



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2005 021 275 B4** 2007.07.26

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2005 021 275.1**

(22) Anmeldetag: **09.05.2005**

(43) Offenlegungstag: **16.11.2006**

(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **26.07.2007**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **H01L 41/22** (2006.01)

**H01L 41/083** (2006.01)

**H01L 41/047** (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 2 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:

**Siemens AG, 80333 München, DE**

(72) Erfinder:

**Döllgast, Bernd, 91054 Erlangen, DE; Kastl, Harald  
Johannes, 95686 Fichtelberg, DE; Schuh, Carsten,  
Dr., 85598 Baldham, DE**

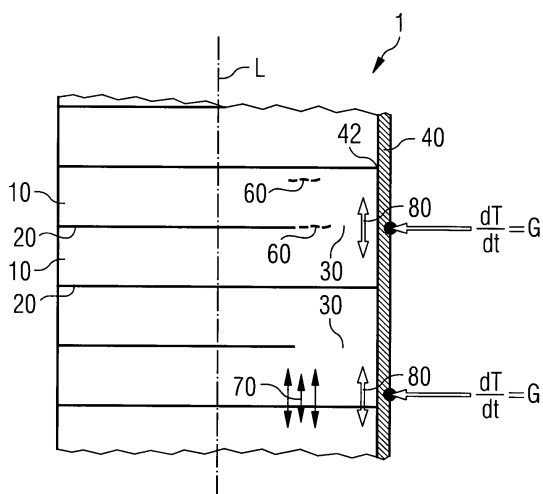
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

**DE 102 34 787 C1**

**DE 199 13 902 A1**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Vermeiden einer Längsrisssbildung eines piezoelektrischen oder elektrostriktiven Bauteils**

(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Vermeiden einer Rissbildung und/oder zum Verhindern einer Rissweiterbildung in Längsrichtung (L) innerhalb eines piezoelektrischen oder elektrostriktiven Bauteils (1), wobei das Bauteil (1) wenigstens an einem Oberflächenbereich einer Temperaturbehandlung unterzogen wird, die am Oberflächenbereich eine Temperaturveränderung von wenigstens 50K/s bewirkt, wobei eine Änderungsgeschwindigkeit der Temperatur (G) im Bauteil (1) derart gewählt wird, dass in einem Volumenbereich, in welchem die Temperaturbehandlung wirksam ist, innerhalb des Bauteils (1) eine gezielte Gefügeschädigung durch Spannungen (70) und/oder Risse (60), insbesondere Mikrorisse (60), entsteht.



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Erhöhen der Lebensdauer eines piezoelektrischen oder elektrostriktiven Bauteils, wobei Risse in Längsrichtung des Stacks vermieden werden und/oder eine Rissverlängerung verhindert wird.

**[0002]** Z. B. piezokeramische Multilayer-Aktuatoren bzw. Multilayer-Stacks weisen alternierend angeordnete Schichten von Piezokeramik- und Innenelektrodenmaterial auf. Bei einer erstmaligen elektrischen Ansteuerung dieser Vielschichtstruktur bis in den Großsignalbereich werden die Piezokeramikschichten polarisiert und zeigen dabei jeweils eine irreversible Längenänderung, die so genannte remanente Dehnung. Aufgrund dieser erstmaligen Dickenänderung der Piezokeramikschichten entstehen mechanische Zugspannungen in der Gesamtstruktur des Stacks, welche dazu führen, dass im Verlauf der Polarisierung und auch in einem späteren Betrieb des Aktuators so genannte Polungsrisse bzw. Risse im Piezostack entstehen.

**[0003]** Die Polungsrisse verlaufen in Querrichtung zum Multilayer-Piezostack und bevorzugt entlang des Interfaces Innenelektrode/Piezokeramikmaterial, sowie innerhalb der Piezokeramikschichten selbst. Solche Polungsrisse sind für die Zuverlässigkeit im dynamischen Betrieb des Multilayer-Aktuators unschädlich, können aber bei Vorliegen ungünstiger intrinsischer Einflüsse, wie z. B. einer fehlerhaften Gefügestruktur und/oder einer ausreichend großen Defektpopulation, und auch bei Vorliegen extrinsischer Einflüsse, wie z. B. den elektrischen Anstiegsflanken im dynamischen Betrieb und/oder einer unzureichenden Klemmung, abgelenkt werden bzw. sich verzweigen. Diese dann oft in Längsrichtung des Multilayer-Piezostacks abgelenkten Risse bzw. Verzweigungen von Polungsrissen mit einem senkrechten Anteil zur ursprünglichen Richtung des Polungsrisses, beeinträchtigen die Funktionstüchtigkeit des Multilayer-Aktuators und können zu einem vorzeitigen Ausfall des Multilayer-Aktuators führen. Insbesondere von Nachteil sind diejenigen Risse in Längsrichtung des Multilayer-Piezostacks, die zwei benachbarte Innenelektroden elektrisch verbinden und so einen elektrischen Kurzschluss erzeugen.

**[0004]** Polungsrisse entstehen bevorzugt in denjenigen Bereichen des Multilayer-Piezostacks, in welchen der Multilayer-Piezostack inaktive Kontaktierungszonen aufweist. In den inaktiven Kontaktierungszonen ist jede zweite Innenelektrode des Multilayer-Piezostacks ausgenommen, damit diese Innenelektroden nicht mit einer falschen Außenmetallisierungsbahn, welche die Innenelektroden mit Spannung versorgt, elektrisch kontaktiert werden. Diese inaktiven Bereiche werden weder beim Polarisieren noch beim Betrieb des Multilayer-Aktuators piezoe-

lektrisch wesentlich gedehnt, wodurch hohe Zugspannungskonzentrationen in den inaktiven Bereichen entstehen, die zur oben genannten Polungsrissbildung führen.

