagung der Membran auf der Unterseite **141**, um den Wandler (Polymer **134** und Elektroden **134** und **136**) in der Nähe der Öffnung **133** zu strecken, wie in [Fig. 1F](#) dargestellt. Eine Spannungsdifferenz wird zwischen den Elektroden **134** und **136** angelegt, während der Wandler gestreckt ist, und ein Entlasten des Drucks gestattet es, dass sich die Membran zusammenzieht und sich die gespeicherte elektrische Energie auf dem Wandler erhöht.

**[0085]** Eine Ausdehnung eines elektroaktiven Polymers in einer Richtung kann Kontraktionsbelastungen in einer zweiten Richtung induzieren, wie infolge von Poisson-Effekten. Dies kann die mechanische Abgabe bei einem Wandler verringern, der eine me-

chanische Abgabe in der zweiten Richtung liefert. Entsprechend können Aktuatoren der vorliegenden Erfindung ausgelegt werden, um ein Polymer in der Nicht-Abgaberichtung einzuschränken. In einigen Fällen können Aktuatoren ausgelegt werden, um die mechanische Abgabe unter Verwendung einer Auslenkung in der Nicht-Abgaberichtung zu verbessern.

**[0086]** Eine Vorrichtung, die eine Auslenkung in einer Ebenenrichtung verwendet, um die Energieumwandlung in der anderen Ebenenrichtung zu verbessern, ist eine Bogen-Vorrichtung. Die [Fig. 2A](#) und [Fig. 2B](#) zeigen eine Bogen-Vorrichtung **200** zum Umwandeln zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie vor und nach einer elektrischen Aktivierung gemäß einer spezifischen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Die Bogen-Vorrichtung **200** ist ein ebener Mechanismus, umfassend einen flexiblen Rahmen **202**, der für eine mechanische Unterstützung sorgt, um die Umwandlung zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie für ein am Rahmen **202** befestigtes Polymer **206** zu verbessern. Der Rahmen **202** schließt sechs steife Elemente **204** ein, die an Gelenken **205** verbunden sind. Die Elemente **204** und die Gelenke **205** liefern eine mechanische Unterstützung, indem sie die Polymerauslenkung in einer Ebenenrichtung **208** in eine mechanische Abgabe in einer dazu senkrechten Ebenenrichtung **210** koppeln. Spezieller ist der Rahmen **202** so angeordnet, dass eine kleine Auslenkung des Polymers **206** in der Richtung **208** die Auslenkung in der dazu senkrechten Ebenenrichtung **210** verbessert. An entgegengesetzten (Ober- und Unter-)Seiten des Polymers **206** sind Elektroden **207** befestigt (untere Elektrode auf der Unterseite des Polymers **206** nicht dargestellt), um für eine Spannungsdifferenz über einen Teil des Polymers **206** zu sorgen.

**[0087]** Das Polymer **206** ist in seinen orthogonalen Richtungen mit verschiedenen Vorbeanspruchungsstärken ausgebildet. Spezieller enthält das elektroaktive Polymer **206** eine hohe Vorbeanspruchung in der Ebenenrichtung **208** und wenig oder keine Vorbeanspruchung in der dazu senkrechten Ebenenrichtung **210**. Diese anisotrope Vorbeanspruchung ist in einer Beziehung zur Geometrie des Rahmens **202** angeordnet. Spezieller zieht sich das Polymer bei einer Aktivierung über die Elektroden **207** in der Richtung **208** der hohen Beanspruchung zusammen. Mit der eingeschränkten Bewegung des Rahmens **202** und des Hebelarms, der von dem Element **204** bereitgestellt wird, trägt diese Kontraktion dazu bei, die Auslenkung in der dazu senkrechten Ebenenrichtung **210** anzutreiben. Daher biegt sich selbst bei einer kurzen Auslenkung des Polymers **206** in der Richtung **208** der hohen Vorbeanspruchung der Rahmen **202** in der Richtung **210** nach außen. Auf diese Weise wird eine kleine Kontraktion in der Richtung **210** der hohen Vorbeanspruchung zu einer größeren Ausdehnung in der Richtung **208** der im Verhältnis



geringen Vorbeanspruchung.

**[0088]** Die Verwendung der anisotropen Vorbeanspruchung und die durch den Rahmen **202** gelieferte Einschränkung der Bogen-Vorrichtung **200** gestattet es, dass die Kontraktion in einer Richtung die mechanische Auslenkung und die elektrische in mechanische Umwandlung in einer anderen Richtung verbessert. Mit anderen Worten wird eine an der Bogen-Vorrichtung **200** befestigte Last **211** ([Fig. 2B](#)) mit einer Auslenkung des Polymers **206** in zwei Richtungen – Richtung **208** und **210** – gekoppelt. Infolge der unterschiedlichen Vorbeanspruchung des Polymers **206** und der Geometrie des Rahmens **202** ist daher die Bogen-Vorrichtung **200** imstande, bei einer gleichen elektrischen Beaufschlagung für eine größere mechanische Verlagerung und mechanische Energieabgabe als ein elektroaktives Polymer allein zu sorgen.

**[0089]** Die Bogen-Vorrichtung **200** kann basierend auf dem Polymer **206** ausgebildet werden. Beispielfähig kann die Geometrie des Rahmens **202** und die Abmessungen des Polymers **206** basierend auf dem Polymermaterial **206** angepasst werden. Bei einer spezifischen Ausführungsform, die als Polymer **206** HS3-Silikon verwendet, weist das Polymer **206** in den Richtungen **208** und **210** bevorzugt ein Verhältnis von 9:2 auf, mit Vorbeanspruchungen von etwa 270 Prozent und –25 Prozent in den Richtungen **208** bzw. **210**. Unter Verwendung dieser Anordnung sind lineare Beanspruchungen von wenigstens etwa 100 Prozent in Richtung **210** möglich.

**[0090]** Die Vorbeanspruchung im Polymer **206** und die vom Rahmen **202** gelieferte Einschränkung kann es der Bogen-Vorrichtung **200** auch erlauben, für eine gegebene Auslenkung niedrigere Aktivierungsspannungen für das vorbeanspruchte Polymer **206** zu verwenden. Da die Bogen-Vorrichtung **200** in der Richtung **210** der geringen Vorbeanspruchung ein geringeres effektives Elastizitätsmodul aufweist, gestattet es die vom Rahmen **202** gelieferte mechanische Einschränkung der Bogen-Vorrichtung **200** in Richtung **210** mit einer niedrigeren Spannung bis zu einer größeren Auslenkung aktiviert zu werden. Zudem erhöht die hohe Vorbeanspruchung in Richtung **208** die Durchbruchfestigkeit des Polymers **206**, was höhere Spannungen und höhere Auslenkungen für die Bogen-Vorrichtung **200** zulässt.

**[0091]** Wenn sich ein Polymer infolge von elektrostatischen Kräften ausdehnt, wie zuvor mit Bezug auf [Fig. 1A](#) erwähnt, dehnt es sich weiter aus, bis mechanische Kräfte mit dem elektrostatischen Druck, der die Ausdehnung antreibt, im Gleichgewicht stehen. Wenn die Last **211** an der Bogen-Vorrichtung **200** befestigt ist, werden durch die Last **211** bereitgestellte mechanische Effekte das Kraftgleichgewicht und die Auslenkung des Polymers **206** beeinflussen. Wenn die Last **211** zum Beispiel der Ausdehnung der

Bogen-Vorrichtung **200** einen Widerstand entgegensetzt, dann kann sich das Polymer **206** nicht so sehr ausdehnen, wie wenn keine Last vorhanden wäre.

**[0092]** In einem Beispiel kann die Bogen-Vorrichtung **200** zusätzliche Komponenten einschließen, um für eine mechanische Unterstützung zu sorgen und die mechanische Abgabe zu verbessern. Beispielfähig können Federn **220**, wie in [Fig. 2C](#) dargestellt, an der Bogen-Vorrichtung **200** befestigt sein, um die Auslenkung in der Richtung **210** zu verbessern. Die Federn laden die Bogen-Vorrichtung **200**, so dass die von den Federn aufgebraachte Federkraft zu einem von einer externen Last gelieferten Widerstand entgegensetzt ist. In einigen Fällen liefern die Federn **220** eine zunehmende Unterstützung für die Auslenkung der Bogen-Vorrichtung **200**. Bei einer Ausführungsform können statt der äußeren Federn **220** Federelemente in die Gelenke **205** eingebaut werden, um die Auslenkung der Bogen-Vorrichtung **200** zu verbessern. Zusätzlich kann die Vorbeanspruchung erhöht werden, um die Auslenkung zu verbessern. Die Last kann auch mit den starren Elementen **204** auf der Ober- und Unterseite des Rahmens **202** gekoppelt werden, statt sie mit den starren Elementen der Seite des Rahmens **202** zu koppeln (wie in [Fig. 2B](#) dargestellt). Da sich die oberen und unteren starren Elemente **204** aufeinander zu zusammenziehen, wenn eine Spannung angelegt wird, wie in [Fig. 2B](#) dargestellt, stellt der Bogen-Aktuator **200** eine beispielhafte Vorrichtung bereit, die sich beim Anlegen einer Spannung in der Ebene zusammenzieht, statt dass sie sich ausdehnt.

**[0093]** Wenn sie als Generator verwendet wird, verbessert die Bogen-Vorrichtung **200** die Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie. Man rufe sich ins Gedächtnis zurück, dass ein Generator (wie in den [Fig. 1A](#) und [Fig. 1B](#)) der vorliegenden Erfindung mechanische Energie in elektrische Energie umwandeln wird, wenn er sich zusammenzieht. Man rufe sich auch ins Gedächtnis zurück, dass die Kontraktion anhalten wird und den Wirkungsgrad verringern kann, wenn der elektrische Felddruck während der Kontraktion zunimmt und ein Gleichgewicht mit den elastischen Rückstell-Belastungen erreicht. Die elastische Energie pro Volumeneinheit in einem Polymer ist typischerweise proportional zur elastischen Rückstell-Belastung oder zum elastischen Rückstell-Druck, z. B. der Belastung, die an einer Begrenzung aufgebracht wird. Ein Weg, um die elastische Energie für eine gegebene Rückstell-Belastung oder einen gegebenen Rückstell-Druck zu maximieren, besteht darin, ein Polymer mit einem niedrigeren Modul zu verwenden. Polymere mit einem niedrigeren Modul können jedoch im Allgemeinen geringere Durchbruchfestigkeiten besitzen und können die Vorteile eines niedrigen Moduls zunichte machen. Die Bogen-Vorrichtung **200** ist ein Weg, um die elastische Energie für eine gegebene Netto-Rückstell-Belas-



tung oder einen gegebenen Netto-Rückstell-Druck zu maximieren, ohne ein Material mit einem niedrigeren Modul zu verwenden. Dies wird unter Verwendung des Rahmens **202** in Verbindung mit anisotropen Vorbeanspruchungen in den Richtungen **208** und **210** gemacht, so dass für eine gegebene Beanspruchung der Netto-Rückstell-Druck oder die Netto-Rückstell-Kraft kleiner ist als sie es für freie Begrenzungs-Bedingungen am Polymer **206** wären. Eine hohe Vorbeanspruchung in Richtung **208** liefert über den Rahmen **202** elastische Energie, um zur Ausdehnung in Richtung **210** beizutragen. Was die Ausdehnung in Richtung **210** angeht, so wirkt das Polymer, als ob es ein niedriges Modul besitzt, und es kann eine große Menge an elastischer Energie für eine gegebene Beaufschlagungskraft oder Beaufschlagungsbelastung an der Begrenzung gespeichert werden. Da die Kontraktion in Richtung **208** klein ist, und die Flächenänderung aus der kleinen Kontraktion entsprechend klein ist, ist das elektrische Verhalten aufgrund von Veränderungen in Richtung **208** minimal, verglichen mit dem großen elektrischen Verhalten (z. B. Veränderung der Kapazität) aufgrund der großen Beanspruchungsänderungen in Richtung **210**. Das Polymer **206** verhält sich daher, als ob es ein Material mit einem sehr niedrigen Modul wäre, das sich im Wesentlichen in einer Richtung (Richtung **210**) dehnt, was es gestattet, dass die Bogen-Vorrichtung **200** eine relativ große Energiemenge pro Volumeneinheit Polymer pro Hub mit hohen Wirkungsgraden umwandelt, verglichen mit anderen Vorrichtungen, die dasselbe Polymer **206** verwenden.

**[0094]** Die Gestalt und Einschränkung des Polymers kann die Auslenkung beeinflussen. Ein Seitenverhältnis für ein elektroaktives Polymer ist als das Verhältnis von seiner Länge zur Breite definiert. Wenn das Seitenverhältnis hoch ist (z. B. ein Seitenverhältnis von wenigstens etwa 4:1) und das Polymer entlang seiner Länge durch starre Elemente eingeschränkt wird, dann kann die Kombination zu einer im Wesentlichen eindimensionalen Auslenkung in Richtung der Breite führen.

**[0095]** Die [Fig. 2D](#) und [Fig. 2E](#) zeigen eine Linearbewegungs-Vorrichtung **230** zum Umwandeln zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie vor und nach einer Aktivierung gemäß einer spezifischen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Die Linearbewegungs-Vorrichtung **230** ist ein ebener Mechanismus, der eine mechanische Translationsbewegung in einer Richtung aufweist. Die Linearbewegungs-Vorrichtung **230** umfasst ein Polymer **231** mit einer Länge **233**, die wesentlich größer ist als seine Breite **234** (z. B. ein Seitenverhältnis von wenigstens etwa 4:1). Das Polymer **231** ist auf entgegengesetzten Seiten entlang seiner Länge **233** an steifen Elementen **232** eines Rahmens befestigt. Die steifen Elemente **232** besitzen eine größere Steifig-

keit als das Polymer **231**. Die von den steifen Elementen **232** bereitgestellte geometrische Randeinschränkung verhindert im Wesentlichen eine Verlagerung in einer Richtung **236** entlang der Polymerlänge **233** und erleichtert eine Auslenkung nahezu ausschließlich in einer Richtung **235**. Wenn die Linearbewegungs-Vorrichtung **230** mit einem Polymer **231** realisiert wird, das eine anisotrope Vorbeanspruchung besitzt, wie eine höhere Vorbeanspruchung in der Richtung **236** als in der Richtung **235**, dann ist das Polymer **231** in der Richtung **236** steifer als in der Richtung **235**, und daraus können sich große Auslenkungen in der Richtung **235** ergeben. Beispielfhaft kann eine solche Anordnung für Acryle mit einer anisotropen Vorbeanspruchung lineare Beanspruchungen von wenigstens etwa 200 Prozent erzeugen.

**[0096]** Eine Ansammlung von elektroaktiven Polymeren oder Aktuatoren kann mechanisch verknüpft werden, um einen größeren Aktuator mit einer gemeinsamen Abgabe, z. B. Kraft und/oder Verlagerung, zu bilden. Durch Verwendung eines kleinen elektroaktiven Polymers als Grundeinheit in einer Ansammlung kann die Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische Energie entsprechend einer Anwendung skaliert werden. Beispielfhaft können mehrere Linearbewegungs-Vorrichtungen **230** in Richtung **235** in Reihe kombiniert werden, um einen Aktuator mit einer kumulativen Auslenkung von sämtlichen der Linearbewegungs-Vorrichtungen in der Reihe zu bilden. Wenn elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt wird, können elektroaktive Polymere – entweder einzeln oder in einer Ansammlung mechanisch verknüpft – als 'künstlicher Muskel' bezeichnet werden. Für Zwecke dieser Anmeldung ist künstlicher Muskel als ein oder mehrere Wandler und/oder Aktuatoren definiert, die eine einzige Abgabekraft und/oder Abgabeverlagerung besitzen. Künstlicher Muskel kann auf einer Mikro- oder Makro-Ebene realisiert werden und kann irgend einen oder mehrere der hier beschriebenen Aktuatoren umfassen.

**[0097]** [Fig. 2F](#) zeigt eine Querschnittsseitenansicht einer mehrschichtigen Vorrichtung **240** zum Umwandeln zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie als ein Beispiel von künstlichem Muskel gemäß einer spezifischen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Die mehrschichtige Vorrichtung **240** schließt vier vorbeanspruchte Polymere **241** ein, die parallel angeordnet und jeweils an einem starren Rahmen **242** befestigt sind, so dass sie dieselbe Auslenkung besitzen. Elektroden **243** und **244** sind auf entgegengesetzte Oberflächen von jedem Polymer **241** deponiert und sorgen für eine gleichzeitige elektrostatische Aktivierung der vier vorbeanspruchten Polymere **241**. Die mehrschichtige Vorrichtung **240** liefert eine kumulative Kraftabgabe der einzelnen Polymerschichten **241**.

**[0098]** Eine Kombination von einzelnen Polymerschichten parallel oder in Reihe weist eine ähnliche Wirkung auf Wandler auf, die in einem Generatormodus betrieben werden. Allgemein erhöht die parallele Kopplung von Schichten die Steifigkeit und die maximale Beaufschlagungskraft der Vorrichtung, ohne ihren maximalen Hub zu verändern, während eine Kombination von Schichten in Reihe den maximalen Hub erhöht, ohne die maximale Beaufschlagungskraft zu erhöhen. Durch Kombination von Schichten in Reihe und parallel kann daher ein Generator ausgelegt werden, um zu einer spezifischen mechanischen Beaufschlagungslast zu passen.

**[0099]** Bei einem anderen Beispiel können an Stelle von einem Polymer mehrere elektroaktive Polymerschichten verwendet werden, um die Kraft- oder die Druckabgabe eines Aktuators zu erhöhen. Zum Beispiel können zehn elektroaktive Polymere geschichtet werden, um die Druckabgabe der Membran-Vorrichtung aus [Fig. 1E](#) zu vergrößern. [Fig. 2G](#) zeigt eine solche gestapelte mehrschichtige Membran-Vorrichtung **245** zum Umwandeln zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie als ein anderes Beispiel von künstlichem Muskel gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Die gestapelte mehrschichtige Vorrichtung **245** schließt drei Polymerschichten **246** ein, die aufeinander geschichtet sind und durch Kleberschichten **247** befestigt sein können. Innerhalb der Kleberschichten **247** befinden sich Elektroden **248** und **249**, die für eine Aktivierung der Polymerschichten **246** sorgen. Eine relativ steife Platte **250** ist an der äußersten Polymerschicht befestigt und so mit einem Muster versehen, dass sie Öffnungen **251** enthält, die eine Auslenkung der gestapelten mehrschichtigen Membran-Vorrichtung **245** gestatten. Indem man die Polymerschichten **246** kombiniert, liefert die gestapelte mehrschichtige Vorrichtung **245** eine kumulative Kraftabgabe der einzelnen Polymerschichten **246**.

**[0100]** Zusätzlich zu der Linearbewegungs-Vorrichtung **230** aus den [Fig. 2D](#) und [Fig. 2E](#) können elektroaktive Polymere in einer Vielfalt von Vorrichtungen enthalten sein, die zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie umwandeln. [Fig. 2H](#) zeigt einen Linear-Aktuator **255**, der eine elektroaktive Polymermembran **256** zum Umwandeln zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie gemäß einer anderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung umfasst. In diesem Fall ist ein Abgabeschäft **257** an einem mittleren Teil der Membran **256** befestigt, die in einer nicht-kreisförmigen Öffnung **258** eines Rahmens **261** ausgelenkt wird. Nach Aktivierung und Entnahme der elektrostatischen Energie führt der Abgabeschäft **257** eine translatorische Bewegung aus, wie durch den Pfeil **259** angezeigt. Der Linear-Aktuator **255** kann auch ein nachgiebiges Federelement **260** einschließen, das dazu beiträgt, den Abgabeschäft **257** zu positionieren.

