

2.4 Piezokeramik – Funktion, Bauarten und Anwendungen

- Andreas J. Schmid,
Argillon GmbH
Piezoproducts
Redwitz

Die Folien finden Sie ab Seite 202.

2.4.1. Einleitung

Der piezoelektrische Effekt verknüpft elektrische und mechanische Größen miteinander. Piezoelektrizität beinhaltet die Umwandlung mechanischer Verformung in elektrische Signale und umgekehrt. Das Sensor- und Aktorverhalten der Piezokeramik ermöglicht eine Vielzahl von unterschiedlichsten Anwendungen für piezokeramische Baugruppen und Systeme.

Die Anwendungsfelder finden sich in allen Bereichen der Elektrotechnik, des Maschinenbaus, der Akustik, der Automatisierungstechnik, der Nachrichtentechnik, der Informationstechnologie, des Automobilbaus, des Konsumerbereichs und in unzähligen weiteren Einsatzgebieten. Zur Anwendung kommen piezokeramische Formteile, piezokeramische Aktoren und Sensoren sowie komplexe Baugruppen und Systeme. Die heutigen technischen Lösungen wurden durch die Entwicklung von hoch effizienten für den technischen Einsatz optimierten kostengünstigen piezokeramischen Werkstoffen und Komponenten möglich.

2.4.2. Grundlagen zur Piezoelektrizität

Das erste grundlegende physikalische Verständnis der Piezoelektrizität wurde von den Brüdern Pierre und Jacques Curie im Jahre 1880 entwickelt. Sie stellten fest, dass bei Turmalinkristallen ein gerichteter mechanischer Druck auf den Außenflächen des Kristalls an den gegenüberliegenden Flächen eine dazu proportionale ungleichnamige

Oberflächenladung erzeugt. Der inverse oder reziproke piezoelektrische Effekt wurde von M. G. Lippmann im folgenden Jahr aufgrund von thermodynamischen Überlegungen vorausgesagt und von den Brüdern Curie auch anschließend experimentell bestätigt.

2.4.2.1. Direkter und reziproker piezoelektrischer Effekt

Unter der Piezoelektrizität ferroelektrischer Materialien wird eine lineare elektromechanische Wechselwirkung zwischen den mechanischen und den elektrischen Zuständen eines Kristalls verstanden.

Der direkte piezoelektrische Effekt tritt dann auf, wenn eine mechanische Deformation eines piezoelektrischen Materials von einer hierzu proportionalen Änderung der elektrischen Polarisation begleitet wird. Der reziproke oder inverse piezoelektrische Effekt zeichnet sich durch eine innere mechanische Spannung des piezoelektrischen Materials aus, welche proportional zu einem äußeren, die mechanische Spannung verursachenden elektrischen Feld ist.

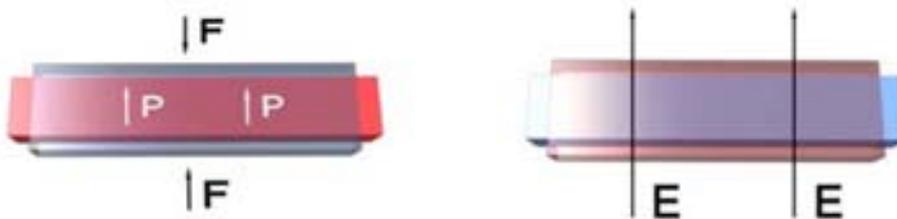


Bild 1: Direkter piezoelektrischer Effekt (links) und indirekter oder reziproker piezoelektrischer Effekt (rechts)

2.4.2.2. Perowskit Kristallstruktur

Die heutzutage gängigsten piezoelektrischen Materialien werden auf der Basis des ferroelektrischen Kristalls Bleizirkonattitant $Pb(Zr_x Ti_{(1-x)}) O_3$ hergestellt. Für die Herstellung einer Keramik wird das piezoelektrische Material in polykristalliner Form verarbeitet. Die beiden gebräuchlichsten Herstellungsverfahren für Piezokeramiken sind das Pressverfahren und das Foliengießverfahren. Bei der Press-technik wird ein Block des Piezomaterials in einer Form gepresst und anschließend gebrannt und weiterverarbeitet. Bei der Foliengieß-technik wird das Piezomaterial auf eine Folie gegossen, gestanzt und anschließend gebrannt. Typische Brenntemperaturen liegen zwischen

1.200° und 1.300°C. Bleizirkonattitant und andere piezoelektrische Materialien besitzen eine perowskitische Kristallstruktur.

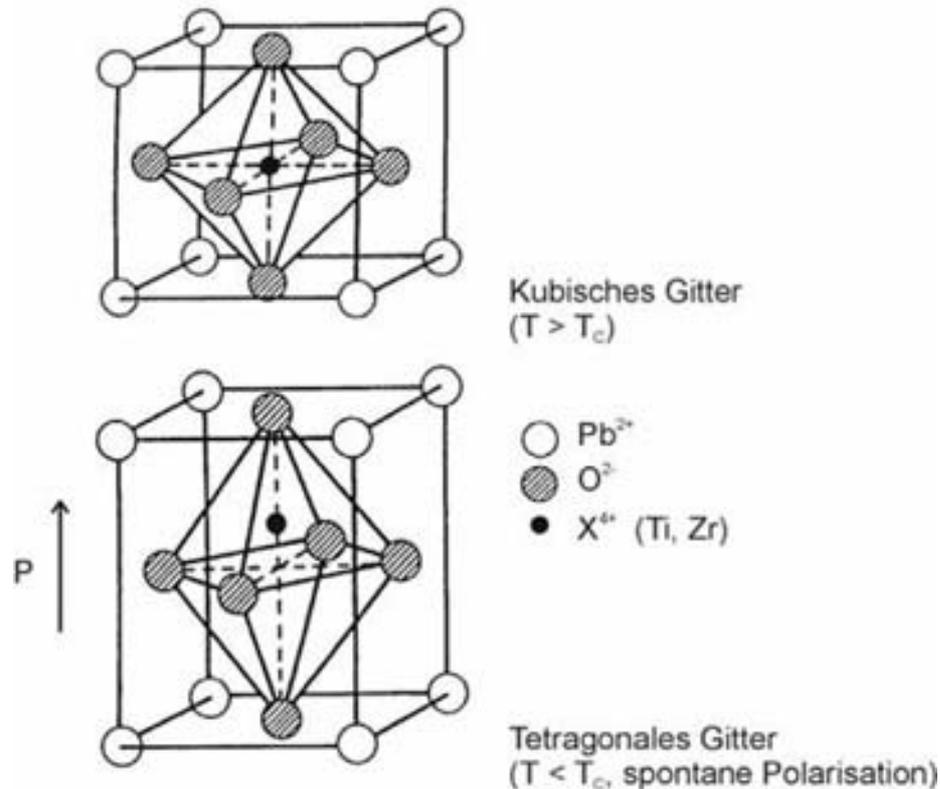


Bild 2: Perowskit Kristallstruktur von Bleizirkonattitanat. Oberhalb und unterhalb der Curietemperatur.

Oberhalb der Curie-Temperatur besitzen die Elementarzellen des perowskitischen Kristalls eine kubische Form. Der Kristall besitzt ein Symmetriezentrum. Es ist kein piezoelektrischer Effekt feststellbar. Die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladungen liegen im Zentrum der Elementarzelle des Kristalls. Unterhalb der Curie-Temperatur tritt spontane Polarisation auf. Die Einheitszelle des Kristalls besitzt eine tetragonale oder rhomboedische Form. Diese spontane Polarisation setzt sich zum größten Teil aus einer Verschiebung der Elektronenwolken gegenüber den Atomrümpfen und zu einem kleineren Teil aus der Verschiebung der positiv geladenen Ionen gegenüber den negativ geladenen Ionen zusammen. Diese beiden Polarisationen besitzen dementsprechend die Bezeichnung Elektronen- und Ionenpolarisation.

Die Ursache für die Polarisation unterhalb der Curie-Temperatur ist die energetisch günstigere Verschiebung der Ionen zueinander. Hierbei geht das Symmetriezentrum des kubischen Kristallgitters verloren.

Die Kristallsymmetrie wird durch den Übergang in die ferroelektrische Phase stets erniedrigt. In jeder Elementarzelle des Kristallits entsteht ein elektrischer Dipol.

Die Dipole beeinflussen sich gegenseitig und bilden spontan Bereiche mit einheitlicher Ausrichtung (Abbildung 3). Diese Bereiche werden in Analogie zum Magnetismus als Domänen bezeichnet. Benachbarte Domänen innerhalb eines Kristalls stehen sich in ihrer Polarisationsrichtung in einem Winkel von 90° oder 180° gegenüber. Man spricht deshalb auch von einer 90° - und 180° -Domänenstruktur. Jede Domäne hat sein eigenes Dipolmoment. Die Wertigkeit der spontanen Polarisation des einzelnen Bereichs ergibt sich bei Division durch das Volumen der Domäne. In einem makroskopischen Kristall oder einer polykristallinen Keramik sind die Orientierungen der resultierenden Dipolmomente nach der spontanen Polarisation und Ausbildung von Domänen bei Unterschreiten der Curie-Temperatur statistisch verteilt. Somit zeigt der makroskopische Körper keine Polarisation und damit auch keinen technisch nutzbaren piezoelektrischen Effekt.

Eine Erklärung für die Ursache der Domänenbildung sind die dadurch bedingte Verringerung der freien Energie und die Reduzierung des elektrischen Streufelds. Die Aufteilung in Domänen kann jedoch nicht unbegrenzt fortgesetzt werden, weil für die Bildung der Domänenwände eine bestimmte Energie erforderlich ist und die Summe der Streufeld- und Wanderenergien der Domänenwände minimal bleiben muss.

2.4.2.3. Hystereseverhalten von Piezokeramiken

Eine polykristalline ferroelektrische Piezokeramik erhält erst durch einen Polarisationsprozess ihre technisch relevanten piezoelektrischen Eigenschaften. Die Domänen der Ferroelektrika verursachen die nicht linearen Eigenschaften der piezoelektrischen Keramiken. Die nicht lineare Abhängigkeit der Polarisation von der elektrischen Feldenergie führt zum Hystereseverhalten der piezoelektrischen Materialien. Durch Anlegen eines elektrischen Feldes an die Keramik erfolgt eine Vergrößerung der Domänenbereiche in Abhängigkeit der Ausrichtung der Polarisation. Bereiche, deren Polarisation in Feldrichtung ausgerichtet ist, wachsen an. Bereiche, in denen die Polarisation nicht der Feldrichtung entspricht, werden von Bereichen mit Polarisationsrichtung in Feldrichtung verdrängt.

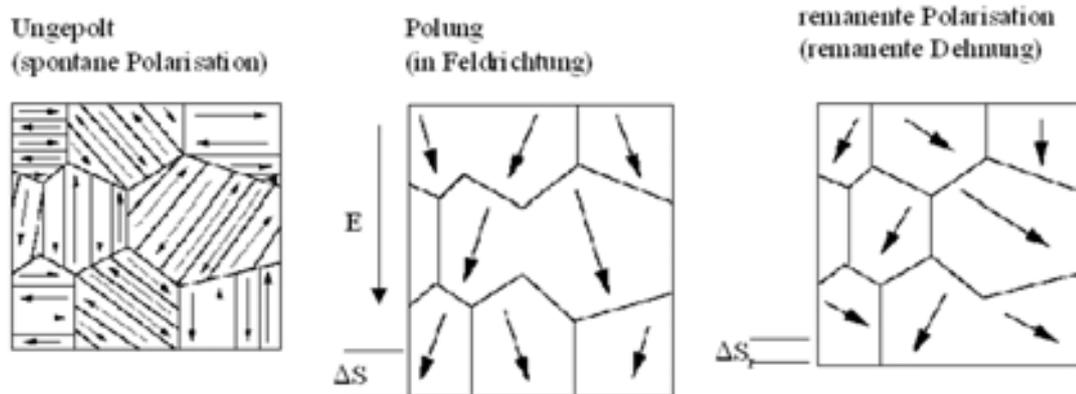


Bild 3: Schematischer Gefügebau einer Bleizirkonattitanatkeramik mit Domänen. Dargestellt sind der ungepolte Zustand nach der spontanen Polarisation, der Zustand während der Polung und die remanente Polarisation.

Das Anwachsen bzw. Verringern der Bereiche geschieht umso schneller, je näher oder weiter weg die Polarisation des Bereiches in Richtung des äußeren elektrischen Feldes ausgerichtet ist. Bei zunehmender Feldstärke besteht der Kristallit letztendlich ab einer gewissen Feldstärke nur noch aus einer einzigen Domäne. Diese Domäne zeichnet sich dadurch aus, dass ihre ursprüngliche Polarisation der äußeren Feldrichtung am nächsten gekommen ist. Bei weiter anwachsendem elektrischem Feld erfolgt letztendlich ein Ausrichten des resultierenden Dipols in Feldrichtung. Die Sättigungspolarisation P_S ist erreicht. Für eine noch nicht polarisierte Keramik entspricht der Verlauf des Polarisationsvorgangs dem Graphen der Neukurve in Bild 4.

Bei Abschalten des elektrischen Feldes bleibt das Dipolmoment der Domäne jedoch nicht vollständig in Feldrichtung stehen, da die Dipolmomente an bestimmte Vorzugsrichtungen in den einzelnen statistisch verteilten Kristalliten der Keramik gebunden sind. Die resultierende Polarisation der Keramik heißt remanente Polarisation P_R und die physikalische Eigenschaft Remanenz. Am Modell der Weisschen Bezirke und der Domänenwände lässt sich für das einzelne Kristallit veranschaulichen, warum eine remanente Polarisation erhalten bleibt. Für die statistisch verteilten Kristallite ist die Vorzugsrichtung ihres bei Sättigungspolarisation in Feldrichtung ausgerichteten Dipolmoments statistisch bedingt nicht immer identisch mit der Feldrichtung. Wird das äußere Feld abgeschaltet, so richtet sich das Dipolmoment der Domäne in seine Vorzugsrichtung aus.