**[0005]** Entscheidend für den Rissverlauf bzw. den Weiterverlauf eines Risses ist die Höhe des Reißwiderstands in den verschiedenen Richtungen der Keramik. Bei einem hohen Reißwiderstand in der Keramik senkrecht zu den Innenelektroden und einem deutlich niedrigeren Reißwiderstand parallel zu den Innenelektroden, bilden sich nur Risse, die in Querrichtung zum Multilayer-Piezostack, also parallel zu den Innenelektroden verlaufen. Wie oben schon erwähnt, ist ein solches Verhalten unschädlich für die Lebensdauer eines Multilayer-Aktuators im dynamischen Betrieb. Bei annähernd gleichem Reißwiderstand parallel und senkrecht zu den Innenelektroden ist allerdings mit einer unerwünschten Ablenkung der Risse in Längsrichtung des Multilayer-Piezostacks zu rechnen. Ferner kann es zu einer Aufspaltung des ursprünglichen Risses in zwei Risse kommen, die jeweils für sich in aktive Bereiche des Multilayer-Piezostacks weiter wachsen und so die Lebensdauer des Multilayer-Aktuators herabsetzen.

**[0006]** Aber auch ohne das Vorliegen von Polungsrissen können sich Längsrisse senkrecht zu den Innenelektroden bilden, was aufgrund hoher und/oder inhomogener mechanischer Belastung der Vielschichtstruktur hervorgerufen werden kann. Dies ist z. B. bei einem Betrieb des Multilayer-Aktuators gegen einen Anschlag; beim Auftreten hoher Kraftgradienten im Verlauf einer Auslenkung bei einer schnellen inhomogenen Erwärmung, z. B. bei hochdynamischer elektrischer Ansteuerung; oder bei prozessbedingten, stark unterschiedlichen Größen der inaktiven Bereiche der Fall. Bei solcherart entstandener Risse bestehen dieselben Probleme wie beim oben Gesagten.

**[0007]** Entscheidend für die Lebensdauer eines piezoelektrischen oder elektrostriktiven Bauteils, insbesondere für die piezokeramischen Multilayer-Aktuatoren sind die Art, der Ort und die Generierung von Rissen, sowie die Richtung der Verlängerung von Rissen, insbesondere parallel zum elektrischen Dehnfeld.

**[0008]** Um der Rissbildung zu begegnen werden im Stand der Technik z. B. so genannte Sicherheitslayer in eine solche piezokeramische Vielschichtstruktur eingebaut. Sicherheitslayer sind elektrisch inaktive Keramikschichten mit geringem Reißwiderstand, wobei z. B. in einem 30mm-Stack neun Sicherheitslayer vorgesehen sind. Hierbei entstehen und wachsen Polungsrisse bevorzugt innerhalb der Sicherheitslayer. Problematisch hierbei ist das Design der piezokeramischen Vielschichtstruktur, da z. B. beim Auftreten von schädlichen Rissen in der dehnungsaktiven Viel-

schichtstruktur die Sicherheitslayer anders positioniert oder zusätzliche Sicherheitslayer vorgesehen werden müssen, was herstellungstechnisch einen hohen Aufwand bedeutet eine Stackstruktur mit z. B. über 300 Schichten entsprechend anzupassen.

**[0009]** Ferner offenbart die DE 102 34 787 C1 ein Verfahren zur Herstellung einer piezoelektrischen Vielschichtstruktur, wobei innerhalb der Vielschichtstruktur im Abstand von 1 bis 4mm, bevorzugt im Abstand von 2 bis 3mm, gezielt Gefügeinhomogenitäten vorgesehen sind. Bevorzugt werden diese Gefügeinhomogenitäten beim Sinterprozess erzeugt, indem beim Stapeln eine Schicht oder eine Menge eines organischen Binders aufgebracht wird, die beim Sinterprozess nahezu vollständig ausbrennt. Diese Gefügeinhomogenitäten wirken als Rissquelle, an welchen später ein gezieltes Risswachstum erfolgen soll, um so einer Rissbildung bzw. einem unkontrollierbaren Risswachstum in einem unerwünschten Bereich innerhalb der Vielschichtstruktur zu begegnen. Problematisch hierbei ist, dass vor dem Sintern, also beim Stapeln der Vielschichtstruktur, diese Gefügeinhomogenitäten angelegt oder vorgesehen werden müssen. Dies wiederum macht ein Anpassen nachfolgender Vielschichtstrukturen bei einem unerwünschten Risswachstum im Betrieb einer vorausgegangenen Vielschichtstruktur schwierig, wodurch tiefgreifendere Veränderungen im Herstellungsverfahren notwendig sind.

**[0010]** Die DE 199 13 902 A1 offenbart ein Verfahren zum Erfassen eines Risses in einem piezoelektrischen Bauelement und eine Anordnung zum Erfassen des Risses. Hierbei wird während der Entstehung eines Risses ein sich durch den Riss verändernder elektrischer Stromverlauf detektiert. Dies geschieht z. B. bei der Polarisierung des piezoelektrischen Bauelements durch Überlagerung des Ladestroms durch einen durch den entstehenden Riss ausgelösten Strompuls.

