

Алматы (727)345-47-04  
Ангарск (3955)60-70-56  
Архангельск (8182)63-90-72  
Астрахань (8512)99-46-04  
Барнаул (3852)73-04-60  
Белгород (4722)40-23-64  
Благовещенск (4162)22-76-07  
Брянск (4832)59-03-52  
Владивосток (423)249-28-31  
Владикавказ (8672)28-90-48  
Владимир (4922)49-43-18  
Волгоград (844)278-03-48  
Вологда (8172)26-41-59  
Воронеж (473)204-51-73  
Екатеринбург (343)384-55-89

Иваново (4932)77-34-06  
Ижевск (3412)26-03-58  
Иркутск (395)279-98-46  
Казань (843)206-01-48  
Калининград (4012)72-03-81  
Калуга (4842)92-23-67  
Кемерово (3842)65-04-62  
Киров (8332)68-02-04  
Коломна (4966)23-41-49  
Кострома (4942)77-07-48  
Краснодар (861)203-40-90  
Красноярск (391)204-63-61  
Курск (4712)77-13-04  
Курган (3522)50-90-47  
Липецк (4742)52-20-81

Магнитогорск (3519)55-03-13  
Москва (495)268-04-70  
Мурманск (8152)59-64-93  
Набережные Челны (8552)20-53-41  
Нижний Новгород (831)429-08-12  
Новокузнецк (3843)20-46-81  
Ноябрьск (3496)41-32-12  
Новосибирск (383)227-86-73  
Омск (3812)21-46-40  
Орел (4862)44-53-42  
Оренбург (3532)37-68-04  
Пенза (8412)22-31-16  
Петрозаводск (8142)55-98-37  
Псков (8112)59-10-37  
Пермь (342)205-81-47

Ростов-на-Дону (863)308-18-15  
Рязань (4912)46-61-64  
Самара (846)206-03-16  
Санкт-Петербург (812)309-46-40  
Саранск (8342)22-96-24  
Саратов (845)249-38-78  
Севастополь (8692)22-31-93  
Симферополь (3652)67-13-56  
Смоленск (4812)29-41-54  
Сочи (862)225-72-31  
Ставрополь (8652)20-65-13  
Сургут (3462)77-98-35  
Сыктывкар (8212)25-95-17  
Тамбов (4752)50-40-97  
Тверь (4822)63-31-35

Тольятти (8482)63-91-07  
Томск (3822)98-41-53  
Тула (4872)33-79-87  
Тюмень (3452)66-21-18  
Улан-Удэ (3012)59-97-51  
Ульяновск (8422)24-23-59  
Уфа (347)229-48-12  
Хабаровск (4212)92-98-04  
Чебоксары (8352)28-53-07  
Челябинск (351)202-03-61  
Череповец (8202)49-02-64  
Чита (3022)38-34-83  
Якутск (4112)23-90-97  
Ярославль (4852)69-52-93

Россия +7(495)268-04-70

Казахстан +7(727)345-47-04

Беларусь +(375)257-127-884

Узбекистан +998(71)205-18-59

Киргизия +996(312)96-26-47

<https://ceramtec.nt-rt.ru> || [cgc@nt-rt.ru](mailto:cgc@nt-rt.ru)



# Hochleistungskeramik in der Piezotechnik

## Advanced Ceramics in Piezo Applications

**CeramTec**  
THE CERAMIC EXPERTS

# Immer aktiv: Keramik in der Piezotechnik

## A Powerful Presence – Ceramics in Piezo Applications

2

Piezokeramiken dienen der Umwandlung von mechanischen Größen, wie Druck und Beschleunigung, in elektrische Größen oder umgekehrt von elektrischen Signalen in mechanische Bewegung oder Schwingungen.

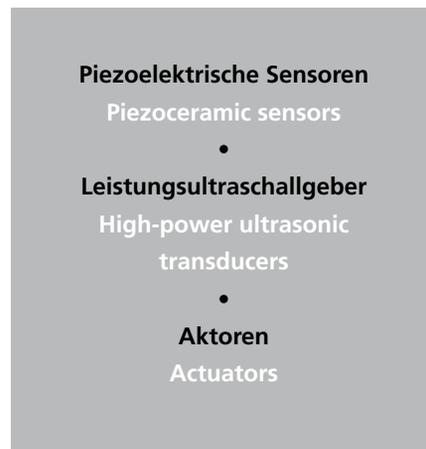
Piezokeramische Bauteile kommen für unterschiedlichste elektromechanische Wandler in einem weiten Frequenzbereich zum Einsatz. Sie ermöglichen in Sensoren die Umwandlung von Kräften, Drücken und Beschleunigungen in elektrische Signale und bei Schall- und Ultraschallgebern die Umwandlung von elektrischen Spannungen in Schwingungen oder Deformationen.

In der Automobiltechnik sorgen Sensoren für die Sicherheit der Insassen und für eine intelligente Motorsteuerung.

In der Ultraschalltechnik werden mit piezokeramischen Bauteilen einerseits hohe Ultraschallintensitäten erzeugt, die zum Reinigen und zum Bohren mit Ultraschall, in der Ultraschall-Schweißtechnik oder auch zur Stimulierung von chemischen Prozessen genutzt werden. Andererseits finden piezokeramische Bauteile als Sender und Empfänger von Ultraschall in vielen Bereichen der Signal- und Informations-Verarbeitung Verwendung. Piezokeramische Bauteile ermöglichen Ultraschallortung in der Sonartechnik, Abstandsmessung, zerstörungsfreier Materialprüfung und medizinischen Diagnostik.

Die Funktion piezokeramischer Aktoren beruht auf der Tatsache, dass Deformationen im Mikrometerbereich erzeugt werden können. Dieses Verhalten eröffnet neue Anwendungsmöglichkeiten elektromechanischer Wandler als Antriebe für hydraulische und pneumatische Ventile, Positioniersysteme, Mikromanipulatoren und Dosiersysteme für Flüssigkeiten und Gase.

Bei dieser großen Vielfalt der Anwendungsmöglichkeiten ist es sinnvoll, schon in der Entwicklungsphase neuer Systeme und Verfahren mit den Experten der CeramTec in Kontakt zu treten. Als Ansprechpartner stehen erfahrene Mitarbeiter zur Verfügung. Im Dialog werden Einsatzbedingungen, Anforderungskriterien sowie konstruktive Bedingungen herausgearbeitet und wirtschaftliche Problemlösungen angeboten. Moderne Herstellungsverfahren ermöglichen die Fertigung piezokeramischer Bauteile mit höchster Qualität und in großen Stückzahlen. Ein unternehmensweites Qualitätsmanagement sorgt dafür, dass die angebotenen Produkte die Erwartungen der Kunden voll erfüllen.



Elektronischer Ölstandssensor mit Piezokeramik

Electronic oil level sensor with piezoceramics

Piezoceramics are capable of converting mechanical quantities such as pressure and acceleration into electrical quantities or, conversely, of transforming electrical signals into mechanical movement or oscillations.

Piezoceramic components are used in a broad spectrum of electromechanical transducers covering a wide frequency range. In sensors, they enable the conversion of forces, pressures and accelerations to electrical signals. In sound generators and ultrasonic transducers, they transform voltages into oscillations or deformations.

In automotive engineering, sensor systems assure the safety of occupants and provide intelligent engine control capabilities.

In ultrasonic applications, piezoceramic components generate high-power ultrasonic waves for ultrasonic cleaning, drilling and welding and for stimulating of chemical processes. On the other hand, piezoceramics are found in many signal and information processing solutions in the form of ultrasonic receivers and transmitters. They also play a key role in advanced sonar locating and ranging, non-destructive material testing, and medical diagnostic equipment.

The operation of piezoceramic actuators relies on the ability of piezo elements to produce controlled deformation in the micrometer range. This characteristic enables new applications for electromechanical transducers as drivers in hydraulic and pneumatic valves, positioning systems, micromanipulators, and proportioning systems for liquid and gaseous media.

Given this broad diversity of applications, it is recommended to discuss with CeramTec's experts at the development stage of a new product or system. Our experienced staff will gladly assist. In dialogue with your company's experts, CeramTec can help to specify application conditions, requirement criteria and design prerequisites, and to propose cost-effective solutions. Advanced manufacturing methods enable CeramTec to produce piezoceramic components of unsurpassed quality in large volume. CeramTec's companywide quality management system assures that its products and services will be fully in line with customer's expectations.

# Produkte & Tätigkeitsfelder

## Products & Market Sectors

4

### Sicherheit und Verteidigung

CeramTec ist führend in der Entwicklung und Herstellung von elektrokeramischen Produkten für den Sicherheits- und Verteidigungsbereich und hat in den letzten Jahrzehnten hochpräzise und zuverlässige Komponenten für Land-, Luft- und Seeanwendungen entwickelt und geliefert. Unsere piezoelektrischen Keramiken und Wandler werden in hochkomplexen Anwendungen eingesetzt, darunter Sonar-, Mess- und Kommunikationssysteme, bei denen die Kennwerte von entscheidender Bedeutung sind.

Piezoelektrische Keramikkomponenten und Wandler sind ein wesentlicher Bestandteil von Sonarsystemen, die zur Erkennung von Unterwasserobjekten und zur Unterstützung der Unterwassernavigation und -kommunikation eingesetzt werden.

Unsere Komponenten bieten ein hohes Maß an Genauigkeit für die Erkennung und Erfassung unter Wasser, und durch die Entwicklung piezoelektrischer Verbundstrukturen konnte die Bildauflösung von Sonarsystemen verbessert werden.

Unsere piezoelektrische Keramik findet sich auch in Hydrophonen, Torpedoleitsystemen, Sonobojen, Gyroskopen, Minensuchgeräten und im Hafenschutz wieder; unsere Wandler werden eingesetzt, um genaue Messwerte für die Flugzeuginstrumentierung und Triebwerksüberwachung zu liefern.

Unsere piezokeramischen Komponenten sind vielseitig verwendbar, langlebig und stabil auch unter widrigen Umgebungsbedingungen und damit ideal für den Einsatz in unseren kundenspezifischen Sensor- und Wandler-Systemen. Viele Seestreitkräfte der Welt verwenden unsere Spezialmaterialien für ihre Sonarsysteme.

### Security and Defence

CeramTec is a leader in the design and manufacture of electroceramics products for the security and defence markets, having developed and supplied precise and accurate components for air, land and sea applications for the past decades. Our piezoelectric ceramics and transducers are used in highly specialized applications, including sonar, instrumentation and communications systems where performance is critical.

Piezoelectric ceramic components and transducers are an essential part of sonar systems used to detect underwater objects and assist in underwater navigation and communication. Our components give a high degree of accuracy for sub-sea detecting and sensing and the development of piezoelectric composite structures has improved the image resolution of sonar systems.

Our piezoelectric ceramic is also found in hydrophones, torpedo guidance systems, sonobuoy, gyroscopes, mine detection systems and harbour protection and our transducers are used to give accurate readings in aircraft instrumentation and engine monitoring.

Our piezoceramic components are versatile, durable and stable even in difficult operating conditions, making them ideal for use in our custom sensor and transducer systems. Many of the world's navies specify our specialist materials for their sonar systems.



## Medizin

CeramTec ist weltweit führend in der Entwicklung und Herstellung von piezoelektrischer Keramik, Sensoren, Wandlern und dielektrischen Komponenten für den medizinischen Markt, einschließlich medizinischer Instrumente, therapeutischer und diagnostischer Geräte sowie chirurgischer Werkzeuge, und im Bereich Geräte für Arzneimitteldosierung und Dialyse.

Unsere hochentwickelten piezoelektrischen Keramikkomponenten ermöglichen eine höhere Auflösung von Ultraschallbildern und werden häufig für Ultraschallgeräte in der Medizin eingesetzt. Sie stellen ebenfalls die Schlüsseltechnologie in Anwendungen, z. B. für die Blutflussmessung und Herzmessgeräte für Föten, dar und garantieren eine hohe Zuverlässigkeit und präzise Erfassung. Das hochleistungsfähige piezoelektrische Material wird bei der Leistungsübertragung von Hochfrequenzwellen zur Unterstützung des chirurgischen Schneidens verwendet. Wir bieten effiziente Materialien und vollständige Wandler für kleine medizinische Geräte, wie z. B. Ultraschallentkalker und Ultraschallskalpelle, die unter anderem bei der Kataraktextraktion eingesetzt werden.

Unsere Produktpalette an Sensoren zur Erkennung von Luftblasen und Druckschwankungen ist eine wesentliche Komponente für Infusions- und Dialysegeräte und rettet Patienten auf der ganzen Welt das Leben.

## Medical

CeramTec is a world leader in the design and manufacture of piezoelectric ceramic, sensors, transducers and dielectric components for the medical market, including medical instrumentation, therapeutic and diagnostic equipment, surgical tools and in drug delivery and dialysis equipment.