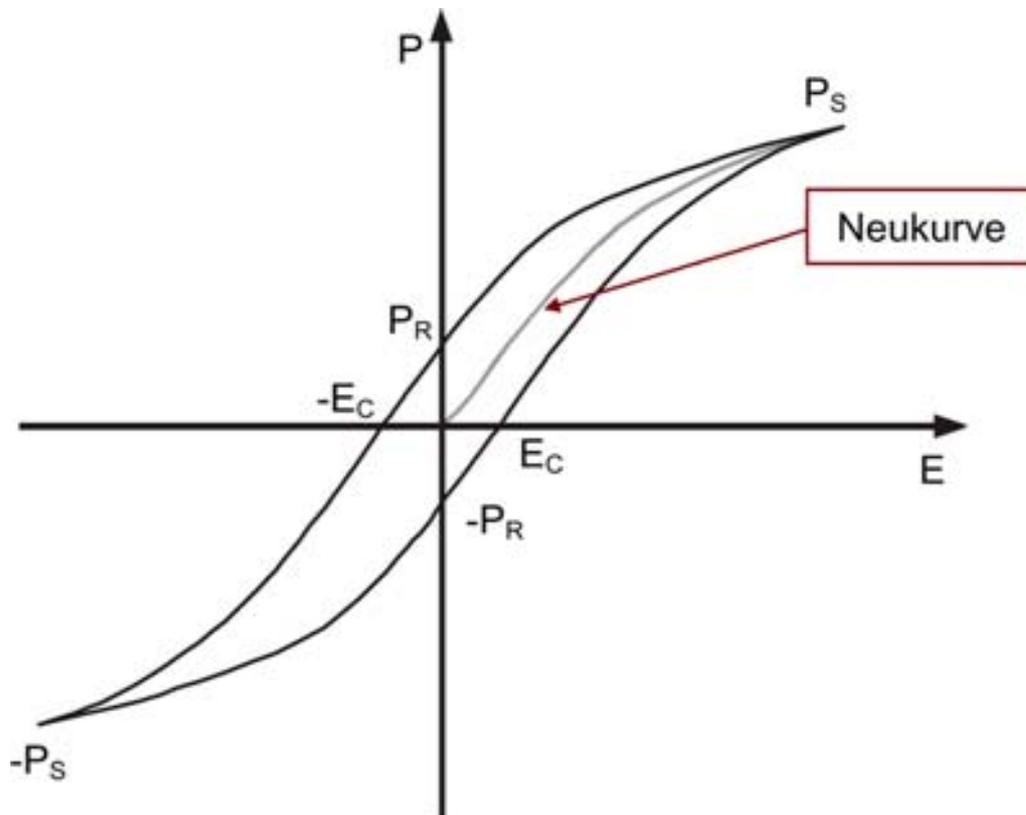


Bild 4: Hysteresekurve von piezoelektrischen Keramiken. Die gestrichelte Linie zeigt die Neukurve, welche den Verlauf für den Fall, dass das Material noch nicht polarisiert wurde, darstellt.

Des Weiteren ist für den Kristallit nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik eine Zunahme der Entropie zu erwarten. Dem Bestreben der Zunahme der Entropie folgt eine Zunahme von Domänen mit Polarisierungen, deren Richtung nicht der ursprünglichen äußeren Feldrichtung entspricht. Dieser Vorgang wird aber durch Störstellen im Kristallit verzögert. Für das Entstehen von neuen Domänen ist es nötig, dass sich die bestehenden Domänen verkleinern. Hierzu müssen die Domänenwände bewegt werden. Diese benötigen eine bestimmte Energie, um über die Störstellen hinwegzuwandern. Diese Energie muss dem Kristall oder der Umgebung entnommen werden. Aus statistischen Überlegungen lässt sich zeigen, dass die maximal mögliche remanente Polarisation höchstens dem 0,86-fachen der Sättigungspolarisation P_S entspricht. Um die remanente Polarisation wieder aufzuheben, ist die Zufuhr von Energie nötig. Die Zufuhr der Energie kann durch ein äußeres elektrisches Feld erfolgen, dessen Richtung der ursprünglichen Feldrichtung

entgegengesetzt ist. Die hierfür nötige Feldstärke wird Koerzitivfeldstärke E_C genannt.

Wird ein hinreichend großes alternierendes elektrisches Feld an die Piezokeramik angelegt, so wird das Material laufend umpolarisiert und es ergibt sich für die Polarisation als Funktion der Feldstärke eine für das jeweilige Material charakteristische Hystereseschleife (siehe Bild 4).

2.4.3. Piezoprodukte

Die heutigen Anwendungen in der Technik, Industrie und im Konsumerbereich erfordern eine Vielzahl von unterschiedlichsten piezokeramischen Formteilen, Bauelementen und Systemen. Die Anwendungen und Herstellungstiefen von piezokeramischen Produzenten kann man grob in drei Bereiche zergliedern. Anwendungen welche ausschließlich durch piezokeramischen Formteile realisiert werden können. Piezokeramische Bauelemente und piezokeramische Baugruppen. Standardmäßig werden heute piezokeramische Scheiben, Platten, Streifen, Ringe, Kalotten, Röhrchen und eine Vielzahl von Sondergeometrien gefertigt. Zum Teil werden die piezokeramischen Formteile direkt am Markt abgesetzt. Ein erheblicher Teil wird jedoch weiterverarbeitet zu piezokeramischen Bauelementen wie Aktoren und Sensoren. Die piezokeramischen Aktoren und Sensoren finden Verwendung in der Textilindustrie, der Robotik, Pneumatik, Medizintechnik, Automatisierungstechnik und in vielen weiteren Bereichen der Industrie und im Konsumermarkt. Ein Teil der piezokeramischen Sensoren und Aktoren wird weiter veredelt zu komplexen Systemen oder Baugruppen. Bei diesen Systemen ist die piezokeramische Komponente nur noch eine von vielen Bausteinen. Beispiele hierfür sind komplexe piezokeramische Module für die Textilindustrie, Ultraschallmesssysteme für die Medizintechnik und für die exakte Bestimmung von Tankinhalten in petrochemischen Raffinerien, Ultraschallzerstäuber für Luftbefeuchter oder Medizintechnik sowie Multilayeraktoren für Diesel- und Benzindirekteinspritzung im Automobil.

2.4.4. Aufbautechniken und Vorteile von Piezoaktoren

Werden zwei Piezokeramikplatten mit einem Trägermaterial verklebt und entgegengesetzt angesteuert, erhält man, ähnlich wie beim Bi-metall eine starke Verbiegung des Verbundes.

Der typische piezokeramische Biegewandler ist eine Kombination aus einer oder zwei piezokeramischen Komponenten in Single- oder Multilayertechnologie mit oder ohne Zwischenlage. Aktoren mit passiver Lage und piezokeramischer Komponente bezeichnet man als Monomorph oder Unimorph. Ein System aus zwei piezokeramischen Komponenten und einer passiven Zwischenlage bezeichnet man als Trimorph. Ein Bimorph besteht aus zwei piezokeramischen Keramiken. Ein Multimorph besitzt keine passive Zwischenlage.

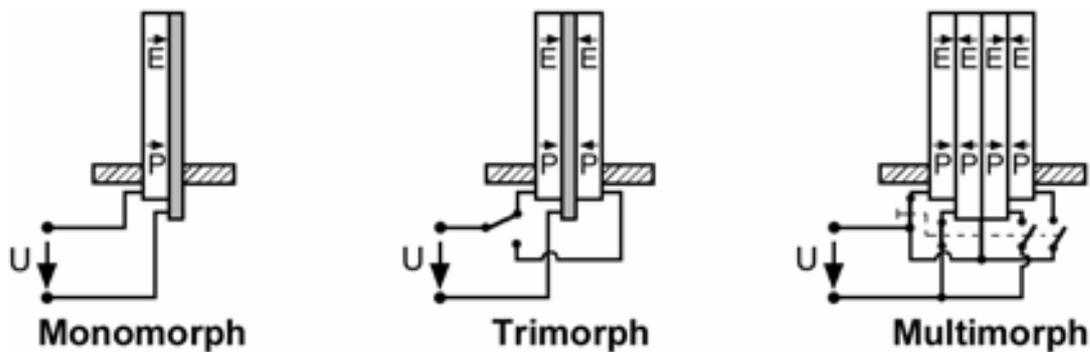


Bild 5: Aufbauvarianten von piezokeramischen Biegewandlern. Der typische Biegewandler besteht aus ein oder zwei piezokeramischen Platten mit oder ohne Zwischenlage.

Ist die Piezokeramik aus einer Schicht aufgebaut spricht man von einer Singlelayertechnologie. Ist die piezokeramische Komponente aus mehreren aktiven piezokeramischen Schichten aufgebaut spricht man von einer Multilayertechnologie. Der multimorphe Biegewandler ist ein piezokeramischer Multilayer ohne passive Zwischenschicht.

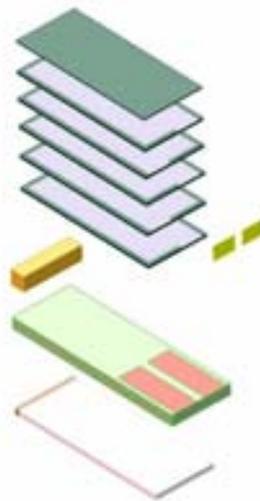


Bild 6: Aufbauvarianten von piezokeramischen Biegewandlern. Der typische Biegewandler besteht aus ein oder zwei piezokeramischen Platten mit oder ohne Zwischenlage.

Durch das jeweilige individuelle Design des Biegewandlers können Auslenkungen von einigen Millimeter, Kräfte bis zu einigen Newton und kurze Stellzeiten erzielt werden. Damit kann der Biegewandler als leistungsfähiges und schnelles Stellelement eingesetzt werden. Durch die hohe Stellgeschwindigkeit steigert sich die Produktivität gegenüber dem Elektromagneten um ein vielfaches. Aufgrund seiner kompakten Bauweise nimmt der piezokeramische Aktor deutlich weniger Platz ein. Auch ist sein Energieverbrauch im Vergleich zum Elektromagneten deutlich geringer.

Ein weiterer Vorteil ist die hohe Zuverlässigkeit - sie macht Ausfallzeiten zur großen Ausnahme. Heutige piezokeramische Hochleistungsbiegewandler haben eine Lebensdauer von mehr als 10^9 Schaltzyklen.

2.4.5. Auslenkung eines piezokeramischen Biegewandlers

Durch Anlegen einer Betriebsspannung an eine der beiden piezokeramischen Komponenten eines trimorphen Biegewandlers erfolgt eine Kontraktion der Piezokeramik. Die durch die Kontraktion hervorgerufene Längenänderung der Piezokeramik verursacht eine Verbiegung des Biegewandlers.

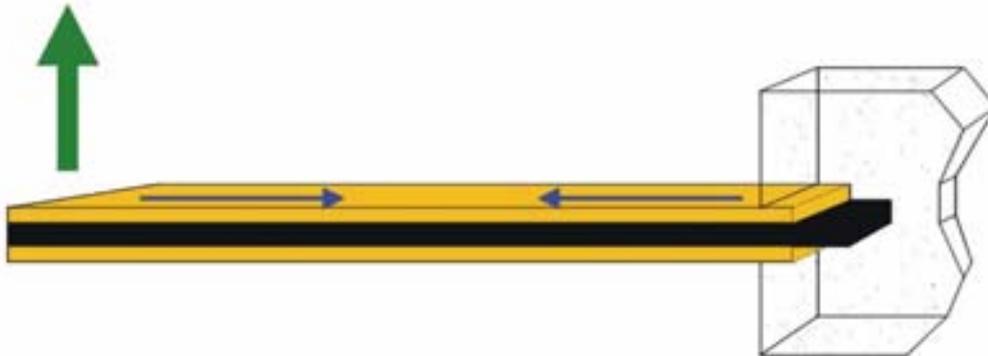


Bild 7: Auslenkung eines trimorphen Biegewandlers. Durch Anlegen der Betriebsspannung verursacht eine Kontraktion der Piezokeramik die Verbiegung des Biegewandlers.

Ein trimorpher Biegewandler kann bei wechselseitigem anlegen der Betriebsspannung an die jeweilige piezokeramische Komponente in beide Richtung ausgelenkt werden.

2.4.6. Anwendungsbeispiele für piezokeramische Aktoren

Der piezokeramische Aktor ist anwendungsspezifisch modifizierbar, und damit ein äußerst vielseitiges Stellelement. Er eignet sich durch seine kompakte Aufbauweise für eine Vielzahl von technischen Anwendungen. Piezokeramische Aktoren finden sich beispielsweise im Automobilbau als Diesel- oder Benzindirekteinspritzung, in der Elektrotechnik, im Maschinenbau als Fadensteuerung für Textilmaschinen, in der Informationstechnologie zur exakten Positionierung von Schreib- und Leseköpfen. Den jeweiligen technischen Anwendungsfeldern sind kaum Grenzen gesetzt.

2.4.6.1. Piezokeramische Aktoren in Textilmaschinen

Beispielsweise laufen durch den Einsatz von Steuermodulen mit piezokeramischen Biegewandlern Textilmaschinen schneller, ruhiger und zuverlässiger als mit herkömmlicher Steuerung durch Magnetsysteme. Mit piezokeramischer Technik sind Jacquard-, Wirk- Strick- und Rundstrickmaschinen rund um die Uhr einsatzbereit. Die Produktivität in den textilverarbeitenden Betrieben wird aufgrund der geringen Schaltzeit von Piezokeramiken erheblich gesteigert. Piezokeramische Aktuatoren, die in einem speziellen Gehäuse und kundenspezifisch

mit oder ohne Ansteuerelektronik geliefert werden, optimieren die Fadensteuerung in Textilmaschinen.

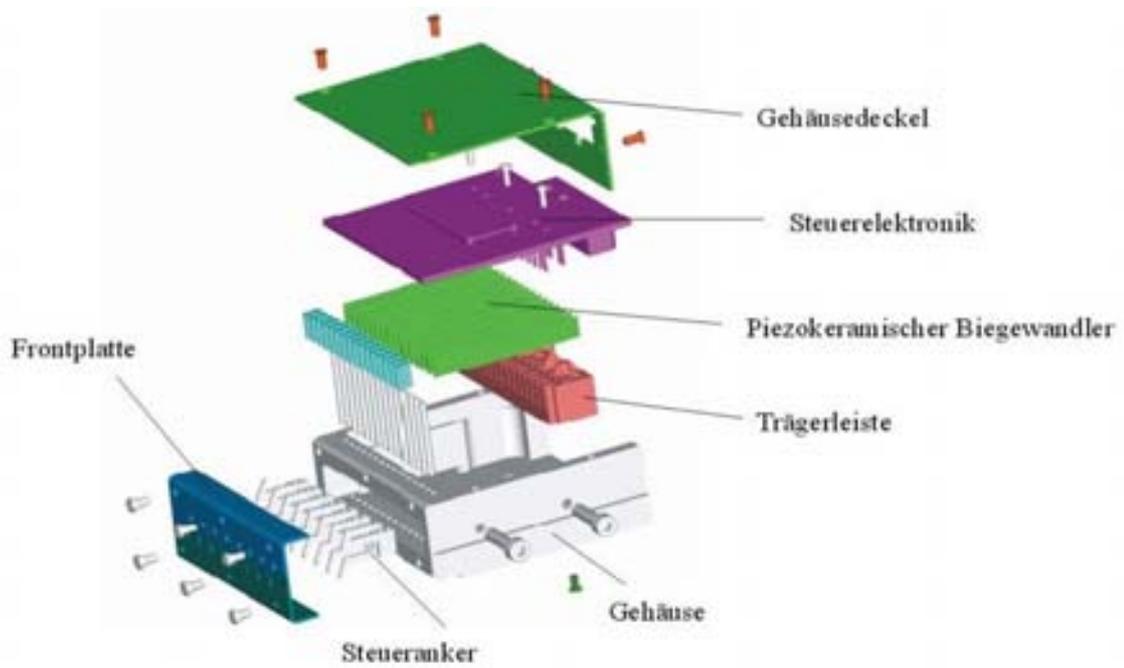


Bild 8: Aufbau eines SITEX[®]-Moduls für Rundstrickmaschinen.