**[0011]** Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein einfacheres und verbessertes Verfahren zur Erhöhung der Lebensdauer eines piezoelektrischen oder elektrostriktiven Bauteils zur Verfügung zu stellen. Insbesondere sollte eine Längsrissbildung im späteren Betrieb des Bauteils durch die Erfindung vermieden werden. Ferner sollte das Verfahren einfach, flexibel und schnell an unterschiedliche Gegebenheiten, wie z. B. unterschiedliche Bauteilabmessungen, sowie an später im Betrieb des Bauteils neu auftauchenden, unerwünschten Rissen, für nachfolgende Bauteile anpassbar sein. Darüber hinaus ist es eine Aufgabe der Erfindung, ein piezoelektrisches oder elektrostriktives Bauteil, insbesondere einen monolithischen Multilayer-Piezostack anzugeben, der wirksam vor einer Längsrissbildung bei einer Polarisierung und im späteren Betrieb geschützt ist.

**[0012]** Die Aufgabe der Erfindung wird mittels eines Verfahrens zum Vermeiden einer Längsrissbildung und/oder zum Verhindern einer Rissverlängerung innerhalb eines piezoelektrischen oder elektrostriktiven Bauteils gelöst, wobei das Bauteil wenigstens partiell einem Thermoschock bzw. einer Temperaturbehandlung ausgesetzt wird, die in bestimmten Bereichen des Bauteils eine gezielte Gefügeschädigung vornimmt. Aufgrund solch einer gezielten Gefügeschädigung entstehen innerhalb des Bauteils mechanische Zug-/Druckspannungen und/oder Risse, insbesondere Mikrorisse. Durch das Ausbilden der mechanischen Spannungen bzw. der Mikrorisse wird eine vermehrte Entstehung von Rissen/Polungsrissen durch das Vorliegen einer erhöhten Population von Anfangsdefekten aufgrund der gezielten Gefügeschädigung erleichtert. Das Vorliegen von mechanischen Spannungen alleine genügt schon, um zusammen mit einer Defektpopulation als Kondensationskeim für einen späteren Riss/Polungsriss oder als Attraktor für einen von außen zulaufenden Riss/Polungsriss zu dienen. Daher ist es also nicht unbedingt notwendig, die Temperaturbehandlung so auszulegen, dass garantiert Risse innerhalb des Bauteils entstehen.

**[0013]** Bevorzugt findet die Temperaturbehandlung zeitlich vor einer Polarisierung bzw. einer Polung des Bauteils statt. Insbesondere bei der Polarisierung – da hierbei die längste Dehnung des Bauteils in der gesamten Lebensdauer des Bauteils auftaucht – entstehen so genannte Polungsrisse, deren spätere Positionen durch die erfindungsgemäßen Gefügeveränderungen determiniert werden können. Aufgrund der Temperaturbehandlung und der daraus resultierenden inneren mechanischen Spannungen bzw. der daraus resultierenden inneren Mikrorisse ist es möglich, wenigstens teilweise den Ort der Polungsrisse im Vorfeld zeitlich vor der Polarisierung zu bestimmen und sie dadurch derart im Bauteil vorsehbar zu gestalten, dass sich die Polungsrisse an Positionen im Bauteil bilden, an welchen sie nicht zum Verzweigen neigen, bzw. dass sich keine Längsrisse bzw. Risse ausbilden.

**[0014]** Spannungen und Mikrorisse entstehen an innerhalb des Bauteils endenden Innenelektroden, wie z. B. an Ausnehmungen der Innenelektroden für inaktive Kontaktierungsbereiche (s. a. u.). Die innerhalb des Bauteils endenden Innenelektroden wirken als Anfangs-Inhomogenitäten für die erfindungsgemäß eingebrachten Mikrorisse und/oder Spannungen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Bauteilgefüge in diesen Bereichen inhomogen ist. Darüber hinaus bilden sich die erfindungsgemäßen Spannungen und Mikrorisse bevorzugt auch an den sich durch die inaktiven Bereiche hindurcherstreckenden Innenelektroden. Durch die erfindungsgemäße Gefügeschädigung ist daher sichergestellt, dass Polungsrisse/Risse auf die Gefügeschädigungen von außen zulaufen und dort zum Stillstand kommen. Darüber hin-

aus bilden sich erfindungsgemäß mehr Polungsrisse als im Stand der Technik aus, wodurch das Bauteil homogener entlastet werden kann. Dadurch neigen die Polungsrisse und auch die später entstehenden Risse weniger zum Weiterwachsen bzw. Verzweigen, wodurch die Funktionstüchtigkeit des Bauteils langfristig erhalten bleibt.

**[0015]** In einem Bereich des Bauteils mit inneren mechanischen Spannungen kann es bei darauf zulaufenden Risspitzen von entstehenden Polungsrissen passieren, dass das weitere Wachstum des Polungsrisses durch eine Bildung von Mikroentlastungsrissen gehemmt bzw. gestoppt wird. Ferner kann es dazu kommen, dass auch das Mikrorisswachstum durch den Polungsriss gehemmt bzw. gestoppt wird, wodurch sich der durch die Temperaturbehandlung vorgesehene innere Mikroriss und der von außen auf ihn zulaufende Polungsriss derart gegenseitig aufheben, dass beide Risse nicht mehr weiter wachsen. Dies gilt natürlich auch für die im Betrieb des Bauteils entstehenden Risse.

**[0016]** In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird die Temperaturbehandlung an den Stellen außen am Bauteil vorgesehen, an welchen nach dem Sintern des Bauteils (Polarisierung und/oder Betrieb) bei gleichen oder ähnlichen Bauteilen schon Risse aufgetreten sind. Dies gilt insbesondere in einem volumenbereich des Bauteils, in welchem Polungsrisse nach der Polarisation auftreten.