Our superior piezoelectric ceramic components enable increased resolution of ultrasonic imaging and are used extensively in medical ultrasound. They are also the key technology in applications such as blood flow measurement and foetal heart monitors, providing increased reliability and accurate detection.

The high performance piezoelectric material is used in power transmission of high frequency waves to assist with surgical cutting. We supply efficient materials and complete transducers for small medical tools such as ultrasonic dental scalers and ultrasonic scalpels, which are used in applications such as cataract removal.

Our range of sensors designed to detect air bubbles and changes in pressure are critical components for infusion and dialysis equipment, protecting the lives of patients around the globe.



# Produkte & Tätigkeitsfelder

## Products & Market Sectors

6

### Industrie

CeramTec verfügt über jahrzehntelange Erfahrung in der Herstellung von piezoelektrischen Keramikbauteilen, Sensoren, Wandlern und dielektrischen Komponenten für den Industrieausrüstungssektor.

Präzisionsgefertigte piezokeramische Scheiben werden von vielen Erstausrüstern zur automatischen Füllstands- und Entfernungsmessung in Industrieanlagen sowie für Gas- und Flüssigkeitsströmungs- und Füllstandsmesssysteme eingesetzt. Geräte zur zerstörungsfreien Prüfung und viele Hochleistungs-Ultraschallanwendungen, z. B. für Ultraschallreinigung, Schweißen, Inspektion und Sonochemie, verwenden ebenfalls unsere piezoelektrischen Keramiken als Wandler. Piezokeramische Bimorphe werden als Betätigungselemente in einer Vielzahl von industriellen Anwendungen wie Tintenstrahl Druckköpfen und Viskositätsmessgeräten eingesetzt. Sie kommen auch in Münz- und Banknotenprüfsystemen zur Anwendung. In Zusammenarbeit mit unseren Kunden entwickeln wir maßgeschneiderte Lösungen für spezifische industrielle Anforderungen. Mit unserem Fachwissen in den Bereichen Konstruktion und Spezialfertigung können wir Komponenten nach strengen Vorgaben in jeder gewünschten Menge herstellen.

### Industrial

CeramTec has decades of experience in the manufacture of piezoelectric ceramic components, sensors, transducers and dielectric components for the industrial equipment market.

Precision-machined piezoceramic disk are used by many OEMs for automatic level and distance sensing in industrial equipment and for gas and liquid flow and level measurement systems.

Non-destructive testing equipment and many high power ultrasonic applications such as ultrasonic cleaning, welding, inspection and sono-chemistry also use our piezoelectric ceramics as transducers.

Piezoceramic bimorphs are used as actuators in a wide range of industrial applications such as inkjet printer heads and viscosity meters. They are also used in coin and bank notes validation systems.

We work in partnership with our customers to develop tailored solutions for specific industrial needs. Using our design expertise and specialist manufacturing capabilities, we can produce components within tight specifications in whatever quantity is required



## Energie

CeramTec liefert piezoelektrische Komponenten für modernste Energiemanagementsysteme und fortschrittlichste Smart-Metering-Technologien. Von Smart Metering bis hin zu Energy Harvesting bieten wir Lösungen an, die Konstrukteure und Hersteller dabei unterstützen, neue Standards für eine effiziente Bereitstellung von sauberem und umweltfreundlichem Strom auf der ganzen Welt zu erfüllen. Unsere piezoelektrischen Keramikkomponenten, Sensoren und Wandler werden in Hochleistungs-Ultraschallzählern zur Bestimmung von Gas- und Wasserdurchflussmessungen für anspruchsvolle Wärme- und Smart-Metering-Technologien eingesetzt.

Unsere überlegenen piezokeramischen Bimorphe werden in Energiegewinnungsgeräten eingesetzt und ermöglichen die effiziente Umwandlung von mechanischer Energie in elektrische Energie. Energieerzeugung, -management und -verteilung ist wohl eine der sich am schnellsten entwickelnden Industrien der Neuzeit, und wir arbeiten eng mit unseren Kunden zusammen, um innovative Komponenten und Unterbaugruppen für den gesamten Energiesektor bereitzustellen.

## Energy

CeramTec supplies piezoelectric components for the latest energy management systems and for the most advanced smart metering technologies. From smart metering to energy harvesting, we provide solutions to help designers and manufacturers meet new standards for efficient delivery of cleaner, greener power all over the world.

Our piezoelectric ceramic components, sensors and transducers are used in high performance ultrasonic meters to determine gas and water flow measurements for sophisticated heat and smart metering technologies.

Our superior piezoceramic bimorphs are used in energy harvesting devices, enabling the efficient conversion of mechanical energy to electrical energy.

Energy generation, management and distribution is arguably one of the fastest evolving industries of modern times and we are working closely with customers to provide innovative components and sub-assemblies across the power sector.

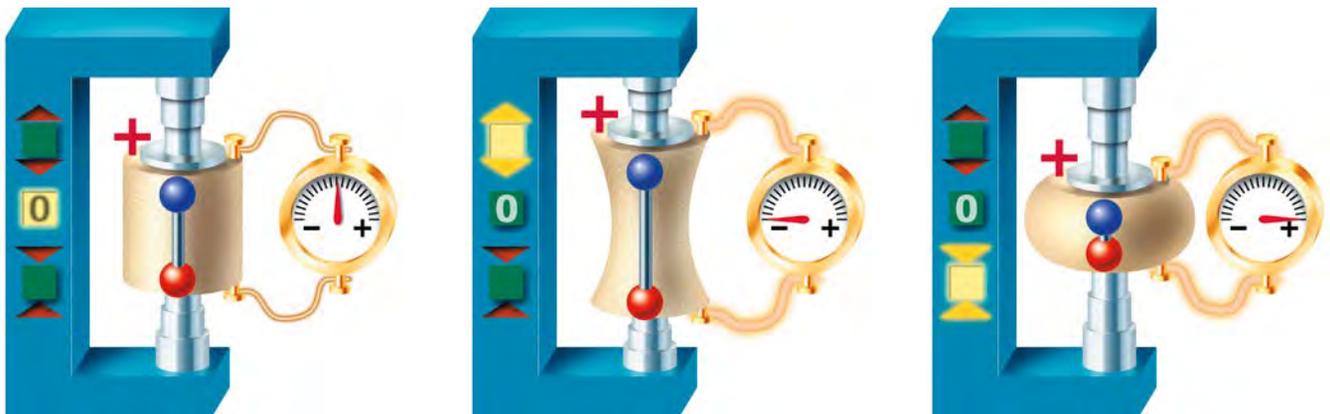


# Grundlagen der keramischen Piezotechnik

## Fundamentals of Piezoceramics

### Direkter piezoelektrischer Effekt

Direct piezoelectric effect



### Piezoelektrizität: spannend von Grund auf

Unter Piezoelektrizität versteht man die Eigenschaft bestimmter Kristalle, bei mechanischer Deformation infolge Druck oder Zug elektrische Ladungen freizusetzen (direkter Piezoeffekt). Die Umkehrung dieses Vorgangs, nämlich die Erzeugung mechanischer Deformationen durch elektrische Felder, bezeichnet man als den inversen Piezoeffekt.

Die Polarität der Ladung hängt von der Orientierung des Kristalls bezüglich der Richtung des Druckes ab.

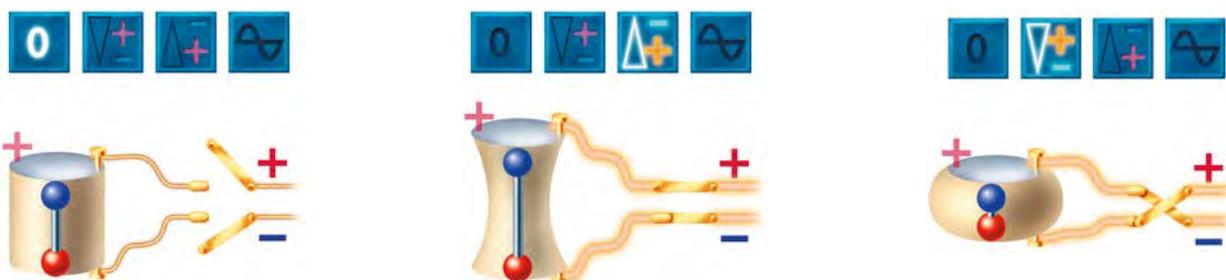
### Piezoelectricity: performance under strain

Piezoelectricity is based on the ability of certain crystals to generate an electrical charge when mechanically loaded with pressure or tension (direct piezo effect). Conversely, these crystals undergo a controlled deformation when exposed to an electric field – a behavior referred to as the inverse piezo effect.

The polarity of the charge depends on the orientation of the crystal relative to the direction of the pressure.

### Inverser piezoelektrischer Effekt

Inverse piezoelectric effect



### Die Struktur des Perowskit

Keramiken, die den Piezoeffekt zeigen, gehören zur Gruppe der Ferroelektrika. Heute werden fast ausnahmslos Systeme auf Bleizirkonat-Titanat-Basis (PZT) verwendet, also Mischkristalle aus Bleizirkonat ( $\text{PbZrO}_3$ ) und Bleititanat ( $\text{PbTiO}_3$ ).

Ein piezokeramisches Bauelement ist ein polykristallines Gebilde, also aus einer Vielzahl von Kristalliten (Domänen) aufgebaut, die wiederum aus einer Vielzahl von Elementarzellen bestehen.

Die Elementarzellen dieser ferroelektrischen Keramiken haben die Kristallstruktur des Perowskit, die allgemein mit der Strukturformel  $\text{A}^{2+}\text{B}^{4+}\text{O}_3^{2-}$  beschrieben werden kann.

Zur näheren Erläuterung werden in den folgenden Abbildungen zwei alternative Ansichten einer Elementarzelle der Gitterstruktur gezeigt. Die zweite ist im Vergleich zur vorherigen Abbildung verschoben, sodass die Anionen jetzt in den Flächenzentren des Würfels liegen und sich das vierwertige Kation im Raumzentrum befindet, während die zweiwertigen Kationen an den Ecken des Würfels positioniert sind. Oberhalb der Curietemperatur ( $T_c$ ) ist dieses Gitter kubisch raumzentriert (obere und untere linke Abbildung S. 6).

Unterhalb der Curietemperatur verzerrt sich das Gitter, und es verschieben sich die Ladungsschwerpunkte, wodurch ein permanentes Dipolmoment entsteht (rechte Abbildung S. 6). Man spricht hier auch von spontaner Polarisation. Die Verzerrung des Gitters kann bei PZT je nach molarem Zr/Ti-Verhältnis tetragonal oder rhomboedrisch sein.

### The perovskite structure

Ceramics exhibiting piezoelectric properties belong to the group of ferroelectric materials. Today's systems are based mostly on lead zirconate titanate (PZT), i.e., they consist of mixed crystals of lead zirconate ( $\text{PbZrO}_3$ ) and lead titanate ( $\text{PbTiO}_3$ ).

Piezoceramic components have a polycrystalline structure comprising numerous crystallites (domains) each of which consists of a plurality of elementary cells.

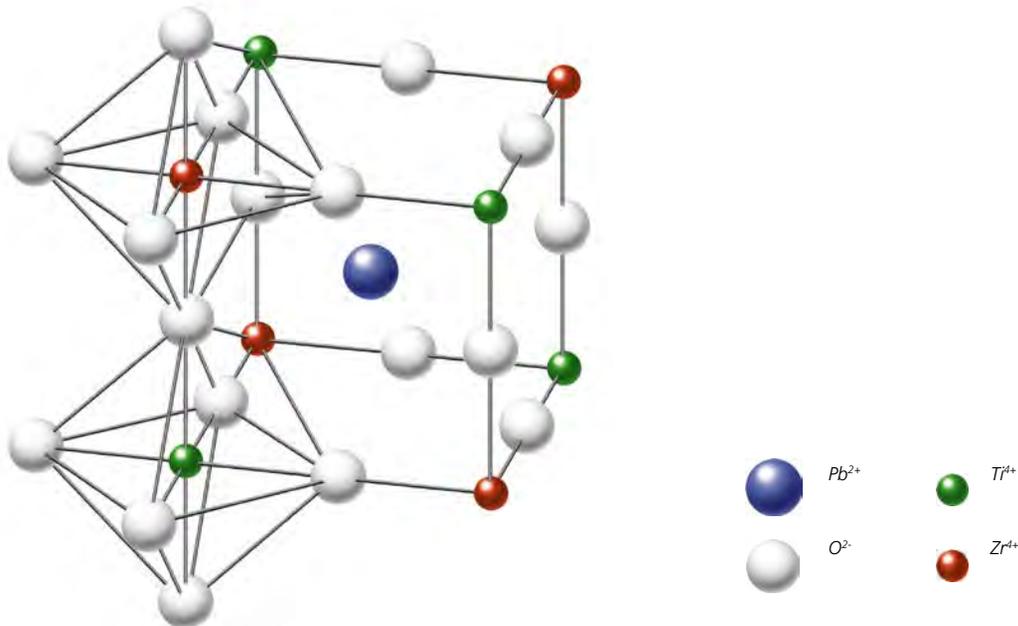
The elementary cells of these ferroelectric ceramics exhibit the perovskite crystal structure, which can generally be described by the structural formula  $\text{A}^{2+}\text{B}^{4+}\text{O}_3^{2-}$ .