**[0101]** In einem Beispiel ist die nicht-kreisförmige Öffnung **258** ein langgestreckter Schlitz. Wie zuvor angegeben, hat ein langgestreckter Schlitz typischerweise eine gleichförmigere Beanspruchung als eine kreisförmige Öffnung. Zusätzlich weist die Polymermembran **256** in der Längsachse des Schlitzes eine höhere Vorbeanspruchung im Verhältnis zur Vorbeanspruchung in der dazu senkrechten Ebenenrichtung auf. Durch Verwendung einer im Verhältnis hohen Vorbeanspruchung in Schlitzlängsrichtung sowie einer im Verhältnis niedrigen Vorbeanspruchung in der dazu senkrechten Ebenenrichtung kann die Verlagerung des Abgabeschäftes **257** im Verhältnis zu Konfigurationen mit gleichförmiger Vorbeanspruchung vergrößert werden.

**[0102]** In einem anderen Beispiel können vorbeanspruchte Polymere der vorliegenden Erfindung zu Linear-Wandlern und Aktuatoren gerollt oder gefaltet werden, die axial ausgelenkt werden, während sie zwischen mechanischer Energie und elektrischer Energie umwandeln. Da die Fertigung von elektroaktiven Polymeren häufig mit einer kleineren Anzahl von Schichten am einfachsten ist, liefern gerollte Aktuatoren eine wirkungsvolle Art und Weise zum Zusammenquetschen großer Polymerschichten in eine kompakte Form. Gerollte oder gefaltete Wandler und Aktuatoren schließen typischerweise zwei oder mehr Polymerschichten ein. Gerollte oder gefaltete Aktuatoren sind immer dort anwendbar, wo Linear-Aktuatoren verwendet werden, wie Roboter-Beine und Finger, Greifer für hohe Kräfte und Linear-Aktuatoren für allgemeine Zwecke.

**[0103]** [Fig. 2I](#) zeigt einen Aktuator **262** vom Raupenspanner-Typ. Der Aktuator **262** vom Raupenspanner-Typ schließt zwei oder mehr gerollte vorbeanspruchte Polymerschichten mit Elektroden **263** ein, die entlang seiner zylindrischen Achse axial ausgelenkt werden. Der Aktuator **262** vom Raupenspanner-Typ schließt auch elektrostatische Klammern **264** und **265** zur Befestigung an und zum Lösen von einer Metalloberfläche **268** ein. Die elektrostatischen Klammern **264** und **265** erlauben es, den Gesamthub bei dem Aktuator **262** vom Raupenspanner-Typ zu vergrößern, verglichen mit einem Aktuator ohne Klammerung. Da bei den elektrostatischen Klammern **264** und **265** die Klammerungskraft pro Gewichtseinheit hoch ist, werden die Vorteile von Kraft-pro-Gewichtseinheit von vorbeanspruchten Polymeren mit dem Aktuator **262** vom Raupenspanner-Typ bewahrt. Die elektrostatischen Klammern **264** und **265** werden am Aktuator vom Raupenspanner-Typ an Verbindungsbereichen **267** befestigt. Ein Körper **266** des Aktuators vom Raupenspanner-Typ schließt die Verbindungsbereiche **267** und das Polymer **263** ein und weist einen Freiheitsgrad entlang der axialen Richtung des gerollten Polymers **263** zwischen den Verbindungsbereichen **267** auf. In einem Beispiel schließen die elektrostatischen Klammern

**264** und **265** einen isolierenden Kleber **269** ein, der einen elektrischen Kurzschluss von den leitenden elektrostatischen Klammern **264** und **265** zur Metalloberfläche **268** verhindert.

[0104] Der Aktuator **262** vom Raupenspanner-Typ bewegt sich in einem sechsstufigen Prozess nach oben. Beim Schritt eins wird der Aktuator **262** vom Raupenspanner-Typ an seinen jeweiligen Enden unbeweglich gemacht, wenn beide elektrostatische Klammern **264** und **265** aktiviert sind und das Polymer **263** entlastet ist. Eine elektrostatische Klammer wird aktiviert, indem zwischen der Klammer und der Metalloberfläche **268** eine Spannungsdifferenz angelegt wird. Im Schritt zwei wird die Klammer **265** gelöst. Das Lösen von einer der Klammern **264** und **265** gestattet es, dass sich ihr jeweiliges Ende des Aktuators **262** vom Raupenspanner-Typ frei bewegt. Im Schritt drei wird das elektroaktive Polymer **263** aktiviert und verlängert den Aktuator **262** vom Raupenspanner-Typ nach oben zu. Im Schritt vier wird die Klammer **265** aktiviert, und der Aktuator **262** vom Raupenspanner-Typ wird unbeweglich gemacht. Im Schritt fünf wird die Klammer **264** gelöst. Im Schritt sechs wird das Polymer **263** entlastet, und der Aktuator **262** vom Raupenspanner-Typ zieht sich zusammen. Indem man die Schritte eins bis sechs zyklisch wiederholt, bewegt sich der Aktuator **262** vom Raupenspanner-Typ in der Aufwärtsrichtung. Indem man die Klammern **264** und **265** bei dem obigen sechsstufigen Prozess anders schaltet, bewegt sich der Aktuator **262** vom Raupenspanner-Typ in einer umgekehrten Richtung.

[0105] Obwohl der Aktuator **262** vom Raupenspanner-Typ im Hinblick auf die Aktivierung unter Verwendung eines einzigen elektroaktiven Polymers und von zwei Klammern beschrieben worden ist, können Aktuatoren vom Raupenspanner-Typ mit mehreren Segmenten unter Verwendung von mehreren elektroaktiven Polymeren realisiert werden. Aktuatoren vom Raupenspanner-Typ mit mehreren Segmenten gestatten es, dass die Länge eines Aktuators vom Raupenspanner-Typ größer wird, ohne dass er dicker wird. Ein Zwei-Segment-Aktuator vom Raupenspanner-Typ würde zwei gerollte Polymere an Stelle von einem und drei Klammern an Stelle von zwei verwenden. Allgemein umfasst ein n-Segment-Aktuator vom Raupenspanner-Typ n Aktuatoren zwischen n + 1 Klammern.

[0106] [Fig. 2J](#) zeigt eine Streckfilm-Vorrichtung **270** zum Umwandeln zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie gemäß einer anderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Die Streckfilm-Vorrichtung **270** schließt einen starren Rahmen **271** mit einer Öffnung **272** ein. Ein vorbeanspruchtes Polymer **273** ist unter Spannung am Rahmen **271** befestigt und überspannt die Öffnung **272**. Ein starrer Stab **274** ist an der Mitte des Polymers **273** befestigt

und liefert eine externe Verlagerung entsprechend der Auslenkung des Polymers **273**. Paare von nachgiebigen Elektroden **275** und **276** sind auf sowohl der Ober- und Unterseite des Polymers auf der linken bzw. der rechten Seite des starren Stabs **274** als Muster vorgesehen. Wenn das Elektrodenpaar **275** aktiviert wird, dehnt sich ein Teil des Polymers **273** zwischen und in der Nachbarschaft des oberen und des unteren Elektrodenpaars **275** in Bezug zum Rest des Polymers **273** aus und die vorhandene Spannung im Rest des Polymers **273** zieht am starren Stab **274**, um diesen nach rechts zu bewegen. Wenn das Elektrodenpaar **276** aktiviert wird, dehnt sich umgekehrt ein durch das Elektrodenpaar **276** beeinflusster zweiter Teil des Polymers **273** in Bezug zum Rest des Polymers **273** aus und gestattet es, dass sich der starre Stab **274** nach links bewegt. Eine abwechselnde Aktivierung der Elektroden **275** und **276** liefert einen effektiv größeren Gesamthub **279** für den starren Stab **274**. Eine Abwandlung dieses Aktuators schließt das Hinzufügen einer anisotropen Vorbeanspruchung des Polymers ein, so dass das Polymer eine hohe Vorbeanspruchung (und Steifigkeit) in der Richtung senkrecht zur Verlagerung des starren Stabes besitzt. Eine andere Abwandlung besteht darin, eines der Elektrodenpaare zu beseitigen. Für den Vorteil einer Vereinfachung der Konstruktion verringert diese Abwandlung den Hub **279** bei der Streckfilm-Vorrichtung **270**. In diesem Fall reagiert nunmehr derjenige Teil des Polymers, der von der entfernten Elektrode nicht mehr verwendet wird, passiv, wie eine Rückstellfeder.

[0107] [Fig. 2K](#) zeigt eine Biegebalken-Vorrichtung **280** zum Umwandeln zwischen mechanischer und elektrischer Energie gemäß einer anderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Die Biegebalken-Vorrichtung **280** schließt ein Polymer **281** ein, das an einem Ende von einer starren Halterung **282** fixiert wird und unter Verwendung einer Kleberschicht an einem flexiblen dünnen Material **283**, wie zum Beispiel Polyimid oder Mylar, befestigt wird. Das flexible dünne Material **283** besitzt ein Elastizitätsmodul, das größer ist als dasjenige des Polymers **281**. Die Differenz der Elastizitätsmodule für die Ober- und Unterseite **286** und **287** der Biegebalken-Vorrichtung **280** bewirkt, dass sich die Biegebalken-Vorrichtung **280** bei einer Aktivierung biegt. Elektroden **284** und **285** sind an den entgegengesetzten Seiten des Polymers **281** befestigt, um elektrische Energie zu liefern. Die Biegebalken-Vorrichtung **280** schließt ein freies Ende **288** ein, das einen einzigen Biege-Freiheitsgrad besitzt. Die Auslenkung des freien Endes **288** kann durch die Winkeldifferenz zwischen dem freien Ende **288** und dem von der starren Halterung **282** fixierten Ende gemessen werden. [Fig. 2L](#) zeigt die Biegebalken-Vorrichtung **280** mit einem 90-Grad-Biegewinkel.

[0108] Der maximale Biegewinkel für die Biegebalken-Vorrichtung **280** wird mit einer Reihe von Fakto-

ren variieren, einschließlich des Polymermaterials, der Aktuator-Länge, der Biegesteifigkeit der Elektroden **284** und **285** und des flexiblen dünnen Materials **283**, usw.. Für eine Biegebalken-Vorrichtung **280**, die Dow Corning HS3-Silikon, Goldelektroden und eine aktive Fläche von 3,5 mm Länge umfasst, sind Biegewinkel über 225 Grad erreichbar. Wenn die Länge der aktiven Fläche zunimmt, sind für die Biegebalken-Vorrichtung **280** größere Biegewinkel erreichbar. Indem man die aktive Länge der oben erwähnten Biegebalken-Vorrichtung auf 5 mm verlängert, ist dementsprechend ein Biegewinkel möglich, der sich an 360 Grad annähert.

[0109] In einem Beispiel kann eine der Elektroden als das flexible dünne Material **283** dienen. Ein beliebiges dünnes Metall, wie Gold, das eine niedrige Biegesteifigkeit und eine hohe Zugsteifigkeit besitzt, kann für eine Elektrode geeignet sein, die als das flexible dünne Material **283** dient. Bei einer anderen Ausführungsform ist eine Sperrschicht zwischen einer der Elektroden **284** und **285** und dem Polymer **281** angeordnet, um die Auswirkung von jeglichem örtlich begrenztem Durchbruch im Polymer zu minimieren.

[0110] [Fig. 2M](#) zeigt eine Biegebalken-Vorrichtung **290** zum Umwandeln zwischen mechanischer und elektrischer Energie gemäß einem anderen Beispiel. Die Biegebalken-Vorrichtung **290** schließt ein oberes und ein unteres vorbeanspruchtes Polymer **291** und **292** ein, die an einem Ende von einer starren Halterung **296** fixiert werden. Jedes der Polymere **291** und **292** kann unabhängig aktiviert werden. Die unabhängige Aktivierung wird durch getrennte elektrische Ansteuerung der oberen und unteren Elektrode **293** und **294** erreicht, die an dem oberen bzw. unteren elektroaktiven Polymer **291** bzw. **292** befestigt ist. Eine gemeinsame Elektrode **295** befindet sich zwischen dem oberen und dem unteren elektroaktiven Polymer **291** und **292** und ist an beiden befestigt. Die gemeinsame Elektrode **295** kann von einer ausreichenden Steifigkeit sein, um die Vorbeanspruchung der Polymerschichten **291** und **292** aufrechtzuerhalten, während sie noch immer eine Ausdehnung und Biegung gestattet.

[0111] Eine Aktivierung des oberen elektroaktiven Polymers **291** unter Verwendung des oberen Paares von Elektroden **293** und **295** bewirkt, dass sich die Biegebalken-Vorrichtung **290** nach unten biegt. Eine Aktivierung des unteren Polymers **292** unter Verwendung des unteren Paares von Elektroden **294** und **295** bewirkt, dass sich die Biegebalken-Vorrichtung **290** nach oben biegt. Daher gestattet eine unabhängige Verwendung des oberen und des unteren elektroaktiven Polymers **291** und **292** die Steuerung der Biegebalken-Vorrichtung **290** entlang einer radialen Richtung **297**. Wenn sowohl das obere und das untere Polymer **291** und **292** gleichzeitig aktiviert werden –

und von im Wesentlichen ähnlicher Größe und Material sind – dehnt sich die Biegebalken-Vorrichtung **290** entlang der linearen Richtung **298** in ihrer Länge aus. Indem man die Fähigkeit zum Steuern der Bewegung in der radialen Richtung **297** und der linearen Richtung **298** kombiniert, wird die Biegebalken-Vorrichtung **290** zu einem Aktuator mit zwei Freiheitsgraden. Entsprechend gestattet es eine unabhängige Aktivierung und Steuerung des oberen und des unteren Polymers **291** und **292**, dass ein freies Ende **299** der Biegebalken-Vorrichtung **290** komplexe Bewegungen ausführt, wie kreisförmige oder elliptische Pfade.

[0112] Die [Fig. 2N](#) und [Fig. 2O](#) zeigen eine Vorrichtung **300** zum Umwandeln zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie gemäß einer anderen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung. Die Vorrichtung **300** schließt ein Polymer **302** ein, das in einer Weise angeordnet ist, die bewirkt, dass ein Teil des Polymers ansprechend auf eine Veränderung im elektrischen Feld ausgelenkt wird, und/oder in einer Weise angeordnet ist, die ansprechend auf eine Auslenkung des Polymers eine Veränderung im elektrischen Feld bewirkt. Elektroden **304** sind an entgegengesetzten Oberflächen (nur die vorderste Elektrode ist dargestellt) des Polymers **302** befestigt und bedecken einen wesentlichen Teil des Polymers **302**. Zwei steife Elemente **308** und **310** erstrecken sich entlang von entgegengesetzten Rändern **312** und **314** des Polymers **302**. Entlang der übrigen Ränder des Polymers **302** befinden sich Biegeelemente **316** und **318**. Die Biegeelemente **316** und **318** verbessern die Umwandlung zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie bei der Vorrichtung **300**.

[0113] Die Biegeelemente **316** und **318** koppeln die Auslenkung des Polymers **302** in einer Richtung in eine Auslenkung in einer anderen Richtung. Bei einer Ausführungsform ruht jedes der Biegeelemente **316** und **318** unter einem Winkel von etwa 45 Grad in der Ebene des Polymers **302**. Bei einer Aktivierung des Polymers **302** bewirkt die Ausdehnung des Polymers **302** in der Richtung **320**, dass sich die steifen Elemente **308** und **310** auseinander bewegen, wie in [Fig. 2O](#) dargestellt. Zudem bewirkt eine Ausdehnung des Polymers **302** in der Richtung **322**, dass die Biegeelemente **316** und **318** begradigt werden, und trennt die steifen Elemente **308** und **310** noch weiter voneinander. Auf diese Weise koppelt die Vorrichtung **300** eine Ausdehnung des Polymers **302** in beiden Ebenenrichtungen **320** und **322** in eine mechanische Abgabe in der Richtung **320**.

[0114] Bei einer Ausführungsform ist das Polymer in den zueinander senkrechten Richtungen **320** und **322** mit verschiedenen Vorbeanspruchungsgraden ausgebildet. Spezieller enthält das Polymer **302** in der Richtung **320** eine höhere Vorbeanspruchung



und in der dazu senkrechten Ebenenrichtung **322** wenig oder keine Vorbeanspruchung. Diese anisotrope Vorbeanspruchung ist in Beziehung zur Geometrie der Biegeelemente **316** und **318** angeordnet.

**[0115]** Ein Vorteil der Vorrichtung **300** besteht darin, dass die gesamte Struktur eben ist. Zusätzlich zu einer Vereinfachung der Fertigung gestattet die ebene Struktur der Vorrichtung eine einfache mechanische Kopplung, um mehrschichtige Konstruktionen zu erzeugen. Beispielhaft können die steifen Elemente **308** und **310** mechanisch mit ihren jeweiligen Gegenständen einer zweiten Vorrichtung **300** gekoppelt (z. B. verklebt oder in ähnlicher Weise fixiert) werden, um zwei parallele Vorrichtungen **300** bereitzustellen, um die Kraftabgabe gegenüber einer einzigen Vorrichtung **300** zu vergrößern. In ähnlicher Weise kann das steife Element **308** aus einer Vorrichtung an dem steifen Element **310** aus einer zweiten Vorrichtung befestigt werden, um mehrere Vorrichtungen in Reihe bereitzustellen, was die Auslenkungsabgabe gegenüber einer einzigen Vorrichtung **300** vergrößert.

**[0116]** Zusätzlich zu einer guten Leistung der Vorrichtung **300** als Aktuator, der elektrische Energie in mechanische Energie umwandelt, ist die Vorrichtung **300** auch als Generator gut geeignet. Wenn zum Beispiel eine Ladung auf das Polymer **302** aufgebracht wird, während es gestreckt ist, wandelt eine Kontraktion der Vorrichtung **300** mechanische Energie in elektrische Energie um. Die elektrische Energie kann dann durch eine Schaltung in elektrischer Verbindung mit den Elektroden **304** geerntet werden.

#### 4. LEISTUNG

**[0117]** Ein Wandler wandelt zwischen elektrischer Energie und mechanischer Energie um. Die Wandlerleistung kann im Hinblick auf den Wandler durch sich selbst, die Leistung des Wandlers in einem Aktuator oder die Leistung des Wandlers in einer spezifischen Anwendung (z. B. einer Reihe von Wandlern, die in einem Motor realisiert sind) charakterisiert werden. Eine Vorbeanspruchung von elektroaktiven Polymeren gemäß der vorliegenden Erfindung liefert wesentliche Verbesserungen bei der Wandlerleistung.

**[0118]** Die Charakterisierung der Leistung eines Wandlers durch sich selbst bezieht sich gewöhnlich auf die Materialeigenschaften des Polymers und der Elektroden. Die Leistung eines elektroaktiven Polymers kann unabhängig von der Polymergröße durch Parameter, wie Beanspruchung, Energiedichte, Aktivierungsdruck, Aktivierungsdruckdichte und Wirkungsgrad beschrieben werden. Es sollte festgestellt werden, dass die unten beschriebene Leistungscharakterisierung von vorbeanspruchten Polymeren und ihren jeweiligen Wandlern für verschiedene elektroaktive Polymere und Elektroden variieren kann.