**[0017]** Häufig werden Polungsrisse in so genannten inaktiven Kontaktierungszonen bzw. inaktiven Bereichen eines piezokeramischen Stacks bzw. eines piezokeramischen Multilayer-Stacks beobachtet. In den inaktiven Bereichen des Stacks findet keine bzw. nur eine geringfügige piezoelektrische Dehnung des Stacks statt, wohingegen in den aktiven Bereichen des Stacks die beabsichtigten elektromechanischen Dehnungen auftreten. Durch die Temperaturbehandlung in oder an einem inaktiven Bereich kommt es insbesondere im Übergangsbereich von inaktivem zu aktivem Bereich des Stacks zur Entstehung erheblicher mechanischer Zug-/Druckspannungen, wobei vor allem die Zugspannungen durch die Bildung von Mikrorissen abgebaut werden können. Dies gilt auch für eine Oberfläche des Stacks. Ist der Temperaturschock nicht stark genug, so kommt es nicht zur Bildung von Rissen, sondern die Spannungen bleiben im Material erhalten. Die Folgen für die danach erfolgende Polarisation des Stacks sind aber nahezu dieselben.

**[0018]** Durch das Vorliegen der Gefügeschädigungen aufgrund der Temperaturbehandlung wird eine vermehrte Entstehung von Polungsrissen durch das Vorliegen einer erhöhten Population von Anfangsdefekten (mechanische Spannungen und/oder Risse) erleichtert, was das Niveau des mechanischen Span-

nungsprofils im inaktiven Kontaktierungsbereich sowie in einem Übergangsbereich von inaktiver zu aktiver Stackschicht nach der Polarisierung herabsetzt und somit auch eine Triebkraft zur Entstehung abgelenkter Risse in Längsrichtung des Stacks verringert. Bevorzugt entstehen die Polungsrisse außen am Stack und insbesondere an bis an die Stackoberfläche reichende Innenelektroden, wobei die Polungsrisse dann nach innen auf die Gefügeschädigung zulaufen und sich mit dieser vereinigen, wobei das Risswachstum gestoppt wird. Gleichzeitig wird die Entstehung a priori längerer Polungsrisse gefördert, welche sofort bis an die Innenelektroden des aktiven Bereichs des Stacks laufen und daher schneller zum Stillstand kommen.

**[0019]** Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, den Piezostack einer entsprechenden Temperaturbehandlung zu unterziehen. So ist es möglich, den Stack punktuell, abschnittsweise und/oder bereichsweise zu erhitzen und/oder abzukühlen. Dies geschieht vorzugsweise von außerhalb des Stacks, wobei jedoch durch eine entsprechend vorgesehene Ausnehmung oder Bohrung die Temperaturbehandlung auch an einer Oberfläche innerhalb des Multilayer-Piezostack durchführbar ist. Ferner ist es möglich den Stack über seine Innenelektroden aufzuheizen, wobei der Stack unter einer dynamischen Ansteuerung, insbesondere einer Großsignalansteuerung, betrieben wird und sich dadurch aufheizt; hierbei kann der Stack zusätzlich wärmeisoliert sein. Anschließend wird der Stack forciert, z. B. mittels Kaltluft oder in einem Flüssigkeitsbad, abgekühlt.

**[0020]** In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird eine Außenmetallisierungsbahn direkt nach ihrem Einbrand auf den Stack forciert abgekühlt, wobei in den Bereichen an den nahe an der Außenmetallisierungsbahn liegenden inaktiven Kontaktierungszonen eine erfindungsgemäße Temperaturbehandlung vorgesehen wird. Insbesondere von Vorteil ist hierbei, dass an sämtlichen inaktiven Kontaktierungszonen eine entsprechende Temperaturbehandlung vorsehbar ist. Ferner kann die Temperaturbehandlung wenigstens teilweise auch an aktiven Bereichen stattfinden, was jedoch unproblematisch ist, da Querrisse in diesen Bereichen die Funktionstüchtigkeit des Stacks einerseits nicht beeinträchtigen (s. o.) bzw. die Querrisse wegen der erfindungsgemäßen Entlastung an anderen Bereichen des Multilayer-Piezostacks nicht zum Verzweigen neigen.

**[0021]** Ferner kann die Temperaturbehandlung aufgrund einer selektiven Aufheizung mittels elektrisch beheizter Thermoden oder mittels Lasern oder durch Anblasen mit Kalt- und/oder Warmluft geschehen. Darüber hinaus ist die Verwendung geeigneter Temperaturprofile für eine Lötung von weiterführenden Kontaktdrähten als Temperaturbehandlung anwendbar. Ein typischer Wert für einen durch die Lötung

aufgebrachten Temperaturgradienten ist erfindungsgemäß 50 bis über 200K/s. Im Stand der Technik liegt ein solcher Wert bei unter 50K/s, da hier – im Gegensatz zur Erfindung – Spannungen und Risse vermieden werden sollen.

**[0022]** Erfindungsgemäß ist eine definierte Anzahl, Lage und Größe von Polungsrissen möglich, wodurch ein kontrolliertes Wachstum der im Verlauf der Herstellung und Anwendung entstehenden Polungsrisse möglich ist. Alle vorgenannten Ausführungsformen bieten einen wirksamen Schutz eines piezoelektrischen oder elektrostriktiven Bauteils, insbesondere eines monolithischen Multilayer-Piezostacks vor der Bildung von Längsrissen. Die einzelnen Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Verfahren sind einfach und ohne erheblichen Mehraufwand realisierbar, was Zeit und Kosten spart. Ferner ist das Verfahren nicht grundsätzlich materialspezifisch, sodass das Verfahren auf eine Vielzahl von piezoelektrischen oder elektrostriktiven Bauteilen anwendbar ist.