Durch die geringe Baugröße ist der Platzbedarf der Steuermodule in den Maschinen minimal. Da die Module mit geringer Energiezufuhr und ohne Wärmeabgabe arbeiten, kann auf eine zusätzliche Kühlung verzichtet werden. Aufgrund eines speziellen Lacküberzugs (Coating) sind Elektronik und Biegewandler gegen Staub, Stofffussel, Öle und Fette unempfindlich. Den Biegewandler werden der technischen Anforderungen und den Kundenwünschen entsprechend mit und ohne Elektronik geliefert.

2.4.6.2. Piezokeramische Aktoren in Ventilen

Piezokeramische Aktoren finden vermehrt Einsatz in Ventilen. Ihr Anwendungsspektrum deckt beispielsweise über Industrieautomatisierung, Medizintechnik, Automatisierungstechnik und Konsumerbereich einen weiten technischen Bereich ab.

Piezokeramische Aktoren eignen sich für den Einsatz in Ventilen insbesondere wegen der extrem schnellen Schaltgeschwindigkeit und den nicht vorhandenen Wärmeverlusten. Dies ist gegenüber anderen Antriebskonzepten wie magnetischen Aktoren ein entscheidender Wettbewerbsvorteil.

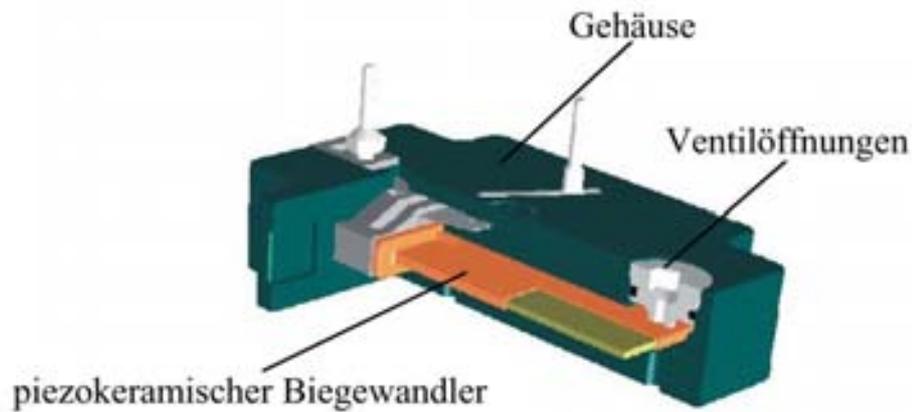


Bild 9: Schematischer Aufbau eines piezokeramischen Ventils.

2.4.6.3. Smarte piezokeramische Aktoren in pneumatischen Mikroventilen

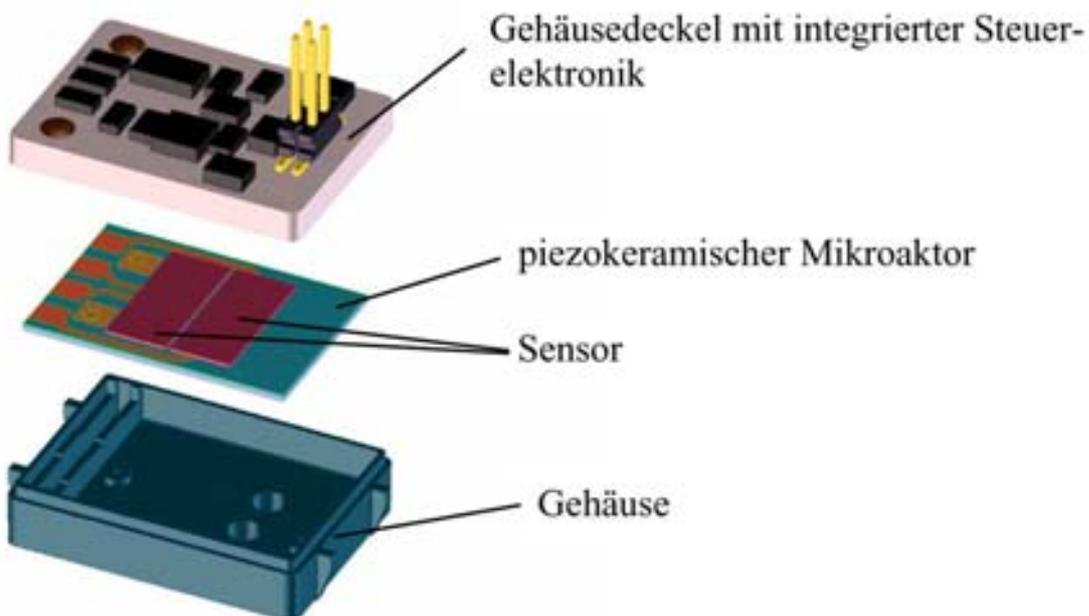


Bild 10: Prinzipdarstellung eines smarten piezokeramischen Mikroventils mit integrierter Wegsensorik und Steuerelektronik.

Neue Anwendungen insbesondere in der Automatisierungsindustrie verlangen neuartige intelligente piezokeramische Aktoren. Die piezokeramischen Aktoren werden hierzu beispielsweise mit Sensoren zur Überprüfung der Funktionalität und Lebensdauer ausgestattet. Darüber hinaus ist aber auch eine exakte Positionierung des Aktors im pneumatischen Mikroventil möglich. Somit kann eine exakte pneu-

matische Durchflussregelung ermöglicht werden. Des Weiteren kann mittels der integrierten Sensorik auch ein Einsatz der pneumatischen Ventile in Anwendungen der Adaptronik gewährleistet werden.

2.4.6.4. Piezokeramische Generatoren

Piezokeramische Generatoren, nutzen den direkten Piezoeffekt. Durch eine mechanische Deformation der Piezokeramik wird eine elektrische Spannung erzeugt. Diese Spannung kann zum Beispiel als Betriebsspannung für die Funkübertragung einer Information genutzt werden.

Diese Technologie wurde für die Anwendung eines draht- und batterie-losen Funkschalters für die Gebäudeinstallation realisiert.



Bild 11: Darstellung eines Funkschalters mit Piezogenerator zur Gewinnung der benötigten Energie aus der Tastenbetätigung.

Hierbei wird durch die Biegung eines piezokeramischen Biegewandlers eine elektrische Spannung erzeugt. Die gewonnene Energie ist ausreichend um eine Sendeelektronik mit der nötigen Spannung zu versorgen um ein hochfrequentes Signal an eine Empfängereinheit zu senden.

Somit kann beispielsweise ohne großen Installationsaufwand eine Nachrüstung von Lichtschaltern in Gebäuden erfolgen. Auch die Aus-

rüstung von Neubauten ist sinnvoll, da die kostenintensiven Arbeiten für die Verlegung von Stromleitungen zu den Lichtschaltern entfallen. Die Vorteile dieser Technologie sind die wartungsfreie, batterie- und drahtlose Übertragungsmöglichkeit von Signalen und Informationen. Dies erfolgt durch Umwandlung von mechanischer Prozessenergie (Schaltenergie) in elektrisch nutzbare Energie (elektrische Betriebsspannung).

2.4.6.5. Piezokeramische adaptive Systeme

Mit den ständig wachsenden Anforderungen für mechanische Systeme im Maschinenbau, Fahrzeugtechnik und Luftfahrt hinsichtlich der Geschwindigkeit und der Genauigkeit wird die Reduktion der systeminternen Strukturschwingungen immer wichtiger. Durch piezokeramische adaptive Systeme können die Schwingungen detektiert und kompensiert werden.

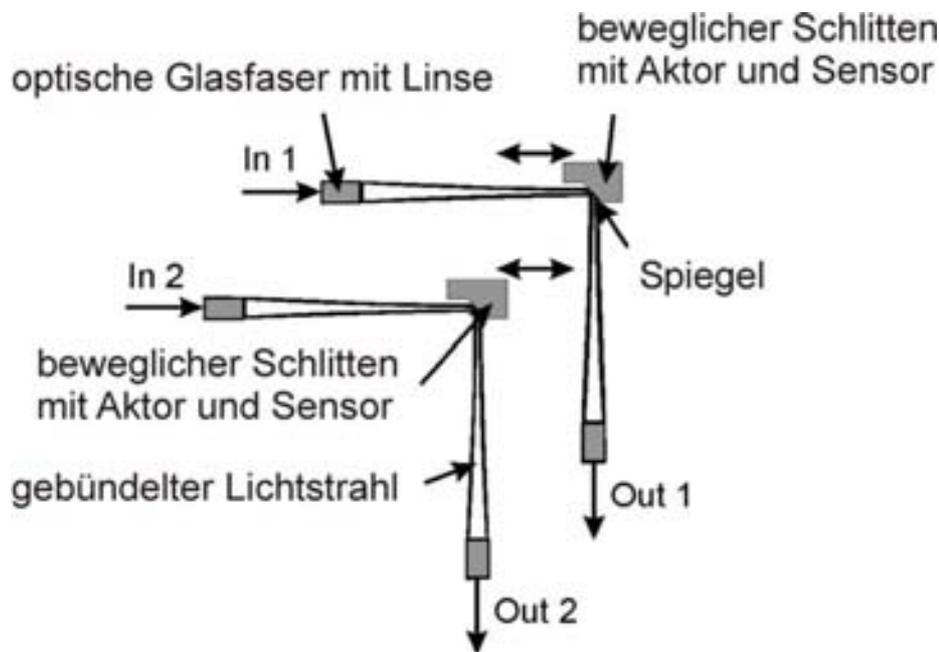


Bild 12: Darstellung der prinzipiellen Funktionsweise eines optischen Lichtwellenschalters mit integrierter Aktorik und Sensorik.

Hierbei dienen piezokeramische Komponenten als Sensor zur Detektion der unerwünschten Schwingungen und piezokeramische Aktoren für die Erzeugung von gegenphasigen Schwingungen um die inhärenten Strukturschwingungen zu minimieren und zu unterdrücken. Die Kopplung der Aktor-Sensor-Eigenschaften in ein piezoelektrisches Bauteil ist ebenfalls möglich. Zur Regelung der piezoelektrischen

adaptronischen Systeme werden geschlossene analoge oder digitale Regelsysteme mit unterschiedlichsten Regelalgorithmen eingesetzt.

Durch adaptive Systeme kann die Kopplung von optischen mikromechanischen Systemen unabhängig von den Schwingungen und Vibrationen der umgebenden Strukturen realisiert werden. Die Feinregelung der optischen Spiegel kann durch gekoppelte piezokeramische Aktoren mit polymeren Sensoren und einem geeigneten Regelkreis gewährleistet werden.

2.4.6.6. Piezokeramische Ultraschallzerstäuber

Mit piezokeramische Ultraschallzerstäuber können Aerosole perfekt erzeugen. Sie eignen sich zur Erzeugung kleiner Tröpfchen mit großen Vorteilen. Die exakte Einhaltung der gewünschten Tröpfchengröße in bester Homogenität ist kein Problem mit piezokeramischen Ultraschallwandlern.



Bild 13: Schematischer Aufbau eines piezokeramischen Ultraschall Tascheninhalators für die Medizintechnik. Mit dem Tascheninhalator können sowohl Medikamente gegen Asthma und chronische Lungenerkrankungen als auch Medikamente zur Schmerztherapie zerstäubt werden.

Einführung

Mit den Ultraschallzerstäubern arbeiten Anwendungen flexibler und wirtschaftlicher als mit herkömmlichen Befeuchtungssystemen, denn der Flüssigkeitsverbrauch sinkt spürbar, die Stillstandszeiten werden kürzer, und beim Zerstäuben wird viel weniger Energie benötigt. Außerdem beanspruchen die Zerstäuber erheblich geringeren Platz.

Ultraschallzerstäubung benötigt keine Treibgase. Pflanzenschutzmittel in der Industrie können exakt dosiert und gezielt verteilt werden. Beim Zerstäuben von Kosmetika muss Lungengängigkeit vermieden werden.

Hingegen müssen bei medizinischen Anwendungen zur Inhalation Medikamente gezielt lungengängig und gleichmäßig zerstäubt werden. Dies ist möglich, dann die Tröpfchengröße ist exakt und homogen einstellbar. Die zerstäubten Medikamente wirken effektiver, da der Patient sie über die Atmung viel besser und schneller aufnehmen kann. Ultraschallwandler für die Medizintechnik haben darüber hinaus den Vorteil, dass mittels Ultraschalleinwirkung Bakterien vernichtet werden können. Das Aerosol ist praktisch keimfrei.

Piezokeramische Ultraschallzerstäuber zeichnen sich durch den geringen Energiebedarf, den niedrigen Unterhaltskosten und einer langen Lebensdauer aus. Ein großer Vorteil ist die Möglichkeit für jeden Anwendungsfall die Tröpfchenverteilung und Tröpfchengröße individuell einstellen zu können.

2.4.6.7. Piezokeramische Ultraschallmeßsystem

Piezokeramische Ultraschallmeßsysteme besitzen eine Vielzahl von Vorteilen. Beispielsweise können mittels Tankinhaltsmesssystemen die Füllhöhen der Tankinhalte ermittelt werden ohne mit mechanischen Abtastsystemen arbeiten zu müssen. Hierdurch kann eine sehr gute Messgenauigkeit erreicht werden. Ultraschallmeßsysteme können einfach in bestehende Tanksysteme integriert werden. Sie eignen sich zur Messung unterschiedlichster Medien.

Das Ultraschall Tankinhaltsmeßsystem TIM[®] arbeitet nach dem Ultraschall Echolot Prinzip. Ein Ultraschallwandler sendet Ultraschallimpulse aus, die an der Oberfläche der Flüssigkeit reflektiert werden. Die reflektierten Schallwellen werden vom Wandler wieder aufgenommen. Sie werden unmittelbar zur Bestimmung der Füllhöhe herangezogen.