**[0119]** Vorbeanspruchte Polymere der vorliegenden Erfindung können ein effektives Modul im Bereich von etwa 0,1 bis etwa 100 MPa aufweisen. Der Aktivierungsdruck ist als die Veränderung der Kraft innerhalb eines vorbeanspruchten Polymers pro Querschnittsflächeneinheit zwischen aktiviertem und nicht-aktiviertem Zustand definiert. In einigen Fällen können vorbeanspruchte Polymere der vorliegenden Erfindung einen Aktivierungsdruck im Bereich von etwa 0 bis etwa 100 MPa und bevorzugter im Bereich von etwa 0,1 bis 10 MPa besitzen. Die spezifische elastische Energiedichte – definiert als die Verformungsenergie einer Masseneinheit des Materials im Übergang zwischen aktiviertem und nicht-aktiviertem Zustand – kann ebenfalls benutzt werden, um ein elektroaktives Polymer zu beschreiben, wo das Gewicht von Bedeutung ist. Vorbeanspruchte Polymere der vorliegenden Erfindung können eine spezifische elastische Energiedichte oberhalb von 3 J/g besitzen.

**[0120]** Die Leistung eines vorbeanspruchten Polymers kann auch unabhängig von der Polymergröße durch den Wirkungsgrad beschrieben werden. Der elektromechanische Wirkungsgrad ist für eine Aktuator-Betriebsart als das Verhältnis von mechanischer Energieabgabe zu elektrischer Energiebeaufschlagung definiert, oder alternativ für eine Generator-Betriebsart als das Verhältnis der elektrischen Energieabgabe zur mechanischen Energiebeaufschlagung. Ein elektromechanischer Wirkungsgrad von mehr als 80 Prozent ist mit einigen vorbeanspruchten Polymeren der vorliegenden Erfindung erreichbar. Die Zeit, die ein vorbeanspruchtes Polymer für den Anstieg (das Absinken) auf seinen maximalen (oder minimalen) Aktivierungsdruck braucht, wird als seine Ansprechzeit bezeichnet. Vorbeanspruchte Polymer-Polymere gemäß der vorliegenden Erfindung können einem weiten Bereich von Ansprechzeiten Rechnung tragen. In Abhängigkeit von der Größe und Ausbildung des Polymers können die Ansprechzeiten zum Beispiel von etwa 0,01 Millisekunden bis 1 Sekunde reichen. Ein mit einer hohen Geschwindigkeit erregtes vorbeanspruchtes Polymer kann auch durch eine Betriebsfrequenz charakterisiert werden. Bei einer Ausführungsform können die maximalen Betriebsfrequenzen, die zur Verwendung mit der vorliegenden Erfindung geeignet sind, im Bereich von etwa 100 Hz bis 100 kHz liegen. Betriebsfrequenzen in diesem Bereich gestatten es, dass vorbeanspruchte Polymere der vorliegenden Erfindung bei verschiedenen akustischen Anwendungen (z. B. Lautsprechern) verwendet werden. Bei einigen Ausführungsformen können vorbeanspruchte Polymere der vorliegenden Erfindung bei einer Resonanzfrequenz betrieben werden, um die mechanische Abgabe zu verbessern.

**[0121]** Die Leistung eines Aktuators kann durch einen für den Aktuator spezifischen Leistungsparameter beschrieben werden. Als Beispiel kann die Leis-

tung eines Aktuators von einer gewissen Größe und einem gewissen Gewicht durch Parameter quantifiziert werden, wie Hub oder Verlagerung, Kraft, Aktuator-Ansprechzeit. Die Charakterisierung der Leistung des Wandlers bei einer Anwendung bezieht sich darauf, wie gut der Wandler bei einer bestimmten Anwendung (z. B. in der Robotertechnik) verkörpert ist. Die Leistung eines Wandlers bei einer Anwendung kann durch einen für die Anwendung spezifischen Leistungsparameter beschrieben werden (z. B. Kraft/Gewichtseinheit bei Robotertechnik-Anwendungen). Anwendungsspezifische Parameter schließen Hub oder Verlagerung, Kraft, Aktuator-Ansprechzeit, Frequenzansprechen, Wirkungsgrad, usw. ein. Diese Parameter können von der Größe, Masse und/oder der Konstruktion des Wandlers und der speziellen Anwendung abhängen.

**[0122]** Es sollte festgestellt werden, dass wünschenswerte Materialeigenschaften für ein elektroaktives Polymer mit einem Aktuator oder einer Anwendung variieren können. Um für eine Anwendung große Aktivierungsdrücke und eine große Beanspruchung zu erzeugen, kann ein vorbeanspruchtes Polymer mit einem von einer hohen Spannungsfestigkeit, einer hohen Dielektrizitätskonstante und einem niedrigen Elastizitätsmodul realisiert werden. Zudem kann ein Polymer zur Maximierung der Energieeffizienz für eine Anwendung eines von einem hohen Volumenwiderstand und einer geringen mechanischen Dämpfung einschließen.

**[0123]** Leistungsparameter für einen Wandler in einer Generator-Betriebsart sind allgemein analog zu denjenigen der Aktuator-Betriebsart. Die spezifische Energiedichte eines Generator-Wandlers ist als die elektrische Energie definiert, die pro Hub pro Wandler-(oder Polymer-)Masseneinheit erzeugt wird. Spezifische Energiedichten für Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung betragen gewöhnlich wenigstens etwa 0,15 Joule pro Gramm für das Polymer und können für einige Polymere größer als 0,35 Joule pro Gramm sein.

## 5. ELEKTRODEN

**[0124]** Wie oben erwähnt, schließen Wandler vorzugsweise eine oder mehrere Elektroden zum Aktivieren eines elektroaktiven Polymers ein. Allgemein gesagt, können Elektroden, die zur Verwendung mit der vorliegenden Erfindung geeignet sein, von einer beliebigen Form und aus einem beliebigen Material sein, vorausgesetzt, sie sind imstande, eine geeignete Spannung, die entweder konstant ist oder sich mit der Zeit verändert, an ein elektroaktives Polymer zu liefern oder aus diesem abzunehmen. Bei einer Ausführungsform haften die Elektroden an einer Oberfläche des Polymers. Am Polymer haftende Elektroden sind vorzugsweise nachgiebig und passen sich an die sich verändernde Form des Polymers an. Die

Elektroden können auf nur einen Teil eines elektroaktiven Polymers aufgebracht werden und definieren entsprechend ihrer Geometrie eine aktive Fläche.

**[0125]** Die nachgiebigen Elektroden sind zu einer Auslenkung in einer oder mehreren Richtungen imstande. Lineare Beanspruchung kann benutzt werden, um die Auslenkung einer nachgiebigen Elektrode in einer dieser Richtungen zu beschreiben. So wie der Begriff hier verwendet wird, bezieht sich lineare Beanspruchung einer nachgiebigen Elektrode auf die Auslenkung pro Längeneinheit entlang einer Auslenkungslinie. Maximale lineare (Zug- oder Druck-)Beanspruchungen von wenigstens etwa 50 Prozent sind für nachgiebige Elektroden der vorliegenden Erfindung möglich. Für einige nachgiebige Elektroden sind maximale lineare Beanspruchungen von wenigstens etwa 100 Prozent üblich. Selbstverständlich kann eine Elektrode mit einer kleineren Beanspruchung als der Maximalbeanspruchung ausgelenkt werden. Bei einer Ausführungsform ist die nachgiebige Elektrode eine 'strukturierte Elektrode', die einen oder mehrere Bereiche von hoher Leitfähigkeit und einen oder mehrere Bereiche von geringer Leitfähigkeit umfasst.

**[0126]** [Fig. 3](#) zeigt eine Oberseitenansicht einer strukturierten Elektrode **501**, die für eine Nachgiebigkeit in einer Richtung gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung sorgt. Die strukturierte Elektrode **501** schließt Metallspuren **502** ein, die in parallelen Linien über einer Ladungsverteilungsschicht **503** als Muster vorgesehen sind – von denen beide eine aktive Fläche eines Polymers (nicht dargestellt) bedecken. Die Metallspuren **502** und die Ladungsverteilungsschicht **503** werden auf entgegengesetzte Oberflächen des Polymers aufgebracht. Daher ist der Querschnitt eines Wandlers, der strukturierte Elektroden **501** auf entgegengesetzten Oberflächen einschließt, von oben nach unten: obere Metallspuren, obere Ladungsverteilungsschicht, Polymer, untere Ladungsverteilungsschicht, untere Metallspuren. Die Metallspuren **502** auf beiden Oberflächen des Polymers dienen als Elektroden für das elektroaktive Polymermaterial zwischen ihnen. Bei einer anderen Ausführungsform kann die untere Elektrode eine nachgiebige gleichförmige Elektrode sein. Die Ladungsverteilungsschicht **503** erleichtert die Verteilung von Ladung zwischen den Metallspuren **502**. Zusammen leiten die Metallspuren **502** mit hoher Leitfähigkeit Ladung schnell über die aktive Fläche zu der Ladungsverteilungsschicht **503** mit geringer Leitfähigkeit, welche die Ladung gleichförmig über die Oberfläche des Polymers zwischen den Spuren **502** verteilt. Die Ladungsverteilungsschicht **503** ist nachgiebig. Infolgedessen gestattet die strukturierte Elektrode **501** eine Auslenkung in einer nachgiebigen Richtung **506** senkrecht zu den parallelen Metallspuren **502**.



**[0127]** Eine Aktivierung für das gesamte Polymer kann erreicht werden, indem man die Länge der parallelen Metallspuren **502** über die Länge des Polymers verlängert und indem man eine geeignete Anzahl von Spuren **502** über die Polymerbreite realisiert. In einem Beispiel sind die Metallspuren **502** in Abständen in der Größenordnung von 400 Mikrometer angeordnet und weisen eine Dicke von etwa 20 bis 100 Nanometer auf. Die Breite der Spuren ist typischerweise viel kleiner als der Abstand. Um die Gesamt-Ansprechgeschwindigkeit für die strukturierte Elektrode **501** zu vergrößern, kann der Abstand zwischen Metallspuren **502** verringert werden. Die Metallspuren **502** können Gold, Silber, Aluminium und viele andere Metalle und relativ steife leitfähige Materialien umfassen. In einem Beispiel sind Metallspuren auf entgegengesetzten Oberflächen eines elektroaktiven Polymers gegeneinander versetzt, um die Ladungsverteilung durch die Polymerschicht zu verbessern und direkte elektrische Durchbrüche von Metall zu Metall zu verhindern.

**[0128]** Eine Auslenkung der parallelen Metallspuren **502** entlang ihrer Achse, die größer ist als die zulässige elastische Auslenkbarkeit des Metallspurenmaterials kann zu einer Beschädigung der Metallspuren **502** führen. Um eine Beschädigung in dieser Weise zu verhindern, kann das Polymer durch eine starre Struktur eingeschränkt werden, die eine Auslenkung des Polymers und der Metallspuren **502** entlang ihrer Achsen verhindert. Die starren Elemente **232** der Linearbewegungs-Vorrichtung aus [Fig. 2D](#) und [Fig. 2E](#) sind in dieser Hinsicht geeignet. In einem anderen Beispiel können die Metallspuren **502** auf der Oberfläche des Polymers **500** leicht gewellt werden. Diese Wellen verleihen den Spuren **502** entlang ihrer Achsen zusätzliche Nachgiebigkeit und gestatten eine Auslenkung in dieser Richtung.

**[0129]** Allgemein besitzt die Ladungsverteilungsschicht **503** einen Leitwert, der größer ist als derjenige des elektroaktiven Polymers, jedoch kleiner als derjenige der Metallspuren. Die nicht-strengen Leitfähigkeitsanforderungen an die Ladungsverteilungsschicht **503** gestatten es, eine breite Vielfalt von Materialien zu verwenden. Beispielfhaft kann die Ladungsverteilungsschicht Kohlenstoffruß, ein Fluor-Elastomer mit kolloidalem Silber, eine wasserbasierende Latexkautschuk-Emulsion mit einem kleinen Prozentsatz Massenbeladung an Natriumiodid, und Polyurethan mit Tetrathiafulavalen/Tetracyanoquinodimethan(TTF/TCNQ)-Ladungstransferkomplex. Diese Materialien sind imstande, dünne gleichförmige Schichten mit einer gleichmäßigen Bedeckung zu bilden und weisen eine Oberflächenleitfähigkeit auf, die ausreichend ist, um die Ladung zwischen Metallspuren **502** zu leiten, bevor wesentliche Ladungsleckagen in die Umgebung auftreten. Bei einer Ausführungsform wird das Material für die Ladungsverteilungsschicht **503** basierend auf der

RC-Zeitkonstante des Polymers ausgewählt. Beispielfhaft kann der Oberflächenwiderstand für die Ladungsverteilungsschicht **503**, der für die vorliegende Erfindung geeignet ist, im Bereich von etwa  $10^6$ – $10^{11}$  Ohm liegen. Es sollte auch festgestellt werden, dass bei einigen Ausführungsformen keine Ladungsverteilungsschicht verwendet wird und die Metallspuren **502** als Muster direkt auf dem Polymer vorgesehen werden. In diesem Fall können Luft oder andere chemische Gattungen auf der Polymeroberfläche ausreichend sein, um Ladung zwischen den Spuren zu tragen. Diese Wirkung kann verbessert werden, indem man die Oberflächenleitfähigkeit durch Oberflächenbehandlungen, wie Plasmaätzen oder Ionenimplantation, verbessert. [Fig. 4](#) zeigt ein vorbeanspruchtes Polymer **510**, das unter einer strukturierten Elektrode liegt, die gemäß einer spezifischen Ausführungsform der Erfindung nicht richtungsabhängig nachgiebig ist. Die strukturierte Elektrode schließt Metallspuren **512** ein, welche als Muster in gleichmäßig beabstandeten, ein 'tick-Zack'-Muster bildenden parallelen Linien direkt auf einer Oberfläche des elektroaktiven Polymers **510** hergestellt werden. Zwei Metallspuren **512** auf entgegengesetzten Oberflächen des Polymers dienen als Elektroden für das elektroaktive Polymermaterial **510** zwischen ihnen. Das 'tick-Zack'-Muster der Metallspuren **512** gestattet eine Ausdehnung und Kontraktion des Polymers und der Strukturelektrode in mehreren Richtungen **514** und **516**.

**[0130]** Die Verwendung einer Anordnung von Metallspuren, wie mit Bezug auf die [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) beschrieben, gestattet die Verwendung von Ladungsverteilungsschichten mit einem geringeren Leitwert. Da der Abstand zwischen Metallspuren abnimmt, kann spezieller der geforderte Leitwert des Materials zwischen den Spuren abnehmen. Auf diese Weise ist es möglich, Materialien zu verwenden, die normalerweise nicht als leitend zur Verwendung als Ladungsverteilungsschicht angesehen werden. Beispielfhaft können auf diese Weise als Ladungsverteilungsschicht Polymere mit einem Oberflächenwiderstand von  $10^{10}$  Ohm verwendet werden. Bei einer spezifischen Ausführungsform wurde Kautschuk als Ladungsverteilungsschicht als Teil einer strukturierten Elektrode auf einer Polymerschicht mit einer Dicke von 25 Mikrometer und einem Abstand zwischen parallelen Metallspuren von etwa 500 Mikrometern verwendet. Zusätzlich zur Verringerung des geforderten Leitwerts für eine Ladungsverteilungsschicht erhöhen in engem Abstand angeordnete Metallspuren auch die Aktivierungsgeschwindigkeit, da sich zwischen in engem Abstand angeordneten Metallspuren die Ladung nur über eine kurze Strecke durch die Ladungsverteilungsschicht bewegen braucht.

**[0131]** Obwohl strukturierte Elektroden im Hinblick auf zwei spezifische Metallspuren-Ausbildungen beschrieben worden sind, können strukturierte Elektroden als Muster in einer beliebigen geeigneten Weise

vorgesehen werden. Wie der Fachmann auf dem Gebiet ersehen wird, können verschiedene gleichförmig verteilte Metallspuren Muster Ladung auf der Oberfläche eines Polymers bereitstellen, während sie für eine Nachgiebigkeit in einer oder mehreren Richtungen sorgen. In einigen Fällen kann eine strukturierte Elektrode in einer nicht-gleichförmigen Weise an der Polymeroberfläche befestigt werden. Da die Aktivierung des Polymers auf einen aktiven Bereich innerhalb einer geeigneten Nähe von einem Paar von als Muster vorgesehenen Metallspuren begrenzt sein kann, können spezialisierte aktive und nicht-aktive Bereiche für ein elektroaktives Polymer durch maßgefertigte Musterung der Metallspuren definiert werden. Diese aktiven und nicht-aktiven Bereiche können entsprechend den konventionellen Metallspurenabscheidungstechniken in maßgefertigten Geometrien und mit hohen Auflösungen ausgebildet werden. Wenn man diese Praxis über die gesamte Oberfläche eines elektroaktiven Polymers ausdehnt, können maßgefertigte Muster für strukturierte Elektroden, die zahlreiche aktive Bereiche mit maßgefertigter Geometrie umfassen, entsprechend dem Muster der strukturierten Elektroden zu einer spezialisierten und nicht-gleichförmigen Aktivierung des elektroaktiven Polymers führen.

**[0132]** Obwohl die vorliegende Erfindung in erster Linie im Hinblick auf flache Elektroden erörtert worden ist, können 'mit einer Textur versehene' Elektroden verwendet werden, die variierende Abmessungen aus der Ebene heraus umfassen, um eine nachgiebige Elektrode bereitzustellen. [Fig. 5](#) zeigt mit einer Textur versehene beispielhafte Elektroden **520** und **521**. Die mit einer Textur versehenen Elektroden **520** und **521** sind an entgegengesetzten Oberflächen eines elektroaktiven Polymers **522** befestigt, so dass eine Auslenkung des Polymers **522** zu einer in der Ebene liegenden und nicht in der Ebene liegenden Verformung der mit einer Textur versehenen Elektroden **520** und **521** führt. Die ebene und nicht-ebene Nachgiebigkeit der Elektroden **520** und **521** wird durch ein Wellenmuster bereitgestellt, das nach einer Ebenen- und/oder Dicken-Auslenkung des Polymers **522** für eine gerichtete Nachgiebigkeit in einer Richtung **526** sorgt. Um für die mit einer Textur versehenen Elektroden **520** und **521** eine im Wesentlichen gleichförmige Nachgiebigkeit bereitzustellen, wird das Wellenmuster über die gesamte Oberfläche des elektroaktiven Polymers in der Richtung **526** realisiert. In einem Beispiel umfassen die mit einer Textur versehenen Elektroden **520** und **521** Metall mit einer Dicke, die ein Biegen ohne ein Reißen des Metalls gestattet, um für die Nachgiebigkeit zu sorgen. Typischerweise ist die mit einer Textur versehene Elektrode **520** so ausgebildet, dass eine nicht-ebene Auslenkung der Elektroden **520** und **521** viel kleiner ist als die Dicke des Polymers, um für das Polymer **522** ein im Wesentlichen konstantes elektrisches Feld bereitzustellen. Mit einer Textur versehene Elektroden

können für eine Nachgiebigkeit in mehr als einer Richtung sorgen. In einem spezifischen Beispiel sorgt eine raue, mit einer Textur versehene Elektrode für Nachgiebigkeit in orthogonalen Ebenenrichtungen. Die raue, mit einer Textur versehene Elektrode kann eine Topographie aufweisen, die der rauen Oberfläche aus [Fig. 1D](#) ähnlich ist.