For greater clarity, the following graphics show two alternative views of an elementary cell of this lattice structure. In the second view, the structure has been shifted from its previously shown position, so that now the anions lie in the center of the cube faces and the tetravalent cation is body-centered, while the bivalent cations are located at the corners of the cube. At temperatures above the Curie point ( $T_c$ ), this lattice is of the "body-centered cubic" type top and lower left diagrams, p. 6.

At temperatures below the Curie point, the lattice becomes distorted and the center of charge gets shifted which gives rise to a permanent dipole momentum (right diagram p. 6). This phenomenon is referred to as "spontaneous polarization". In the case of PZT, the lattice distortion may be either tetragonal or rhombohedral, depending on the Zr/Ti molar ratio.

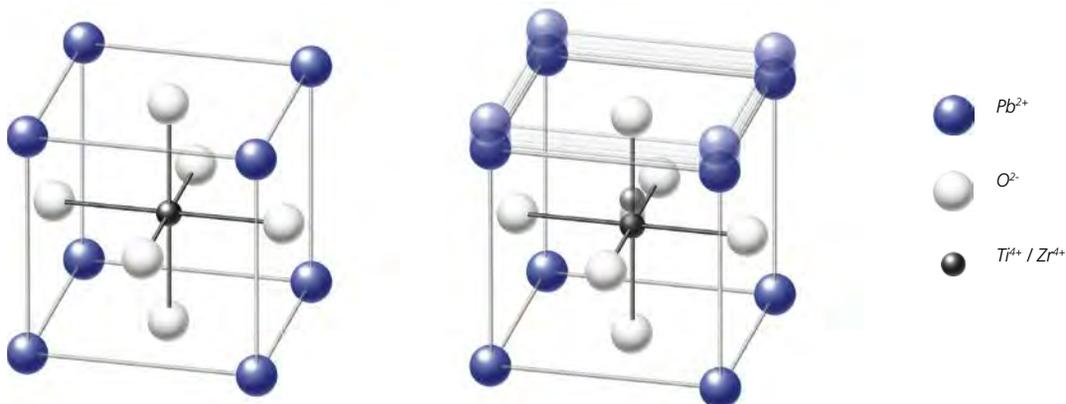
# Grundlagen der keramischen Piezotechnik

## Fundamentals of Piezoceramics



Schematische Darstellung der idealen Perowskitstruktur unter Vernachlässigung der auftretenden Verzerrungen durch spontane Polarisation unterhalb der Curietemperatur. Im Zentrum des Würfels befindet sich das zweiwertige Kation, während die vierwertigen Kationen an den Ecken des Würfels positioniert sind. Die zweiwertigen Anionen sind in dieser Darstellung in der Mitte jeder Würfelfkante zu finden.

Schematic diagram of an ideal perovskite structure, neglecting distortions due to spontaneous polarization below Curie temperature. The bivalent cation is located in the center of the cube, while the tetraivalent cations form the cube corners. The bivalent anions are located in the center of each cube edge in this illustration.



Kubisch raumzentriert, oberhalb  $T_c$   
Body-centered cubic state (above  $T_c$ )

Tetragonal verzerrt, unterhalb  $T_c$   
Tetragonally distorted (below  $T_c$ )

### Die Polarisation macht's

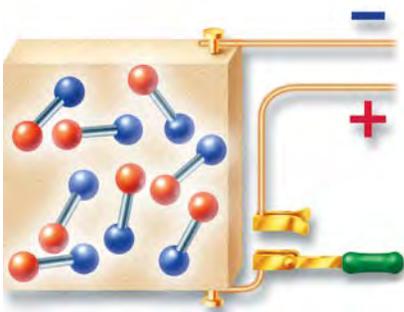
Unmittelbar nach dem Sinterprozess des keramischen Körpers zeigen die Domänen (Bereiche mit Elementarzellen einheitlicher Dipolrichtung) eine willkürliche Orientierung mit statistischer Verteilung, sodass der makroskopische Körper isotrop ist und in diesem Zustand keinen piezoelektrischen Effekt zeigt.

Die piezoelektrischen Eigenschaften müssen durch „Polen“ hervorgerufen werden. Unter dem Einfluss eines elektrischen Gleichfeldes werden die elektrischen Dipole in Feldrichtung ausgerichtet (siehe Abbildungen). Diese Orientierung bleibt auch nach Abschalten des elektrischen Gleichfeldes zum großen Teil erhalten (remanente Polarisation). Dies ist die notwendige Voraussetzung für das piezoelektrische Verhalten der ferroelektrischen Keramik.

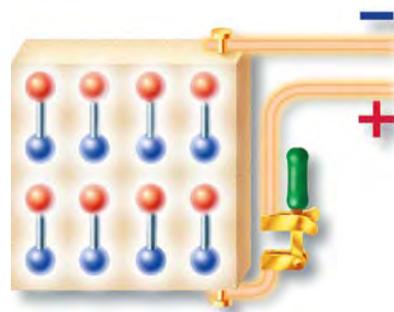
### The key is polarization

Immediately after sintering, the domains of a ceramic body (i.e., the areas consisting of elementary cells of uniform dipole direction) will show an arbitrary (statistically distributed) orientation, i.e., the macroscopic body is isotropic and shows no piezoelectric properties.

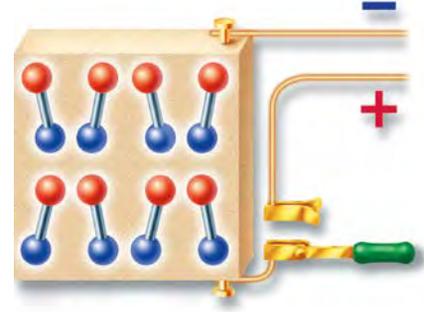
These piezoelectric properties have to be originated by "polarization". In this process, the ceramic body is exposed to a strong electric DC field that causes the electric dipoles to become aligned in the direction of field. They will maintain this orientation even when the DC field is no longer applied (remanent polarization) – a necessary condition for the piezoelectric behavior of ferroelectric ceramics.



Vor der Polarisation  
Before polarization



Während der Polarisation  
During polarization



Nach der Polarisation  
After polarization

# Grundlagen der keramischen Piezotechnik

## Fundamentals of Piezoceramics

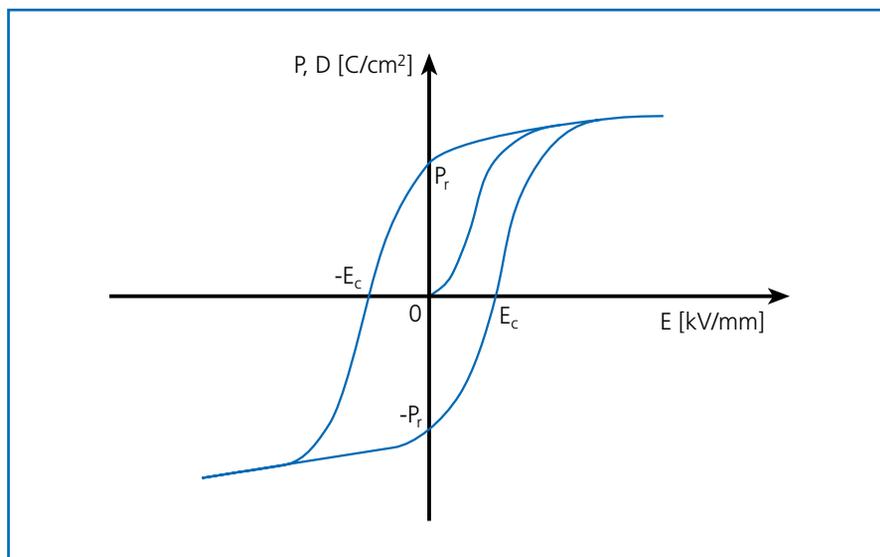
12

Die bei diesem Vorgang erzeugte remanente Polarisation wird durch die untenstehende Abbildung erläutert, die die elektrische Verschiebungsdichte  $D$  als Funktion der angelegten Feldstärke  $E$  zeigt. Legt man ein Feld an, steigt  $D$  mit wachsendem  $E$  auf der sogenannten Neukurve und mündet in einer Sättigung. Reduziert man nun  $E$ , nimmt  $D$  nur unwesentlich ab und behält im Remanenzpunkt für  $E = 0$  einen endlichen Wert, der der remanenten Polarisation  $P_r$  entspricht. Damit ist die Keramik piezoelektrisch. Bei angelegtem Feld gegen die ursprüngliche Richtung sinkt  $D$  und verschwindet bei einer bestimmten Feldstärke, der Koerzitivfeldstärke  $-E_c$ . Wenn  $E$  noch negativer wird, erreicht  $D$  einen negativen Sättigungswert.

Durchfährt man diese Kurve mit positivem und negativem Feld mehrmals, stellt man fest, dass Hin- und Rücklauf nicht übereinstimmen. Die sich bildende Schleife aus Hin- und Rücklauf wird Hysteresekurve genannt.

The remanent polarization produced by this process is illustrated by the graph below. The dielectric displacement density  $D$  is plotted over the applied electric field strength  $E$ . When a field is applied,  $D$  increases with  $E$  along the "initial curve" (starting from 0) until saturation is achieved. If  $E$  is reduced at this point,  $D$  will decrease insignificantly; at the remanence point it retains a finite value for  $E = 0$  which corresponds to the remanent polarization level  $P_r$ . In other words, the material exhibits piezoelectric properties. When an opposed field is applied,  $D$  will decrease and disappear at a given field strength the coercive field strength  $-E_c$ .

As  $E$  becomes more negative,  $D$  will reach a negative saturation point. If the material goes through several positive and negative field cycles, it becomes apparent that the forward and return graphs do not coincide. The resulting forward/return loop is called the hysteresis curve.



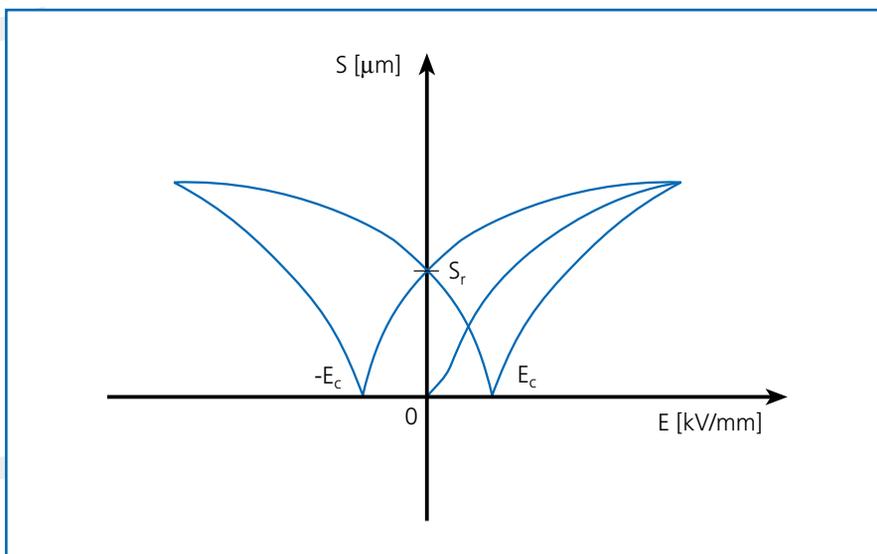
Hysteresekurve

Hysteresis curve

**D [C/cm<sup>2</sup>]**

Trägt man, wie im nächsten Bild dargestellt, die Dehnung  $S$  des keramischen Körpers in Abhängigkeit der angelegten Feldstärke  $E$  ein, erhält man die sogenannte Schmetterlingskurve.  $S$  wächst anfangs entlang der Neukurve und erreicht eine Sättigung. Im Remanenzpunkt bleibt auch die remanente Dehnung  $S_r$  erhalten. Das heißt: Während der Polarisierung entsteht eine bleibende Verformung. Bei negativem  $E$  wird  $S$  kleiner, verschwindet bei  $-E_c$  und nimmt anschließend wieder zu. Auch die Verformung hat also eine Hysterese. Die durch das Polieren erreichte remanente Dehnung definiert den Arbeitspunkt der Piezokeramik. In der Umgebung von  $S_r$  antwortet die Piezokeramik bei Änderung der Feldstärke mit einer proportionalen Längenänderung, die in der Anwendung genutzt wird.