Mit Ultraschalltankinhaltsmesssystemen ist eine präzise Messung der Tankinhalte möglich. Durch rechnerischen Abgleich der Medientemperaturen können auch Sumpfablagerungen bestimmt werden. Darüber hinaus ist eine Qualitätsbestimmung des Treibstoffs möglich. Ultraschalltankinhaltsmesssysteme ermöglichen eine vereinfachte Messung im Vergleich zu anderen Messverfahren.

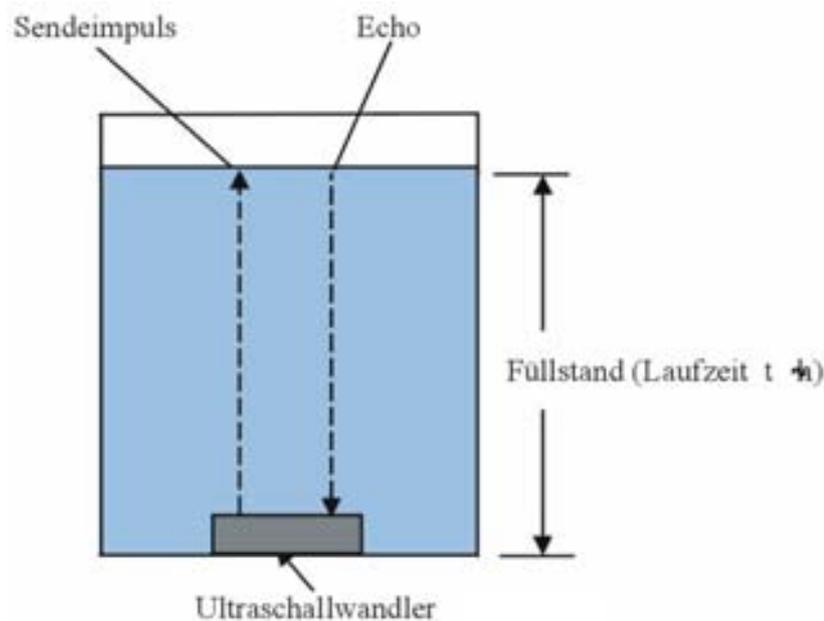


Bild 14: Prinzipielle Funktionsweise des Ultraschall Tankinhaltsmesssystem TIM[®]. Aus der Laufzeit des Ultraschallsignals kann die Füllstandshöhe ermittelt werden.

2.4.7. Literatur

- [1] Low Voltage Piezoelectric Actuator with Integrated Strain Gauge – A New Technology for Industrial Automation; A. J. Schmid, T. Wich, ;T. Fischer, U. Töpfer, T. Steinkopff, C. Schuh, M. Weinmann, M. Maichl, G. Munz, C. Hanisch, H. F. Schlaak, R. Ballas, M. Hoffmann, S. Wagner; 8th International Conference on New Actuators, Actuator 2002
- [2] Piezo electric Ceramics; J. vom Randeraat, R. E. Setterington, 2nd edition; Mulland 1974
- [3] Innovative Sensor and Actuator Devices Using MID Technology; M. Weinmann, et. al.; 4th International Congress Molded Interconnect Devices; 2000

Einführung

- [4] Piezokeramische Systeme – Physikalische Eigenschaften und Anwendungen; A. J. Schmid; Technische Keramik in der Praxis; Verband der keramischen Industrie e.V.; Selb; 2002
- [5] Design and construction of a high-resolution 3D translation stage for metrological applications; W. Chr. Heerens J.M.T.A. Adriaens W.L. de Koning K.R. Koops, R. Banning P.M.L.O. Scholte, Applied Physics A- Materials Science & Processing, 1998
- [6] Piezo electric Components for Technical Applications, C. Schuh, K. Lubitz, Th. Steinkopff, A. Wolff, Piezoelectric Materials, Ed.: C. Galassi et al., Kluwer Academic Publ. 2000, 391- 399
- [7] Smarter Niedervoltaktor – Multilayer Biege wandler mit integrierter Sensorik; A. J. Schmid; Deutsche Keramische Gesellschaft, 10. Keramik-Tag der Bundesanstalt für Materialforschung, Symposium: Folien und Multilayertechnologie für funktionskeramische Anwendungen, 2003
- [8] Piezoelectrically Actuated Suspension for Hard Disk Drives; Yimin Nui, Wie Guo, Guoxiao Guo, Eng Hong and Tony Huang; Storage Proc. Syst.; Vol. 1.; 321 –327, 1999
- [9] Piezoelectric Micro Actuator with an Integrated Sensor to Control the Air Flow in a Micro Valve; A. J., Schmid, U. Töpfer, H. Murrmann-Biesenecker, G. Munz, A. Münzenmaier, M. Maichl, R. Ballas, H. F. Schlaak, T. Steinkopff, C. Schuh, M. Laurent, M. Hoffmann, S. Wagner; Actuator 2004; 9th International Conference on New Actuators; 2004; Bremen
- [10] Novel Micromechanical Fiber Optic Modules with Integrated 2x2-Switches and Variable Optical Attenuator; M. Voit, T. Schary, H. F. Schlaak; MICRO.tec 2003 – 2nd VDE World Microtechnologies Congress 2003; 2003; 185-190, München
- [11] Smart Piezoelectric Micro Actuator - an Integrated System to Measure Bending Deflection and External Load; A. J. Schmid, R. Ballas, M. Voit, H. F. Schlaak , U. Töpfer, U. Pothineni, R. Riehl, S. Ledermann, Adaptronic 2004; 8th International Adaptronic Congress; 2004; Hildesheim
- [12] Adaptive Koppelung; W. Martin, Adaptronic 2003; 7th International Adaptronic Congress; 2003; Wolfsburg

- [13] Entwicklung multifunktionaler Werkstoffsysteme mit piezokeramischen Folien im Leitprojekt Adaptronik; P. Wierach, Adaptronic 2003; 7th International Adaptronic Congress; 2003; Wolfsburg
- [14] Modelling, Simulation and Optimal Design of Smart Lightweight Structures; U. Gabbert, H. Köppe, T. Nestorovic, Adaptronic 2003; 7th International Adaptronic Congress; 2003; Wolfsburg
- [15] Aktive Schwingungskompensation an einer PKW-Dachstruktur; K. Schmidt, V. Thörmann, T. Weyer, D. Mayer, S. Herold, V. Krajenski, Adaptronic 2003; 7th International Adaptronic Congress; 2003; Wolfsburg
- [16] Funktionsverbesserung von Glasschneidemaschinen durch aktive Schwingungsdämpfung; S. Glaser, J. Hesselbach, P. Last, I. Pietsch, Adaptronic 2003; 7th International Adaptronic Congress; 2003; Wolfsburg
- [17] Prädiktive Schwingungskompensation bei Maschinen mit paralleler Kinematik ; M. Weck, T. Yamasaki, wt - Werkstattstechnik online 92, 356-360, 2002

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 38) finden sich auf den folgenden Seiten.

Piezokeramik – Funktion, Bauarten und Anwendungen

Dipl.-Phys. Andreas J. Schmid
ARGILLON GmbH
Piezoproducts
Redwitz a.d. Rodach



Piezokeramik – Funktionen, Bauarten und Anwendungen – Maschinenbau, Feinwerktechnik, Mikrosystemtechnik und Adaptronik

Dipl.-Phys. Andreas J. Schmid
ARGILLON GmbH
Piezoproducts
Redwitz a.d. Rodach



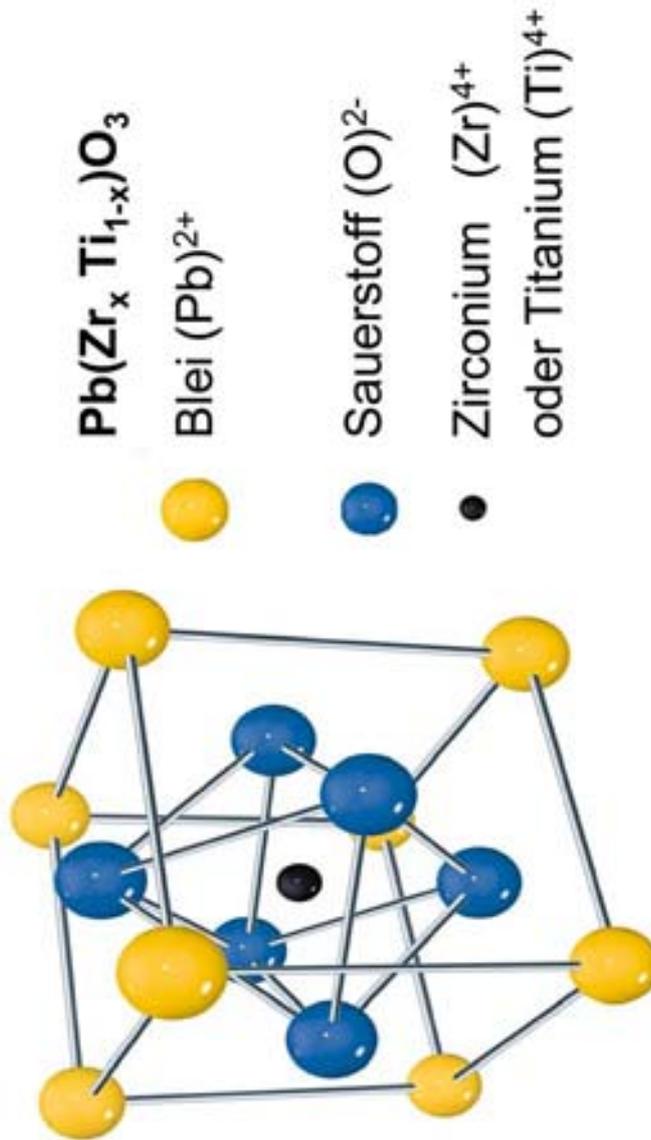


Überblick

**Piezokeramik –
Funktionen, Bauarten und Anwendungen –
Maschinenbau, Feinwerktechnik,
Mikrosystemtechnik und Adaptronik**

- Piezoeffekt
- Piezoprodukte
- Aufbautechniken
- Anwendungsbeispiele

PZT – Perowskitsche Kristallstruktur



think Ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

Piezoeffekt - Curie Temperatur

Perowskitsche Kristallstruktur

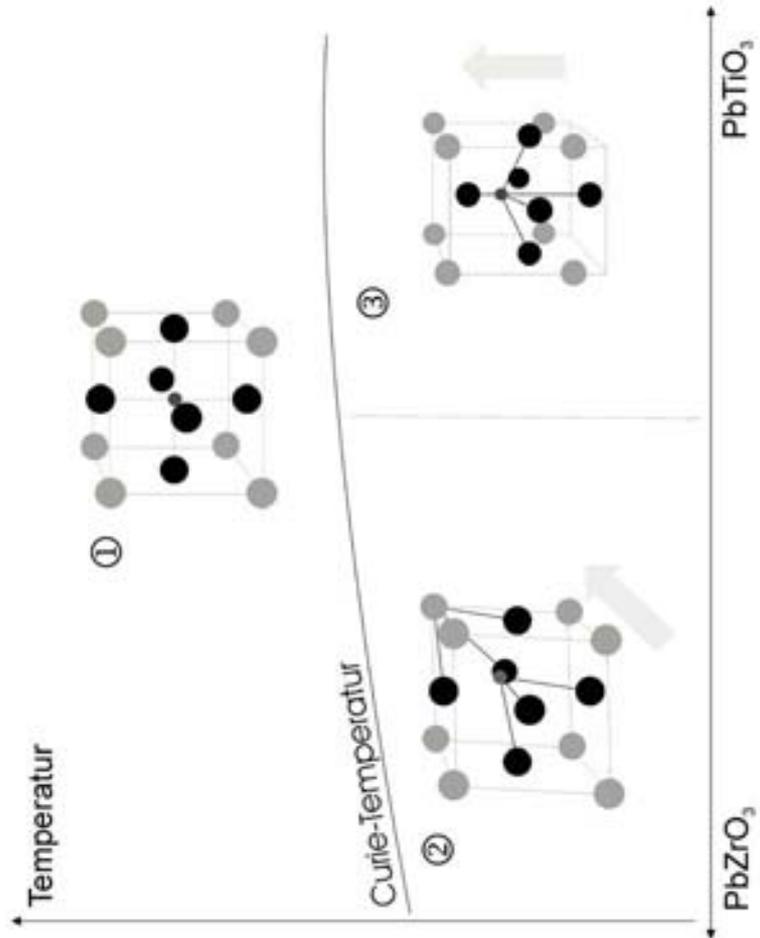
PZT Cubic crystal
($T > T_c$)

○ Pb^{2+}
● O^{2-}
● X^{4+} (Ti, Zr)

PZT Tetragonal crystal
($T < T_c$, Spontaneous Polarisation)

Piezoeffekt - Curie Temperatur

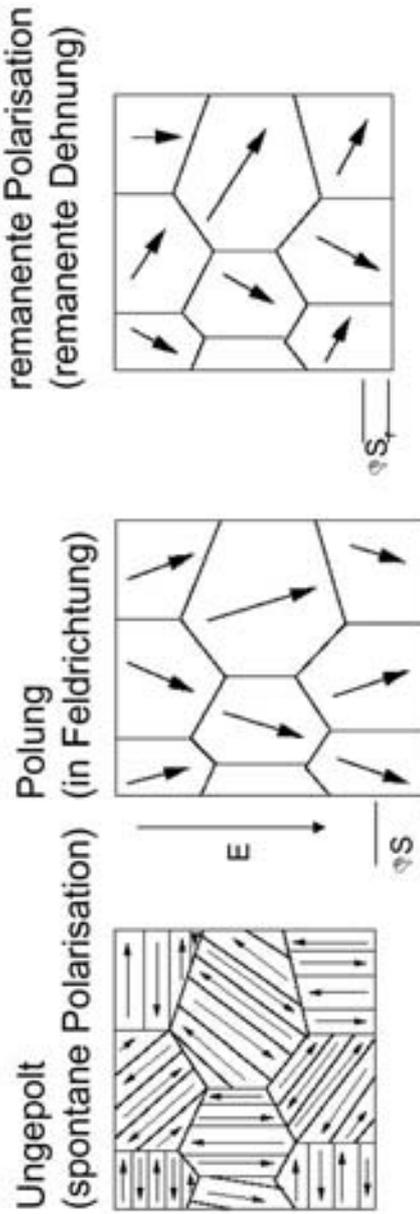
Perowskit Kristallstruktur von Bleizirkonattitanat.
Oberhalb und unterhalb der Curietemperatur.