**[0133]** In einem Beispiel umfassen nachgiebige Elektroden der vorliegenden Erfindung ein leitfähiges Fett, wie Kohlenstoff-Fett oder Silber-Fett. Das leitfähige Fett sorgt für eine Nachgiebigkeit in mehreren Richtungen. Um die Leitfähigkeit des Polymers zu erhöhen, können Partikel hinzugefügt werden. Beispielsweise können Kohlenstoffpartikel mit einem Polymer-Bindemittel, wie Silikon, kombiniert werden, um ein Kohlenstoff-Fett zu erzeugen, das eine geringe Elastizität und eine hohe Leitfähigkeit besitzt. Andere Materialien können in das leitfähige Fett zugemischt werden, um eine oder mehrere Materialeigenschaften zu verändern. Leitfähige Fette gemäß der vorliegenden Erfindung sind für die Auslenkung von wenigstens etwa 100 Prozent Beanspruchung geeignet.

**[0134]** Nachgiebige Elektroden, die für die vorliegende Erfindung geeignet sind, können auch kolloidale Suspensionen einschließen. Kolloidale Suspensionen enthalten Partikel von Submikrometergröße, wie Graphit, Silber und Gold in einem flüssigen Einschlussmittel. Allgemein gesagt, kann eine beliebige kolloidale Suspension mit einer ausreichenden Beladung an leitfähigen Partikeln als Elektrode in einer Vorrichtung der vorliegenden Erfindung verwendet werden. In einem spezifischen Beispiel wird ein leitfähiges Fett, das leitfähige Partikel von kolloidaler Größe enthält, mit einem leitfähigen Silikon vermischt, das in einem Silikon-Bindemittel leitfähige Partikel von kolloidaler Größe enthält, um eine kolloidale Suspension zu erzeugen, die aushärtet, um einen leitfähigen fließfähigen Festkörper zu bilden. Ein Vorteil von kolloidalen Suspensionen besteht darin, dass sie durch Versprühen, Tauchbeschichten und andere Techniken, die einen dünnen gleichförmigen Überzug einer Flüssigkeit zulassen, in einem Muster auf der Oberfläche eines Polymers hergestellt werden können. Um die Haftung zwischen dem Polymer und einer Elektrode zu erleichtern, kann ein Bindemittel zu der Elektrode hinzugefügt werden. Beispielsweise kann ein wasserbasierender Latexkautschuk oder Silikon als Bindemittel zu einer kolloidalen Suspension hinzugefügt werden, die Graphit enthält.

**[0135]** In einem anderen Beispiel werden nachgiebige Elektroden unter Verwendung von leitfähigem Material mit einem hohen Seitenverhältnis, wie Kohlenstoff-Fibrillen und Kohlenstoff-Nanoröhrchen erzielt. Diese Kohlenstoffmaterialien mit hohem Seitenverhältnis können hohe Oberflächenleitfähigkeiten in dünnen Schichten bilden. Kohlenstoffmaterialien mit hohem Seitenverhältnis können der Oberfläche des

Polymers bei relativ geringen Elektrodendicken eine hohe Leitfähigkeit verleihen, und zwar wegen der hohen gegenseitigen Verbindbarkeit der Kohlenstoffmaterialien mit hohem Seitenverhältnis. Beispielfhaft können Dicken für Elektroden, die mit üblichen Formen von Kohlenstoff hergestellt worden sind, welche kein hohes Seitenverhältnis besitzen, im Bereich von 5–50 Mikrometer liegen, während Dicken für Elektroden, die mit Kohlenstoff-Fibrillen oder Kohlenstoff-Nanoröhrchen-Elektroden hergestellt worden sind, kleiner als 2–4 Mikrometer sein können. Flächenausdehnungen reichlich über 100 Prozent in mehreren Richtungen sind mit Kohlenstoff-Fibrillen- und Kohlenstoff-Nanoröhrchen-Elektroden auf Acryl und anderen Polymeren geeignet. Kohlenstoffmaterialien mit hohem Seitenverhältnis können die Verwendung eines Polymerbindemittels einschließen, um die Haftung mit der elektroaktiven Polymerschicht zu erhöhen. Vorteilhaft gestattet es die Verwendung eines Polymerbindemittels, basierend auf der Haftung mit einer bestimmten elektroaktiven Polymerschicht und basierend auf elastischen und mechanischen Eigenschaften des Polymers ein spezifisches Bindemittel auszuwählen.

**[0136]** In einem Beispiel können Kohlenstoffelektroden mit hohem Seitenverhältnis dünn genug gefertigt werden, so dass die Lichtundurchlässigkeit der Elektroden entsprechend der Polymerauslenkung verändert werden kann. Beispielfhaft können die Elektroden dünn genug gemacht werden, so dass sich die Elektrode bei einer Ausdehnung von lichtundurchlässig zu semitransparent verändert. Diese Fähigkeit zum Manipulieren der Lichtundurchlässigkeit der Elektrode kann es gestatten, Wandler der vorliegenden Erfindung bei einer Reihe von verschiedenen optischen Anwendungen einzusetzen, wie unten beschrieben wird.

**[0137]** In einem anderen Beispiel können für die nachgiebigen Elektroden Mischungen von ionisch leitfähigen Materialien verwendet werden. Diese können zum Beispiel wasserbasierende Polymermaterialien, wie Glycerin oder Salz in Gelatine, mit Jod dotierte Naturkautschuke und wasserbasierende Emulsionen umfassen, zu denen organische Salze, wie Kaliumjodid hinzugefügt werden. Für hydrophobe elektroaktive Polymere, die an einer wasserbasierenden Elektrode nicht gut haften können, kann die Oberfläche des Polymers durch Plasmaätzen oder mit einem feinen Pulver, wie Graphit oder Kohlenstoffruß, vorbehandelt werden, um die Haftung zu erhöhen.

**[0138]** Materialien, die für die Elektroden einer Vorrichtung der vorliegenden Erfindung verwendet werden, können stark variieren. Geeignete Materialien, die in einer Elektrode verwendet werden, können Graphit, Kohlenstoffruß, kolloidale Suspensionen, dünne Metalle einschließlich Silber und Gold, mit Sil-

ber gefüllte und mit Kohlenstoff gefüllte Gele und Polymere, ionisch oder elektronisch leitfähige Polymere einschließen. Bei einer spezifischen Ausführungsform umfasst eine zur Verwendung mit der vorliegenden Erfindung geeignete Elektrode 80 Prozent Kohlenstoff-Fett und 20 Prozent Kohlenstoff-Ruß in einem Silikonkautschuk-Bindemittel, wie Stockwell RTV60-CON, wie es von der Stockwell Rubber Co. Inc., Philadelphia, PA hergestellt wird. Das Kohlenstoff-Fett ist von der Art, wie Circuit Works 7200, wie es von ChemTronics Inc., Kennesaw, GA geliefert wird. Das leitfähige Fett kann auch mit einem Elastomer vermischt werden, wie Silikon-Elastomer RTV 118, wie es von General Electric, Waterford, NY hergestellt wird, um ein gelartiges leitfähiges Fett bereitzustellen.

**[0139]** Es versteht sich, dass gewisse Elektrodenmaterialien mit bestimmten Polymeren gut zusammenarbeiten und bei anderen nicht so gut funktionieren können. Beispielfhaft arbeiten Kohlenstoff-Fibrillen gut mit Acrylelastomerpolymeren zusammen, während sie mit Silikonpolymeren nicht so gut zusammenarbeiten. Für die meisten Wandler können wünschenswerte Eigenschaften für die nachgiebige Elektrode irgend eines von einem niedrigen Elastizitätsmodul, einer geringen mechanischen Dämpfung, einem geringen Oberflächenwiderstand, einem gleichförmigen Widerstand, einer chemischen und Umgebungs-Stabilität, einer chemischen Verträglichkeit mit dem elektroaktiven Polymer, einer guten Haftung am elektroaktiven Polymer und einer Fähigkeit, glatte Oberflächen zu bilden, einschließen. In einigen Fällen kann es wünschenswert sein, dass das Elektrodenmaterial für eine präzise Musterherstellung während der Fertigung geeignet ist. Beispielfhaft kann die nachgiebige Elektrode auf das Polymer sprühbeschichtet werden. In diesem Fall wären Materialeigenschaften wünschenswert, die für die Sprühbeschichtung von Vorteil sind. In einigen Fällen kann ein Wandler der vorliegenden Erfindung zwei verschiedene Arten von Elektroden realisieren. Beispielfhaft kann eine Membran-Vorrichtung der vorliegenden Erfindung eine an ihrer Oberseite befestigte strukturierte Elektrode und ein auf der Unterseite abgeschiedenes Kohlenstoffmaterial mit hohem Seitenverhältnis aufweisen.

**[0140]** Elektronische Treiber sind mit den Elektroden verbunden. Die zu dem elektroaktiven Polymer gelieferte Spannung wird von spezifischen Eigenschaften einer Anwendung abhängen. In einem Beispiel wird ein Wandler elektrisch angesteuert, indem man eine angelegte Spannung um eine Gleichspannungs-Vorspannung herum moduliert. Eine Modulation um eine Vorspannung herum sorgt für eine verbesserte Empfindlichkeit und Linearität des Wandlers gegenüber der angelegten Spannung. Beispielfhaft kann ein bei einer Audio-Anwendung verwendeter Wandler von einem Signal von bis hin zu 200 bis

1000 Volt Spitze-zu-Spitze über einer Vorspannung im Bereich von etwa 750 bis 2000 Volt Gleichspannung angesteuert werden.

## 6. ANWENDUNGEN

**[0141]** Da die vorliegende Erfindung Generatoren einschließt, die sowohl auf dem Mikro- und Makro-Maßstab realisiert werden können, sowie eine breite Vielfalt von Aktuator-Konstruktionen, findet die vorliegende Erfindung in einem breiten Bereich von Anwendungen Verwendung, wo eine Umwandlung zwischen elektrischer und mechanischer Energie gefordert wird. Unten werden mehrere beispielhafte Anwendungen für einige der oben beschriebenen Aktuatoren geliefert. Breit gesagt, können die Wandler und Aktuatoren bei einer beliebigen Anwendung Verwendung finden, die eine Umwandlung zwischen elektrischer und mechanischer Energie erforderlich macht. Diese Anwendungen schließen Robotertechnik, Sensoren, Motoren, Spielzeuge, Mikro-Aktuator-Anwendungen, Pumpen, Generatoren, usw. ein.

**[0142]** Wie zuvor erwähnt, können elektroaktive Polymere, entweder einzeln oder in einer Ansammlung mechanisch verknüpft, als künstlicher Muskel bezeichnet werden. Der Begriff künstlicher Muskel in sich selbst impliziert, dass diese Aktuatoren für eine Anwendung an biologisch inspirierten Robotern oder in biomedizinischen Anwendungen gut geeignet sind, wo eine Nachahmung von Muskel, Säugetier oder anderem erwünscht ist. Beispielhaft können Anwendungen, wie prothetische Gliedmaßen, Exoskelette und künstliche Herzen aus vorbeanspruchten Polymeren der vorliegenden Erfindung Vorteile ziehen. Die Größenskalierbarkeit von elektroaktiven Polymeren und die Fähigkeit, in einer Ansammlung eine beliebige Anzahl von Wandlern oder Polymer-Aktuatoren zu verwenden, gestatten es, künstlichen Muskel gemäß der vorliegenden Erfindung in einem Bereich von Anwendungen zu nutzen, der größer ist als der ihrer biologischen Gegenstücke. Da Wandler und Aktuatoren der vorliegenden Erfindung einen Leistungsbereich besitzen, der weit außerhalb desjenigen ihrer biologischen Gegenstücke liegt, ist die vorliegende Erfindung nicht auf künstlichen Muskel begrenzt, der eine echtem Muskel entsprechende Leistung besitzt, und kann in der Tat Anwendungen einschließen, die eine Leistung außerhalb von derjenigen von echtem Muskel erforderlich machen.

**[0143]** In einem Beispiel von künstlichem Muskel umfasst eine Ansammlung von Linearbewegungs-Vorrichtungen zwei oder mehr Schichten von vorbeanspruchtem Polymer, die sandwichartig zusammengefügt und an entgegengesetzten Rändern jedes Polymers an zwei starren Platten befestigt sind. Elektroden sind in die Mitte zwischen jeder von den Polymerschichten eingeschweißt. Sämtliche der Linearbewegungs-Vorrichtungen in der Ansammlung

können aus geometrischen Einschränkungen Nutzen ziehen, die von den starren Platten und einer anisotropen Vorbeanspruchung geliefert werden, um eine Verformung des Polymers in der aktivierten Richtung einzuschränken. Ein Vorteil der geschichteten Konstruktion besteht darin, dass so viele elektroaktive Polymerschichten wie erforderlich parallel gestapelt werden können, um die gewünschte Kraft zu erzeugen. Weiter kann der Hub dieser Linearbewegungs-Vorrichtungen-Konfiguration vergrößert werden, indem man in Reihe ähnliche Linearbewegungs-Vorrichtungen hingefügt.

**[0144]** Im Mikro-Bereich können die vorbeanspruchten Polymere Dicken im Bereich von mehreren Mikrometern bis mehreren Millimetern aufweisen, und vorzugsweise von mehreren Mikrometern bis zu Hunderten von Mikrometern. Vorbeanspruchte Polymere von Mikro-Größe sind gut für Anwendungen geeignet, wie Tintenstrahl, betätigte Ventile, Mikro-Pumpen, Aktuatoren vom Raupenspanner-Typ, Zeigespiegel, Tongeneratoren, Mikro-Klammern und Mikro-Robotertechnik-Anwendungen. Mikro-Robotertechnik-Anwendungen können Mikro-Roboterbeine, Greifer, Zeiger-Aktuatoren für CCD-Kameras, Drahtzuführvorrichtungen zur Mikro-Verschweißung und Reparatur, Klemm-Aktuatoren zum Halten von starren Positionen und Ultraschall-Aktuatoren zur Übertragung von Daten über gemessene Entfernungen einschließen. Bei einer anderen Anwendung kann eine Membran-Vorrichtung in einer Anordnung von ähnlichen elektroaktiven Polymermembranen in einer ebenen Konfiguration auf einer einzigen Oberfläche realisiert werden. Beispielhaft kann eine Anordnung zweiundsechzig Membranen mit dem Durchmesser von 150 Mikrometern einschließen, die jeweils in einer Ebenenkonfiguration angeordnet sind. Bei einer Ausführungsform kann die Anordnung von Membran-Vorrichtungen auf einem Silizium-Wafer ausgebildet werden. Anordnungen von Membran-Vorrichtungen, die auf diese Weise hergestellt werden, können zum Beispiel von 5 bis 10000 oder mehr Membranen einschließen, die jeweils einen Durchmesser im Bereich von etwa 60 bis 150 Mikrometer besitzen. Die Anordnung kann auf Gitterplatten angebracht werden, die in einem geeigneten Abstand angeordnete Öffnungen für jede Membran aufweisen.

**[0145]** Im Makro-Bereich kann jeder der oben beschriebenen Aktuatoren für seine eigene Gruppe von Anwendungen gut geeignet sein. Zum Beispiel ist der Aktuator vom Raupenspanner-Typ aus [Fig. 21](#) zur Verwendung mit kleinen Robotern geeignet, die imstande sind, durch Rohre mit einem Durchmesser von weniger als 2 cm zu navigieren. Andere Aktuatoren sind zum Beispiel gut geeignet mit Anwendungen wie Robotertechnik, Magnetspulen, Tongeneratoren, Linear-Aktuatoren, Raumfahrt-Aktuatoren und in der allgemeinen Automatisierung.



**[0146]** In einem anderen Beispiel wird ein Wandler als optische Modulationsvorrichtung oder als optischer Schalter verwendet. Der Wandler schließt eine Elektrode ein, deren Opazität sich mit der Auslenkung verändert. Ein durchsichtiges oder im Wesentlichen durchscheinendes vorbeanspruchtes Polymer ist an der Elektrode mit variierender Opazität befestigt, und die Auslenkung des Polymers wird benutzt, um die Opazität der Vorrichtung zu modulieren. Im Fall eines optischen Schalters, unterbricht der Wandler mit sich ändernder Opazität eine mit einem Lichtsensor kommunizierende Lichtquelle. Somit bewirkt die Auslenkung des durchsichtigen Polymers, dass die Elektrode mit sich ändernder Opazität ausgelenkt und der Lichtsensor beeinflusst wird. In einem spezifischen Beispiel enthält die Elektrode mit sich ändernder Opazität Kohlenstoff-Fibrillen oder Kohlenstoff-Nanoröhrchen, die weniger undurchsichtig werden, wenn die Elektrodenfläche zunimmt und die Fibrillen-Flächendichte abnimmt. In einem anderen spezifischen Beispiel kann eine optische Modulationsvorrichtung, umfassend ein elektroaktives Polymer und eine Elektrode mit sich ändernder Opazität, ausgelegt werden, um die durch die Vorrichtung durchgelassene Lichtmenge präzise zu modulieren.

**[0147]** Membran-Vorrichtungen können als Pumpen, Ventile usw. verwendet werden. In einem Beispiel ist eine Membran-Vorrichtung mit einem vorbeanspruchten Polymer zur Verwendung als Pumpe geeignet. Die Pumpwirkung wird durch wiederholte Aktivierung des Polymers erzeugt. Elektroaktive Polymerpumpen gemäß der vorliegenden Erfindung können sowohl im Mikro- und Makro-Maßstab realisiert werden. Beispielhaft kann die Membran als Pumpe mit einem Durchmesser im Bereich von etwa 150 Mikrometern bis etwa 2 Zentimetern verwendet werden. Diese Pumpen können Polymerbeanspruchungen über 100 Prozent einschließen und können Drücke von 20 kPa oder mehr erzeugen.

**[0148]** [Fig. 6](#) zeigt ein zweistufiges hintereinander geschaltetes Pumpen-System, das Membranpumpen **540** und **542** gemäß einer spezifischen Ausführungsform der vorliegenden Erfindung einschließt. Die Membranpumpen **540** und **542** schließen vorbeanspruchte Polymere **544** und **546** ein, die an Rahmen **545** und **547** befestigt sind. Die Polymere **544** und **546** werden innerhalb von Öffnungen **548** und **550** in den Rahmen **545** bzw. **547** in einer zur Ebene der Öffnungen **548** und **550** senkrechten Richtung ausgelenkt. Die Rahmen **545** und **547** begrenzen zusammen mit den Polymeren **545** und **546** Hohlräume **551** und **552**. Die Pumpe **540** schließt einen Plungerkolben **553** ein, der eine Biegefeder **560** aufweist, um für eine Vorspannkraft auf die Membran **544** in Richtung des Hohlraums **551** zu sorgen.

