

## 5.2 Piezokeramik: Funktion, Werkstoffe und Anwendungen

- Claudia Voigt  
Dr.-Ing. Hans-Jürgen Schreiner  
CeramTec AG  
Lauf a. d. Pegnitz

*Die Folien finden Sie ab Seite 480.*

### 5.2.1. Einleitung

Viele Keramiken finden aufgrund von Eigenschaften wie Härte, Verschleißfestigkeit oder Isolationseigenschaften ihre Anwendung. Piezokeramiken hingegen haben in dieser Hinsicht wenig zu bieten. Sie haben aber eine spezielle Eigenschaft, die sie von diesen Strukturkeramiken unterscheidet und für technische Anwendungen äußerst interessant macht: Sie wandeln mechanischen Druck in elektrische Signale um oder sie ändern Ihre Länge aufgrund eines elektrischen Feldes. Piezokeramiken zählen deshalb zu den Funktionskeramiken.

### 5.2.2. Grundlagen

Die Piezoelektrizität wurde von den Gebrütern Curie ca. 1880 zunächst am Quarz entdeckt. Durch mechanischen Druck lässt sich ein elektrisches Signal erzeugen (direkter Effekt) oder man erhält beim Anlegen einer elektrischen Spannung eine Längenänderung (indirekter Effekt) Der Effekt ist am Quarz jedoch sehr klein. Außerdem lassen sich aus den Kristallen nicht beliebig geformte Bauteile herstellen. Daher wurden piezoelektrische Bauteile erst mit der Entdeckung des ferroelektrischen Effektes an Bariumtitanat und Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) praktisch herstellbar. Dieser Effekt ist in der Gitterstruktur begründet. Bei Ferroelektrika lässt sich die Richtung der „spontanen Polarisation“ des Kristallgitters durch ein äußeres elektrisches Feld verändern. Dadurch erhält das Bauteil, das zuvor makroskopisch keine Piezoelektrizität zeigt, seine piezoelektrischen Eigenschaften. Diese Keramiken zeigen einen deutlich größeren piezoelektrischen Effekt als Quarz und sind auch in nahezu beliebiger Geometrie herstellbar.

Der Nachteil ist eine größere Nichtlinearität und eine höhere Temperaturabhängigkeit.

Zur Unterscheidung der Begriffe Piezoelektrika, Pyroelektrika, Ferroelektrika siehe *Bild 1*.

**Piezoelektrika:** fehlendes Symmetriezentrum  
z.B. Quarz

**Pyroelektrika:** spontane Polarisierung  
z.B. Turmalin

**Ferroelektrika:** spontane Polarisierung,  
Richtung durch elektrisches Feld  
veränderbar, auftreten von Domänen  
z.B. Bariumtitanat, Bleizirkonat-Titanat

**Bild 1:** Begriffserläuterung Piezoelektrika-Pyroelektrika-Ferroelektrika

Die meisten heute kommerziell genutzten piezokeramischen Bauteile bestehen aus Blei-Zirkonat-Titanat (PZT).

### 5.2.3. Herstellung piezokeramischer Bauteile

Bis zum Schleifen unterscheiden sich Piezokeramiken nicht wesentlich von anderen keramischen Materialien. Während bei diesen aber meist nach dem Schleifen der Oberflächen die endgültige Funktionalität erreicht ist, bedarf es bei Piezokeramiken weiterer Schritte. Zunächst muss eine Metallisierung aufgebracht werden, um eine elektrische Kontaktierung zu ermöglichen. Anschließend wird ein starkes elektrisches Feld angelegt (meist  $> 3\text{kV/mm}$ ). Nach diesem, Polung genannten, Vorgang sind die Keramiken piezoelektrisch und können in den verschiedensten Anwendungen eingesetzt werden. Ein Spektrum möglicher Anwendungen ist in folgender Tabelle aufgelistet