If we plot the strain  $S$  of the ceramic body over the field strength  $E$ , as in the next illustration, we obtain a "butterfly curve". The strain  $S$  initially grows following the "initial curve" (starting from 0) before it reaches a saturation point. At the remanence level, the ceramic will retain its residual strain, i.e., the polarization process causes a lasting deformation  $S_r$  of the ceramic. The strain  $S$  decreases with negative  $E$  and disappears at  $-E_c$  before beginning to rise again. Also, the deformation effect shows a hysteresis. The remanent deformation imparted to the material defines the operating point of the piezoceramic component. In the vicinity of  $S_r$  the piezoceramic body will respond to field strength variations by undergoing a proportional length change that is utilized for application purposes.



Schmetterlingskurve

Butterfly curve

Die piezoelektrischen Eigenschaften werden beeinträchtigt, wenn die beim Polen erreichte Ausrichtung der Domänen ganz oder teilweise zerstört wird (Depolarisation).

Drei Einflussgrößen können zur Depolarisation führen:

- Thermische Depolarisation durch Erwärmung. In der Anwendung sollte die Betriebstemperatur die Hälfte der im Datenblatt angegebenen Curietemperatur nicht überschreiten. Auch die Lagertemperatur darf diese Grenze nur unwesentlich überschreiten.
- Elektrische Depolarisation durch elektrische Ansteuerung gegen die ursprüngliche Polarisationsrichtung.
- Mechanische Depolarisation durch hohe Druckbelastung, insbesondere bei kurzgeschlossenen Elektroden. Der maximal zulässige Druck ist sehr stark materialabhängig.

Da in der Anwendung überlagerte Belastungen (z. B.: elektrisches Feld gegen Polrichtung bei erhöhter Anwendungstemperatur) auftreten können und man hier das Depolarisationsverhalten nicht einschätzen kann, sind im Vorfeld entsprechende anwendungsnahe Lebensdauerprüfungen durchzuführen.

A full or partial elimination of the domain alignment achieved by the polarizing process (depolarization) will degrade the piezoelectric properties of the material.

Depolarization may be the result of three factors:

- Thermal depolarization due to heat exposure. In application environments, the component temperature should not exceed one-half the Curie temperature stated in the data sheet. Storage temperatures should also not exceed this temperature by a significant margin.
- Electric depolarization due to electric fields acting against the original polarization direction.
- Mechanical depolarization caused by high-pressure loads, especially with short-circuited electrodes. The maximum permissible pressure level varies largely according to the material used.

Since most applications will involve some form of superimposed loading (e.g., exposure to an electric field opposed to the direction of polarization at elevated operating temperatures) and the depolarization behavior cannot be estimated in this case. It is recommended to run lifetime tests under close-to-application conditions at the project planning stage.

**S [μm]**

# Hochleistungswerkstoffe für die Piezotechnik

## High-Performance Materials for Piezo Applications

Die CeramTec hat spezielle Hochleistungswerkstoffe für den Einsatz in der Piezotechnik entwickelt. Denn piezokeramische Bauteile werden teilweise starken Beanspruchungen ausgesetzt und müssen ihre Aufgaben trotzdem mit höchster Zuverlässigkeit erfüllen. Mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten sind die Werkstoffe der Marke SONOX® in der Welt der Sensoren, Aktoren und Wandler ein Begriff für höchste Leistungsfähigkeit und maximale Zuverlässigkeit.

### Werkstoffkategorien

Die Klassifikation der piezokeramischen Materialien basiert auf der chemischen Zusammensetzung einerseits und den spezifischen Anwendungsbedingungen andererseits. Auswahlkriterien sind neben den typischen Kenngrößen (siehe Datenblätter) das Verhalten bei großer elektrischer und mechanischer Last.

Es werden folgende Werkstoffkategorien unterschieden:

### Werkstoffe für Leistungswandler: SONOX® P4, SONOX® P8, PZT401, PZT807

Diese Werkstoffe vertragen hohe elektrische Steuerspannungen sowie große mechanische (Druck-) Lasten und zeichnen sich aus durch:

- Geringe dielektrische Verluste
- Dielektrizitätszahlen im Bereich zwischen 900 und 1400
- Hohe Gütewerte im Bereich zwischen 500 und 2000
- Hohe Curietemperatur
- Große Koerzitivfeldstärke

Sie eignen sich besonders für Hochleistungs-Ultraschallanwendungen im Bereich von 20 kHz bis zu einigen MHz.

### Werkstoffe für sensorische Anwendungen: SONOX® P5, SONOX® P502, SONOX® P504, SONOX® P508, PZT 503, PZT5A1, PZT 5A4, PZT5H1

- Dielektrizitätszahlen im Bereich zwischen 1000 und 2000
- Große piezoelektrische Aktivität ( $d_{33} \geq 400 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$ )
- Geringe Gütewerte ( $\leq 100$ )

Sensorische Anwendungen sind in den meisten Fällen kombinierte Systeme, in denen die Piezokeramik einerseits als Ultraschall-Sender, andererseits als Empfänger eingesetzt wird.

SONOX® P502 und SONOX® P504 sind speziell entwickelte Werkstoffe mit hoher thermischer und zeitlicher Stabilität. Deshalb eignen sie sich besonders für automotiv Anwendungen im Bereich von -40 bis +160° Celcius.

### Werkstoffe für aktorische Anwendungen: SONOX® P505 und SONOX® P53, PZT 503, PZT5A4, PZT5H1

- Sehr hohe Dehnung (1,4–1,7%)

Beide Werkstoffe lassen sich neben der Trockenpresstechnik auch gießen. Dadurch sind die Schichtdicken von 30 µm bis 300 µm realisierbar.

SONOX® P53 ist optimiert für diskrete Aufbautechnik, SONOX® P505 für monolithische Vielschichttechnik.

### Sonderwerkstoffe

P1 bleifrei (P1LF).

SONOX® P51 – sehr dünne Bauform möglich bei hoher piezoelektrischer Aktivität ( $d_{33} > 500 \text{ pC/N}$ ).

Auf Anfrage sind weitere Sonderwerkstoffe verfügbar.

Typische Applikationen	Standard-Werkstoff
Ultraschallreinigung Sonartechnik	SONOX® P4 PZT401 PZT5H1
Sensortechnik Materialprüfung Medizinische Diagnostik und Therapie	SONOX® P5 PZT5A1 PZT5A4 SONOX® P502 PZT503 SONOX® P504 SONOX® P508
Ultraschallbearbeitung (Schweißen, Bohren)	SONOX® P8 PZT807
Aktoren Piezoelektrische Generatoren	SONOX® P505 SONOX® P53 PZT5A4

# Hochleistungswerkstoffe für die Piezotechnik

## High-Performance Materials for Piezo Applications

CeramTec has developed special high-performance materials for implementation in piezo applications, as piezoceramic components are sometimes exposed to high stresses, and must still fulfil their functions with maximum reliability. With their different qualities and application options, SONOX® brand materials are synonymous with premium efficiency and maximum reliability in the world of sensors, actuators and transducers.

### Material categories

Piezoceramic materials are categorised according to their chemical composition and, on the other hand, by the specific application conditions. Besides the typical parameters (see data sheets), selection criteria include behavior under high electrical and mechanical loads. The following material categories are differentiated:

### Materials for power transducers: SONOX® P4, SONOX® P8, PZT401, PZT807

These materials withstand both high electrical driving voltages and intense mechanical (pressure) loads and are characterized by:

- Low dielectric loss
- Permittivity in between 900 and 1400
- High mechanical quality factor in between 500 and 2000
- High Curie temperature
- High coercive field strength

Materials of this type are specifically well suited for high-performance ultrasonic applications in the range from 20 kHz to several MHz.

### Materials for sensor applications: SONOX® P5, SONOX® P502, SONOX® P504, SONOX® P508, PZT 503, PZT5A1, PZT 5A4, PZT5H1

- Permittivity in between 1000 and 2000
- High piezoelectric activity ( $d_{33} \geq 400 \cdot 10^{-12} \text{ C/N}$ )
- Low mechanical quality factor ( $\leq 100$ )

Sensor applications are mainly combined systems in which the piezoceramic is used as ultrasonic-transducer on the one hand and as a receiver on the other hand.

SONOX® P502 and SONOX® P504 are specially developed materials with a high rate of thermal and temporal stability. For this reason, they are very suitable for automotive applications in the area ranging from -40 to +160° Celsius.

### Materials for actuator applications: SONOX® P505 and SONOX® P53, PZT 503, PZT5A4, PZT5H1

- Very high displacement (1,4-1,7‰)

Both materials can, in addition to the dry-pressing process, also be manufactured as a ceramic tape. As a result thereof, a layer thickness of 30 µm to 300 µm can be realized.

SONOX® P53 is optimized for discrete set-up technology, SONOX® P505 for monolytic multilayer technology.

### Special materials

P1 lead free (P1LF).

SONOX® P51 – very thin plates with high piezoelectric activity ( $d_{33} > 500 \text{ pC/N}$ ).

Additional special materials are available upon request.

Typical Applications	Suitable Material
Ultrasonic cleaning Sonar technique	SONOX® P4 PZT401 PZT5H1
Sensor technique Material testing Medical diagnostics and therapy	SONOX® P5 PZT5A1 PZT5A4 SONOX® P502 PZT503 SONOX® P504 SONOX® P508
Ultrasonic machining and joining techniques (welding, drilling)	SONOX® P8 PZT807
Actuators Piezo electric generators	SONOX® P505 SONOX® P53 PZT5A4

**RoHS**

RoHS (Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Substanzen in elektrischen und elektronischen Geräten)

Diese Richtlinie beschreibt die Vermeidung von gefährlichen oder schädlichen Substanzen in elektrischen oder elektronischen Geräten. Wir produzieren und verkaufen keramische Bauelemente und sind somit von dieser Richtlinie nicht direkt betroffen – möglicherweise aber unsere Kunden. Der Hauptbestandteil von piezokeramischen Bauteilen sind Bleiverbindungen wie Bleizirkonat und Bleititanat. Das ist leider nicht vermeidbar. Dies wurde auch von der europäischen Kommission so gesehen. Deshalb hat z. B. Blei in piezokeramischen Verbindungen in RoHS und der ELV („Altauto-Verordnung“) eine Ausnahmegenehmigung.

Trotzdem oder gerade deshalb wollen wir unsere Kunden in dieser Beziehung unterstützen:

Wir bieten an, piezokeramische Bauteile zurückzunehmen und einer umweltgerechten Entsorgung bzw. einem Recycling-Prozess zuzuführen. Voraussetzung ist, dass uns die Piezokeramiken ohne Fremdkomponenten (also nicht im Gehäuse oder eingegossen) angeliefert werden. Sollten Sie an einem Recycling interessiert sein, nehmen Sie bitte Kontakt mit uns auf. Wir machen Ihnen gerne ein Angebot.

**RoHS**

(Restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment)

This directive describes the avoidance of dangerous or hazardous substances in electrical or electronic equipment. We produce and sell ceramic components which means that we are not affected by this directive but possibly our customers. The main ingredients of piezoceramic parts are lead – compounds as leadzirconate or leadtitanate. Unfortunately this cannot be avoided which is as well the conclusion of the European Commission. Therefore, lead in piezoceramic compounds, for example, have an exemption from the restrictions in the RoHS and “End of Life Vehicles directives”.

Despite of this respectively due to this we want to assist our customers in this matter:

We offer to redeem piezoceramic components and to recycle the materials in processes which will protect the environment. Precondition is, that the piezoceramic parts will be delivered without contamination respectively foreign substances (not in a housing, casted or moulded).

Please give us a call, should you be interested. We will be happy to make you an offer.

# Bewährtes Know-how in der Fertigung

## Proven Manufacturing Expertise

18

Die CeramTec hat die unterschiedlichen Verfahren und Methoden des Herstellungsprozesses über Jahrzehnte hinweg perfektioniert.