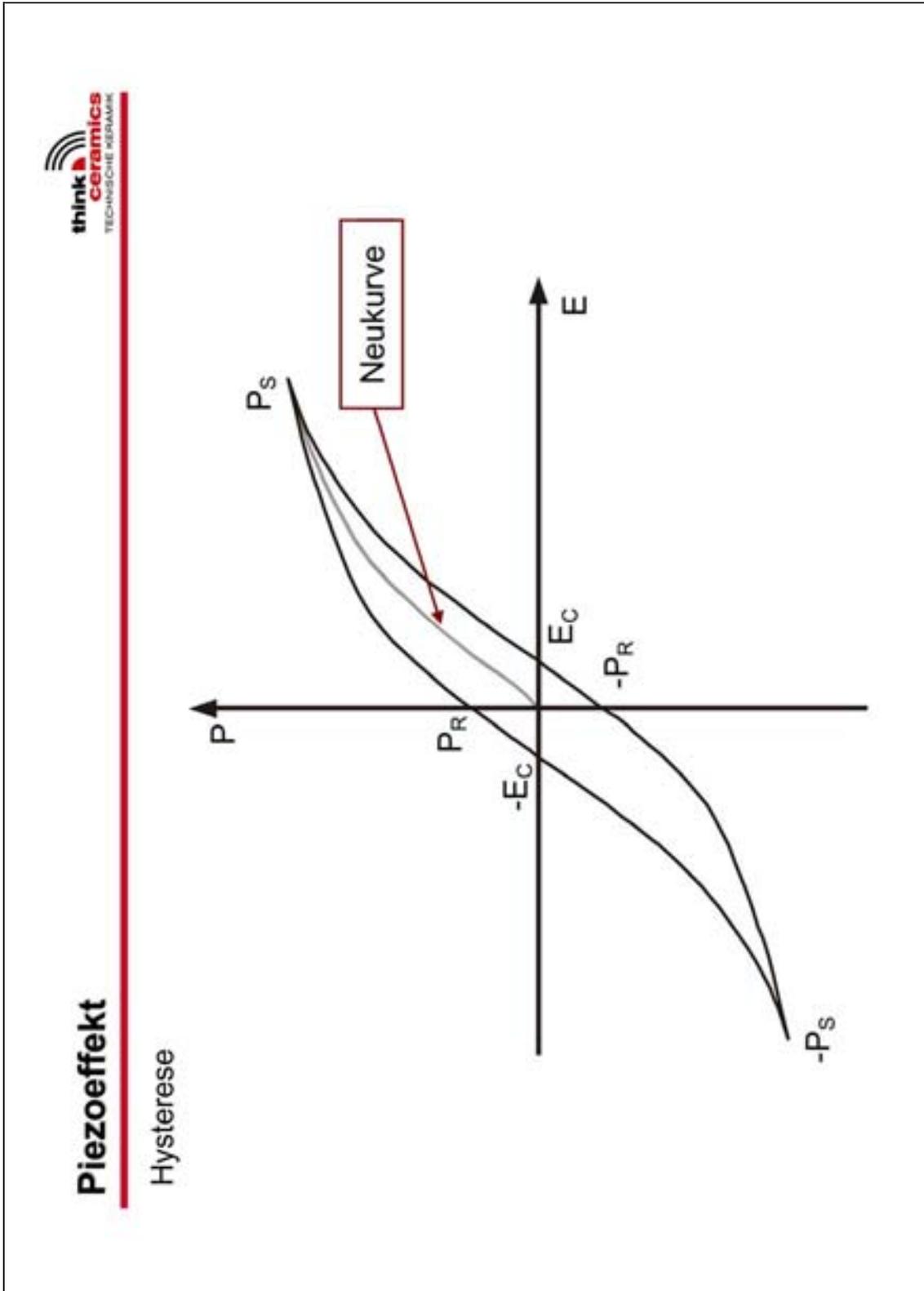
Piezoeffekt



Schematischer Gefügebau einer PZT-Keramik mit Domänen



S : Dehnung der Keramik
 S_r : remanente Dehnung der Keramik

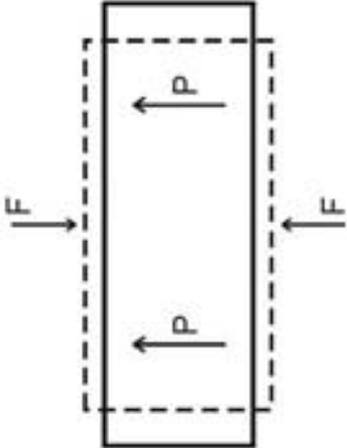


2.4 Piezokeramik - Folie 8

think Ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

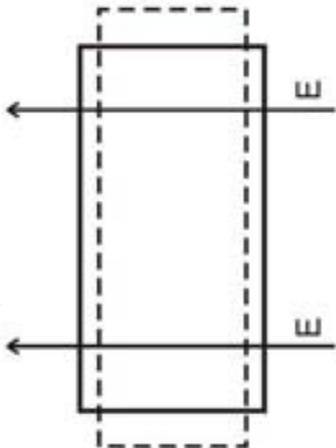
Piezoeffekt

Direkter piezoelektrischer Effekt



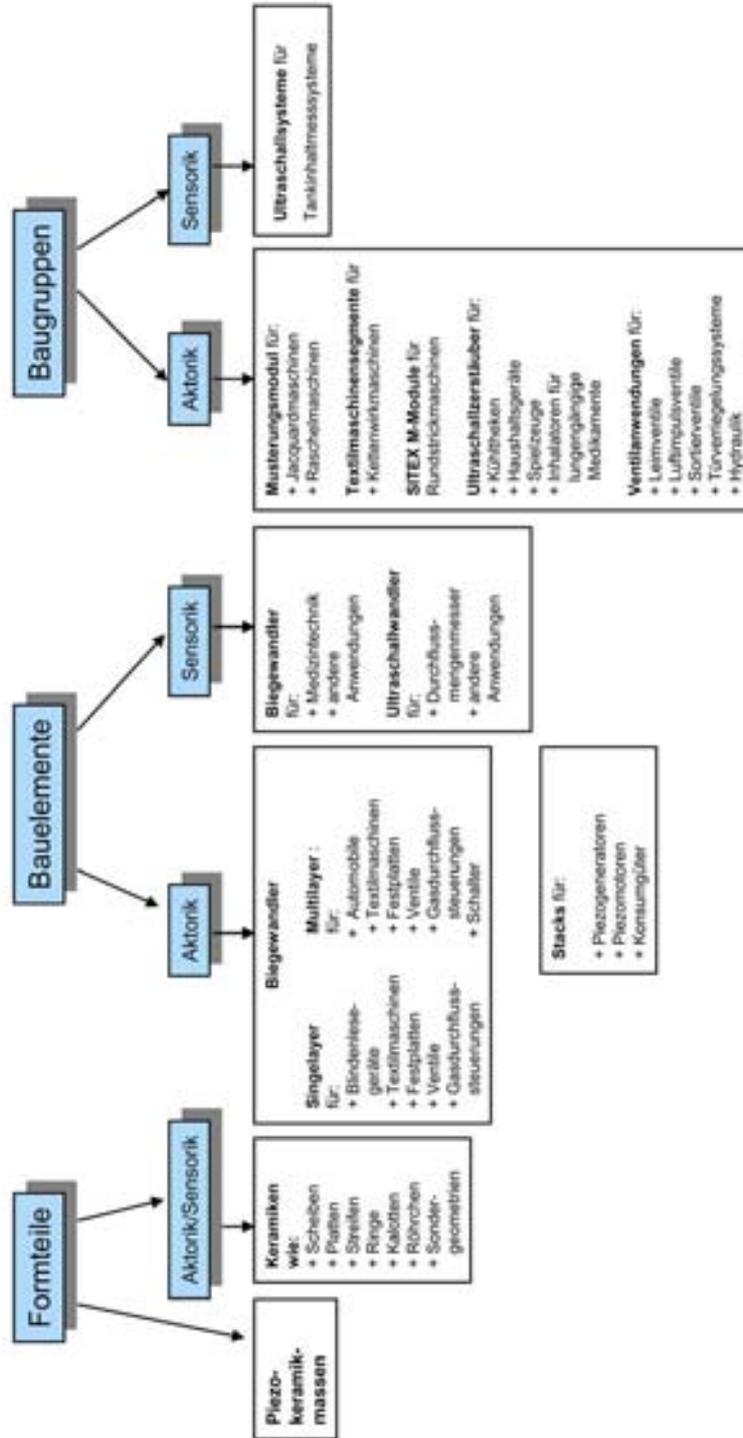
Eine äußere Kraft verursacht mittels Deformation eine ungleichnamige Oberflächenladung.

Inverser piezoelektrischer Effekt

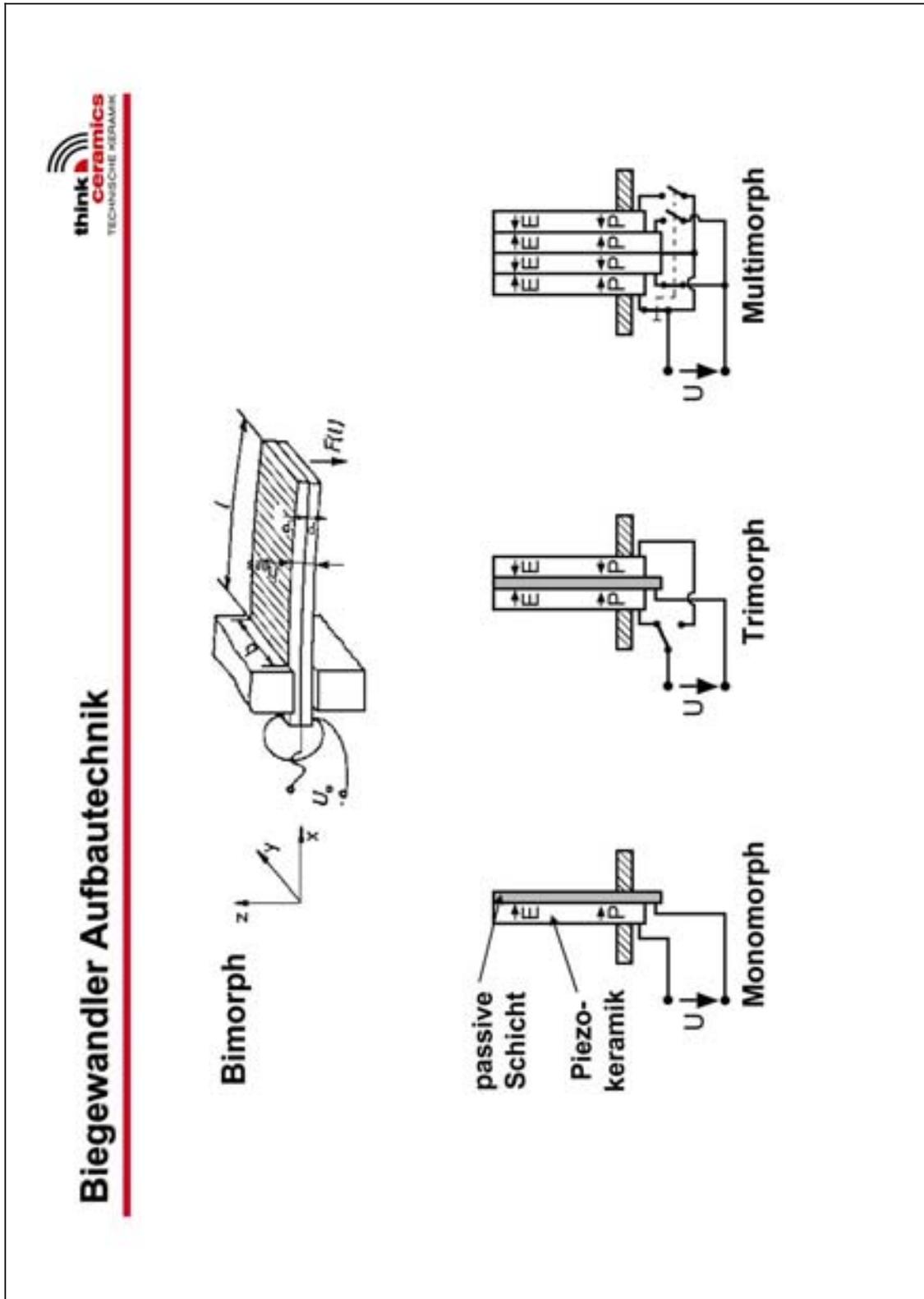


Ein äußeres E-Feld verursacht eine Deformation.

Piezoprodukte



2.4 Piezokeramik - Folie 10



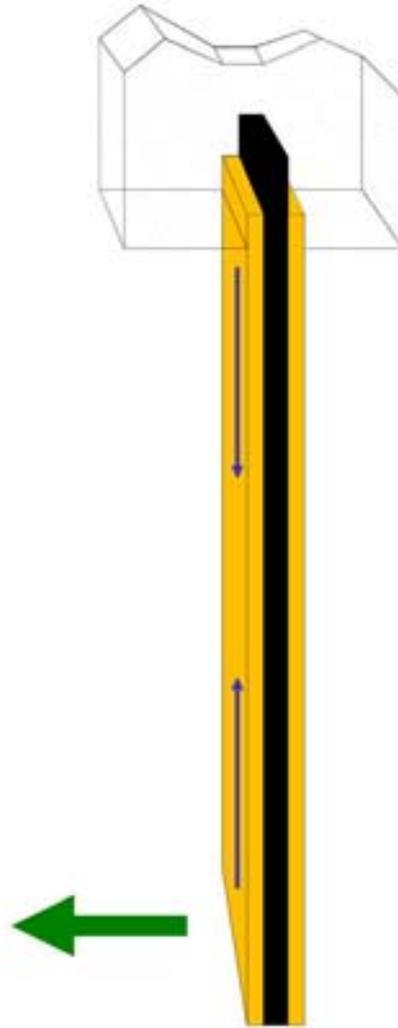
2.4 Piezokeramik - Folie 11

Betrieb eines Biegewandlers



Auslenkung eines trimorphen Biegewandlers (inverser piezoelektrischer Effekt)

Kontraktion der Keramik bei anliegender Betriebsspannung
führt zur Auslenkung des Biegewandlers