**[0023]** Ferner wird die Erfindung mittels eines piezoelektrischen oder elektrostriktiven Bauteils, insbesondere eines monolithischen Multilayer-Piezostacks gelöst, das im Stackmaterial eine erhöhte Anzahl mechanischer Spannungen und/oder eine erhöhte Anzahl von Rissen aufweist, als sonst bei typischen Herstellungsschritten des Bauteils bis zu dessen Polarisierung zu beobachten sind. D. h. das Bauteil weist vor der Polarisierung im Vergleich mit einem Bauteil gemäß dem Stand der Technik (ebenfalls vor dessen Polarisierung) eine bei weitem höhere Anzahl (Faktor 10 bis über 100) von Anfangsdefekten in Form von inneren Spannungen und/oder inneren Mikrorissen auf.

**[0024]** Weitere Ausführungsformen der Erfindung ergeben sich aus den übrigen abhängigen Ansprüchen.

**[0025]** Die Erfindung wird im Folgenden anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher erläutert.

**[0026]** In der Zeichnung zeigen:

**[0027]** [Fig. 1](#) einen monolithischen Multilayer-Piezostack in einer 3D-Ansicht;

**[0028]** [Fig. 2](#) eine Teilseitenschnittansicht im Bereich einer Außenmetallisierungsbahn des Multilayer-Piezostacks aus [Fig. 1](#);

**[0029]** [Fig. 3a](#) den Multilayer-Piezostack aus [Fig. 2](#) bei/nach einer erfindungsgemäßen Temperaturschock-Behandlung; und

**[0030]** [Fig. 3b](#) den erfindungsgemäßen Multilayer-Piezostack aus [Fig. 3a](#) nach einer Polarisierung.

**[0031]** Die Erfindung bezieht sich im Folgenden auf einen Multilayer-Piezostack bzw. einen monolithischen Vielschicht-Aktuator, wobei die Erfindung nicht darauf beschränkt sein soll, sondern generell piezokeramische oder elektrostriktive Schichten, Stacks (auch mit nur einer einzigen Piezoschicht) oder Bauteile betrifft, bei welchen das Auftreten von Rissen, insbesondere das Auftreten von Polungsrissen beobachtet wird.

**[0032]** [Fig. 1](#) zeigt einen Multilayer-Piezostack **1** mit einer Mehrzahl von Piezokeramiksichten **10**, wobei der Einfachheit halber nur eine geringe Anzahl von Piezokeramiksichten **10** dargestellt sind. In einer herkömmlichen Ausführungsform als Aktuator für einen Dieselinjektor weist ein solcher Multilayer-Piezostack **1** bis über 300 solcher Piezokeramiksichten **10** auf. Zwischen jeweils zwei direkt benachbarten Piezokeramiksichten **10** befindet sich jeweils eine Innenelektrode **20**, wobei jede zweite Innenelektrode **20** mit einer Außenmetallisierungsbahn **40** in elektrischem Kontakt **42** ist (z. B. vorne rechts in der [Fig. 1](#)). Ebenso sind die anderen zweiten Innenelektroden **20** mittels einer zweiten Außenmetallisierungsbahn **40** ebenfalls elektrisch verbunden (im gewählten Beispiel hinten links in der [Fig. 1](#)). Damit eine Innenelektrode **20** nicht mit der falschen Außenmetallisierungsbahn **40** zufällig in elektrischen Kontakt gerät, sind die Innenelektroden **20** jeweils an der nicht betreffenden Außenmetallisierungsbahn **40** ausgenommen, wodurch sich im Multilayer-Piezostack **1** zwei inaktive Kontaktierungszone **30** ausbilden. Die inaktiven Kontaktierungszone **30** haben keinen Anteil an der piezoelektrischen Dehnung des Multilayer-Piezostacks **1**, da in ihnen ein vernachlässigbar geringes oder kein elektrisches Feld herrscht, mittels welchem die entsprechende Piezokeramiksicht **10** im Betrieb einer Dehnung unterworfen ist bzw. bei einer Polarisierung polarisiert wird. Die Kernbereiche der inaktiven Kontaktierungszone **30** sind in [Fig. 1](#) grau hinterlegt dargestellt.

**[0033]** Andere Ausführungsformen bzw. Positionen der inaktiven Kontaktierungszone sind natürlich möglich. So gibt es Multilayer-Piezostacks mit innenliegenden Kontaktierungs-Metallisierungsbahnen, wobei die nicht betreffenden Innenelektroden ebenfalls ausgenommen sind. Ferner gibt es Ausführungsformen, bei welchen zwei direkt benachbarte Innenelektroden jeweils an zwei gegenüberliegende Außenflächen des Multilayer-Piezostacks herausgeführt sind. Eine entsprechende Außenmetallisierungsbahn kann hierbei z. B. eine vollständige Längsseite des Multilayer-Piezostacks bedecken.

**[0034]** Die Außenmetallisierungsbahnen **40** dienen der elektrischen Parallelschaltung der jeweiligen Innenelektroden **20**, wodurch ein Dehnen des polarisierten Multilayer-Piezostacks **1** hervorgerufen wird. Die Piezokeramiksichten **10** haben bevorzugt eine

Dicke von ca. 20 bis über 100µm, wobei die im Siebdruckverfahren aufgebrachtten Innenelektroden **20** eine Dicke von ca. 1 bis ca. 5µm aufweisen.