**[0149]** Ein Ein-Wege-Ventil **555** gestattet den Eintritt eines Fluids oder Gases in den Hohlraum **551**. Ein

Ein-Wege-Ventil **556** gestattet den Austritt des Fluids oder Gases aus dem Hohlraum **551** heraus in den Hohlraum **552** hinein. Zudem gestattet ein Ein-Wege-Ventil **558** den Austritt des Fluids oder Gases aus dem Hohlraum **552**. Bei Aktivierung der Polymere **544** und **546** werden die Polymere abwechselnd ausgelenkt, um den Druck innerhalb der Hohlräume **551** bzw. **552** zu verändern, wodurch Fluid oder Gas aus dem Ein-Wege-Ventil **555** zum Hohlraum **551**, aus dem Ventil **556** heraus in den Hohlraum **552** hinein und aus dem Ventil **558** heraus bewegt wird.

**[0150]** Bei dem hintereinander geschalteten zweistufigen Pumpen-System aus [Fig. 6](#) schließt die Membranpumpe **542** keine Vorspannkraft ein, da die mit Druck beaufschlagte Abgabe aus der Membranpumpe **540** die Pumpe **542** vorbelastet. In einem Beispiel nutzt nur die erste Pumpe in einer hintereinander geschalteten Reihe von Membranpumpen einen Vorspanndruck – oder irgendeinen anderen Mechanismus zur Selbstauslösung. In einigen Beispielen können in einer Anordnung bereitgestellte Membranpumpen Spannungen einschließen, die von einer elektronischen Zeitsteuerung geliefert werden, um den Pumpwirkungsgrad zu erhöhen. In dem in [Fig. 6](#) dargestellten Beispiel werden die Polymere **544** und **546** für die beste Leistung gleichzeitig aktiviert. Bei anderen Beispielen, die mehr Membranpumpen in der Kaskade beinhalten können, wird die elektronische Zeitsteuerung für die verschiedenen Aktuatoren in idealer Weise so eingestellt, dass sich das Hohlraumvolumen einer Pumpe zusammenzieht, während sich die nächste Pumpe in der Reihe (wie durch die Ein-Wege-Ventile festgelegt) ausdehnt. In einem spezifischen Beispiel liefert die Membranpumpe **540** Gas mit einer Durchsatzmenge von 40 ml/min und einem Druck von etwa 1 kPa, während die Membranpumpe **542** Gas mit im Wesentlichen derselben Durchsatzmenge liefert, jedoch den Druck auf 2,5 kPa erhöht.

**[0151]** Biegebalken-Vorrichtungen, wie diejenigen, die im Hinblick auf die [Fig. 2K-Fig. 2M](#) beschrieben wurden, können in einer Vielfalt von kommerziellen und Raumfahrt-Vorrichtungen und Anwendungen eingesetzt werden, wie Gebläsen, elektrischen Schaltern und Relais, sowie Lichtscannern – auf der Mikro- und Makro-Ebene. Für Biegebalken-Aktuatoren, die als Lichtscanner verwendet werden, kann eine reflektierende Oberfläche, wie mit Aluminium bedampftes Mylar, mit dem freien Ende eines Biegebalken-Aktuators verbunden werden. Spezieller wird Licht reflektiert, wenn der Biegebalken aktiviert wird, und Licht tritt hindurch, wenn sich der Biegebalken in Ruhe befindet. Der Reflektor kann dann verwendet werden, um ankommendes Licht zu reflektieren und einen Abtaststrahl zu bilden, um entsprechend der Auslenkung des Aktuators einen Bogen oder eine Linie zu bilden. Anordnungen von Biegebalken-Aktuatoren können auch für Flat-Panel-Anzeigen verwenden

det werden, um die Luftströmung über eine Oberfläche zu steuern, für Lautsprecher mit geringer Tiefe und für Schwingungsunterdrücker, als "intelligente Pelze" zur Steuerung von Wärmeübertragung und/oder Lichtabsorption auf einer Oberfläche, und können in einer koordinierten Weise als Zilien wirken, um Objekte zu manipulieren.

**[0152]** Polymere und Polymerfilme, die zu einem röhrenförmigen oder mehrschichtigen Zylinder-Aktuator gerollt sind, können als Kolben realisiert werden, der sich bei einer Aktivierung axial ausdehnt. Ein solcher Aktuator ist einem hydraulischen oder pneumatischen Kolben analog und kann in einer beliebigen Vorrichtung oder Anwendung realisiert werden, welche diese traditionellen Formen von linearer Auslenkung verwendet.

**[0153]** Für eine Vielfalt von Anwendungen, die Tongeneratoren und akustische Lautsprecher, Tintenstrahldrucker, schnelle MEMS-Schalter usw. einschließen, kann ein elektroaktiver Polymer-Aktuator bei hohen Geschwindigkeiten arbeiten. In einem spezifischen Beispiel wird eine elektroaktive Polymermembran als Lichtscanner verwendet. Spezieller kann ein Spiegel auf einem Biegeelement angebracht werden, das nach unten auf eine elektroaktive Polymermembran mit 5 mm Durchmesser drückt, um ein verspiegeltes Biegeelement bereitzustellen. Eine gute Abtastung von Bildern unter einem Abtastwinkel von etwa 10 bis 30 Grad kann mit Spannungen im Bereich von etwa 190 bis 300 Volt und Frequenzen im Bereich von etwa 30 bis 300 Hz erzielt werden. Viel größeren Abtastwinkeln, zum Beispiel bis zu 90 Grad, kann ebenfalls Rechnung getragen werden, indem Spannungen im Bereich von 400 bis 500 V verwendet werden. Zudem können mit einem steiferen verspiegelten Biegeelement höhere Frequenzen verwendet werden.

**[0154]** Generatoren der vorliegenden Erfindung finden breite Verwendung als Generatoren zum Umwandeln von mechanischer Energie in elektrische Energie. Insbesondere sind Generatoren der vorliegenden Erfindung zur Verwendung als Fersenaufsetz-Generatoren gut geeignet. Spezieller können ein oder mehrere Wandler der vorliegenden Erfindung in einem Schuh verwendet werden, um beim Gehen erzeugte mechanische Energie als elektrische Energie nutzbar zu machen. Typischerweise schließt ein Generator ein Polymer ein, das in einer Art und Weise angeordnet ist, die ansprechend auf eine Auslenkung eines Teils des Polymers eine Veränderung im elektrischen Feld und in gespeicherter elektrischer Energie bewirkt. Eine mechanische Beaufschlagung, wie ein Aufsetzen einer Ferse, führt zur Ausdehnung des Wandlers in einer oder beiden Ebenenrichtungen parallel zur Oberfläche der Elektroden, womit die gespeicherte elastische mechanische Energie des Wandlers vergrößert wird. Wenn

dann im gestreckten Zustand eine elektrische Ladung auf die Elektroden aufgebracht wird (oder im gestreckten Zustand mehr Ladung hinzugefügt wird) und man den Wandler sich zusammenziehen lässt, wandelt der Wandler einen Teil oder die Gesamtheit seiner elastischen mechanischen Energie in eine größere Menge an gespeicherter elektrischer Energie um. Die größere gespeicherte elektrische Energie kann dann von einer Schaltungsanordnung zurückgewonnen oder geerntet werden, die in elektrischer Verbindung mit den Elektroden steht. Ein gewisser Teil der geernteten Energie kann dann zurückgeführt werden, um für die anfängliche elektrische Ladung zur Beaufschlagung im nächsten Ausdehnungs-Kontraktions-Zyklus zu sorgen. Generator-Anwendungen schließen auch Wandler ein, die mit konventionellen Verbrennungsmotoren gekoppelt sind, um kraftstoffgetriebene elektrische Generatoren herzustellen, handgetriebene Kurbelgeneratoren, durch Wellen angetriebene Generatoren, durch Wind angetriebene Generatoren und andere Arten von Generatoren, wo eine mechanische Beaufschlagung verfügbar ist, um den Wandler zu strecken.

**[0155]** Es sollte festgestellt werden, dass Wandler der vorliegenden Erfindung realisiert werden können, um mehr als eine Funktionalität zu haben. Mit anderen Worten kann ein Wandler in derselben Konstruktion als Aktuator, Generator und Sensor dienen.

## 7. FERTIGUNG

**[0156]** Da die vorbeanspruchten Polymere sowohl im Mikro- und Makro-Maßstab in einer breiten Vielfalt von Aktuator-Konstruktionen, mit einem weiten Bereich von Materialien und in einem breiten Bereich von Anwendungen realisiert werden können, können mit der vorliegenden Erfindung verwendete Fertigungsverfahren stark variieren. Verfahren zur Fertigung von elektromechanischen Vorrichtungen, die ein oder mehrere vorbeanspruchte Polymere einschließen, werden im Folgenden beschrieben.

**[0157]** [Fig. 7A](#) zeigt einen Prozessablauf **600** für die Fertigung einer elektromechanischen Vorrichtung, die wenigstens eine elektroaktive Polymerschicht aufweist. Die Prozesse können bis zu mehrere zusätzliche Schritte einschließen, die hier nicht beschrieben oder dargestellt sind, um die vorliegende Erfindung nicht zu verdecken. In einigen Fällen können Fertigungsverfahren konventionelle Materialien und Techniken einschließen, wie kommerziell erhältliche Polymere und Techniken, die bei der Fertigung von Mikroelektronik und Elektronik-Technologien verwendet werden. Zum Beispiel können Mikro-Membran-Vorrichtungen in situ auf Silizium hergestellt werden, wobei konventionelle Techniken verwendet werden, um die Löcher zu bilden und das Polymer und die Elektroden aufzubringen.



**[0158]** Der Prozessablauf **600** beginnt mit dem Erhalt oder der Fertigung eines Polymers (**602**). Das Polymer kann gemäß mehreren Verfahren erhalten oder gefertigt werden. In einem Beispiel ist das Polymer ein kommerziell erhältliches Produkt, wie ein kommerziell erhältlicher Acrylelastomerfilm. In einem anderen Beispiel ist das Polymer ein Film, der durch eines von Gießen, Tauchen, Schleuderbeschichten oder Sprühen erzeugt wird. In einem Beispiel wird das Polymer erzeugt, während Veränderungen der Dicke oder irgendwelche anderen Defekte minimiert werden, welche das Maximieren des elektrischen Feldes, das über das Polymer angelegt werden kann, gefährden können und daher die Leistung gefährden.

**[0159]** Das Schleuderbeschichten beinhaltet typischerweise das Aufbringen einer Polymer-Mischung auf ein starres Substrat und das Schleudern bis zu einer gewünschten Dicke. Die Polymer-Mischung kann das Polymer, ein Aushärtungsmittel und ein flüchtiges Dispergier- oder Lösemittel enthalten. Die Menge an Dispergiermittel, die Flüchtigkeit des Dispergiermittels und die Schleudergeschwindigkeit können verändert werden, um ein gewünschtes Polymer zu erzeugen. Beispielfhaft können Polyurethanfilme in einer Lösung von Polyurethan und Tetrahydrofuran (THF) oder Cyclohexanon schleuderbeschichtet werden. Im Fall von Silizium-Substraten kann das Polymer auf einem mit Aluminium bedampften Kunststoff oder einem Siliziumcarbid schleuderbeschichtet werden. Das Aluminium und das Siliziumcarbid bilden eine Opferschicht, die anschließend durch ein geeignetes Ätzmittel entfernt wird. Filme im Bereich von einem Mikrometer Dicke können auf diese Weise durch Schleuderbeschichtung erzeugt werden. Die Schleuderbeschichtung von Polymerfilmen, wie Silikon, kann auf einem glatten, nicht-haftenden Kunststoffsubstrat, wie Polymethylmethacrylat oder Teflon, vorgenommen werden. Der Polymerfilm kann dann durch mechanisches Abziehen oder mit Hilfe von Alkohol oder einem anderen geeigneten Trennmittel abgelöst werden. Die Schleuderbeschichtung ist auch zur Erzeugung von dickeren Polymeren im Bereich von 10–750 Mikrometern geeignet. In einigen Fällen kann die Polymer-Mischung vor dem Schleuderbeschichten zentrifugiert werden, um unerwünschte Substanzen, wie Füllstoffe, teilchenförmige Stoffe, Verunreinigungen und Pigmente zu entfernen, die in kommerziellen Polymeren verwendet werden. Um den Wirkungsgrad der Zentrifuge zu erhöhen oder die Gleichförmigkeit der Dicke zu verbessern, kann ein Polymer in einem Lösemittel verdünnt werden, um seine Viskosität abzusenken; z. B. kann Silikon in Naptha gelöst werden.

**[0160]** Das Polymer kann dann in einer oder mehreren Richtungen vorbeansprucht werden (**604**). Bei einer Ausführungsform wird die Vorbeanspruchung erzielt, indem ein Polymer in einer oder mehreren Richtungen mechanisch gestreckt und an einem oder

mehreren festen Elementen (z. B. starren Platten) fixiert wird, während es beansprucht ist. Eine andere Technik zur Aufrechterhaltung einer Vorbeanspruchung schließt die Verwendung von einer oder mehreren Versteifungen ein. Die Versteifungen sind lange starre Strukturen, die auf einem Polymer angebracht werden, während es sich in einem vorbeanspruchten Zustand befindet, z. B. während es gestreckt ist. Die Versteifungen erhalten die Vorbeanspruchung entlang ihrer Achsen aufrecht. Die Versteifungen können parallel oder in einer anderen Ausbildung angeordnet sein, um eine gerichtete Nachgiebigkeit des Wandlers zu erzielen. Es sollte festgestellt werden, dass die vergrößerte Steifigkeit entlang der Versteifungsachsen sowohl die vom Material der Versteifungen gelieferte vergrößerte Steifigkeit als auch die vergrößerte Steifigkeit des Polymers in der Vorbeanspruchungsrichtung umfasst.

**[0161]** Oberflächen auf dem vorbeanspruchten Polymer können mit einer Textur versehen werden. Bei einem Verfahren zur Bereitstellung einer Texturierung wird ein Polymer mehr gestreckt, als es gestreckt werden kann, wenn es aktiviert wird, und auf der gestreckten Polymeroberfläche wird eine dünne Schicht von steifem Material abgeschieden. Zum Beispiel kann das steife Material ein Polymer sein, das ausgehärtet wird, während das elektroaktive Polymer gestreckt ist. Nach dem Aushärten wird das elektroaktive Polymer entspannt, und die Struktur beult sich aus, um die mit der Textur versehene Oberfläche bereitzustellen. Die Dicke des steifen Materials kann verändert werden, um für eine Texturierung auf einem beliebigen Maßstab zu sorgen, einschließlich Submikrometer-Höhen. Bei einer anderen Ausführungsform werden mit einer Textur versehene Oberflächen durch reaktives Ionenätzen (RIE) erzeugt. Beispielfhaft kann RIE auf einem vorbeanspruchten Polymer, das Silikon umfasst, mit einem 90 Prozent Kohlenstofftetrafluorid und 10 Prozent Sauerstoff umfassenden RIE-Gas ausgeführt werden, um eine Oberfläche mit Wellentälern und Bergrücken von 4 bis 5 Mikrometern Tiefe zu bilden.

**[0162]** Auf dem Polymer werden dann eine oder mehrere Elektroden gebildet (**606**). Bei dem oben erwähnten, durch RIE veränderten Silikonpolymer kann eine dünne Goldschicht durch Sputtern auf der durch RIE mit einer Textur versehenen Oberfläche abgeschieden werden, um eine mit einer Textur versehene Elektrode bereitzustellen. In einem anderen Beispiel können eine oder mehrere Graphit-Elektroden unter Verwendung eines Stichels in einem Muster vorgesehen und abgeschieden werden. Elektroden, die leitfähige Fette vermischt mit einem leitfähigen Silikon umfassen, können gefertigt werden, indem man das leitfähige Fett und das nicht-ausgehärtete leitfähige Silikon in einem Lösemittel auflöst. Die Lösung kann dann auf das elektroaktive Polymermaterial gesprüht werden und kann eine Maske oder ei-

nen Stichel einschließen, um das spezielle Muster zu erzielen.

**[0163]** Die Metallschichten der strukturierten Elektroden aus den [Fig. 3](#) und [Fig. 4](#) können als Muster fotolithographisch auf dem Polymer oder der Ladungsverteilungsschicht hergestellt werden. Zum Beispiel wird eine Goldschicht durch Sputtern abgeschieden, bevor über dem Gold ein Fotoresist abgeschieden wird. Der Fotoresist und das Gold können gemäß konventionellen fotolithographischen Techniken in einem Muster hergestellt werden, z. B. unter Verwendung einer Maske gefolgt von einer oder mehreren Spülungen, um den Fotoresist zu entfernen. Eine zwischen dem Polymer und den Metallschichten hinzugefügte Ladungsverteilungsschicht kann zum Beispiel durch Schleuderbeschichtung abgeschieden werden.

**[0164]** Bei einem spezifischen Verfahren wird eine strukturierte Elektrode auf einem Polymer gebildet, indem Gold etwa 2 bis 3 Minuten lang (entsprechend der gewünschten Dicke) durch Sputtern mit etwa 150 Angström pro Minute abgeschieden wird. HPR 506-Fotoresist, wie er von Arch Chemicals, Norwalk, Connecticut geliefert wird, wird dann bei etwa 500 bis 1500 U/min etwa 20 bis 30 Sekunden lang schleuderbeschichtet und dann bei etwa 90 Grad Celsius gebacken. Eine Maske wird dann aufgebracht, bevor man den Fotoresist UV-Licht und einer Entwicklung aussetzt, um unmaskierte Teile des Fotoresists zu entfernen. Das Gold wird dann weggeätzt, und der Film wird gespült. Der verbleibende Fotoresist wird durch Belichtung mit UV-Licht, Entwicklung und Spülen entfernt. Die Goldspuren können dann gestreckt werden, um die Beanspruchungstoleranz zu verbessern.

**[0165]** Mit einer Textur versehene Elektroden können auch fotolithographisch in einem Muster hergestellt werden. In diesem Fall wird ein Fotoresist auf einem vorbeanspruchten Polymer abgeschieden und unter Verwendung einer Maske mit einem Muster versehen. Plasmaätzen kann Teile des elektroaktiven Polymers, die nicht von der Maske geschützt sind, in einem gewünschten Muster entfernen. Die Maske kann anschließend durch eine geeignete Nassätzung entfernt werden. Die aktiven Oberflächen des Polymers können dann mit der dünnen Goldschicht bedeckt werden, die zum Beispiel durch Sputtern abgeschieden wird.

**[0166]** Der Wandler, der die eine oder die mehreren Polymerschichten und Elektroden umfasst, wird dann entsprechend einer Anwendung gepackt (**608**). Das Packen kann auch die Montage von mehreren mechanisch verbundenen oder gestapelten Wandlern als mehrere Schichten einschließen. Zudem können entsprechend einer Anwendung mechanische und elektrische Verbindungen zu den Wandlern ausgebildet werden.

**[0167]** Die Fertigung von Polymeren kann auch das Hinzufügen von einem oder mehreren Additiven einschließen. Bei dem oben beschriebenen Additive-Beispiel wurde Mineralöl zu einer Lösung von Kraton D2104, wie es von Shell Chemical, Houston, TX hergestellt wird, in einem Lösemittel, wie Butylacetat, hinzugefügt, um die dielektrische Durchbruchfestigkeit zu erhöhen. In einem spezifischen Beispiel enthielt die Lösung 14,3 Gewichtsprozent Mineralöl und 32,1 Gewichtsprozent Kraton D2104. Die Lösung wurde dann auf Glas gegossen und in einem Ofen bei 95 Grad Celsius erwärmt, um jegliches restliche Lösemittel zu entfernen und das elektroaktive Polymer zu erzeugen. Das Polymer wurde dann auf einem Rahmen um 150 Prozent mal 150 Prozent gestreckt. Kohlenstoff-Fett-Elektroden wurden dann auf entgegengesetzte Oberflächen des Polymers geschmiert. Dieser Prozess erzeugte einen Wandler mit einer maximalen linearen Beanspruchung im Bereich von etwa 70 bis 100 Prozent.