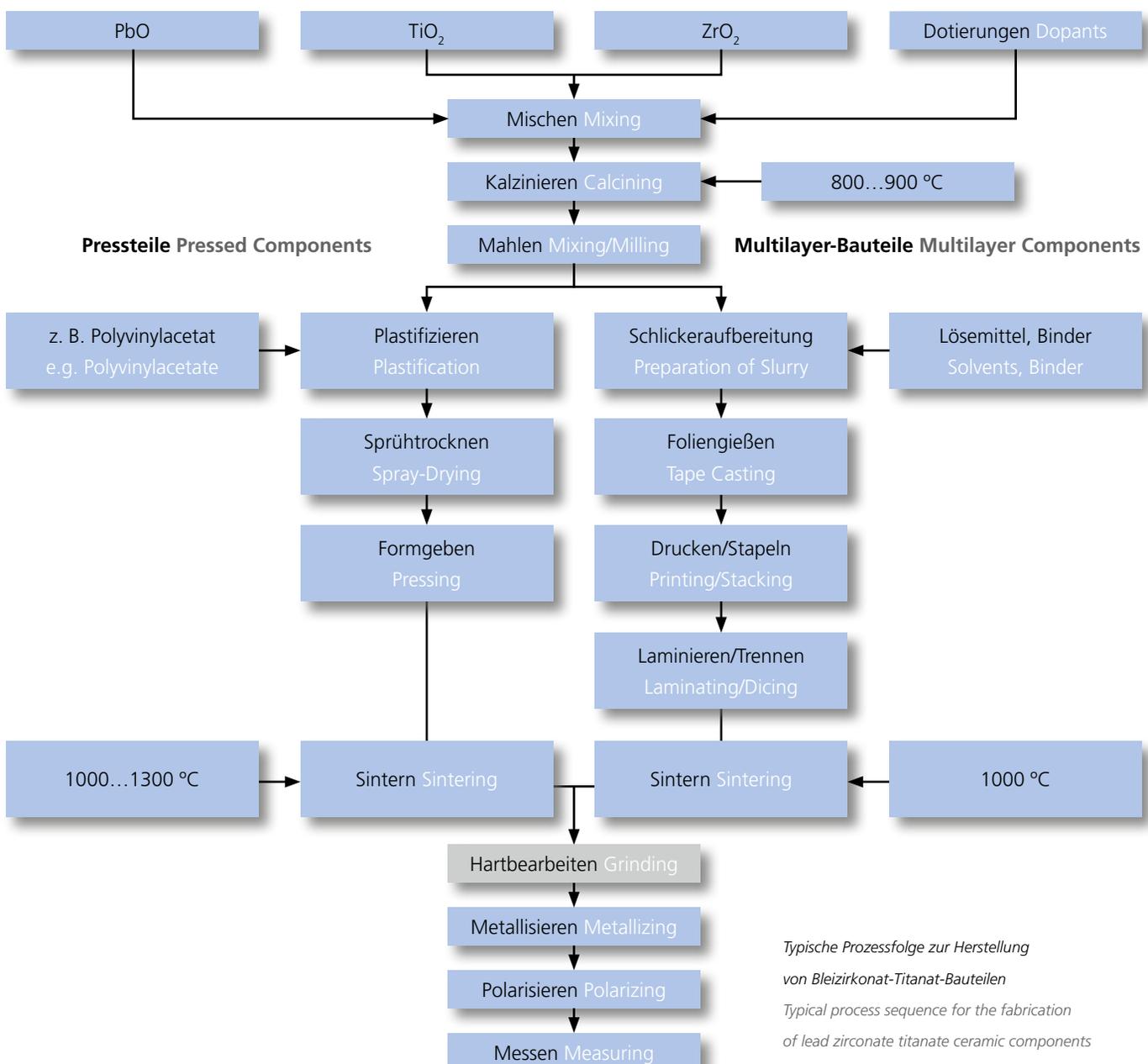
Überwachte Abläufe nach IATF 16949:2016 bilden die Grundlage für eine Fertigung, die sogar die hohen Qualitätsforderungen der Fahrzeug- und Sicherheitstechnik erfüllt. Mehr als 90 % kundenspezifische Teile sind der beste Beweis für die Flexibilität einer Fertigung, in der Musterstücke mit der gleichen Präzision realisiert werden wie Standardteile in Großserien.

Trotz unterschiedlicher Werkstoff-Zusammensetzungen – entsprechend den Erfordernissen der praktischen Anwendung – läuft der keramische Herstellungsprozess nach einem prinzipiellen Schema ab.

CeramTec has perfected a broad range of processes and methods over many decades. Systems managed in compliance with IATF 16949:2016 standard specifications form the basis of a production system that meets even the most exacting quality

requirements, e.g., of the automotive and safety systems industries. A product mix of over 90% customerspecific components testifies to the flexibility of CeramTec's manufacturing systems, which produces single specimens with the same precision as standardized volume parts.

Notwithstanding the diversity of material compositions formulated to meet the requirements, the piezoceramic manufacturing process follows a basic scheme:



Typische Prozessfolge zur Herstellung von Bleizirkonat-Titanat-Bauteilen  
 Typical process sequence for the fabrication of lead zirconate titanate ceramic components

# Heiße Technik für präzise Ergebnisse

## Precision Sophisticated Technology

Die Produkte werden in der Regel durch Verarbeitung oxidischer Rohstoffe entsprechend der vorgegebenen chemischen Zusammensetzung in einem Pulverpräparationsprozess gewonnen. Weitere Schritte bestehen in der Verdichtung der konditionierten Pulver und der Formgebung z. B. durch Trockenpressen. Nach der Formgebung wird der Keramikrohling bei Temperaturen zwischen 1000 °C und 1300 °C gesintert. Das Sintern der Keramiken erfolgt in kontinuierlich betriebenen Elektroöfen. Im Verlauf des Sinterprozesses erfolgt die Bildung des polykristallinen keramischen Gefüges. Die gesinterte Piezokeramik wird durch Schleifen, Läppen, Polieren und Trennsägen mechanisch bearbeitet, um geometrische Abmessungen und die Oberflächenbeschaffenheit in engen Toleranzen zu gewährleisten. Geometrische Abmessungen bestimmen neben den Materialkoeffizienten die funktionellen Eigenschaften, wie z. B. Kapazität oder Resonanzfrequenz. Zur elektrischen Kontaktierung werden üblicherweise Silberelektroden mittels Siebdruckverfahren aufgebracht, die bei ca. 600 °C eingebrannt werden. Danach erfolgt der Polarisationsprozess, bei dem durch Anlegen eines elektrischen Gleichfeldes (2...3 kV/mm) bei Temperaturen zwischen 80 °C und 140 °C die Dipole im Material ausgerichtet werden.

In der abschließenden Wareenausgangskontrolle werden beispielsweise geometrische Abmessungen, Haftfestigkeit der Silbermetallisierung und piezoelektrische Daten protokolliert, bevor die Ware ausgeliefert wird. Die zu prüfenden Parameter und die Prüfschärfe werden individuell mit dem Kunden abgestimmt. In-Prozess-Kontrollen und eine IATF 16949:2016-konforme Fertigung gewährleisten ein hohes Qualitätsniveau auch bei größten Stückzahlen.

Production normally involves a powder preparation process in which oxide raw materials are mixed to obtain the defined chemical product composition. Further steps include the compaction of the conditioned powder and a forming stage such as dry-pressing. The ceramic blank is then sintered at temperatures between 1000 °C and 1300 °C in a continuous tunnel style electric furnace. In the course of this sintering step the product develops its polycrystalline ceramic structure. The sintered piezoceramic component is mechanically finished by grinding, lapping, polishing, and sawing to assure its geometrical dimensions and surface finish remain within the specified narrow tolerances. The geometrical dimensions of the product, apart from material coefficients, determine its functional characteristics such as capacitance or resonant frequency. Electrical connections are usually made by applying silver electrodes in a screen printing process with subsequent sintering at approx. 600 °C. This is followed by the polarization step in which the product is exposed to an electric DC field (2 to 3 kV/mm) at temperatures between 80 °C and 140 °C to achieve the appropriate dipole orientation within the ceramic.

In the final outgoing product inspection, the component is tested for a wide range of parameters (e.g., geometrical dimensions, adhesion strength of the silver metallization layer). Its piezoelectric data are recorded prior to shipping.

The parameters to be inspected and the severity of the test conditions are agreed with the customer on an individual basis. In-process inspections and an IATF 16949:2016 compliant manufacturing process assure a high quality level even in volume production.



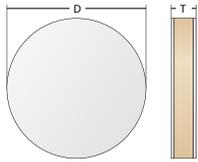
Werkstoffprüfung Material testing



Läppen Lapping

# Formen und mechanische Toleranzen

## Shapes and Mechanical Tolerances



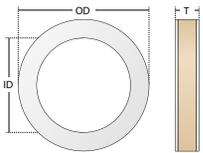
### Scheibe

	Von	Bis
Durchmesser	3 mm (0,12")	255 mm (10")
Stärke	0,2 mm (0,008")	25 mm (1")



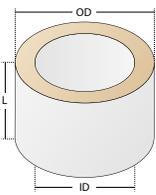
### Platte (quadratisch & rechteckig)

	Von	Bis
Länge	1 mm (0,04")	165 mm (6,5")
Breite	1 mm (0,04")	165 mm (6,5")
Stärke	0,2 mm (0,008")	35 mm (1,4")



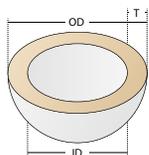
### Ring

	Von	Bis
Außendurchmesser	3 mm (0,12")	150 mm (5,9")
Innendurchmesser	0,5 mm (0,02")	140 mm (5,5")
Stärke	0,2 mm (0,008")	25 mm (1")



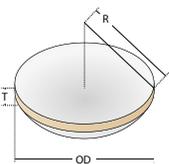
### Rohr

	Von	Bis
Außendurchmesser	1 mm (0,04")	150 mm (5,9")
Innendurchmesser	0,5 mm (0,02")	140 mm (5,5")
Länge	1 mm (0,04")	150 mm (5,9")



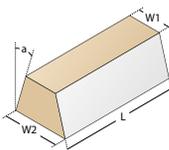
### Halbkugel

	Von	Bis
Außendurchmesser	6 mm (0,24")	203,2 mm (8")
Wandstärke	1 mm (0,04")	10 mm (0,39")

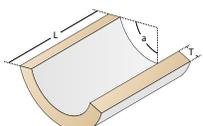


### Fokusschale

	Von	Bis
Durchmesser	6 mm (0,24")	203,2 mm (8")
Stärke	1 mm (0,04")	10 mm (0,39")



### Konische Stange



### Zylinderstange

#### Legende

PZT-Keramik	
Elektrode	

#### FORMEN

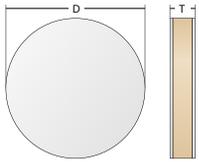
Zusätzlich zu den aufgeführten Formen sind auch kundenspezifische Formen erhältlich. Die Teile können in den angegebenen Abmessungsbereichen hergestellt werden, jedoch nicht in jeder Kombination von Stärke und Seitenmaßen. Eine detaillierte Liste der Standardgrößen der verfügbaren Teile ist auf Anfrage erhältlich.

#### MECHANISCHE STANDARDTOLERANZEN

Die Toleranzen der Bearbeitungsabmessungen gelten für die meisten Komponenten. Bei großformatigen Teilen muss vor Auftragserteilung eine Bestätigung der möglichen Toleranzen erfolgen. Komponenten können mit kleineren Toleranzen hergestellt werden (z. B. Konzentrität innerhalb von 0,13 mm (0,005") Ablesedifferenz (TIR) und Oberflächenveredelung (Ra) innerhalb von 1,6 µm (62 µin)). Es muss darauf geachtet werden, dass Toleranzen nicht zu präzise angegeben werden, da dies zu einem erheblichen Anstieg der Kosten führen kann.

Mechanische Standardtoleranzen	
Außendurchmesser	±0,15 mm
Innendurchmesser	±0,15 mm
Länge & Breite	±0,15 mm
Stärke	±0,05 mm
Rechtwinkligkeit (Kante zu Fläche)	innerhalb von 0,15°
Konzentrität	0,2 mm Ablesedifferenz (TIR)
Oberflächenebenheit (geläppte Teile)	12 µm (0,012 mm)
Oberflächenebenheit (große Schnittteile)	15 µm (0,015 mm)
Parallelität (geläppte Teile)	12 µm (0,012 mm)
Parallelität (große Schnittteile)	60 µm (0,06 mm)
Oberflächenveredelung (Ra)	3 µm (0,003 mm)

„As-Fired“-Toleranzen ±0,3 mm oder ±1 %, je nachdem, welcher Wert größer ist.



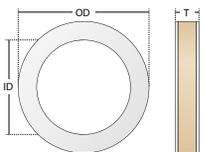
### Disc

	From	To
Diameter	3mm (0.12")	255mm (10")
Thickness	0.2mm (0.008")	25mm (1")



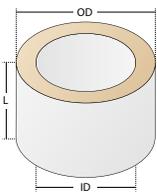
### Plate (square & rectangle)

	From	To
Length	1mm (0.04")	165mm (6.5")
Width	1mm (0.04")	165mm (6.5")
Thickness	0.2mm (0.008")	35mm (1.4")



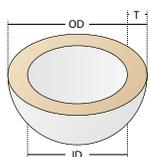
### Ring

	From	To
Outside diameter	3mm (0.12")	150mm (5.9")
Inner diameter	0.5mm (0.02")	140mm (5.5")
Thickness	0.2mm (0.008")	25mm (1")



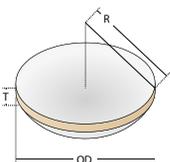
### Tube

	From	To
Outside diameter	1mm (0.04")	150mm (5.9")
Inner diameter	0.5mm (0.02")	140mm (5.5")
Length	1mm (0.04")	150mm (5.9")



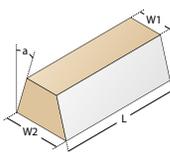
### Hemisphere

	From	To
Outside diameter	6mm (0.24")	203.2mm (8")
Wall thickness	1mm (0.04")	10mm (0.39")

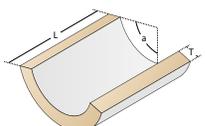


### Focal Bowl

	From	To
Diameter	6mm (0.24")	203.2mm (8")
Thickness	1mm (0.04")	10mm (0.39")



### Tapered Stave



### Barrel Stave

## SHAPES

In addition to the shapes shown, custom shapes are also available. Parts can be made to the size ranges shown, but not in every combination of thickness and lateral dimensions. A separate list of standard sizes of parts available can be obtained on request.