Betrieb eines Biegewandlers



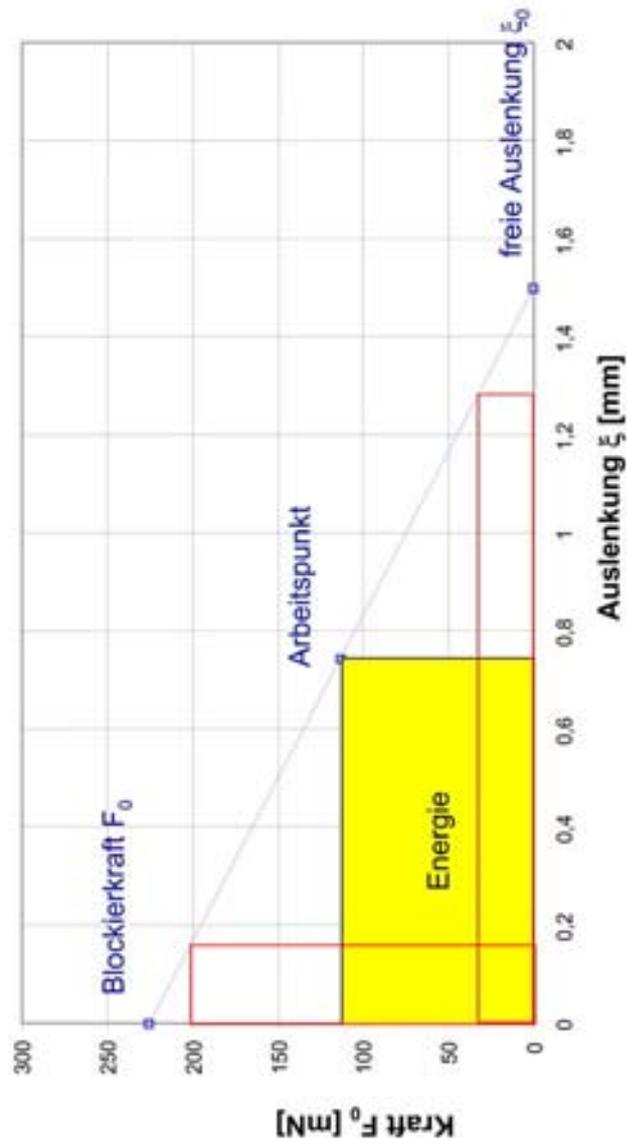
Auslenkung eines trimorphen Biegewandlers (inverser piezoelektrischer Effekt)

Kontraktion der Keramik bei anliegender Betriebsspannung

führt zur Auslenkung des Biegewandlers

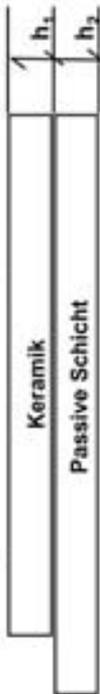


Biegewandler – Kraft-Weg-Diagramm



Biegewandler – Kraft-Weg-Diagramm

Monomorpher Biegewandler



a) freie Auslenkung ξ_0

$$\xi_0 = \frac{3}{4} d_{31} U \left(\frac{l^2}{h_1^3} \right) fE$$

$$fE = \frac{4 a c (1 + a)}{4 a c (1 + a)^2 + (1 - a^2 c)^2}$$

$$a = \frac{h_2}{h_1}$$

a) Blockierkraft F_0

$$F_0 = \frac{3}{2} d_{31} U b E_1 \left(\frac{h_1}{l} \right) f_m$$

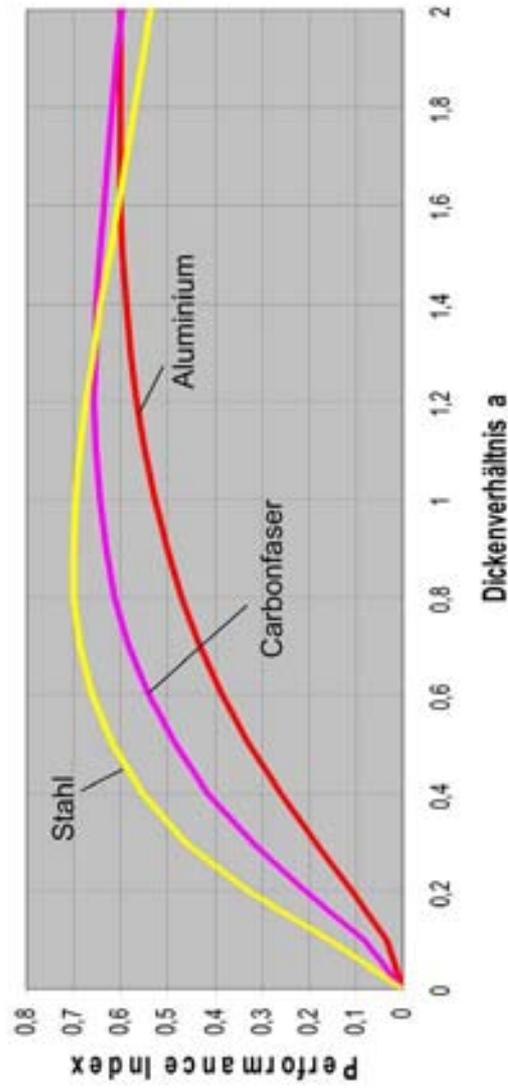
$$f_m = \frac{a c (1 + a)}{2 (1 + a c)}$$

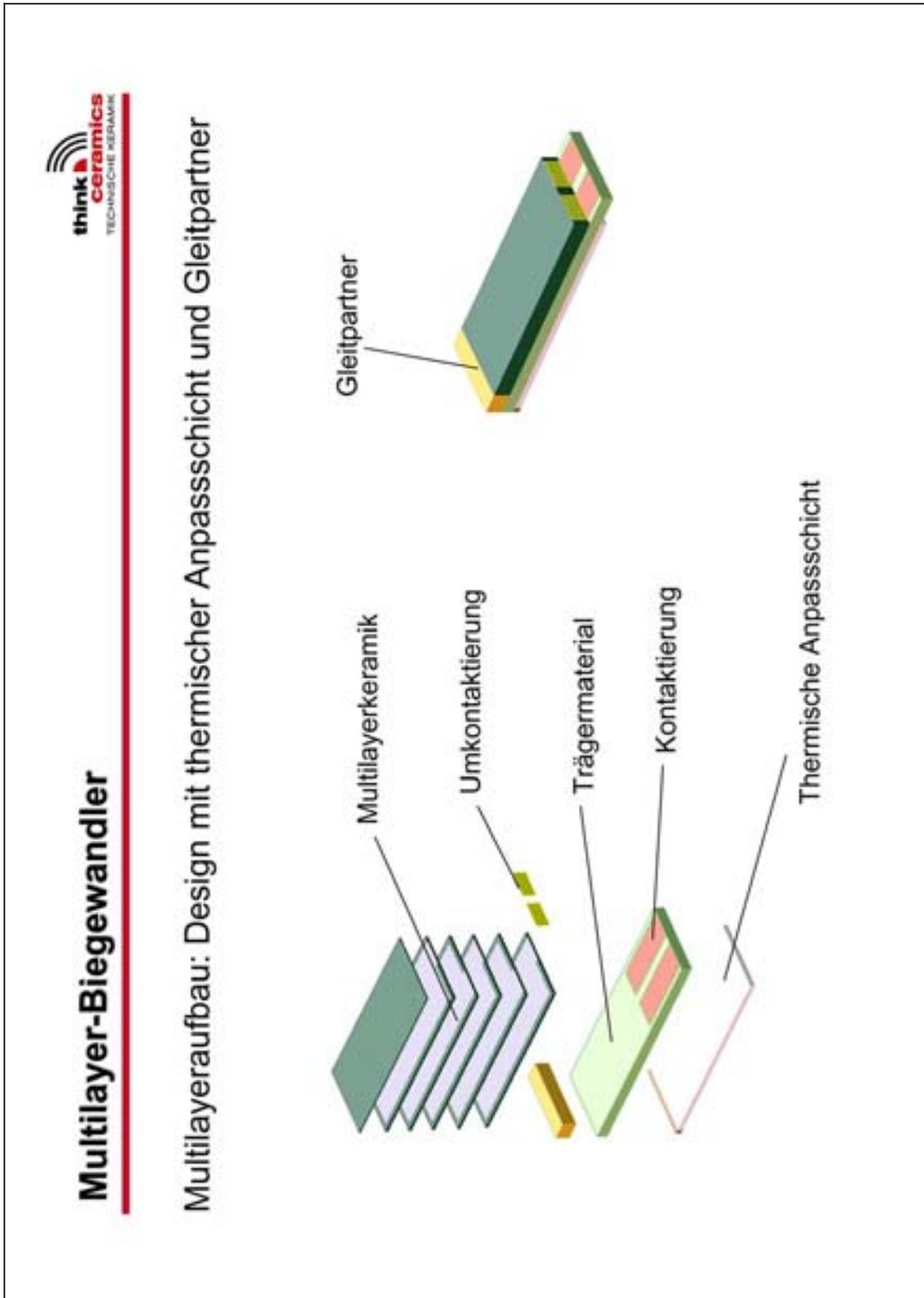
$$c = \frac{E_2}{E_1}$$

Biegewandler - Performance Index



Performance Index = Blockierkraft · freie Auslenkung





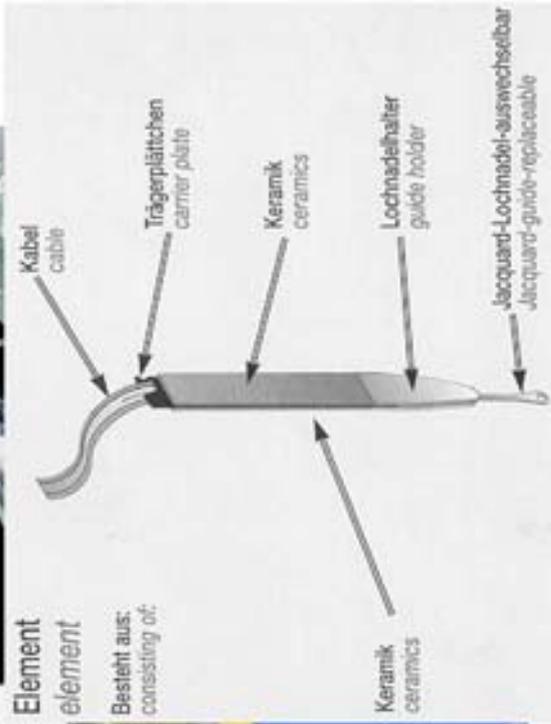
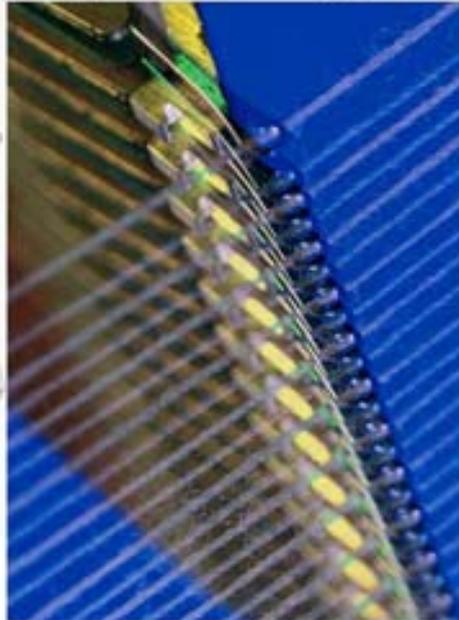
2.4 Piezokeramik - Folie 17