**[0168]** Die vorliegende Offenbarung sieht auch alternative Verfahren zur Fertigung von elektromechanischen Vorrichtungen vor, die mehrere Schichten von vorbeanspruchtem Polymer enthalten. Bei einem Verfahren beginnt ein Prozess zur Fertigung von elektromechanischen Vorrichtungen, indem man eine Polymerschicht erhält oder fertigt. Das Polymer wird dann auf die gewünschte Vorbeanspruchung gestreckt und an einem ersten starren Rahmen befestigt. Als nächstes werden Elektroden auf beiden Seiten des Polymers abgeschieden, so dass aktive Flächen festgelegt und elektrische Verbindungen eingerichtet werden. Die Elektroden können durch eine Vielfalt von wohlbekannten Techniken in einem Muster hergestellt werden, wie Sprühbeschichtung durch eine Maske. Falls erwünscht, wird dann eine zweite Polymerschicht auf einem zweiten Rahmen gestreckt. Elektroden werden auf dieser zweiten Polymerschicht in einem Muster hergestellt. Die zweite Polymerschicht wird dann mit der ersten Schicht gekoppelt, indem ihre jeweiligen Rahmen gestapelt werden. Schichten von geeigneten nachgiebigen Klebern können verwendet werden, um die beiden Schichten und Elektroden zu verbinden, falls dies benötigt wird. Die Größe der Rahmen wird so gewählt, dass sie einen innigen Kontakt zwischen den Polymerschichten nicht stört. Wenn eine Störung vorhanden ist, dann kann es wünschenswert sein, den zweiten Rahmen zu entfernen, z. B. indem man die Polymerschicht um den Rand des ersten Rahmens herum wegschneidet. Falls gewünscht, kann in einer ähnlichen Weise, wie die zweite Schicht zur ersten hinzugefügt wurde, eine dritte Polymerschicht mit Elektroden hinzugefügt werden. Diese Vorgehensweise kann fortgesetzt werden, bis eine gewünschte Anzahl von Schichten erreicht ist.

**[0169]** Starre Rahmen, starre Elemente oder andere elektrische und mechanische Verbinder werden

dann an den Polymerschichten befestigt, z. B. durch Verleimen. Falls erwünscht, kann das Polymer dann von dem ersten Rahmen entfernt werden. In einigen Fällen kann der erste Rahmen als struktureller Teil des endgültigen Aktuators oder der endgültigen Aktuatoren dienen. Zum Beispiel kann der erste Rahmen eine Anordnung von Öffnungen sein, um eine Anordnung von Membran-Vorrichtungen zu erzeugen.

**[0170]** Die [Fig. 7B–F](#) zeigen einen zweiten Prozess zur Fertigung einer elektromechanischen Vorrichtung **640** mit mehreren Schichten von elektroaktivem Polymer. Die Prozesse können bis zu mehrere zusätzliche Schritte einschließen, die hier nicht beschrieben oder dargestellt sind, um die vorliegende Erfindung nicht zu verdecken. Der Prozess beginnt, indem man ein vorbeanspruchtes Polymer **622** auf einem geeigneten starren Substrat **624** erzeugt, z. B. durch Schleuderbeschichten eines Polymers auf einer Polymethylmethacrylat(PMMA)-Scheibe, das Polymer streckt ([Fig. 7B](#)) und es an einem starren Substrat **624** befestigt. Nachdem das Polymer **622** ausgehärtet ist, werden Elektroden **625** in einem Muster auf der freiliegenden Seite **626** des Polymers **622** hergestellt. Ein Feststoff-Element **627**, wie ein flexibler Film, der einen von einem Polyimid-, Mylar- oder Acetat-Film enthält, wird dann mit einem geeigneten Kleber **628** auf dem elektroaktiven Polymer **622** abgeschieden ([Fig. 7C](#)).

**[0171]** Das starre Substrat **624** wird dann vom elektroaktiven Polymer **622** gelöst ([Fig. 7D](#)). Ein Trennmittel, wie Isopropylalkohol, kann benutzt werden, um das Ablösen zu erleichtern. Elektroden **629** werden dann in einem Muster auf der zuvor nicht frei liegenden Seite des Polymers **622** hergestellt. Die Baugruppe wird dann mit einer anderen elektroaktiven Polymerschicht **630** verbunden, die an einem starren Substrat **631** befestigt ist ([Fig. 7E](#)). Die Polymerschichten **622** und **630** können durch eine Kleberschicht **632** verbunden werden, die zum Beispiel GE RTV 118-Silikon umfasst. Das starre Substrat **631** wird dann vom Polymer **630** gelöst, und Elektroden **633** werden in einem Muster auf der verfügbaren Seite **634** des Polymers hergestellt. Wenn zusätzliche Polymerschichten erwünscht sind, können die Schritte eines Hinzufügens einer Polymerschicht, Entfernen des starren Substrats und Hinzufügen von Elektroden wiederholt werden, um so viele Polymerschichten, wie gewünscht, zu erzeugen. Die Polymerschicht **635** ist auf diese Art und Weise hinzugefügt worden. Um die elektrische Verbindung mit Elektroden in den inneren Schichten der Vorrichtung **640** zu erleichtern, kann ein Metallstift durch die Struktur hindurch gestoßen werden, um einen Kontakt mit Elektroden in jeder Schicht herzustellen.

**[0172]** Das Feststoff-Element **627** kann dann mit einem Muster versehen oder entfernt werden, wie benötigt, um den Rahmen oder die mechanischen Ver-

bindungen bereitzustellen, die für den spezifischen Aktuator-Typ erforderlich sind. Membran-Vorrichtungen können gebildet werden, indem das Feststoff-Element **627** unter Verwendung einer geeigneten Maske oder Ätztechnik mit einem Muster versehen wird, um Öffnungen **636** zu bilden, die aktive Bereiche für die elektromechanische Vorrichtung **640** liefern ([Fig. 7F](#)). Wenn die aktive Fläche nicht groß ist und Elektroden ohne Schäden zu den aktiven Bereichen des Polymers hinzugefügt werden können, kann in einem anderen Beispiel das Feststoff-Element **627** vor der Befestigung am Polymer **622** mit den Öffnungen **636** als Muster versehen werden.

**[0173]** Für die Prozesse aus den [Fig. 7B–F](#) wird das starre Substrat **624** typischerweise vom elektroaktiven Polymer **622** gelöst, indem man das flexible elektroaktive Polymer abschält. Das Abschälen ist für die Fertigung von Vorrichtungen, die elektroaktive Polymere mit einem im Wesentlichen ebenen Profil umfassen, gut geeignet. Opferschichten können zwischen dem Polymer oder den Elektroden und dem starren Substrat verwendet werden, um das Ablösen zu erleichtern. Die Opferschichten gestatten es, dass das Polymer, die Elektroden und die daran befestigte Baugruppe von einem starren Substrat gelöst wird, indem die Opferschicht weggeätzt wird. Metalle, die Aluminium und Silber umfassen, sind zum Beispiel zur Verwendung als Opferschichten geeignet. Die Verwendung von Metallen gestattet es, die Opferschichten durch Flüssigkeiten wegzuzäten, welche die Polymerschichten nicht beeinträchtigen. Metallische Opferschichten können mit verschiedenen Maskierungstechniken auch einfach mit einem Muster versehen werden, um Rahmen, Verbinder für andere strukturelle Komponenten für die elektromechanische Vorrichtung **640** bereitzustellen. Die Opferschichten können auch benutzt werden, um Vorrichtungen zu fertigen, die Wandler mit nicht-ebenen Profilen umfassen, z. B. indem starre Substrate verwendet werden, die als Röhren geformt sind. Für geometrisch komplexe Wandler können Opferschichten in Kombination mit einer Tauchbeschichtung verwendet werden, um die komplexe Geometrie bereitzustellen.

**[0174]** Obwohl eine Fertigung von vorbeanspruchten Polymeren im Hinblick auf einige spezifische Beispiele kurz beschrieben worden ist, können für irgend einen der oben beschriebenen Aktuatoren oder irgend eine der Anwendungen Fertigungsprozesse und Techniken entsprechend variieren. Zum Beispiel kann der Prozess zur Fertigung einer Membran-Vorrichtung ein Schleuderbeschichten eines Polymers auf einem Substrat einschließen, bevor eine strukturierte Elektrode auf dem Polymer gefertigt wird. Das Polymer wird dann gestreckt, und starre Rahmen, die ein oder mehrere, für die aktive Fläche von jeder Membran-Vorrichtung bemessene Öffnungen enthalten, werden mit dem vorbeanspruchten Polymer verbunden, einschließlich irgendwelcher Überlappungs-

teile der strukturierten Elektrode. In einem anderen Beispiel werden die Öffnungen in das Substrat geätzt, statt dass ein getrennter starrer Rahmen verwendet wird, z. B. wenn das Substrat aus Silizium besteht. Das Substrat wird dann vom Polymer abgelöst, und eine Elektrode wird an der Unterseite des Polymers befestigt.

## 8. SCHLUSSFOLGERUNG

**[0175]** Obwohl diese Erfindung im Hinblick auf mehrere bevorzugte Ausführungsformen beschrieben worden ist, gibt es Veränderungen, Abwandlungen und Äquivalente, die unter den Umfang dieser Erfindung fallen, welche zum Zweck der Kürze weggelassen worden sind. Obwohl zum Beispiel für die vorliegende Erfindung geeignete Elektroden im Hinblick auf mehrere zahlreiche aufgebrauchte Materialelektroden beschrieben worden sind, sind für die vorliegende Erfindung geeignete Elektroden nicht auf diese Materialien beschränkt, und in einigen Fällen können sie Luft als Elektrode einschließen. Obwohl die vorliegende Erfindung im Hinblick auf mehrere bevorzugte Polymermaterialien und Geometrien mit bestimmten Leistungsbereichen beschrieben worden ist, ist die vorliegende Erfindung zudem nicht auf diese Materialien und Geometrien beschränkt und kann Leistungen außerhalb der aufgeführten Bereiche besitzen. Der Umfang der Erfindung wird durch die Ansprüche definiert.

### Patentansprüche

1. Generator (**100, 200, 230, 240, 255, 262, 270, 280, 290, 300**) zum Umwandeln von mechanischer Energie in elektrische Energie, wobei der Generator (**100, 200, 230, 240, 255, 262, 270, 280, 290, 300**) umfasst:  
wenigstens zwei Elektroden (**104, 106, 134, 136, 243, 244, 275, 276, 284, 285, 293, 294, 304**); und  
ein Polymer (**102, 152, 160, 131, 206, 231, 241, 273, 281, 291, 292, 302**), das in einer Weise angeordnet ist, die eine Veränderung des elektrischen Feldes als Reaktion auf eine auf einen ersten Teil des Polymers (**102, 152, 160, 131, 206, 231, 241, 256, 273, 281, 291, 292, 302**) aufgebrauchte Auslenkung (**108, 110, 208, 210**) verursacht, wobei ein zweiter Teil des Polymers (**102, 152, 160, 131, 206, 231, 241, 273, 281, 291, 292, 302**), der den ersten Teil einschließt, elastisch vorbeanspruchung ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Polymer (**102, 152, 160, 131, 206, 231, 241, 273, 281, 291, 292, 302**) ein Elastizitätsmodul von höchstens etwa 100 MPa aufweist.

2. Generator nach Anspruch 1, bei dem der Generator (**100, 200, 230, 240, 255, 262, 270, 280, 290, 300**) vor der Auslenkung gedehnt wird.

3. Generator nach Anspruch 2, bei dem die wenigstens zwei Elektroden (**104, 106, 134, 136, 243,**

**244, 275, 276, 284, 285, 293, 294, 304**) im Gebrauch eine Spannung anlegen, die einen Druck im Polymer (**102, 152, 160, 131, 206, 231, 241, 273, 281, 291, 292, 302**) erzeugt, der kleiner als aus der Dehnung resultierende elastische Rückstellspannungen sind.

4. Generator nach Anspruch 2, bei dem die Auslenkung eine Kontraktion in einer Richtung ist.

5. Generator nach Anspruch 4, bei dem das Polymer (**102, 152, 160, 131, 206, 231, 241, 273, 281, 291, 292, 302**) so angeordnet ist, dass elektrische Energie während der Kontraktion und nach der Dehnung zunimmt.

6. Generator nach Anspruch 1, bei dem das Polymer (**102, 152, 160, 181, 206, 231, 241, 256, 273, 281, 291, 292, 302**) eine im Wesentlichen konstante Dicke aufweist, und die Auslenkung eine Verkleinerung der Nettofläche des Polymers (**102, 152, 160, 181, 206, 231, 241, 256, 273, 281, 291, 292, 302**) orthogonal zur Dicke umfasst.

7. Generator nach Anspruch 1, bei dem die Vorbeanspruchung in einer ersten orthogonalen Richtung aufgebracht wird, mit einer Vorbeanspruchung, die größer als die Vorbeanspruchung in einer zweiten orthogonalen Richtung ist.

8. Generator nach Anspruch 1, weiter umfassend eine mit den wenigstens zwei Elektroden (**104, 106, 134, 136, 243, 244, 275, 276, 284, 285, 293, 294, 304**) verbundene elektrische Schaltung.

9. Fersenaufsetzgenerator, umfassend den Generator (**100, 200, 230, 240, 255, 262, 270, 280, 290, 300**) nach Anspruch 1.

10. Generator nach Anspruch 1, bei dem eine von den wenigstens zwei Elektroden (**104, 106, 134, 136, 243, 244, 275, 276, 284, 285, 293, 294, 304**) nachgiebig ist.

11. Generator nach Anspruch 1, weiter umfassend:  
einen mit dem Polymer (**206**) verbundenen flexiblen Rahmen (**202**), wobei der Rahmen (**202**) für den Generator (**200**) eine verbesserte Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie liefert.

12. Generator nach Anspruch 1, weiter umfassend:  
wenigstens ein mit dem Polymer (**152, 231, 304**) verbundenes steifes Element (**156, 232, 308, 310**), wobei das wenigstens eine steife Element eine Verlagerung in einer einzigen Richtung (**235**) im Wesentlichen verhindert.

13. Generator nach Anspruch 12, bei dem das Polymer ein Seitenverhältnis von wenigstens 4:1 auf-

weist.

14. Generator nach Anspruch 12, bei dem das wenigstens eine steife Element (**310**) mit einem Rand (**312, 314**) des Polymers verbunden ist.

15. Verfahren zur Verwendung eines elektroaktiven Polymerwandlers (**100, 200, 230, 240, 255, 262, 270, 280, 290, 300**), der ein elektroaktives Polymer (**102, 152, 160, 181, 206, 231, 241, 256, 273, 281, 291, 292, 302**) und wenigstens zwei Elektroden (**104, 106, 134, 136, 243, 244, 275, 276, 284, 285, 293, 294, 304**) in elektrischer Verbindung mit dem elektroaktiven Polymer (**102, 152, 160, 181, 206, 231, 241, 256, 273, 281, 291, 292, 302**) umfasst, wobei das Verfahren umfasst:

mechanisches Auslenken eines elastisch vorbeanspruchten Teils des Polymers (**102, 152, 160, 181, 206, 231, 241, 256, 273, 281, 291, 292, 302**), das ein Elastizitätsmodul von höchstens etwa 100 MPa aufweist, in eine erste Stellung;

Liefern von Ladung zu den wenigstens zwei Elektroden (**104, 106, 134, 136, 243, 244, 275, 276, 284, 285, 293, 294, 304**), die in elektrischer Verbindung mit dem Polymer (**102, 152, 160, 181, 206, 231, 241, 256, 273, 281, 291, 292, 302**) stehen;

mechanisches Auslenken des Teils aus der ersten Stellung in eine zweite Stellung; und

Abziehen von Ladung von den wenigstens zwei Elektroden (**104, 106, 134, 136, 243, 244, 275, 276, 284, 285, 293, 294, 304**) nach dem Auslenken des Teils aus der ersten Stellung.

16. Verfahren nach Anspruch 15, bei dem die Ladung geliefert wird, indem eine zwischen den wenigstens zwei Elektroden (**104, 106, 134, 136, 243, 244, 275, 276, 284, 285, 293, 294, 304**) angelegte Spannung verwendet wird, die kleiner als die Spannung ist, die zum Stellen des Teils in die erste Stellung erforderlich ist.

17. Verfahren nach Anspruch 15, bei dem das Abziehen der elektrischen Ladung ein Übertragen der Ladung auf eine Konditionierelektronik in elektrischer Verbindung mit den wenigstens zwei Elektroden (**104, 106, 134, 136, 243, 244, 275, 276, 284, 285, 293, 294, 304**) umfasst.

18. Verfahren nach Anspruch 15, bei dem das mechanische Auslenken aus der ersten Stellung in die zweite Stellung des Teils das elektrische Feld zwischen den wenigstens zwei Elektroden (**104, 106, 134, 136, 243, 244, 275, 276, 284, 285, 293, 294, 304**) verstärkt.

19. Verfahren nach Anspruch 15, bei dem Ladung von den wenigstens zwei Elektroden (**104, 106, 134, 136, 243, 244, 275, 276, 284, 285, 293, 294, 304**) während des Auslenkens des Teils aus der ersten Stellung in die zweite Stellung abgezogen wer-

den.

20. Verfahren nach Anspruch 15, weiter einschließlich ein Vorbeanspruchen des Polymers (**102, 152, 160, 181, 206, 231, 241, 256, 273, 281, 291, 292, 302**) vor einem mechanischen Auslenken des Teils in die erste Stellung.