## STANDARD MECHANICAL TOLERANCES

Tolerances on machined dimensions apply to most components. For large size parts, confirmation of the tolerances achievable will need to be agreed prior to placing an order.

Components can be produced to tighter tolerances ((e.g. Concentricity within 0.13mm (0.005") TIR and surface finish (Ra) within 1.6µm (62µin)).

Care should be taken not to over-specify a tolerance as this can significantly increase costs.

Standard Mechanical Tolerances	
Outside diameter	±0.15mm
Inner diameter	±0.15mm
Length & width	±0.15mm
Thickness	±0.05mm
Squareness (edge to face)	Within 0.15°
Concentricity	0.2mm TIR
Surface flatness (lapped parts)	12µm (0.012mm)
Surface flatness (large sliced parts)	15µm (0.015mm)
Parallelism (lapped parts)	12µm (0.012mm)
Parallelism (large sliced parts)	60µm (0.06mm)
Surface finish (Ra)	3µm (0.003mm)

"As-Fired" tolerances  
±0.3mm or ±1% whichever is greater.

### Legend

- PZT Ceramic
- Electrode

# Dynamisches Verhalten von Piezokeramik

## Dynamic Behavior of Piezoceramics

22

Wird ein piezokeramisches Bauteil mit einer elektrischen Wechselspannung beaufschlagt, ändert es seine Abmessungen periodisch entsprechend der Frequenz des Steuersignals.

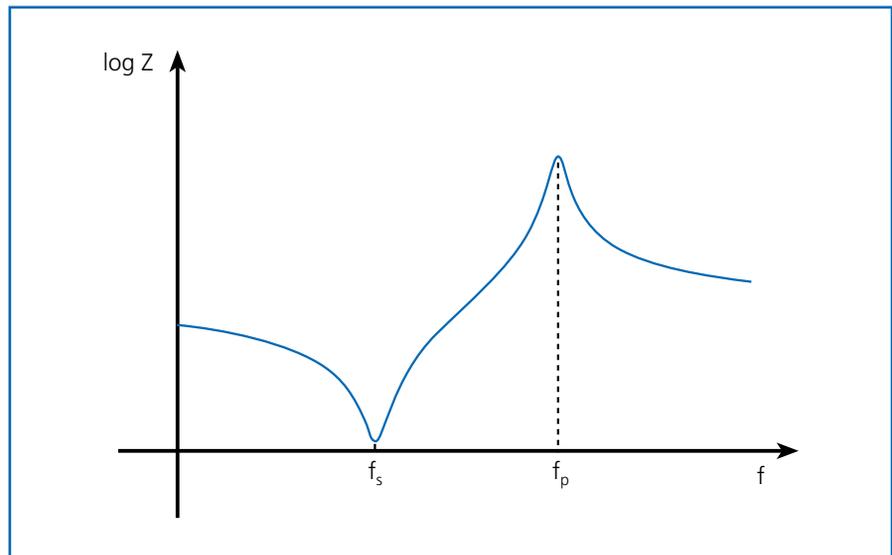
Aufgrund der beteiligten Steifigkeiten und Massen des schwingenden Bauteils treten geometrieabhängige Resonanzfrequenzen auf, bei denen die Schwingamplitude bei konstanter Steuerspannung stark ansteigt. In der Nähe der Resonanzfrequenz lässt sich das schwingende piezokeramische Bauteil durch das folgende elektrische Ersatzschaltbild beschreiben.

When a piezoceramic component is connected to an AC voltage, it undergoes a periodic change in dimension according to the frequency of the control signal.

Due to the stiffness and mass of the oscillating component, we can observe geometry related resonance frequencies at which the amplitude rises steeply although the control voltage remains unchanged. In the vicinity of that frequency, the oscillating piezoceramic component can be described by the following equivalent circuit diagram:

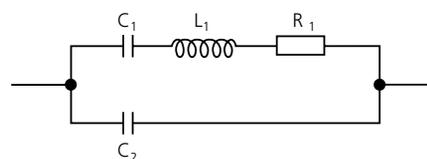
Stellt man den Wechselstromwiderstand  $Z$  in Abhängigkeit der Frequenz dar, erhält man die folgende Kurve:

By plotting the AC resistance  $Z$  over the frequency, the following curve results:



Dabei gelten folgende Analogien:

The analogies are as follows:



$C_1$ : Reziprokwert der Federsteifigkeit  
inverse of spring stiffness

$C_2$ : dielektrische Kapazität  
dielectric capacity

$L_1$ : träge Masse inert mass

$R_1$ : innere Verluste interior loss

Näherungsweise ergeben sich die Serienresonanzfrequenz  $f_s$  bei Impedanzminimum und die Parallelresonanzfrequenz  $f_p$  bei Impedanzmaximum. Wird also ein piezokeramischer Körper in seiner Serienresonanzfrequenz angesteuert, wird seine Stromaufnahme maximal, und die Schwingamplitude erhöht sich im ungedämpften Fall um den Faktor der mechanischen Schwinggüte.

Mit der in den Datentafeln angegebenen Frequenzkonstanten  $N$  (Serienresonanzfrequenz  $\times$  frequenzbestimmende Abmessung) kann man die Resonanzfrequenzen eines piezokeramischen Körpers leicht bestimmen (siehe hierzu auch die Darstellungen auf den folgenden Seiten).

Roughly speaking, you obtain the series resonance frequency  $f_s$  at minimum impedance and the parallel resonance frequency  $f_p$  at maximum impedance. Thus, if a piezoceramic body is driven with its series resonance frequency, its current consumption will peak and its oscillation amplitude will increase (in the absence of external damping) by the mechanical quality factor ( $Q$ ).

With the aid of the frequency constants,  $N$ , given in the data tables ( $N =$  series resonance frequency times the frequency-determining dimension), the resonance frequencies of a piezoceramic body can be readily determined (refer also to the illustrations on the following pages).

# Schwingungsformen, Dehnung & elektrische Spannung

## Modes of Vibration, Displacement & Voltage

Form Shape	Achsen Axes	Polarisierungsrichtung Polarisation Direction	Output der angelegten Feldspannung Applied Field Voltage Output	Schwingungsformen, Verschiebung durch angelegte mechanische Spannung Modes of Vibration, Displacement Applied Stress
<b>Dünne Scheibe</b> Thin Disc				 Radial Radial Dicke Thickness
<b>Platte</b> Plate				 Länge oder Transverse (L oder W) Length or Transverse (L or W) Dicke Thickness
<b>Ring</b> Ring				 Radial Radial Dicke Thickness
<b>Rohr</b> Tube				 Länge (L) Length (L) Wanddicke Wall Thickness Umfang Circumferential (Hoop)
<b>Stange</b> Rod				 Dicke Thickness
<b>Halbkugel</b> Hemisphere				 Wanddicke Wall Thickness Radial Radial
<b>Scherschwinger</b> Shear Plates				 Angabe der mechanischen Spannung oder Deformation durch Index 5 Stress or strain indicated by subscript 5

**ANMERKUNGEN:**

- 1 – Gleichungen gültig für: (A) Platte, Scheibe, Ring & Scherschwinger, wobei  $r, L$  und  $W \gg thk$
- 2 – Alle Variablen sind metrisch; SI-Einheiten verwenden
- 3 – Konstanten  $d_{31}$  und  $g_{31}$ , negative Werte, die zu Kontraktion und negativer Spannung (entgegengesetzter Polarität) führen
- 4 – Jede Art von Material verfügt über spezifische Spannungs-, Belastungs- und Temperaturgrenzen

Frequenz Frequency	Kapazität Capacitance	Verschiebung (statisch) Displacement (static)	Spannung (statisch) Voltage (static)
$f_r = \frac{N_p}{d}$ $f_r = \frac{N_t}{t}$	$C = \frac{\epsilon_{33}^T \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot t}$	$\Delta r = \frac{d_{31} \cdot d \cdot V}{t}$ $\Delta t = d_{33} \cdot V$	$V = \frac{g_{31} \cdot F_r}{\pi \cdot d}$ $V = \frac{4 \cdot g_{33} \cdot F_3 \cdot t}{\pi \cdot d^2}$ <p>wobei <math>F</math> = Kraft where <math>F</math> = Force</p>
$f_r = \frac{N_1}{L \text{ or } W}$ $f_r = \frac{N_t}{t}$	$C = \frac{\epsilon_{33}^T \cdot L \cdot W}{t}$	$\Delta W = \frac{d_{31} \cdot W \cdot V}{t}$ $\Delta L = \frac{d_{31} \cdot L \cdot V}{t}$ $\Delta t = d_{33} \cdot V$	$V = \frac{g_{31} \cdot F_1}{W}$ $V = \frac{g_{31} \cdot F_2}{L}$ $V = \frac{g_{33} \cdot F_3 \cdot t}{L \cdot W}$
$f_r = \frac{2 \cdot N_c}{(d_o + d_i)}$ $f_r = \frac{N_t}{t}$	$C = \frac{\epsilon_{33}^T \cdot \pi \cdot (d_o^2 - d_i^2)}{4 \cdot t}$	$\Delta r = \frac{d_{31} \cdot (d_o - d_i) \cdot V}{2 \cdot t}$ $\Delta t = d_{33} \cdot V$	$V = \frac{g_{31} \cdot F_r}{2\pi(d_o - d_i)}$ $V = \frac{4 \cdot g_{33} \cdot F_3 \cdot t}{\pi(d_o^2 - d_i^2)}$
$f_r = \frac{N_1}{L}$ $f_r = \frac{2 \cdot N_t}{(d_o - d_i)}$ $f_r = \frac{2 \cdot N_c}{(d_o + d_i)}$	$C = \frac{2\pi \cdot \epsilon_{33}^T \cdot L}{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}$	$\Delta L = \frac{2 \cdot d_{31} \cdot L \cdot V}{(d_o - d_i)}$ $\Delta d_m = \frac{d_{33} \cdot d_m \cdot V}{t}$ <p>wobei <math>d_m = (d_o + d_i) / 2</math> where <math>d_m = (d_o + d_i) / 2</math></p>	$V = \frac{g_{31} \cdot F_1}{\pi \cdot d_m}$ $V = \frac{g_{31} \cdot d_o \cdot P}{2}$ <p>wobei <math>P</math> = Druck where <math>P</math> = Pressure</p>
$f_r = \frac{N_3}{L}$	$C = \frac{\epsilon_{33}^T \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot L}$	$\Delta L = d_{33} \cdot V$	$V = \frac{4 \cdot g_{33} \cdot F_3 \cdot L}{\pi \cdot d^2}$
$f_r = \frac{2 \cdot N_t}{d_o - d_i}$ $f_r = \frac{2 \cdot N_p}{(d_o + d_i)}$	$C = \frac{\epsilon_{33}^T \cdot \pi \cdot (d_o + d_i)^2}{4 \cdot (d_o - d_i)}$	$\Delta t = d_{33} \cdot V$ $\Delta r = \frac{2 \cdot d_{31} \cdot r \cdot V}{t}$	$V = \frac{g_{31} \cdot d_o \cdot P}{2}$
$f_a = \frac{N_5}{t}$	$C = \frac{\epsilon_{11}^T \cdot L \cdot W}{t}$	$\Delta L = \frac{d_{15} \cdot L \cdot V}{t}$	$V = \frac{g_{15} \cdot F_3 \cdot t}{L \cdot W}$

**NOTES:**

- 1 – Equations valid for: (A) plate, disc, ring & shear plate where  $r$ ,  $L$  and  $W \gg \text{thk}$
- 2 – All variables are metric; use Si-units
- 3 – Constants  $d_{31}$  and  $g_{31}$ , negative values which result in negative strain (contraction) and negative voltage (opposite polarity)
- 4 – Each type of material has particular voltage, stress and temperature limitations

# Anwendungsfelder piezoelektrischer Bauteile

## Piezoceramic Applications

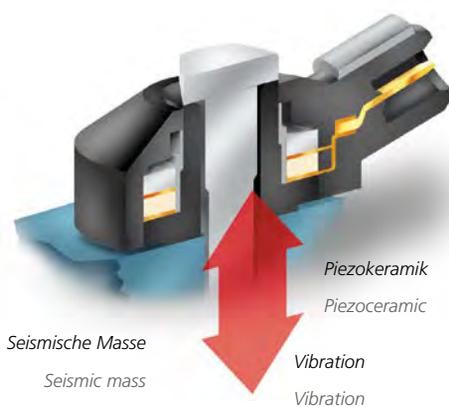
26

### Beispiele aus der Fahrzeugindustrie

Klopfsensor, Rückfahrsensor, Beschleunigungssensor, Drehratensensor, Sonarwandler zur Objekterkennung, Sonarwandler zur Ortung/Navigation, Füllstandssensoren, Luftmassenmesser, Energieerzeugung für Reifendruckensensoren.