direkter piezoelektrischer Effekt	inverser piezoelektrischer Effekt	beide Effekte
mechano- elektrische Wandler <ul style="list-style-type: none"> <li>• Piezotasten</li> <li>• Sensoren</li> </ul> elektro- akustische Wandler <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schall- und Ultraschall-Empfänger: Mikrofone, Hydrofone</li> </ul> Hochspannungsquellen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zündelemente</li> </ul>	Schall- und Ultraschall- Geber <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tongeber</li> <li>• Leistungs Ultraschallgeber</li> </ul> Aktoren <ul style="list-style-type: none"> <li>• Multilayer</li> <li>• Biege- Stäbe und - Membrane</li> </ul> Motoren	Ultraschall-Signalverarbeitung <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sonartechnik</li> <li>• Ultraschall-Materialprüfung</li> <li>• medizinische Diagnostik</li> <li>• Entfernungs- und Füllstands- Messung</li> <li>• Annäherungs- Detektoren</li> <li>• Erkennungs- Systeme</li> </ul>

**Tabelle 1:** Grundprinzipien und Spektrum möglicher Anwendungen

#### 5.2.4. Piezokeramischer Werkstoffe für den Einsatz in Sensoren

Sensorelemente erhalten ihre Sensitivität durch eine einmalige Polung bei der Herstellung. Das bedeutet, dass die Stabilität der remanenten Polarisierung unter Temperatur- und Druckbeanspruchung möglichst groß sein sollte. Dies wird bei modernen Werkstoffen zum einen durch den gezielten Einsatz von Dotierungen, optimierte Gefüge und auch durch entsprechend angepasste Polarisierungsbedingungen erreicht. Eine weitere gewünschte Eigenschaft ist eine geringe Variation der Eigenschaften mit der Temperatur. Bei typischen Temperaturspannen von  $-50$  bis  $150$  °C, wie sie bei vielen Automobilanwendungen gefordert werden, sind Werkstoffe mit geringen Temperaturkoeffizienten erforderlich.

Aufgrund der Vielzahl möglicher Anwendungen (*siehe Tabelle 1*), werden einige Beispiele ausgewählt, die verschiedene Grundprinzipien vermitteln.

#### Klopfensensoren

Diese Sensoren dienen in Motornähe dazu ungleichmäßige Verbrennungen im Motorraum zu detektieren (Klopfen). Der gebräuchlichste Sensor ist als Beschleunigungssensor aufgebaut.

Die durch die ungleichmäßige Verbrennung erzeugte Erschütterung wird als Beschleunigung aufgenommen. Durch eine seismische Mas-

se wird die Beschleunigung in eine Kraft umgewandelt die wiederum durch die Piezokeramik in eine messbare Spannung überführt wird.

### Ultraschallsensoren

Ultraschallwandler werden im Fahrzeug üblicherweise als Luftultraschallwandler zur Abstandsmessung eingesetzt. Eine weit verbreitete Anwendung sind Rückfahr sensoren, die bei Annäherung an ein Hindernis den Fahrer warnen. Diese Luftultraschallwandler bestehen aus einem piezoelektrischen Plättchen das zu Schwingungen angeregt wird (aktiv) und dadurch einen Ultraschallimpuls in der Luft auslöst. Dieser wird durch ein Hindernis reflektiert. Die reflektierte Welle trifft auf das piezoelektrische Plättchen, das nun als Sensor (passiv) wirkt und die Ultraschallwelle wieder in ein elektrisches Signal umwandelt. Durch die Laufzeitmessung und die bekannte Schallgeschwindigkeit in Luft ist der Abstand zum Hindernis dann zu ermitteln. Die Anforderungen an die Piezokeramik in diesem Anwendungsfall ist nicht so stark durch Temperaturwechselbeanspruchung geprägt, als vielmehr eine gute Sendeleistung und eine entsprechende Sensitivität zur Ermittlung des Schalldrucks.