Piezoaktoren in Braille-Modulen

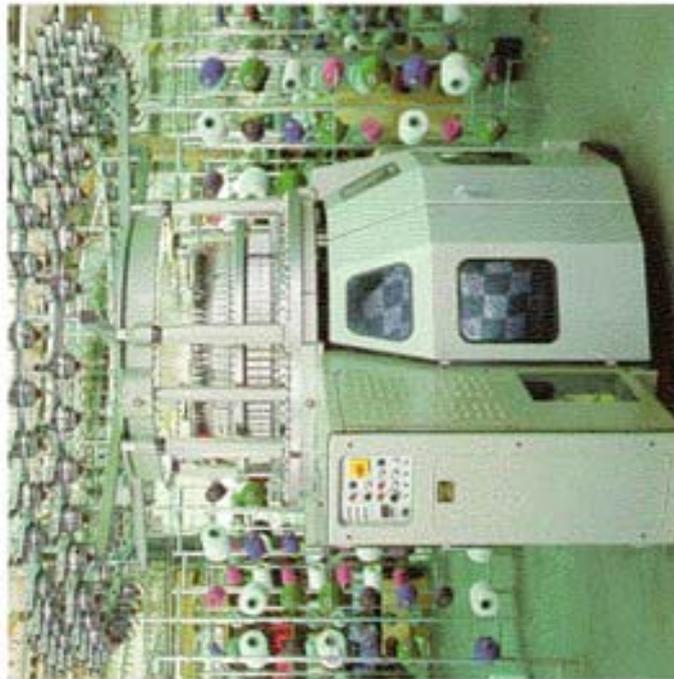


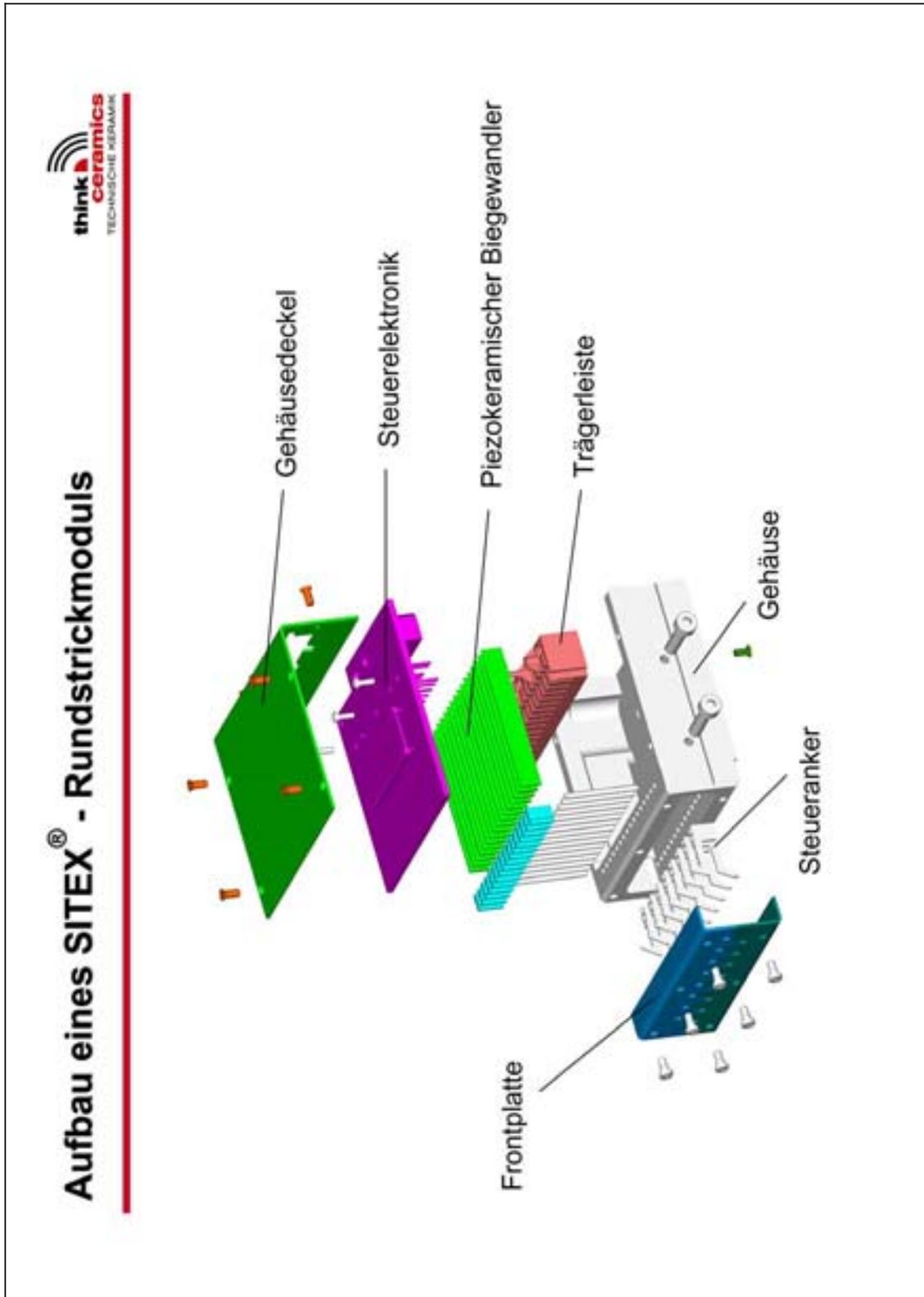
Einführung

Piezoaktoren für Kettenwirkmaschinen



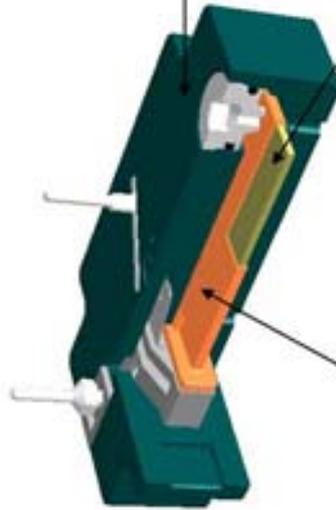
Piezoaktoren für Rundstrickmaschinen (SITEX®)





2.4 Piezokeramik - Folie 21

Ventil mit Piezoaktor



Kunststoffgehäuse

- + Höhere Präzision
- + Geringeres Gewicht
- + Kostengünstiger

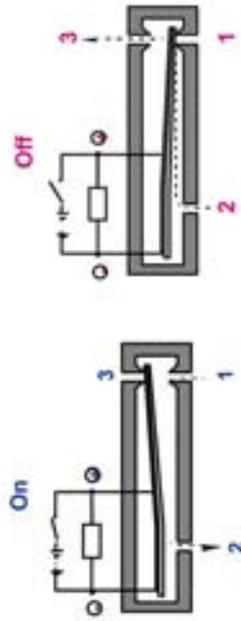
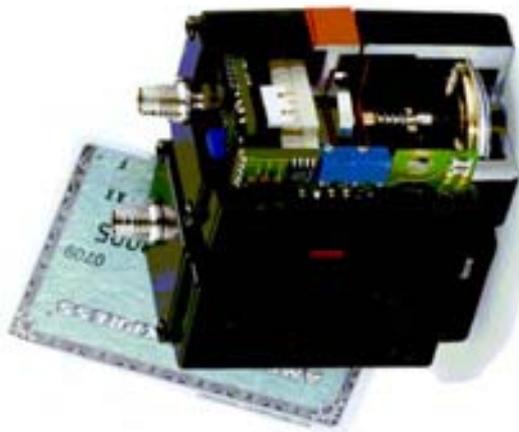
Biegewandler

- + Energiefreie Kontrolle
- + Nahezu kein Verschleiß
- + Ideal für höchste Sicherheitsvorschriften
- + Arbeitet digital und analog
- + Keine Erwärmung
- + Keine elektronische Aufladung
- + Nicht magnetisch

Elastomermantel

- + Verbesserte Versiegelung
- + Schutz gegen Feuchtigkeit
- + Trennt das Medium sicher von der Elektronik

Hoch dynamischer Druckregler

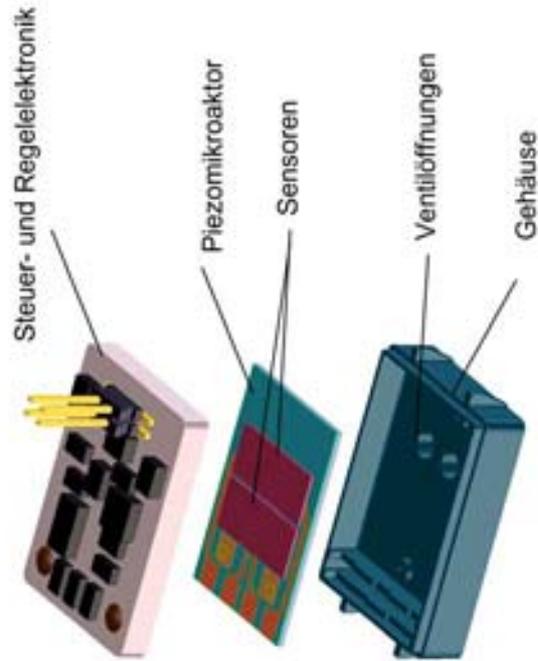




Pneumatisches Ventil mit einem smarten Piezoaktor

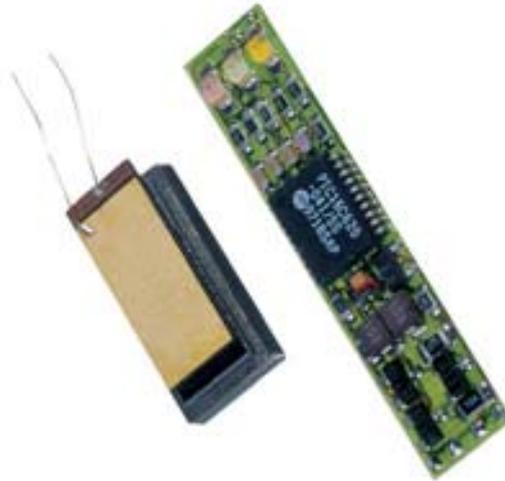
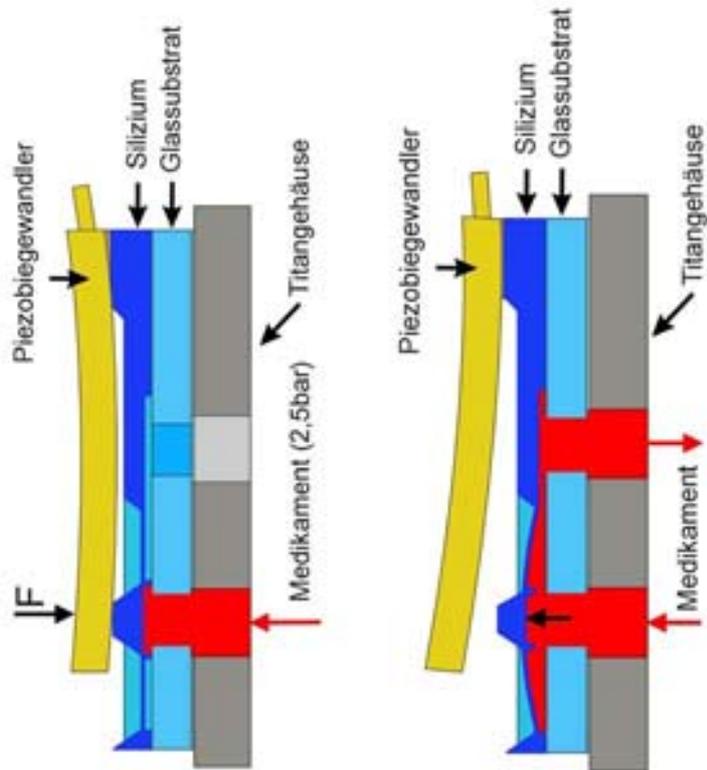
Multilayer Piezoaktor mit integrierter Sensorik zur Funktionsüberwachung und pneumatischen Regelung.

Pneumatisches Mikroventil:



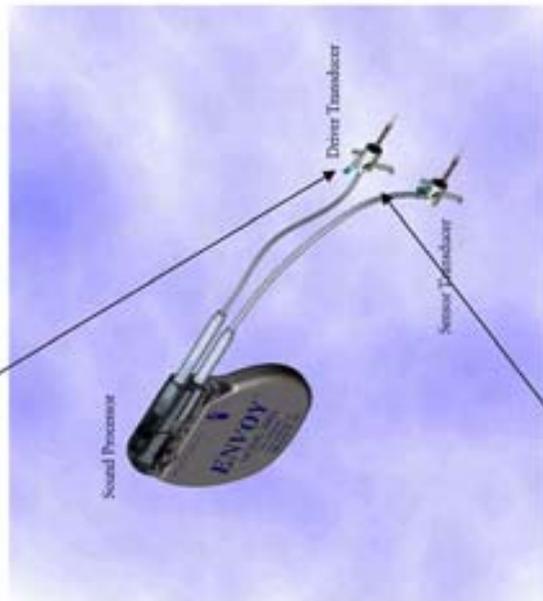
Mikroventil mit Piezoaktor

HSG-IMIT Mikroventil für implantierbare Medikamentendosiersysteme



Piezokeramische Biegewandler für implantierbare Hörgeräte

Der PZT Aktor konvertiert das elektrische Signal vom Sound Prozessor in eine mechanische Vibration, welche an das Gehörknöchelchen weitergegeben wird.



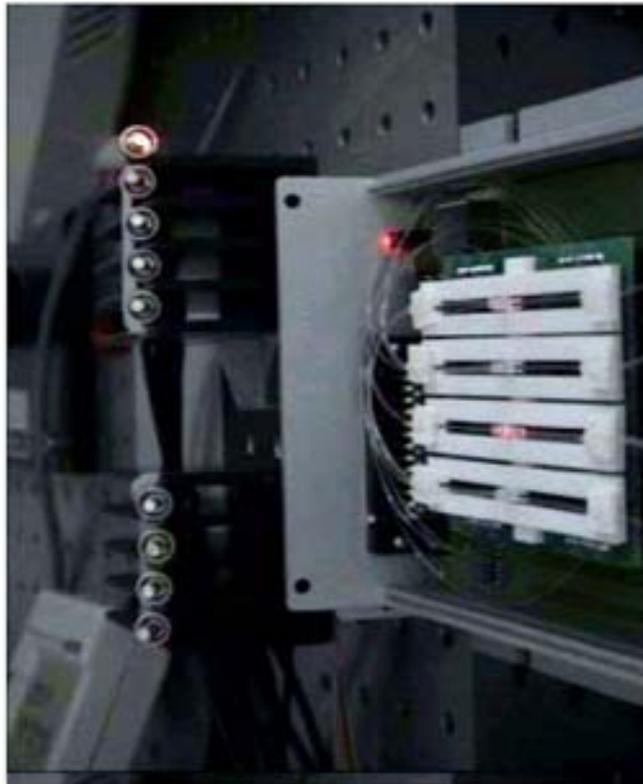
Der PZT Sensor nimmt die Umgebungsgeräusche auf und sendet diese als elektrische Signale an den Sound Prozessor.

Weitere Informationen unter: www.sicroidmedical.com

Piezokeramische Lichtleiterschalter



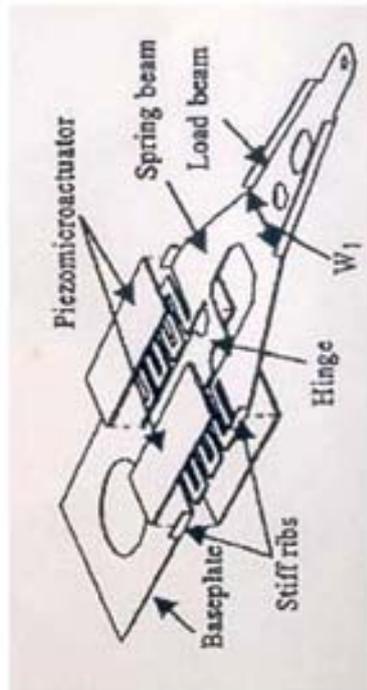
Anwendungen:
Telekommunikation
Optische
Speichermedien



Mikroaktoren

Harddisk Suspension

Feinpositionierung von Harddisk Schreib- und Leseköpfen

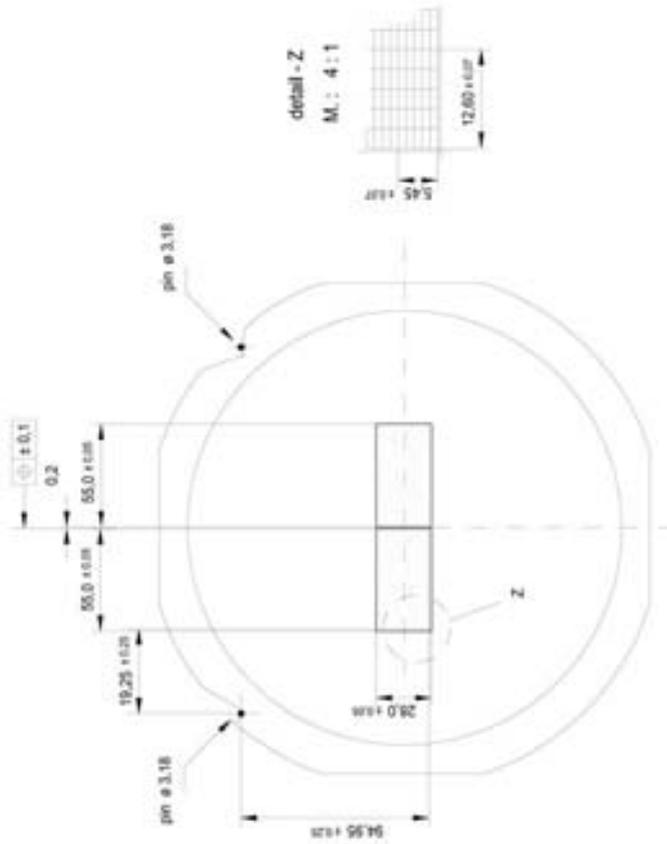


Piezoelectrically Actuated Suspension for Hard Disk Drives; Yimin Niu, Wie Guo, Guoxiao Guo, Eng Hong and Tony Huang; Storage Proc. Syst.; Vol. 1; 321 -327

Mikroaktoren



Mikroaktor zur Feinpositionierung von Schreib- und Leseköpfen
Anwendungen: Bandlaufwerke, Festplatten, DVD- und CD-Recorder



Die Mikroaktoren können per Pick and Place von den Wafer Frames abgenommen und weiterverarbeitet werden.