Es folgen 15 Blatt Zeichnungen

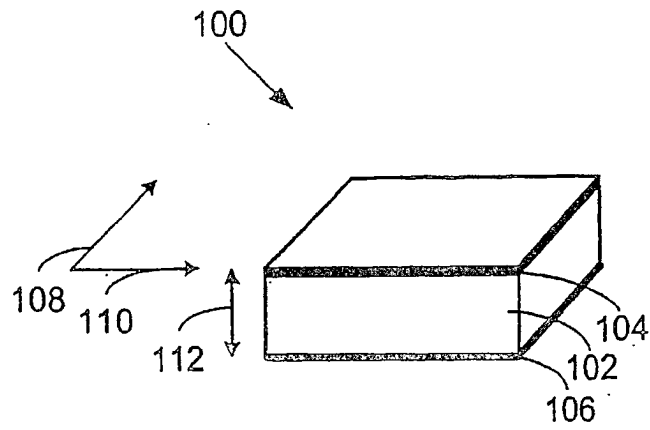


FIG. 1A

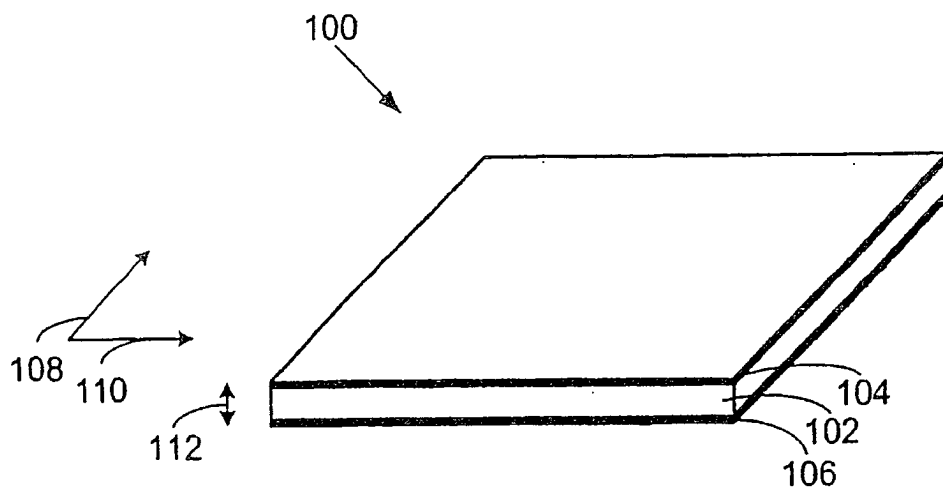


FIG. 1B



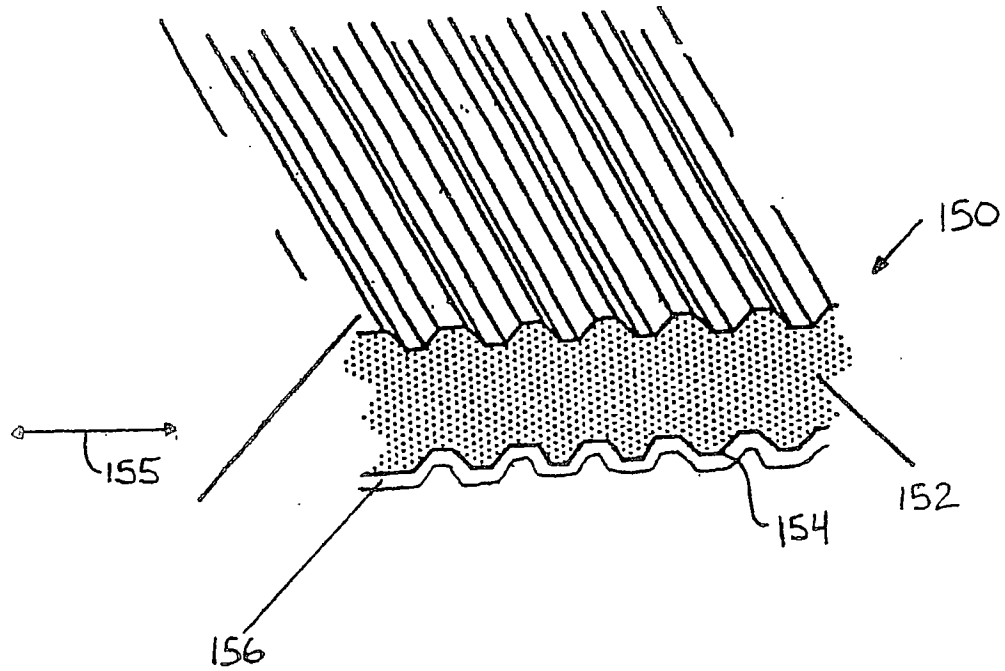


FIG. 1C

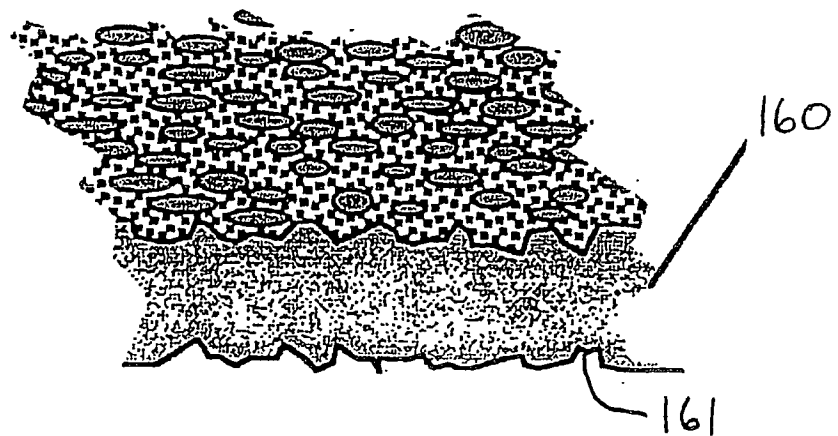


FIG. 1D

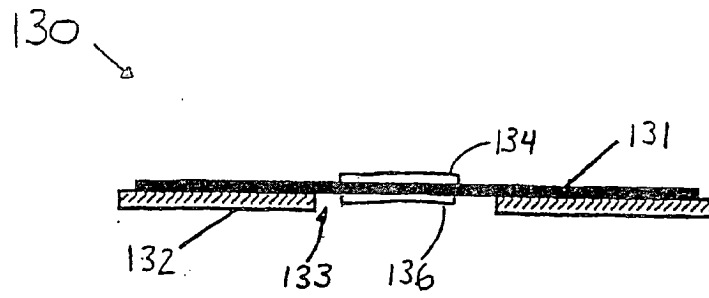


FIG. 1E

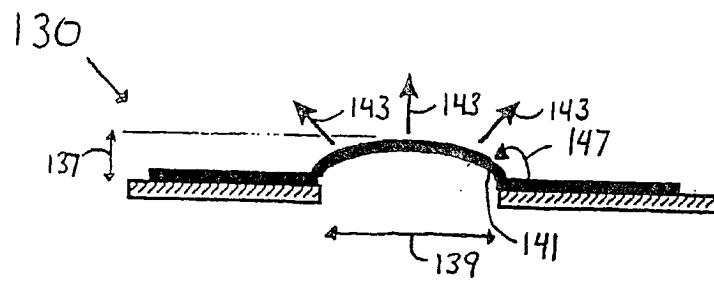


FIG. 1F

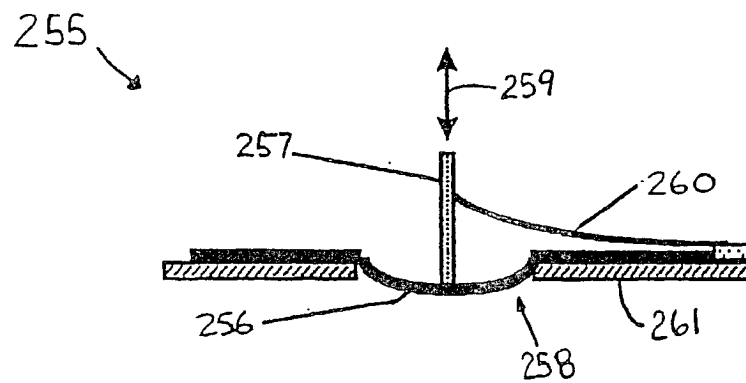


FIG. 2H

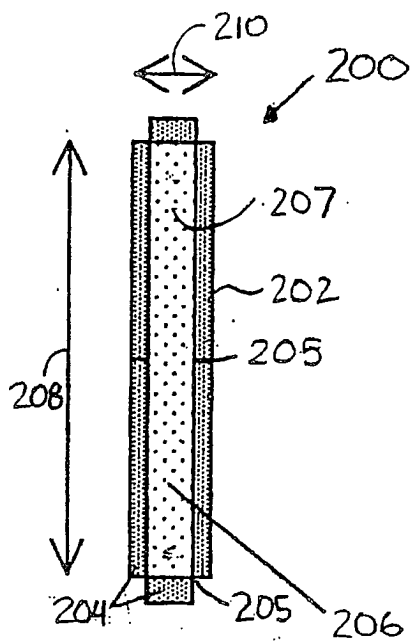


FIG. 2A

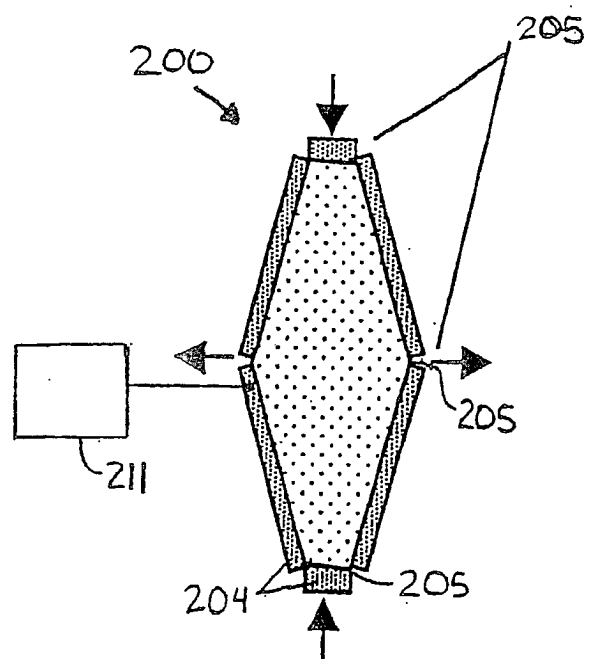


FIG. 2B

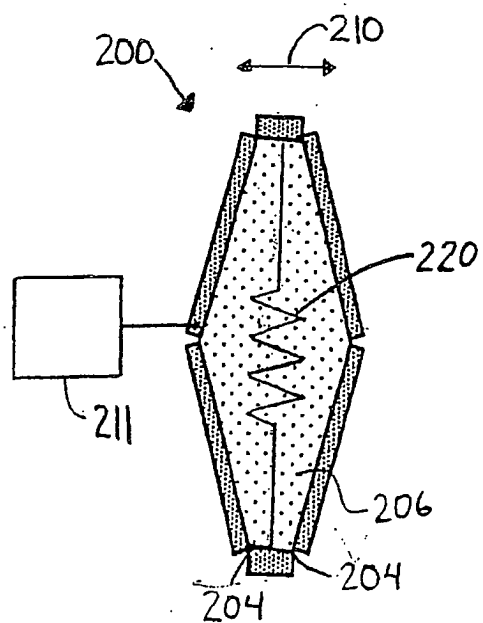
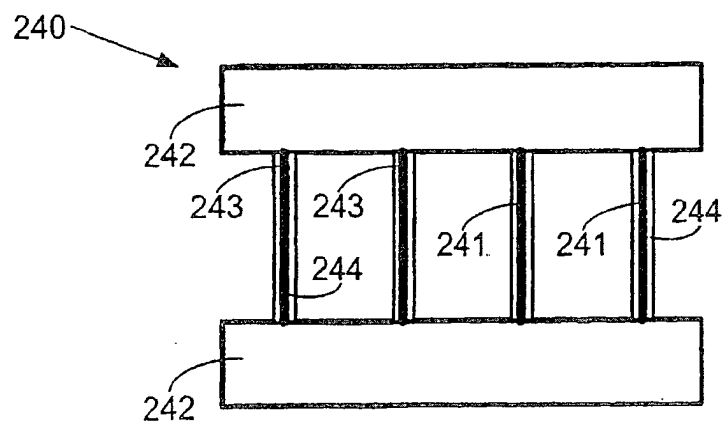
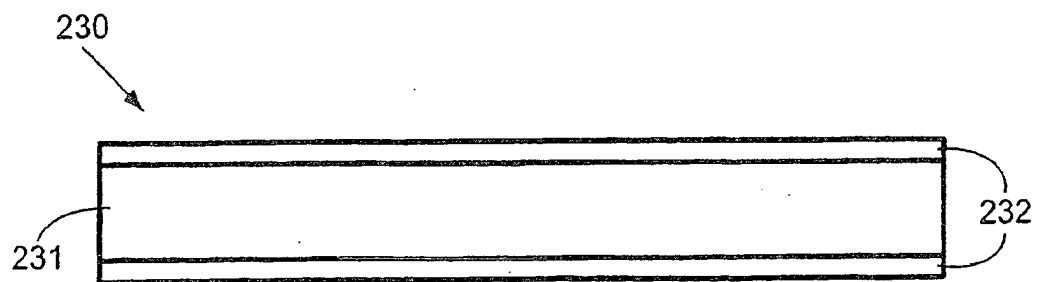
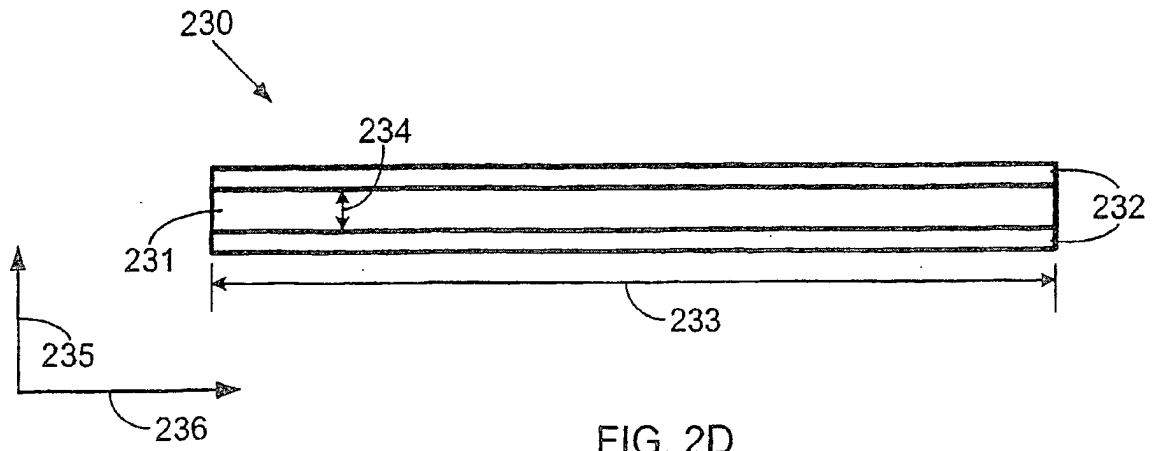