### Examples automotive

Knock sensors, back-up sensors, acceleration sensors, gyrometric sensors, sonar transducers for object identification, sonar transducers for locating/navigation functions, level sensors, air-mass sensors, energy harvesting for tire pressure sensors.



*Klopfsensor Knock sensor*

### Beispiele aus der Medizintechnik

Nierensteinertrümmerer, Zahnsteinentferner, chirurgisches Messer, Ultraschall-Vernebler für Inhalatoren, Ultraschall-Diagnostik und Therapie.

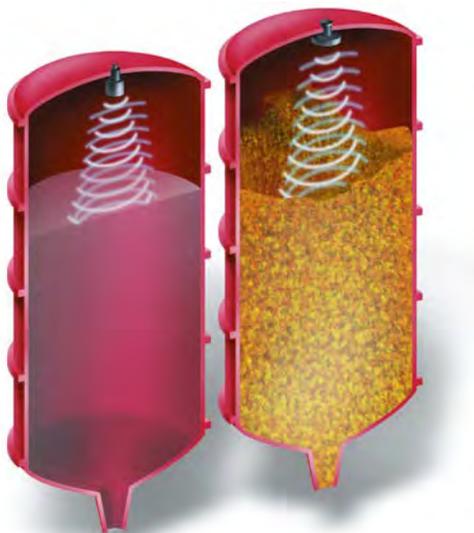
### Examples medical applications

Lithotripters, dental plaque removers, ultrasonic scalpels, ultrasonic nebulizers, ultrasonic diagnostics and therapy.

*Lithotripter (Nierensteinertrümmerer)*

*Lithotripter*





Füllstandssensoren (Reflexionsprinzip)  
Level transducers (reflection type)

### Beispiele aus dem Maschinenbau

Luft-Ultraschall-Abstandssensoren, Füllstandssensoren, Durchflussmessung (flüssige und gasförmige Medien), Ultraschall-Reinigung, Ultraschall-Schweißen (Kunststoff und Metall), Ultraschall-Materialbearbeitung, zerstörungsfreie Materialprüfung, aktive Schwingungsdämpfung von Werkzeugen.

### Examples mechanical engineering

Ultrasonic distance sensors, level sensors, flow rate measurement (liquid and gaseous media), ultrasonic cleaning, ultrasonic welding (plastics and metal), ultrasonic machining, non-destructive testing, active vibration control.

Piezokeramische Wandler  
(Sender/Empfänger)  
Piezoceramic transducer  
(transmitter/receiver)

### Beispiele für Consumeranwendungen

Haushaltsgasanzünder, Piezofeuerverzeuge, Tonabnehmer für Instrumente (Gitarrentonabnehmer), Einbruchmeldeanlagen, Zerstäuber für medizinische und kosmetische Anwendungen.

### Examples consumer applications

Household gas lighters, piezo cigarette lighters, guitar pickups and burglar alarm sensors, nebulizers for medicine and cosmetic applications.

### Beispiele aus der Aktorik

Lichtleitfaserjustierung, Präzisionsverstelleinrichtungen, pneumatische/hydraulische Ventile, aktive Schwingungsdämpfung, Schallerzeugung.

### Examples actuator applications

Optical fiber alignment, precision positioning devices, pneumatic / hydraulic valves, active vibration damping, sound emitters.



Monolithischer Vielschichtaktor  
Monolithic multilayer actuator

### Empfehlungen zur Kontaktierung piezoelektrischer Keramik

Die metallisierten Elektrodenflächen der CeramTec-Piezokeramiken eignen sich zur Kontaktierung mittels Leitgummi- oder Federkontakt ebenso wie zur Kontaktierung durch Anlöten mit einem Weichlot. Für Sensoranwendungen, bei denen keine großen elektrischen Leistungen übertragen werden müssen, ist es auch möglich, flexible Leiterbahnen mittels Leitkleber auf der metallisierten Oberfläche zu fixieren.

Soll durch Anlöten mit einem Weichlot kontaktiert werden, sind einige Besonderheiten zu beachten, um optimale Ergebnisse zu erzielen: Es wird die Verwendung eines temperaturgeregelten Elektroniklöt-kolbens mit einer Leistung von ca. 30 W empfohlen. Die optimale Lötspitzentemperatur beträgt 320 °C. Da die Elektrodendicke nur wenige µm beträgt, muss bei Silberelektroden ein silberhaltiges Lot verwendet werden, da ansonsten das Silber der Elektrode sehr schnell in das Lot hineinlegiert. Wir empfehlen daher die Verwendung des folgenden Lotes:

L-Sn 96.5 Ag 3.5 DIN 29453

95.5 AG 3,8 Cu 0,7

SN 96 AG4 ISN 95 AG 4 Cu A

Die Eignung für die jeweilige Anwendung ist vom Verarbeiter zu prüfen.

ISO 9435:2014

Im allgemeinen erfolgt die Lötung in zwei Schritten:

- a) Verzinnen des Lötpunktes
- b) Einlöten der Anschlusslitze

Beide Vorgänge sollten so kurz wie möglich gehalten werden und die Dauer von je einer Sekunde nicht überschreiten. Dazu ist es unbedingt erforderlich, vorverzinnte Anschlusslitzen zu verwenden. Bei massiven Piezokeramikteilen kann es außerdem sinnvoll sein, die Piezokeramik vorzuwärmen, um den Lötvorgang zu erleichtern/zu beschleunigen. Hier ist eine Vorwärmtemperatur von ca. 60 °C zu empfehlen.

### Recommendations for terminal connections of piezoceramics

The metallized electrode surfaces of CeramTec piezoceramics are suitable for conductive rubber or spring-type contact systems, as well as for soldered connections. In sensor applications involving small power levels, it is also possible to attach flexible PCB type conductors to the metallized surface with a conductive bonding agent such as specialized epoxies.

Where terminals are to be soldered, a number of special requirements have to be observed in order to achieve optimized results. First, a temperature-controlled electronic soldering iron with an output of approximately 30 W should be used. The optimum soldering tip temperature is 320 °C. Since the electrode is only several micrometers thick, a solder containing silver must be used on silver electrodes to prevent the silver from diffusing into the solder. CeramTec recommends the use of the following solder:

L Sn 96.5 Ag 3.5 DIN 29453

95.5 AG 3,8 Cu 0,7

SN 96 AG4 ISN 95 AG 4 Cu A

Suitability has to be examined by the processor for each particular application.

ISO 9435:2014

Soldering is generally performed in two steps:

- a) tinning the soldering point
- b) soldering the flexible connecting lead into position

The duration of both steps should be minimized and should not exceed 1 second. To achieve this, the use of pretinned flexible leads is required. It is often beneficial to preheat the piezoceramic to facilitate and/or accelerate the soldering process. The recommended preheating temperature is 60 °C.

### Metallisierung

Standardelektrodenmaterialien sind Silber, Nickel und optional Nickel-Gold, wobei spezielle Elektrodenlayouts, wie Rückkoppel-Elektroden, herumgezogene Elektroden oder Sonderformen, möglich sind, um erweiterte Funktionalitäten realisieren zu können. Die Metallisierung kann mit und ohne Isolationsrand erfolgen. Wird ein Isolationsrand gewünscht, ist er mit  $\leq 0,3$  mm spezifiziert.

Da für viele Anwendungen die Polarisationsrichtung entscheidend sein kann, ist üblicherweise die positive Seite markiert.

### Metallization

Standard electrode materials include silver, nickel and optionally nickel-gold. Special electrode configurations (e.g., feedback or wrap-around electrodes, custom designs) are feasible to achieve expanded functionalities. The metal plating can be applied with or without insulating margin. Standard insulation margin is  $\leq 0.3$  mm.

Since the polarization direction is of decisive importance in many applications, the positive side of the piezoceramic element is usually marked.

### Beispiele für spezielles Elektrodendesign

#### Examples of special electrode designs



# Piezokeramiken für Leistungs-Ultraschall-Anwendungen

## Piezoceramics for High-Power Ultrasonic Applications

Leistungswandler-Verbundschwinger, auch Langevin-Bolt-Transducer (LBT) genannt, werden mit speziell dafür entwickelten Piezokeramiken aufgebaut, die sich durch niedrige dielektrische Verluste und hohe mechanische Gütewerte auszeichnen. CeramTec stellt hierfür zwei Materialtypen mit unterschiedlichen Eigenschaftsprofilen zur Verfügung.

### Die Werkstoffe

SONOX® P4, PZT401 eignet sich für Wandler zur Ultraschallreinigung und zur zerstörungsfreien Materialprüfung. Die hohen Koppelfaktoren, mittleren Gütewerte und die große mechanische Stabilität erlauben große Schwingamplituden im Resonanzbetrieb.

Es wird eine Wirkleistung von ca. 7 bis 10 W/cm<sup>2</sup> bei einseitiger Abstrahlung in Wasser erreicht. Die maximale Betriebstemperatur der Keramik liegt bei 125 °C. Die Druckbelastung dieser Keramik hängt von den Einbaubedingungen ab (homogene Flächenbelastung).

SONOX® P8, PZT807 ist für Leistungswandler mit höchster Flächenbelastung ausgelegt. Dieser Werkstoff besitzt hohe mechanische Gütewerte bei großen Koppelfaktoren und niedrigen dielektrischen Verlusten. In Verbindung mit seiner hohen Depolarisationsfestigkeit eignet er sich daher besonders für Hochleistungswandler.

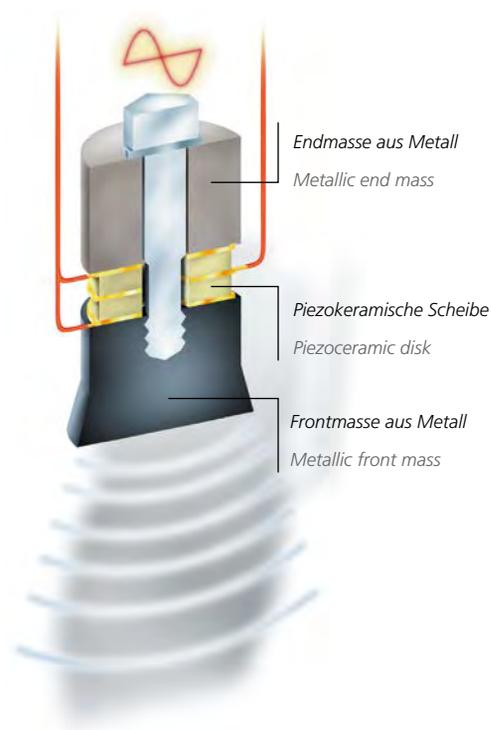
Power conversion compound transducers, also referred to as Langevin-Bolt transducers (LBT), are made from specially developed piezoceramics characterized by low dielectric loss and high mechanical Q factors. For these applications, CeramTec supplies two material types distinguished by different attribute profiles.

### Materials

SONOX® P4, PZT401 is suitable for ultrasonic cleaning and non-destructive testing transducers. Its high coupling factors, medium-range Q factors, and excellent mechanical stability permit high oscillation amplitudes at resonance.

The achievable active power output in transducer configurations (emitting unilaterally in water) varies between approximately 7 and 10 W/cm<sup>2</sup>. The maximum operating temperature of the ceramic element must not exceed 125 °C. Its compressive-strength depends on the mounting conditions (homogeneous load distribution).

SONOX® P8, PZT807 is designed for power transducers handling maximum loads per unit area. This material combines high mechanical Q values with high coupling factors and low dielectric loss. Since it also features a high depolarization resistance, SONOX® P8 is particularly suitable for high-power transducers.



Hochleistungsschwinger  
High-power ultrasonic transducer

In geeigneten mechanischen Wandlern lassen sich Wirkleistungen von über 2 kW erzielen. Solchermaßen aufgebaute Wandler werden hauptsächlich für das Ultraschallschweißen und die Materialbearbeitung, aber auch für Reinigungsanwendungen mit höchsten Ansprüchen eingesetzt. Je nach Wandleraufbau und Ankopplung werden beim Ultraschallreinen Wirkleistungen von 10 bis 50 W/cm<sup>2</sup> bei einseitiger Abstrahlung in Wasser erzielt. Die Betriebstemperatur liegt bei maximal 125 °C.