[0035] Im Bereich der inaktiven Kontaktierungszonen **30** entstehen bei der Polarisierung oder beim Betrieb des Multilayer-Piezostacks **1** in an sich bekannter Weise Spannungskonzentrationen, insbesondere Zugspannungen, die die Ursache für ein Risswachstum ist. Solche Risse, z. B. Polungsrisse, sind, solange sie senkrecht bezüglich einer Längsachse L des Multilayer-Piezostacks **1** verlaufen, unschädlich für den Betrieb des Multilayer-Piezostacks **1**. Verzweigen sich solche Risse jedoch oder ändert sich die Richtung des Rissfortschritts, kann dies zu einem teilweisen bzw. vollständigem Ausfall des Multilayer-Piezostacks **1** führen. Werden z. B. durch einen Riss in Längsrichtung L des Multilayer-Piezostacks **1** zwei direkt benachbarte Innenelektroden **20** elektrisch verbunden, so kommt es zu einem Kurzschluss des gesamten Bauteils.

[0036] [Fig. 2](#) zeigt solche von außen nach innen in den Multilayer-Piezostack **1** hineinlaufenden Risse **50**, **55**, wobei die Risse **50** Polungsrisse sind, die aufgrund der Polarisierung im Multilayer-Piezostack **1** entstanden sind, und die Risse **55** andere Risse sind, die z. B. aufgrund des Betriebs des Multilayer-Piezostacks **1** entstehen. Aufgrund eines nahezu gleichen Reißwiderstands parallel und senkrecht zu den Innenelektroden **20** innerhalb des Keramikmaterials des Multilayer-Piezostacks **1**, können sich die an sich unschädlichen Risse **50**, **55** (senkrechte Komponente zur Längsrichtung L des Multilayer-Piezostacks **1**) aufspalten (Y-Riss) oder abknicken und senkrecht zu den Innenelektroden **20** weiter wachsen. Dies ist in [Fig. 2](#) mit Verzweigungen **52** der Polungsrisse **50** dargestellt. Der Polungsriss **50** erweitert sich hierbei in Form eines Y und erhält eine wesentliche senkrechte Komponente bezüglich der Innenelektroden **20**.

[0037] Die [Fig. 3a](#) und [Fig. 3b](#) zeigen nun, wie einer solchen Aufspaltung von Polungsrissen **50** bzw. Rissen **55** begegnet werden kann.

[0038] Hierzu wird der Multilayer-Piezostack **1** einer Temperaturbehandlung unterzogen, die bevorzugt an bzw. in den inaktiven Kontaktierungszonen **30** stattfindet. Dies ist in [Fig. 3a](#) mit den Doppelpfeilen **80** verdeutlicht, die eine Dickenänderung des Stackmaterials **10** aufgrund eines Temperaturgradienten  $G = dT/dt$  innerhalb des Stacks **1** verdeutlichen sollen. Aufgrund der Temperaturschocks entstehen im Stackmaterial **10** wenigstens innere Spannungen **70** oder Risse **60** bzw. Mikrorisse **60**. Dies entspricht einer gezielten Vorschädigung des Stackmaterials **10** innerhalb des Stacks **1**.

[0039] Im vorliegenden Beispiel wird die Tempera-

turbehandlung dergestalt von außen an/in das Stackmaterial **10** eingebracht, indem nach dem Einbrennen der Außenmetallisierungsbahn **40** diese schnell abgekühlt wird, wodurch sich die inneren mechanischen Spannungen **70** bzw. die Mikrorisse **60** ausbilden. Insbesondere im Übergangsbereich zwischen den aktiven und den inaktiven Schichten des Multilayer-Piezostacks **1** kommt es zur Entstehung von Zug-/Druckspannungen, wobei vor allem die Zugspannungen durch die Bildung von Mikrorissen **60** abgebaut werden.

[0040] [Fig. 3b](#) zeigt, was das Einbringen dieser Vorschädigungen für erfindungsgemäße Konsequenzen für die danach erfolgende Polarisierung des Multilayer-Piezostacks **1** bzw. für dessen späteren Betrieb hat.

[0041] Durch eine Vielzahl von im Multilayer-Piezostack **1** vorliegenden Anfangsdefekten **60**, **70** entstehen bei der nachfolgenden Polarisierung des Multilayer-Piezostacks **1** mehr Polungsrisse **50** als im Vergleich zum Stand der Technik, was wiederum die Höhe des mechanischen Spannungsprofils, insbesondere im Übergangsbereich zwischen einem inaktiven und einem aktiven Kontaktierungsbereich, nach der Polarisierung herabsetzt. Somit entstehen auch weniger in Längsrichtung L des Multilayer-Piezostacks **1** abgelenkte Risse bzw. weniger entsprechende Y-Zweige **52** der Polungsrisse **50**. Dies ist beispielhaft in [Fig. 3b](#) oben dargestellt, wo ein Polungsriss **50** auf einen bereits vorhandenen Mikroriss **60** trifft, sich totläuft und sich daher nicht mehr weiter verzweigt. Ferner wird die Entstehung längerer Polungsrisse **50** gefördert, was im darunter liegenden Teil der [Fig. 3b](#) zu sehen ist, wobei der Polungsriss **50** durch die vorhandenen mechanischen Spannungen **70** schnell bis an den aktiven Bereich des Piezostacks **1** läuft und daher schneller zum Stillstand kommt. Ferner können sich entstehende Polungsrisse **50** schneller an einer Innenelektrode **20** totlaufen.

[0042] Die Spannungen **70** und die Mikrorisse **60** wirken hierbei als Attraktor und „ziehen“ den Riss **50**, **55** quasi an sich. In realitas ist das innere Gefüge des Stacks **1** in diesen Bereichen geschwächt, wodurch das Gefüge bevorzugt an diesen Stellen aufreißen kann und so die Polungsrisse **50** bzw. die Risse **55** in diesen Bereich aufgrund des entstandenen geringeren Reißwiderstands ablenkt. Somit ist ein kontrolliertes Polungsrisswachstum bzw. Risswachstum möglich. Hierdurch können Polungsrisse **50** bzw. Risse **55** gezielt an denjenigen Stellen im Stack **1** vorgesehen werden, an welchen sie den Stack **1** nicht schädigen; d. h. der monolithische Multilayer-Stack **1** kann sich selbst an unschädlichen Stellen entlasten.