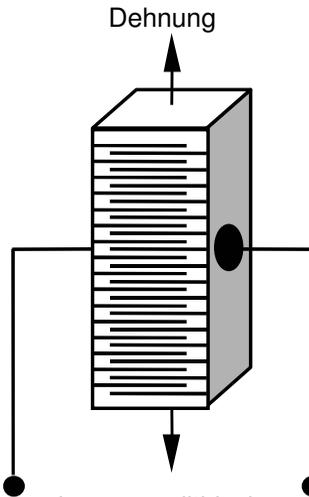
Ultraschallsensoren sind somit aktiv (Sender) als auch passiv (Empfänger).

### 5.2.5. Piezokeramiken als Aktoren

Die bisherigen Beispiele nutzten das sogenannte Kleinsignalverhalten der Piezokeramik aus. Das bedeutet, dass die angelegten bzw. erzeugten Feldstärken sehr viel kleiner als die Polungsfeldstärke sind. Das folgende Beispiel zeigt Bauteile, die bei hohen Feldstärken betrieben werden um Auslenkungen im Bereich von einigen  $\mu\text{m}$  und große Kräfte zu erzeugen: Piezoelektrische Aktoren.

Solche Aktoren finden zum Beispiel Einsatz in Einspritzsystemen bei Dieselmotoren.

Der Aufbau ist aus *Bild 2* zu entnehmen. Die interdigital angeordneten Innenelektroden werden wechselseitig an eine Außenfläche geführt und dort kontaktiert. Die Aktoren bestehen aus bis zu 400 piezokeramischen Lagen. Dieser Aufbau ist analog zu keramischen Vielschichtkondensatoren. Somit sind die einzelnen Keramiksichten elektrisch parallel geschaltet. Die Einzelkapazitäten addieren sich.



**Bild 2:** Aufbau eines monolithischen multilayer Aktors



**Bild 3:** Piezoelektrische Multilayeraktoren

Mechanisch sind die Auslenkungen in Reihe geschaltet, das bedeutet, die Auslenkungen der einzelnen Schichten addieren sich. So können je nach Bauhöhe Auslenkungen von 5 bis 50 (80)  $\mu\text{m}$  erzielt werden. Je nach Grundfläche und sonstigem Aufbau liegen die Kräfte typisch zwischen 1.000 und 3.000 N. Die Bewegung folgt dem elektrischen Feld äußerst schnell, es sind Ansprechzeiten bis zu wenigen  $\mu\text{s}$  erreichbar.

Typische Aktoren sind in Bild 3 gezeigt. Die Länge des längsten Bauteils beträgt ca. 50 mm.

### 5.2.5. Zusammenfassung

Piezokeramische Werkstoffe finden heute eine Vielzahl von Anwendungen. Das Spektrum reicht dabei von Ultraschallerzeugung über Kraft- und Beschleunigungssensoren bis hin zu aktorischen Anwendungen wie beispielsweise Fadenführungen bei Textilmaschinen (Biegeelemente) oder Stellelemente für Positionieraufgaben (sogenannte Piezostacks). Diese Vielfalt von Anwendungen spiegelt sich auch im Einsatz im Automobil wieder. Hier gibt es eine Reihe von Bauteilen die heute Standard sind. Hierzu zählen beispielsweise die Klopfensensoren, die Ultraschallsensoren für die Einparkhilfen und Multilayeraktoren, die es erlauben Dieselmotoren verbrauchs- und abgasoptimiert zu betreiben.

Des Weiteren gibt es Anwendungen, die heute noch nicht realisiert sind, aber in der Zukunft eine wichtige Rolle spielen können. Hier sind aktive Schwingungsdämpfungen mittels Piezokeramiken oder schnelle Druckmessungen denkbar. Einige Bauteile, wie z. B. Piezomotoren oder piezoelektrische Fasern, sind immer noch Entwicklungsgegenstand, auch wenn sich schon vereinzelt Anwendungen gefunden haben.

Die einzelne Anwendung stellt jeweils spezifische Anforderungen an die Bauteile, so dass sich schon in einem frühen Entwicklungsstadium eine enge Zusammenarbeit zwischen Anwender und Piezokeramikhersteller empfiehlt.