ELLIPTEC - Piezomotor

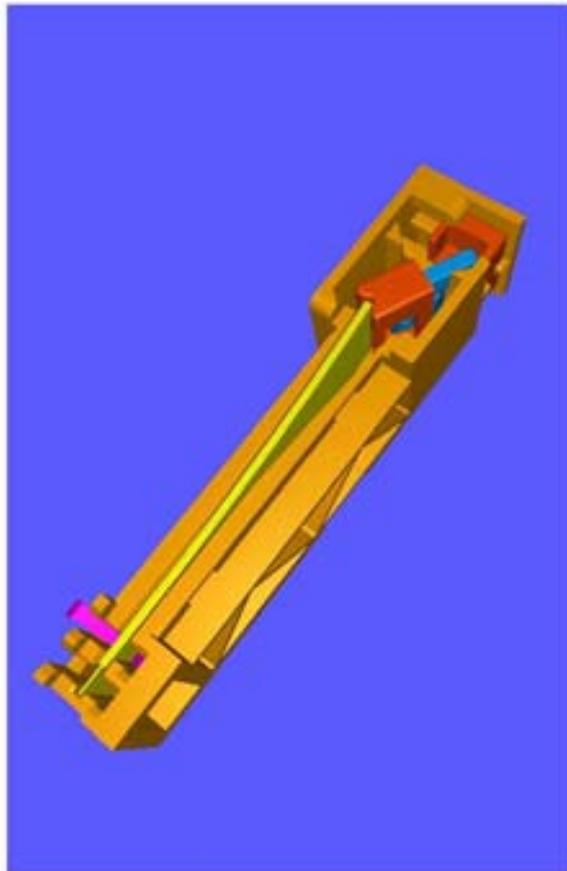
Durch elliptische Schwingungen können rotatorische und lineare Bewegungen erzeugt werden.



EnOcean - Piezokeramische Generatoren



Die Betätigungsenergie wird für batterielose Transpondersysteme verwendet.

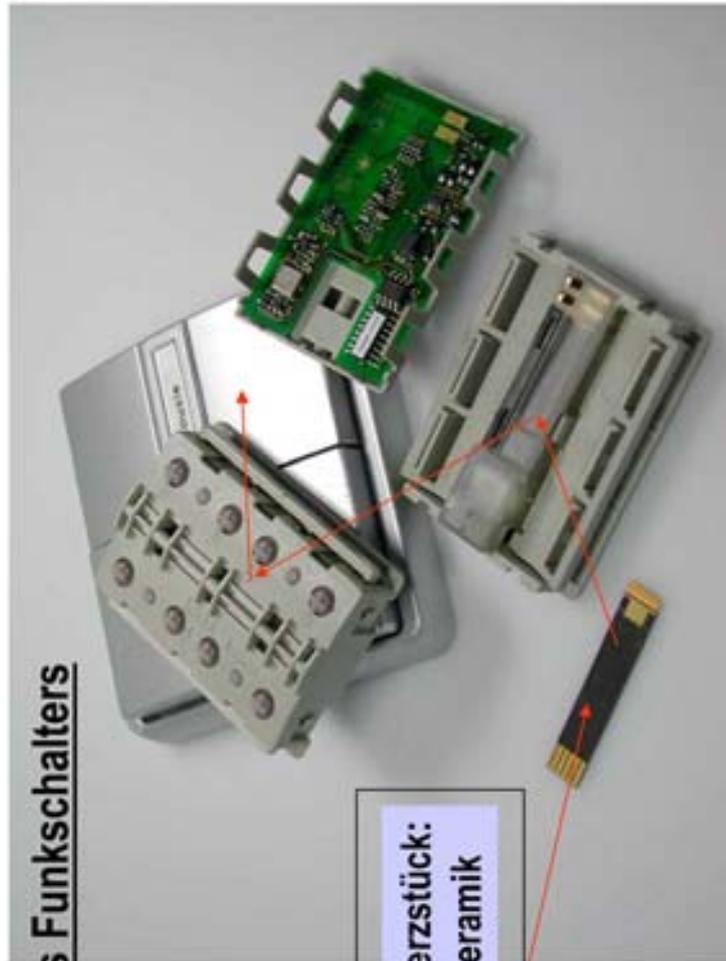


Anwendungen:

Lichtschalter
Funk-Reifensensoren

EnOcean - Piezokeramische Generatoren

Einzelteile des Funkschalters



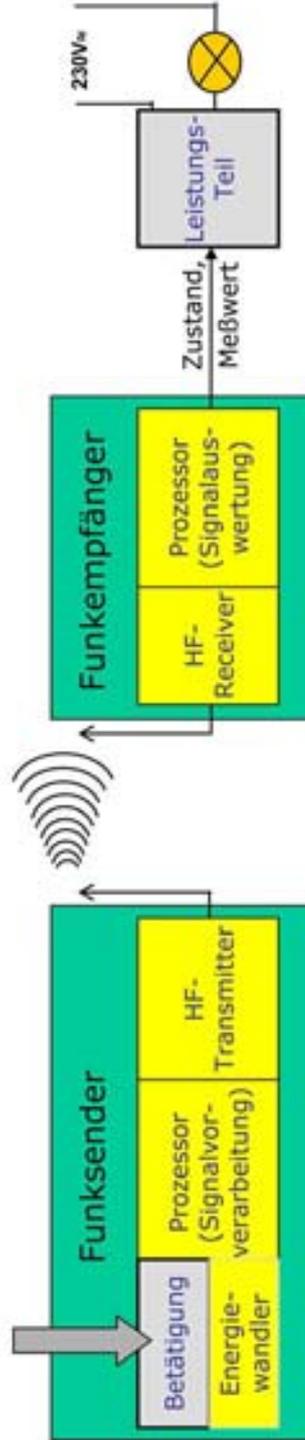
mit dem Herzstück:
der Piezokeramik

EnOcean - Piezokeramische Generatoren

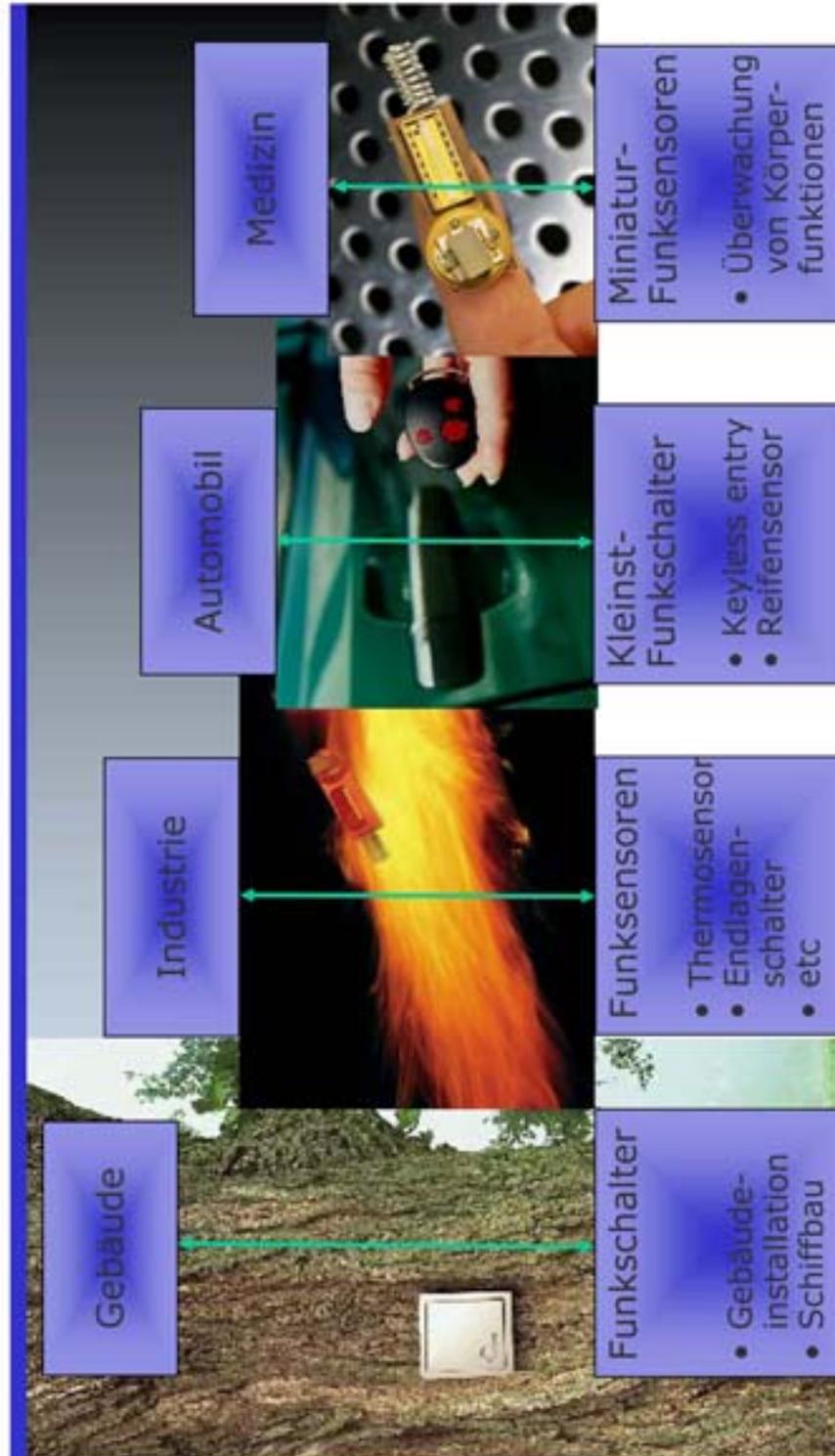


Batterielose Funktechnik

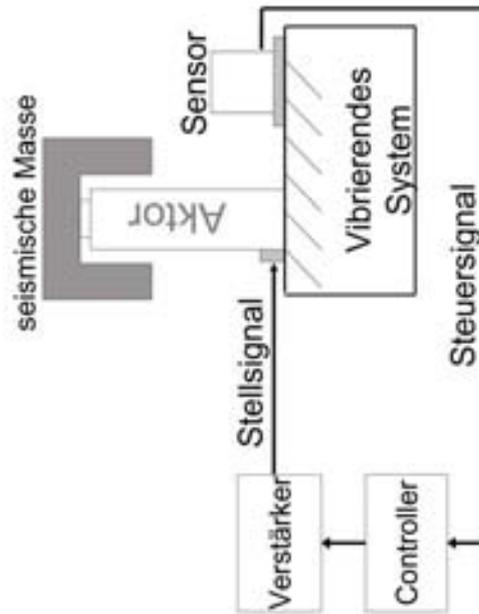
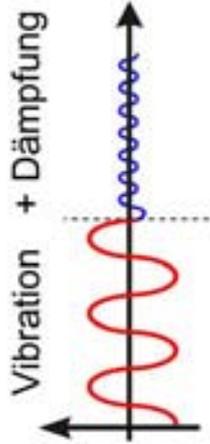
- Umwandlung von Prozessenergien in nutzbare elektrische Energie
- Effiziente Ausnutzung elektrischer Energie, Aufbereitung und hochfrequente Übertragung von Befehlen und Meßgrößen
- Systemarchitektur zur optimalen Verknüpfung von Einzelkomponenten



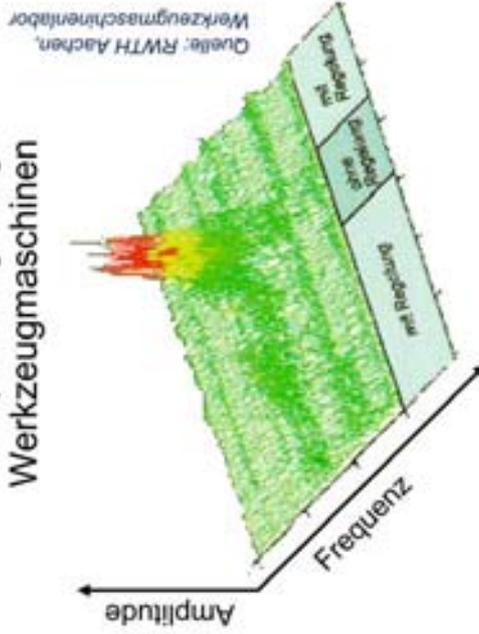
EnOcean - Piezokeramische Generatoren



Adaptronik - Aktive Schwingungsdämpfung



Möglichkeit der Schwingungsdämpfung durch aktive Spindellagerung bei Werkzeugmaschinen



Beispiele für industrielle Anwendungen adaptiver Regelungen mit Piezoaktoren



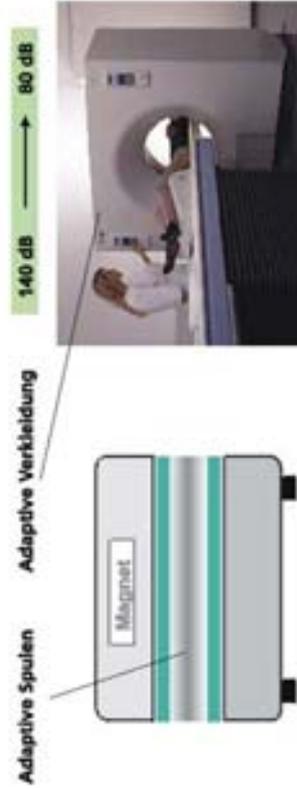
Active Schwingungsdämpfung des Autodachs (VW)



Active Dämpfung des ICE-Wagenkastens (EADS)



Active Schwingungsdämpfung bei Glasschneidemaschinen (HEGLA)



Lärminderung MR-Tomograph (Siemens MED)



Vorteile von Piezoaktoren

- Hohe Produktivität durch hohe Stellgeschwindigkeit
- Hohe Zuverlässigkeit reduziert Ausfallzeiten dramatisch
- Geringe Verlustleistung
- Niedrige Betriebskosten
- Kompakte Bauweise
- Nahezu geräuschloser Betrieb
- Schwingungsdämpfung - Adaptronik
- Anwendungsspezifisch modifizierbar
- Miniaturisierung ist möglich

Zusammenfassung

Piezokeramik

- Elektromechanischer Wandler (Aktor/Sensor/Generator)
- Kundenspezifisch modifizierbar
- Universell einsetzbar

Piezokeramische Komponenten

- Formteile
- Bauelemente
- Baugruppen / Systeme (inkl. Elektronik und Gehäuse)