[0043] Eine weitere bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens arbeitet mittels einem Lötverfahren, wobei durch die Verwendung ei-

nes geeigneten Temperaturprofils für das Lötverfahren, beim Verlöten von weiterführenden Kontaktdrähten an die Außenmetallisierungsbahnen **40**, entsprechende Lötchockrisse **60** bzw. innere mechanische Spannungen **70** aufgrund des Löttemperaturschocks entstehen. Ein hierdurch bevorzugt eingebrachter Temperaturgradient ist 100K/s.

**[0044]** Es sind eine Vielzahl möglicher Wärme- und Kältebehandlungen am bzw. im Multilayer-Piezostack **1** denkbar. So kann der Multilayer-Piezostack **1** nur teilweise außen oder auch an einer gesamten Außenseitenfläche entsprechend wärme- oder kältebehandelt werden. Ferner ist es möglich, gleichzeitig zwei nebeneinander liegende Punkte oder Bereiche dergestalt der Temperaturbehandlung zu unterziehen, dass der eine Punkt oder Bereich erhitzt und der andere Punkt oder Bereich abgekühlt wird. Darüber hinaus ist es erfindungsgemäß möglich, parallel zu einer Stirnseite des Multilayer-Piezostacks in Abständen von 0,5 bis 10mm, bevorzugt in Abständen von 1 bis 8mm und insbesondere bevorzugt in Abständen von 2 bis 6mm, Thermoschocks entlang einer Längsseite des Multilayer-Piezostacks **1** vorzusehen, wobei die Thermoschockzentren bevorzugt an inaktiven Kontaktierungszonen **30** stattfinden. Ferner ist es möglich, die Temperaturbehandlung wenigstens teilweise auch an den aktiven Bereichen stattfinden zu lassen.

**[0045]** Ferner ist es auch möglich, dass die Temperaturbehandlung dergestalt in den Multilayer-Piezostack **1** eingebracht wird, indem ein forciertes Abkühlen auf oder sogar unter Raumtemperatur stattfindet. Bei einer Wärmebehandlung und einem anschließenden nicht forcierten Abkühlen können eventuell unerwünschte Spannungsrelaxationen stattfinden, die das gezielt eingebrachte Spannungsprofil wieder so weit herabsetzen, dass der erfindungsgemäße Effekt teilweise wieder zunichte gemacht wird. Ob eine solche unerwünschte Spannungsrelaxation bei einer Wärmebehandlung stattfindet oder nicht ist experimentell gut überprüfbar.

**[0046]** Darüber hinaus ist es erfindungsgemäß möglich, zeitlich nach einer ersten erfindungsgemäßen Temperaturbehandlung eine zweite bzw. weitere – auch entgegengesetzte (also zuerst erwärmen und kurz danach forciert abkühlen bzw. umgekehrt) – erfindungsgemäße Temperaturbehandlungen am Multilayer-Piezostack **1** stattfinden zu lassen. Diese können an denselben Stellen am Multilayer-Piezostack **1** vorgesehen sein, oder sich z. B. auch nur geringfügig davon unterscheiden.

**[0047]** Unter dem Thermoschock bzw. der Temperaturbehandlung ist eine bereichs- bzw. abschnittsweise beabsichtigte, kurzfristige, thermomechanische Belastung des Stacks **1**, insbesondere nach dessen Sintern und, bevorzugt, vor dessen Polarisie-

rung, zu verstehen, welcher der Stack **1** bzw. ein Stackgrünling im Stand der Technik bisher nicht ausgesetzt war. Maßgeblich für das Entstehen, von inneren Spannungen **70** und/oder Rissen **60** ist der bei der Temperaturbehandlung innerhalb des Stacks **1** vorliegende Temperaturgradient  $G$ . Vorzugsweise liegen am Stack **1** Aufheiz- oder Abkühlraten von über 50 bis über 150K/s vor. Im Stand der Technik liegen die an Stacks **1** auftretenden Temperaturgradienten  $G$ , bei sämtlichen Produktions- und Betriebsstadien des Stacks **1**, inklusive des Sinterns, bei teilweise weit unter 50K/s. Ferner liegen Aufheiz- und/oder Abkühlraten (Temperaturgradienten  $G$ ) für Teile des Stacks **1** bei 65–300K/s, bevorzugt bei 75–235K/s, insbesondere bei 85–210K/s, vorzugsweise bei 95–165K/s, insbesondere bevorzugt bei 110–140K/s und besonders bevorzugt bei 115–125K/s.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Vermeiden einer Rissbildung und/oder zum Verhindern einer Rissweiterbildung in Längsrichtung (L) innerhalb eines piezoelektrischen oder elektrostriktiven Bauteils (**1**), wobei das Bauteil (**1**) wenigstens an einem Oberflächenbereich einer Temperaturbehandlung unterzogen wird, die am Oberflächenbereich eine Temperaturveränderung von wenigstens 50K/s bewirkt, wobei eine Änderungsgeschwindigkeit der Temperatur ( $G$ ) im Bauteil (**1**) derart gewählt wird, dass in einem Volumenbereich, in welchem die Temperaturbehandlung wirksam ist, innerhalb des Bauteils (**1**) eine gezielte Gefügeschädigung durch Spannungen (**70**) und/oder Risse (**60**), insbesondere Mikrorisse (**60**), entsteht.