FIG. 2C



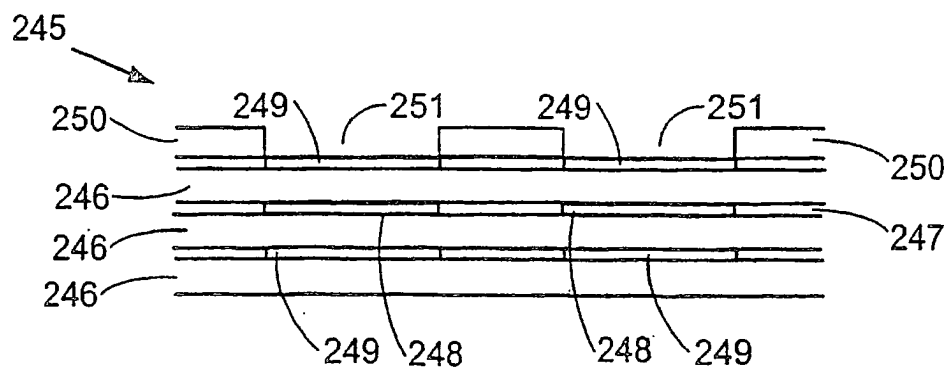


FIG. 2G



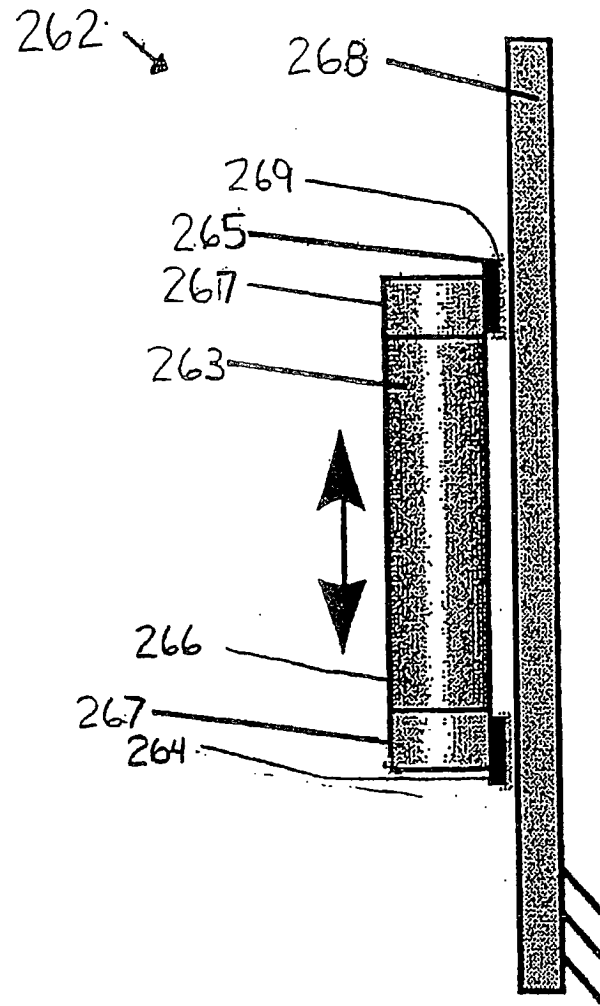


FIG. 2I

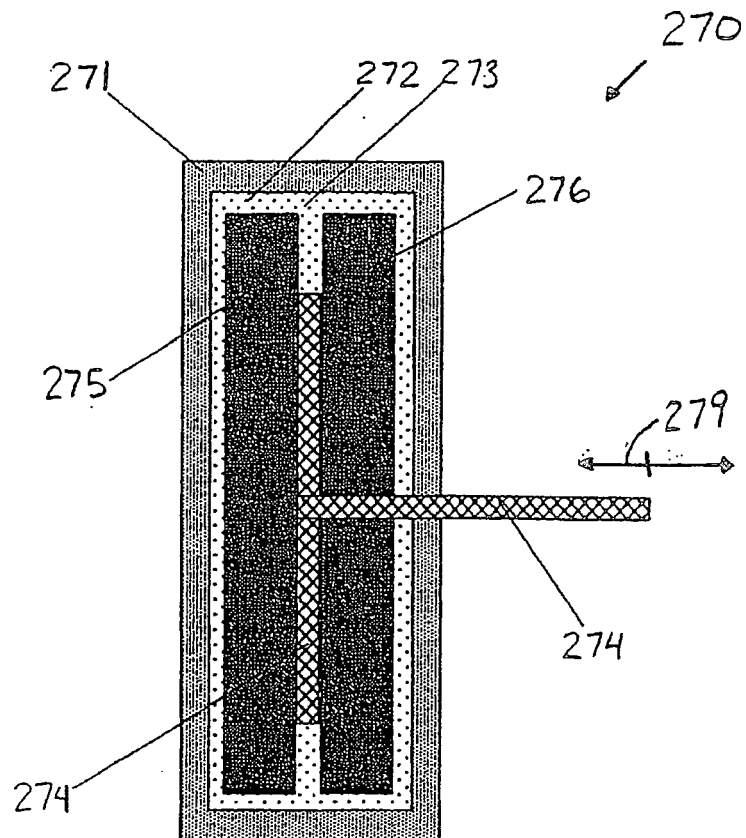


FIG 2J

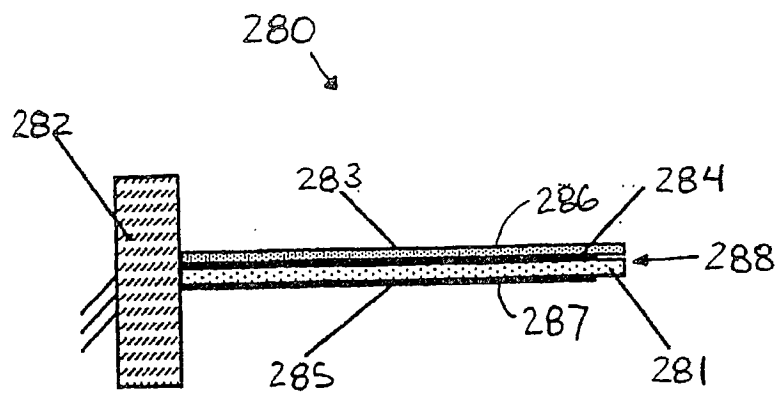


FIG. 2K

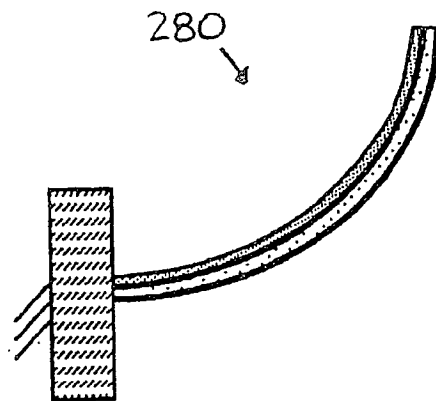


FIG. 2L

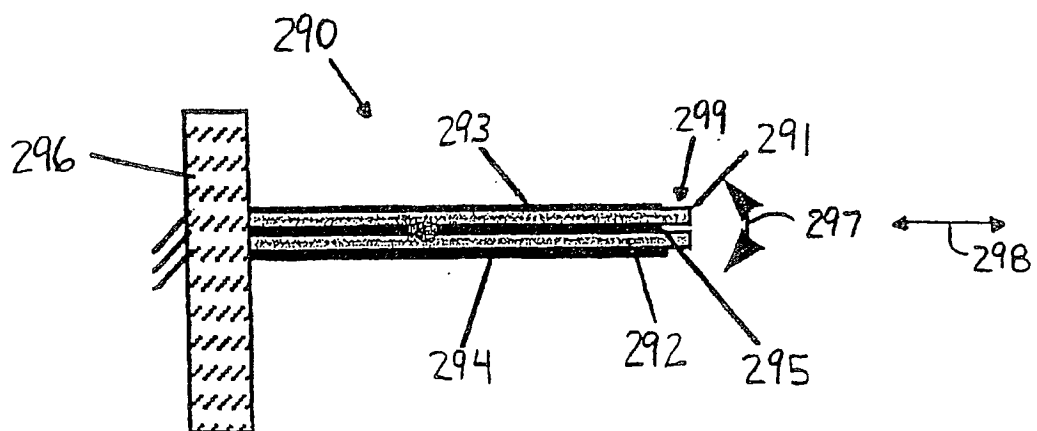


FIG. 2M

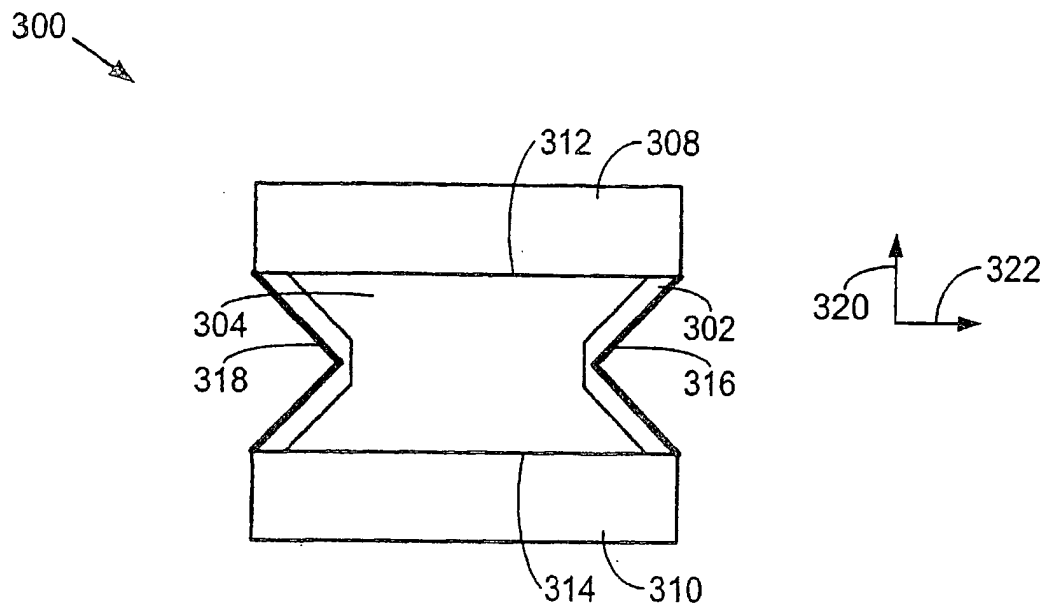


FIG. 2N

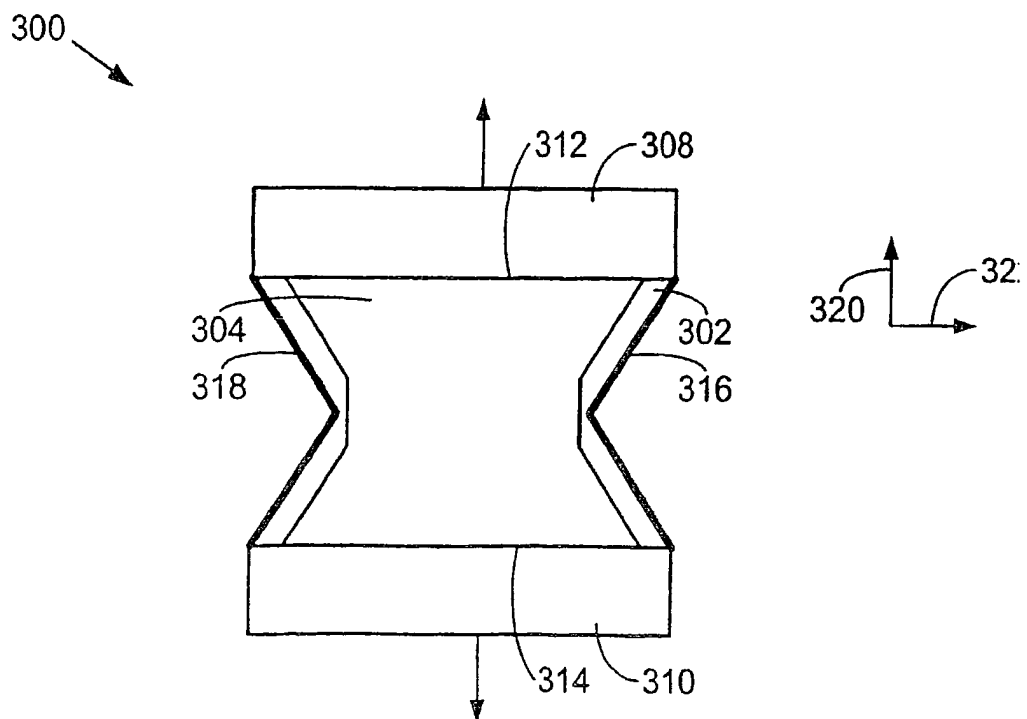


FIG. 2O

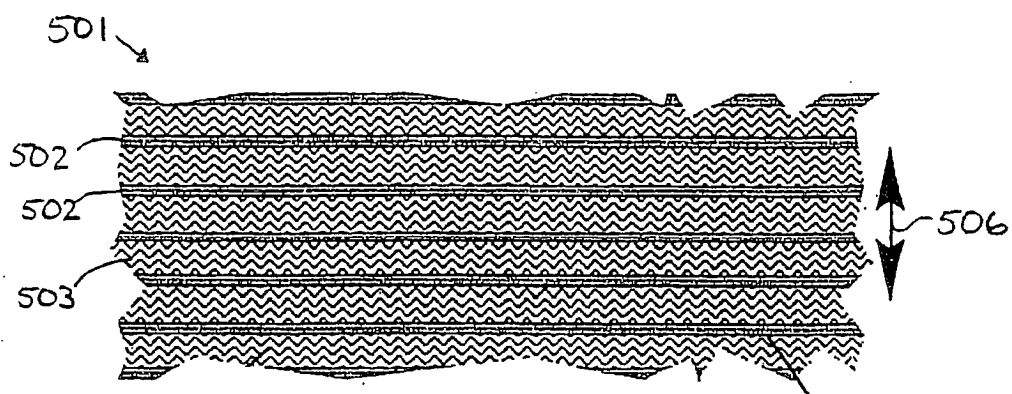


FIG. 3

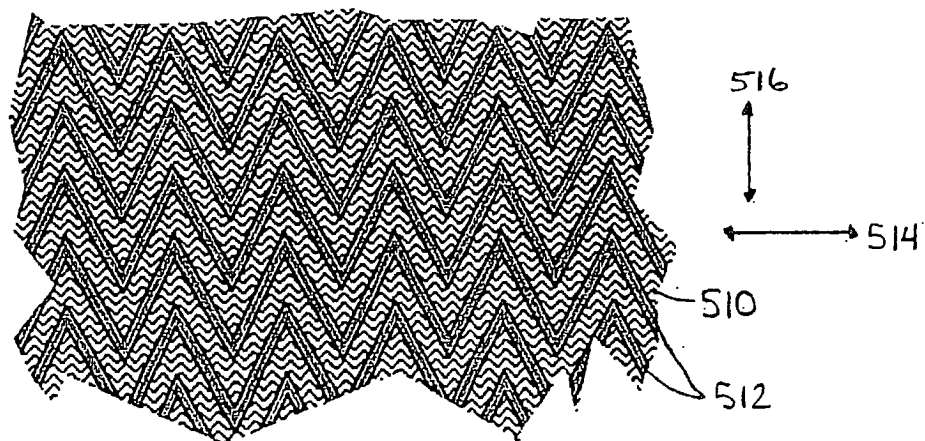


FIG. 4



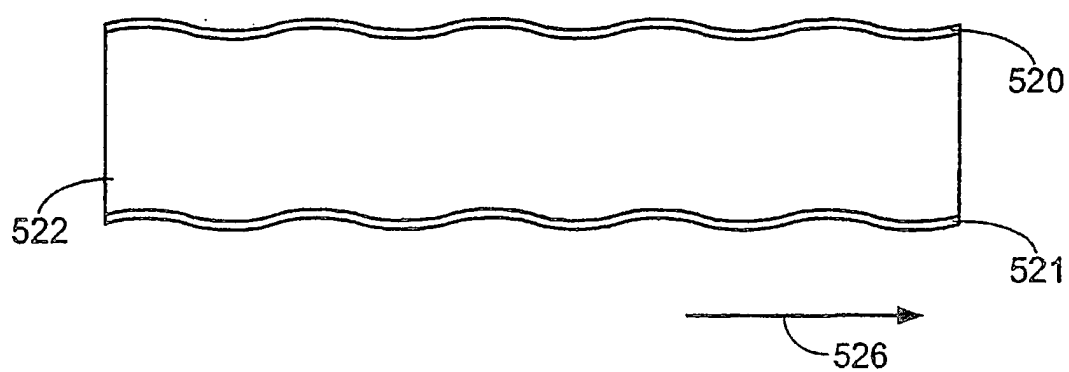


FIG. 5

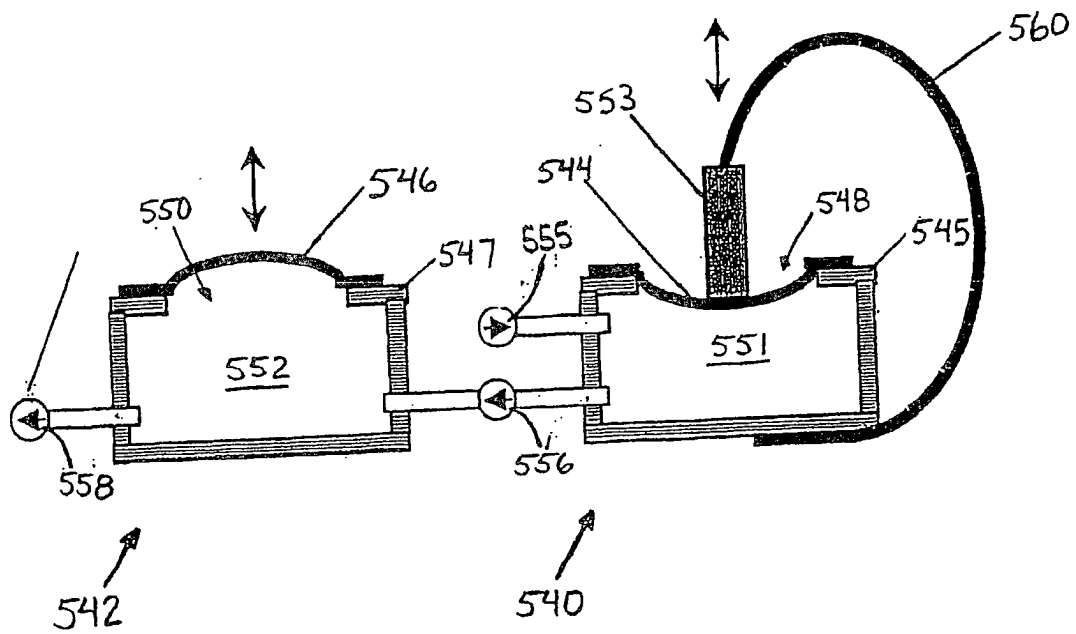


FIG. 6

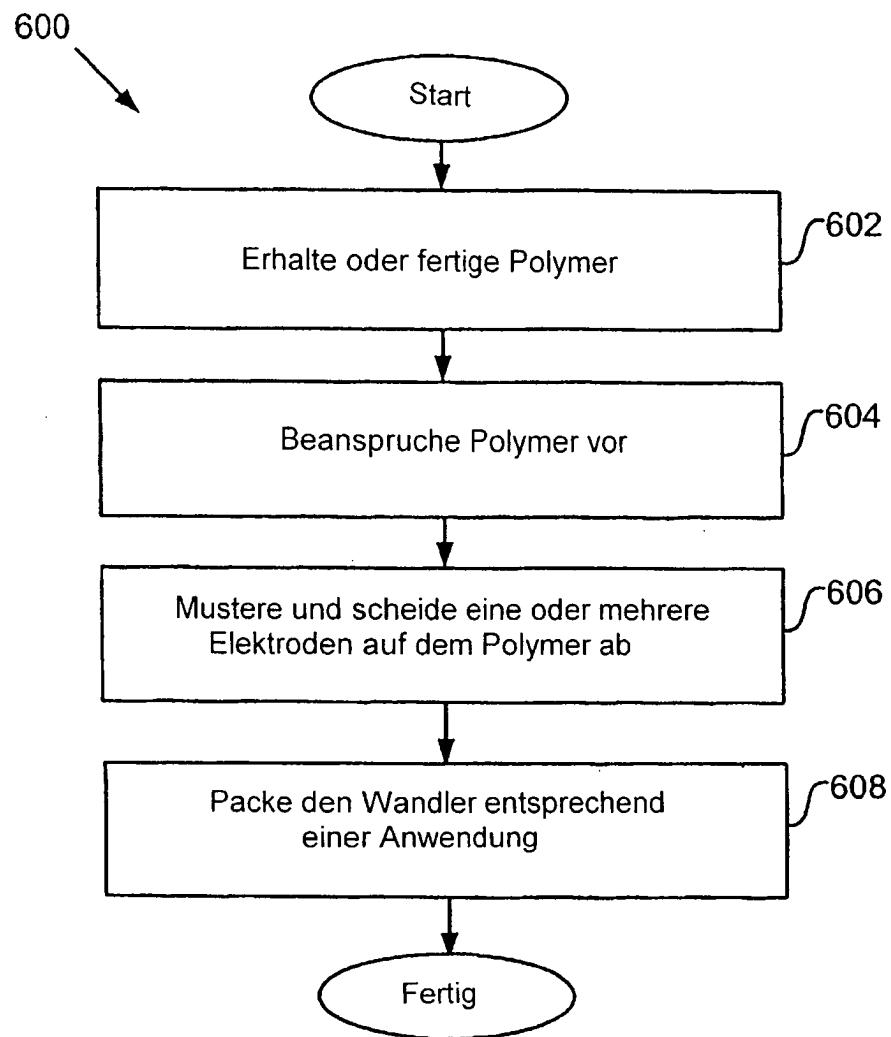


FIG. 7A

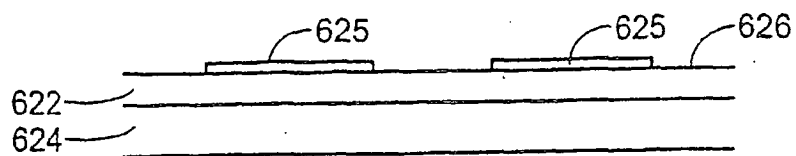


FIG. 7B

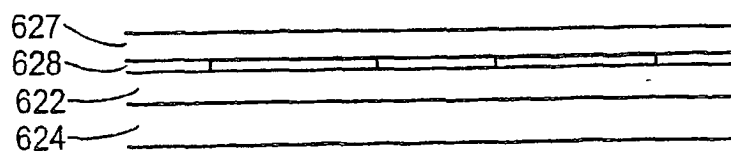


FIG. 7C

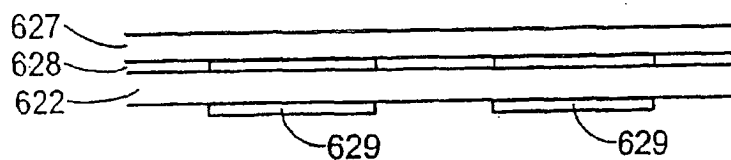


FIG. 7D

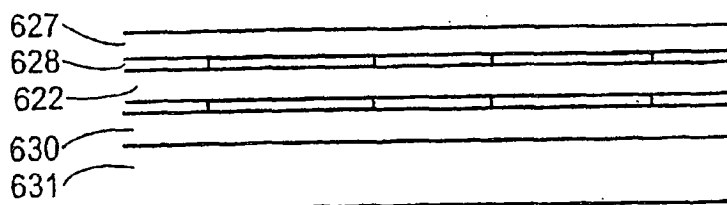


FIG. 7E

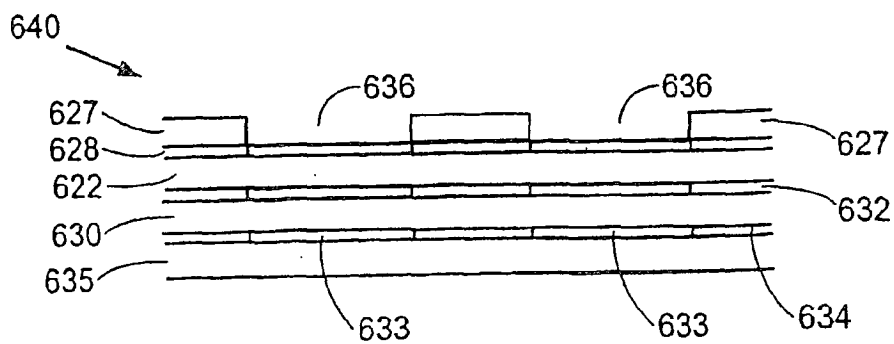


FIG. 7F