### 5.2.6. Literaturverzeichnis

- [RUSCHMEYER] Ruschmeyer, K (Hrsg.); Piezokeramik: Grundlagen, Werkstoffe, Applikationen; Renningen-Malmsheim: expert-Verlag 1995
- [CERAMTEC] Piezoelektrische Bauteile, CeramTec AG, Geschäftsbereich Piezotechnik

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 15) finden sich auf den folgenden Seiten.

# Piezoelektrische Materialien und Anwendungen

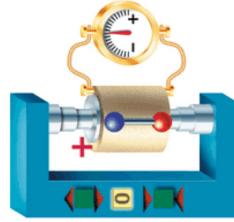
Dipl.-Ing. Claudia Voigt  
CeramTec  
Lauf a. d. Pegnitz



## Theoretische Grundlagen

Der piezoelektrische Effekt:

- Kopplung von mechanischen und elektrischen Größen
- Direkter piezoelektrischer Effekt: mechanische Belastung bewirkt eine Verschiebung der Ladungsträger und damit einen Potentialunterschied (Spannung) → Sensorik
- Inverser piezoelektrischer Effekt: ein elektrisches Feld bewirkt eine Verformung → Aktorik



## Theoretische Grundlagen



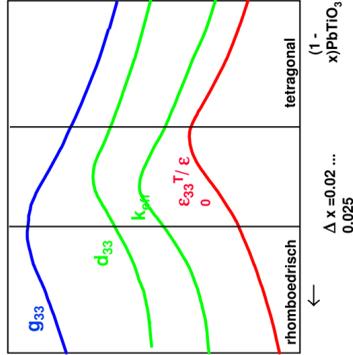
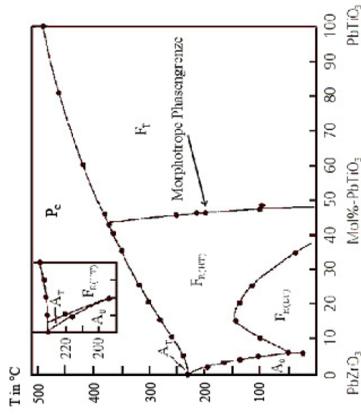
Piezoelektrika: fehlendes Symmetriezentrum	z. B. Quarz	Kraftmessdose
Pyroelektrika: spontane Polarisation	z. B. Turmalin	Pyrosensoren
Ferroelektrika: Richtung durch elektrisches Feld änderbar	z. B. PZT	Sensoren, Aktoren

- Technisch interessant sind die „nur“ piezoelektrischen Materialien (Quarz in Kraftmessdosen und Uhren) und die ferroelektrischen Materialien – nur letztere zählen zu den Keramiken
- Wichtigsten ferroelektrischen Materialien sind Blei-Zirkonat-Titanat und Bariumtitanat

## Theoretische Grundlagen

### System PZT:

Blei-Zirkonat-Titanat ist eine feste Lösung

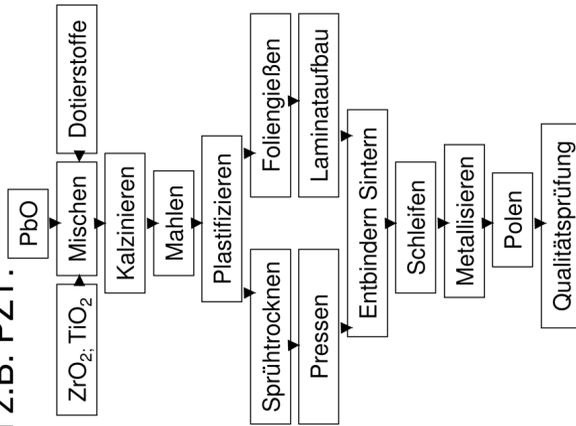


Je nach Anwendung wird Zusammensetzung gewählt:

- Zr-Ti Verhältnis
- Dotierstoffe

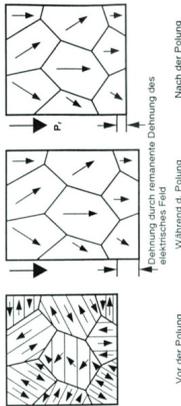
## Theoretische Grundlagen

Herstellung von z.B. PZT:



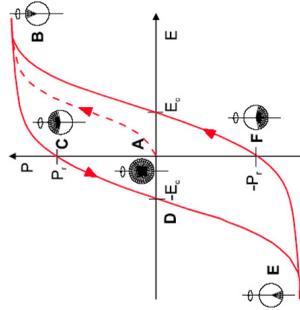
# Theoretische Grundlagen

## Polarisation:



## Piezelektrische Kenngrößen:

Bezeichnung	Symbol	physikalische Bedeutung
Curie-Temperatur	$T_C$	Temperatur des Phasenübergangs vom ferroelektrischen in den paraelektrischen Zustand
mechanische Güte	$Q_m$	Maß für mechanische Verluste
Dielektrizitätszahl	$\epsilon/\epsilon_0$	Maß für die elektrische Verschiebung im Material bei gegebenem elektrischem Feld
dielektrischer Verlustfaktor	$\tan \delta$	Maß für die dielektrischen Verluste
elektromechanischer Kopplungsfaktor	$k_{33}$	$ k_{33} ^2$ ist das Verhältnis aus umgewandelter, gespeicherter Energie zu gesamer, gespeicherter Energie
piezelektrische Ladungskonstante	$d$	Maß für die mechanische Deformation bei gegebenem elektrischem Feld bzw. dielektrische Verschiebung bei gegebener mechanischen Spannung
piezelektrische Spannungskonstante	$g$	Maß für die erzeugte Spannung bei gegebener mechanischer Belastung bzw. der Deformation bei gegebener Spannung
Kleinsignal-Kapazität	$C_{(KS)}$	Kapazität bei el. Feld $<10V/mm$
Großsignal-Kapazität	$C_{(GS)}$	Kapazität bei el. Feld $>>10V/mm$



Quelle: A. Schläpferle „Ferroelektrische Eigenschaften von PZT-Keramiken“ VDI Fortschrittsberichte

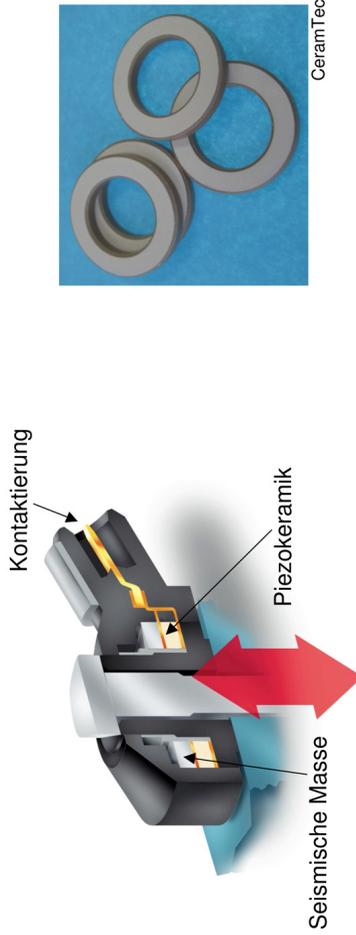
## Anwendungen

### Übersicht:

Direkter piezoelektrischer Effekt	Inverser piezoelektrischer Effekt	Beide Effekte
Mechano- elektrische Wandler	Schall- und Ultraschall- Geber	Ultraschall- Signalverarbeitung
<ul style="list-style-type: none"><li>• Piezotasten</li><li>• Sensoren</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tongeber</li><li>• Leistungs Ultraschallgeber</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sonartechnik</li><li>• Ultraschall-Materialprüfung</li><li>• medizinische Diagnostik</li><li>• Entfernung- und Füllstands- Messung</li><li>• Annäherungs- Detektoren</li><li>• Erkennungs- Systeme</li></ul>
Elektro- akustischeWandler	Aktoren	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Schall- und Ultraschall- Empfänger: Mikrofone, Hydrofone</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Multilayer</li><li>• Biege- Stäbe und - Membrane</li></ul>	
Hochspannungsquellen:	Motoren	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Zündelemente</li></ul>		