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, wobei die Änderungsgeschwindigkeit der Temperatur ( $G$ ) wenigstens 60K/s beträgt.

3. Verfahren gemäß Anspruch 1 oder 2, wobei die Änderungsgeschwindigkeit der Temperatur ( $G$ ) 70–80K/s, bevorzugt 90–105K/s, insbesondere 120–130K/s, vorzugsweise 150–175K/s, insbesondere bevorzugt 190–225K/s und besonders bevorzugt 250–275K/s beträgt.

4. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei eine absichtliche Gefügeschädigung des Bauteils (**1**) durch die mechanischen Spannungen (**70**) und/oder Risse (**60**) zeitlich vor der Polarisierung des Bauteils (**1**) erfolgt.

5. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei die Temperaturbehandlung in einem Volumenbereich im Bauteil (**1**) durchgeführt wird, in welchem bei einem späteren Verfahrensschritt oder einem späteren Einsatz des Bauteils (**1**) erfahrungsgemäß Risse (**50**, **55**) entstehen.

6. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Temperaturbehandlung in einem Volumenbereich im Bauteil (1) durchgeführt wird, in welchem bei der nachfolgenden Polarisierung des Bauteils (1) Polungsrisse (50) entstehen können.

7. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei die Temperaturbehandlung in einem Volumenbereich einer inaktiven Kontaktierungszone (30) durchgeführt wird, die bevorzugt von drei zueinander direkt benachbarten Innenelektroden (20) des Bauteils (1) bestimmt wird.

8. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei die Temperaturbehandlung in einem Volumenbereich des Bauteils (1) durchgeführt wird, in welchem eine Innenelektrode (20) ausgenommen ist.

9. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei die Temperaturbehandlung dergestalt erfolgt, dass das Bauteil (1) punktuell, bereichs- und/oder abschnittsweise erhitzt wird.

10. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei die Temperaturbehandlung dergestalt erfolgt, dass das Bauteil (1) punktuell, bereichs- und/oder abschnittsweise gekühlt wird.

11. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei die Temperaturbehandlung an einer Außenoberfläche des Bauteils (1) durchgeführt wird, so dass sie in das Innere des Bauteils (1) hineinwirkt.

12. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 11, wobei die Temperaturbehandlung zeitlich nach einem Einbrennen einer Außenmetallisierungsbahn (40), bevorzugt zeitlich direkt nach dem Einbrennen der Außenmetallisierungsbahn (40), erfolgt, wobei im Wesentlichen die gesamte Außenmetallisierungsbahn (40) forciert abgekühlt wird.

13. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 12, wobei die Temperaturbehandlung durch eine selektive Aufheizung erfolgt, die, bevorzugt, mittels elektrisch beheizter Thermoden oder eines Lasers erfolgt.

14. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 13, wobei die Temperaturbehandlung durch ein Anblasen mit Kalt- und/oder Warmluft geschieht.

15. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 14, wobei die Temperaturbehandlung durch ein Schweißen oder Löten von weiterkontaktierenden Kontaktdrähten, bevorzugt an die Außenmetallisierung (40) erfolgt, wobei eine Temperatur des Lötmittels derart gewählt wird, dass die mechanischen Spannungen (70) oder die Risse (60) entstehen.

16. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis

15, wobei das Bauteil (1) in seiner Längsrichtung (L) mit der Temperaturbehandlung behandelt wird, wobei bei der Temperaturbehandlung Temperaturmaxima in einem gegenseitigen Abstand von 0,5 bis 4mm, insbesondere 1 bis 3mm und bevorzugt in einem gegenseitigen Abstand von 2mm erfolgen.

17. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 16, wobei die Temperaturbehandlung in einem Volumenbereich einer Kontaktierungszone durchgeführt wird.

18. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 17, wobei die Temperaturbehandlung zeitlich nachgeschaltet an ein Sinterverfahren des Bauteils (1) durchgeführt wird.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen



Anhängende Zeichnungen

FIG 1

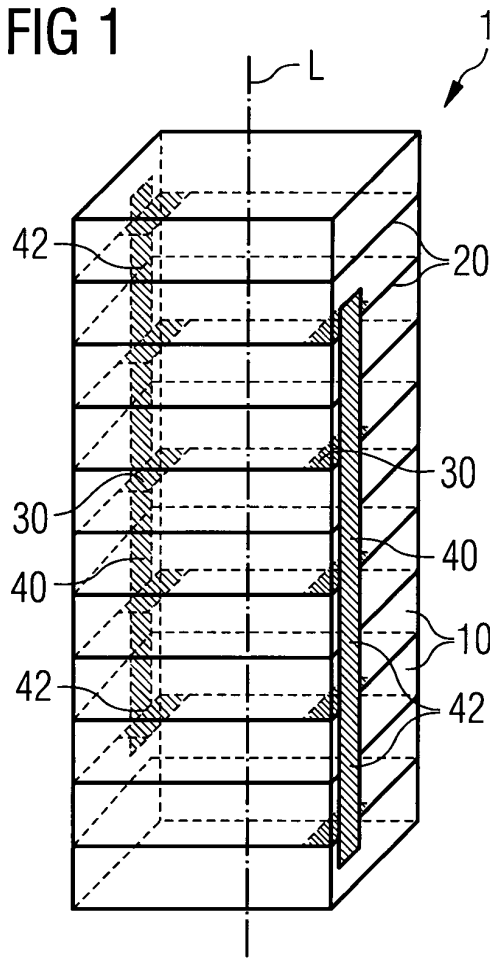


FIG 2