## Anwendungen

### Klopfsensor:

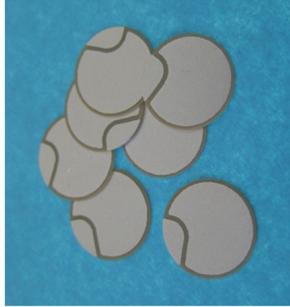
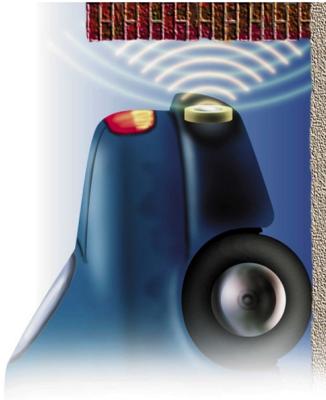


Tritt im Motor sogenanntes "Klopfen" auf, weil Benzin mit einer anderen Oktanzahl getankt wurde, oder sich die Betriebsbedingungen geändert haben, wird dieses Signal von der Auswertelektronik erfasst und das Zündkenntfeld entsprechend nachgeregelt. Durch diese intelligente Motorsteuerung kann die Verbrennung immer sehr nah an der Klopfgrenze betrieben werden. Das Ergebnis: eine Senkung des Brennstoffverbrauchs.

### Anwendungen



#### Rückfahrsensor:



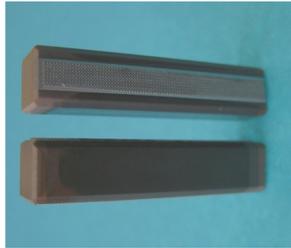
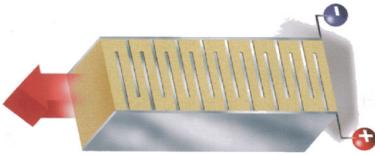
CeramTec

Der piezokeramische Wandler sendet einen kurzen Luft-Ultraschallimpuls, der vom Hindernis reflektiert und vom gleichen Piezowandler wieder empfangen wird. Über die Laufzeit kann die Entfernung zum Hindernis bestimmt werden. Derartige Sensoren finden als Einparkhilfe im Kfz-Bereich Verwendung.

## Anwendungen



### Einspritzsysteme mit Multilayeraktoren:



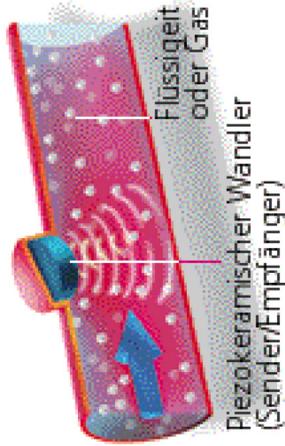
CeramTec



Bosch  
Solche Aktoren finden zum Beispiel Einsatz in Einspritzsystemen bei Dieselmotoren. Sie können je nach Bauhöhe Auslenkungen von 5 bis 50  $\mu\text{m}$  erzielen. Je nach Grundfläche und sonstigem Aufbau liegen die Kräfte typisch zwischen 1000 und 3000 N. Die Bewegung folgt dem elektrischen Feld äußerst schnell, es sind Ansprechzeiten bis zu wenigen  $\mu\text{s}$  erreichbar, wodurch mehrstufiger Einspritzverlauf realisierbar ist.

## Anwendungen

### Durchflussmessung:



### Dopplermessverfahren

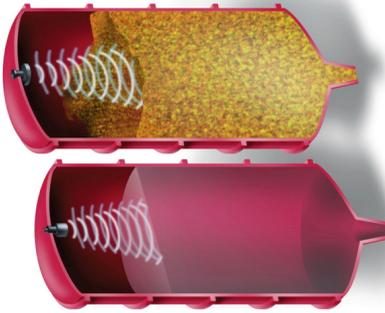
### Mitfühprinzip

Beim Dopplereffekt wird die Frequenzverschiebung der Ultraschallwellen ausgewertet, die von Streuteilchen, die sich in der Flüssigkeit befinden, reflektiert werden. Je größer die Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit, desto größer ist die Frequenzverschiebung zwischen abgestrahlter und reflektierter Wellenfront.

Beim Mitfühprinzip werden immer zwei piezokeramische Wandler eingesetzt, die versetzt zur Strömungsrichtung positioniert sind. Diese senden bzw. empfangen wechselseitig pulsartige Ultraschallwellenpakete gegen die Strömung und mit der Strömung. Es ergibt sich jeweils eine entsprechende Überlagerung von Schallausbreitungsgeschwindigkeit und Strömungsgeschwindigkeit. Die Strömungsgeschwindigkeit ist dann proportional zum Kehrwert der Laufzeitdifferenz mit und gegen die Strömung.

## Anwendungen

### Füllstandsmessung:



CeramicTec

Bei Füllstandssensoren gibt es grundsätzlich zwei unterschiedliche Messsysteme. Das eine funktioniert über die Lautzeitmessung eines ausgesandten und vom Füllgut reflektierten Luftultraschallimpulses. Ein zweites Messprinzip zur Füllstandsmessung sind die sogenannten Tauchschwinger. Eine Stimmgabel aus Metall wird von einem piezokeramischen Plättchen in ihrer Eigenresonanzfrequenz angeregt. Diese Eigenresonanzfrequenz ist vom umgebenden Medium abhängig. Taucht die Stimmgabel beispielsweise in eine Flüssigkeit oder ein Pulver ein, ändert sich die Resonanzfrequenz des System. Diese Frequenzänderung wird von der Auswertelektronik erfasst.

### Anwendungen



### Ultraschallreinigung:

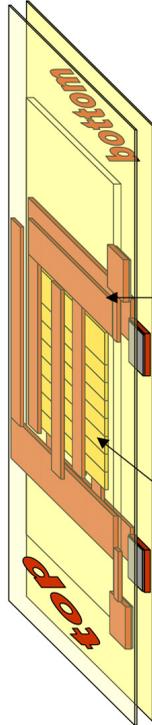


CeramTec

Wirkungsprinzip ist, dass in einer Reinigungsflüssigkeit mittels Leistungs-Ultraschall Kavitation erzeugt wird. Kavitation ist die Bildung kleinster lokaler Gasblasen auf Grund von Druckunterschieden in der Flüssigkeit, die nach sehr kurzer Zeit wieder implodieren. Diese Kavitation sorgt an der verschmutzten Oberfläche des Füllgutes für eine intensive Reinigung, auch bei komplizierten Formen. Die Ultraschallenergie wird über Boden und Wände der Reinigungswanne oder über eingehängte Tauchschwinger in die Reinigungsflüssigkeit abgestrahlt.

# Anwendungen

## Macro Fiber Composite (MFC):



Ausgerichtete piezokeramische Fasern

Elektrodenmuster auf Polyimidfilm



Einsatz:

- Vibrationsdämpfung (Einsatz als adaptives System)
- Mikropositionierung
- Energy Harvesting

Vorteile:

- Flexibel und robust
- Fehlertolerant

## Literaturverzeichnis



**Ruschmeyer, K.;** Piezokeramik:Grundlagen, Werkstoffe, Applikationen;  
Renningen-Malmsheim: expert-Verlag 1995

**Jaffe,B., Cook, W.R., Jaffe, H.;** Piezoelectric Ceramics; London, New York  
1979

**DKE;** Piezoelektrische Eigenschaften von keramischen Werkstoffen und  
Komponenten,  
Teil 1-3; DIN EN 50324-1; DIN EN 50324-2; DIN EN 50324-3; 2002

**Koch, J.;** Oiezoide (PXE) Eigenschaften und Anwendungen, Philips, 1988