Die Elektroden bestehen aus Einbrennsilber, das mittels Siebdrucktechnik aufgebracht wird. Bei Lochscheiben bis 50 mm Außendurchmesser beträgt die Exzentrizität von Innendurchmesser zu Außendurchmesser maximal 0,1 mm.

Ebenheit und Parallelität über Metallisierung liegen bei  $\leq 20 \mu\text{m}$ . Es können auf Anfrage jedoch auch Teile mit wesentlich kleineren Werten produziert werden.

Bei Vollscheiben beträgt die Dicken-toleranz  $\pm 0,1 \text{ mm}$  über Metallisierung. Innerhalb dieser Toleranz bewegen sich auch Ebenheit und Parallelität dieser Teile. Sonderausführungsformen mit angelöteten Anschlussdrähten oder eingefrästen Nuten sind machbar.

With an appropriate transducer design, active power outputs in excess of 2 kW can be achieved. Such transducers are used chiefly in ultrasonic welding and machining equipment, but also in high-performance cleaning. Depending on the transducer design and coupling method, ultrasonic cleaning systems may be configured with active power outputs between 10 and 50 W/cm<sup>2</sup> (unilateral emission in water). The maximum operating temperature is 125 °C.

The electrodes are made of sintered silver screen printed onto the material. On rings up to 50 mm outside diameter, the maximum inside/outside diameter concentricity is 0.1 mm.

The surface flatness and parallelism over the metallized layer is  $\leq 20 \mu\text{m}$ . By special arrangement, parts can be produced to significantly smaller tolerances.

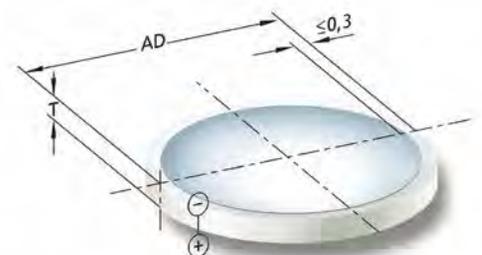
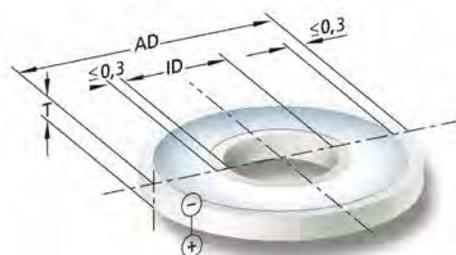
For disks, the thickness tolerance over the metallized surface is  $\pm 0.1 \text{ mm}$ . Flatness and parallelism values lie within the same tolerance band. Special designs with soldered connecting wires or machined grooves can be produced upon request.

### Die Bauformen

Übliche Bauformen sind runde Lochscheiben oder Vollscheiben.

### Product shapes

Standard products are in the form of disks or rings.



In der folgenden Tabelle finden Sie Vorzugswerte für Durchmesser und Dickenkombinationen:

The following table summarizes the preferred diameter and thickness combinations for rings:

AD (mm) OD (mm)	ID (mm)	T (mm)
10	4	2
	5	2
15	8	2
25	10	4
		5
		6
		6.35
35	15	4
		5
		6
		6.35
38	13	4
	15	5
	20	6
50	20	6.35
		5
		6
<i>AD: Außendurchmesser</i> <i>OD: Outside diameter</i> <i>ID: Innendurchmesser</i> <i>ID: Inside diameter</i> <i>T: Dicke</i> <i>T: Thickness</i>		

AD (mm) OD (mm)	T (mm)
25	1
38	3
	6.35
50	2.50
	3
	6
<i>Andere Formen und Abmessungen auf Anfrage</i> <i>Other shapes and dimensions available upon request</i>	

Standardelektrodenmaterialien sind Silber, Nickel und optional Nickel-Gold, wobei spezielle Elektrodenlayouts, wie Rückkoppelelektroden, herumgezogene Elektroden oder Sonderformen, möglich sind, um erweiterte Funktionalitäten realisieren zu können. Die Metallisierung kann mit und ohne Isolationsrand erfolgen. Wird ein Isolationsrand gewünscht, ist er mit  $\leq 0,3$  mm spezifiziert.

Da für viele Anwendungen die Polarisationsrichtung entscheidend sein kann, ist üblicherweise die positive Seite markiert.

Standard electrode materials include silver, nickel and optionally nickel-gold. Special electrode configurations (e.g., feedback or wrap-around electrodes, custom designs) are feasible to achieve expanded functionalities. The metal plating can be applied with or without insulating margin. Standard insulation margin is  $\leq 0.3$  mm.

Since the polarization direction is of decisive importance in many applications, the positive side of the piezoceramic element is usually marked.

## Alterungsrate $c$

Die Alterungsrate gibt die relative Änderung des entsprechenden Koeffizienten pro Zeitdekade an. Dabei bedeuten:

- $c_c$ : Alterungsrate der Kapazität
- $c_f$ : Alterungsrate der Resonanzfrequenz
- $c_k$ : Alterungsrate des elektromechanischen Koppelfaktors

Wird beispielsweise im Datenblatt die Kapazitätalterung unserer SONOX® P4-Keramik mit -4,5 % pro Dekade angegeben, bedeutet dies:

Beispielkeramik, Kapazitätswert:

- 1 Tag nach Polarisation: **100 nF**
- 10 Tage nach Polarisation:  
**95,5 nF (-4,5 %)**
- 100 Tage nach Polarisation:  
**91,2 nF (-4,5 %)**
- 1000 Tage nach Polarisation:  
**87,1 nF (-4,5 %)**

## Curietemperatur $T_c$

Temperatur, bei der die relative Dielektrizitätszahl von ferroelektrischen Keramiken ihr Maximum erreicht.

Piezoelektrische Keramiken verlieren spätestens bei dieser Temperatur ihren während der Produktion aufgeprägten Polarisationszustand. Aus diesem Grund sollte die Betriebstemperatur maximal die Hälfte der Curietemperatur betragen.

## Dielektrizitätszahl, relative $\epsilon_r$

Verhältnis von (absoluter) Dielektrizitätszahl zur Dielektrizitätszahl im freien Raum ( $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  F/m).

## Frequenzkonstante $N$

Produkt der mechanischen Resonanzfrequenz und derjenigen Abmessung, die diese Frequenz bestimmt. Der Index bezieht sich auf die Schwingungsform.

- $N_p$ : Frequenzkonstante für die Planarschwingung einer Kreisscheibe
- $N_t$ : Frequenzkonstante für die Dicken-schwingung einer dünnen Platte
- $N_l$ : Frequenzkonstante für die Längen- oder Breitenschwingung einer in Dickenrichtung polarisierten dünnen Platte
- $N_s$ : Frequenzkonstante für die Längsschwingung eines in dieser Richtung polarisierten schlanken Stabes oder Zylinders

Da bei allen Schwingungsformen geometriebedingte Koppelschwingungen auftreten können, sind bei der Verwendung der Frequenzkonstanten für die Berechnung von Resonanzfrequenzen die Geometrieverhältnisse am schwingenden Körper zu beachten (siehe hierzu auch „Grundswingungsformen piezoelektrischer Resonatoren“).

Abgesehen von  $N_p$  entsprechen die angegebenen Frequenzkonstanten der halben Schallausbreitungsgeschwindigkeit in der Piezokeramik.

## Gütefaktor, mechanischer $Q_m$

Amplitudenüberhöhung eines oszillierenden piezoelektrischen Bauteils in Resonanz. Definiert als das Verhältnis der pro Schwingungszyklus zugeführten Energiemenge zu der pro Schwingungszyklus verbrauchten (vernichteten) Energiemenge.

Der mechanische Gütefaktor kann wie folgt berechnet werden:

$$Q_m = \frac{f_p^2}{2 \cdot \alpha \cdot f_s \cdot Z_s \cdot C \cdot (f_p^2 - f_s^2)}$$

Der mechanische Gütefaktor ist somit eine dimensionslose Messgröße für die mechanischen Verluste des Bauteils im dynamischen Betrieb.

- $f_p$ : Parallelresonanzfrequenz
- $f_s$ : Serienresonanzfrequenz
- C: Kapazität
- $Z_s$ : Impedanz in Resonanz

## Indizes

Bei piezoelektrischen Werkstoffen wird die Richtung der positiven Polarisation üblicherweise so gewählt, dass sie mit der z-Achse eines rechtwinkligen Systems kristallographischer Achsen zusammenfällt. Diese Koordinaten werden im allgemeinen mit den Ziffern 1, 2 und 3 bezeichnet, wobei Richtung 3 die Polarisationsrichtung bezeichnet. Mechanische und elektrische Größen, die in einer dieser Richtungen wirken, werden mit einem bestimmten Index versehen. Da piezoelektrische Bauelemente bereits in einer bestimmten Richtung 3 polarisiert sind und sich entsprechend anisotrop verhalten, sind auch die Koeffizienten in den Datentafeln, die die Materialeigenschaften beschreiben, richtungsabhängig und deshalb in vielen Fällen mit zwei tiefgestellten Indizierungen und manchmal zusätzlich mit einer hochgestellten Indizierung versehen.

Dabei zeigt der hochgestellte Index an, welche Größe konstant bleibt, und die beiden tiefgestellten Indizes zeigen, in welcher Richtung die Größen elektrisches Feld, elektrische Verschiebung, mechanische Spannung und Dehnung miteinander verknüpft sind.

## Hochgestellte Indizes:

- T: bei konstanter mechanischer Spannung
- S: bei konstanter Dehnung
- E: bei konstanter elektrischer Feldstärke
- D: bei konstanter dielektrischer Verschiebung

## Tiefgestellte Indizes:

- 1,2: senkrecht zur Polarisationsrichtung; die Richtungen 1 und 2 stehen senkrecht zueinander und sind gleichberechtigt (isotropes Verhalten der Keramik).
- 3: in Polarisationsrichtung

Beispiel:

Piezoelektrische Ladungskonstante  $d_{33}$  (siehe auch Datenblatt). Die bei der Messung angelegte mechanische Spannung besitzt Richtung 3 (Polarisationsrichtung); die erzeugte elektrische Verschiebung hat ebenfalls Richtung 3.

### Kapazität C

Kapazität eines piezoelektrischen Schwingers, weit unterhalb seiner niedrigsten Eigenresonanzfrequenz gemessen; üblicherweise bei 1 kHz.

Sie kann bei gegebener Geometrie und Material für ein definiertes Bauteil unter Verwendung der relativen Dielektrizitätszahl aus dem Datenblatt mit folgender Formel errechnet werden:

$$C = \epsilon_r^T \cdot \epsilon_0 \cdot (A/d)$$

A: Elektrodenfläche

d: Elektrodenabstand

In guter Näherung kann man folgende vereinfachte Formeln zur Berechnung des Kapazitätswertes in pF piezokeramischer Körper verwenden.

### Runde Scheibe/Zylinder:

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot d^2}{t \cdot 144} \text{ [pF]}$$

t: Dicke/Höhe in mm

d: Durchmesser in mm

### Rechteckige Platte:

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot l \cdot w}{t \cdot 113} \text{ [pF]}$$

l: Länge in mm

w: Breite in mm

t: Dicke in mm

### Kopplungsfaktor, elektro-mechanischer k

Maß für die Effizienz der Energieumwandlung elektrisch zu mechanisch.

Für Bauteile mit elektrischer „Vorspannung“ gilt:

$$k^2 = \frac{\text{gespeicherte mechanische Energie}}{\text{gesamte gespeicherte Energie}}$$

Für Bauteile mit mechanischer „Vorspannung“ gilt:

$$k^2 = \frac{\text{gespeicherte elektrische Energie}}{\text{gesamte gespeicherte Energie}}$$

Entsprechend den Randbedingungen existieren fünf unterschiedliche Kopplungsfaktoren, die die Formfaktoren und Schwingungsform des Bauteils berücksichtigen. Sind keine eindeutigen Randbedingungen (z. B. ein bestimmtes Durchmesser-zu-Dicken-Verhältnis) gegeben, wird üblicherweise der effektive Koppelkoeffizient als Bewertungsmaßstab herangezogen. Näherungsweise lässt sich dieser durch die folgende vereinfachte Formel ausdrücken:

$$k_{\text{eff}}^2 = \frac{f_p^2 - f_s^2}{f_p^2}$$

$f_s$ : Serienresonanzfrequenz

$f_p$ : Parallelresonanzfrequenz

### Ladungskonstante, piezoelektrische d

Verhältnis von entstehender Ladung zu beaufschlagter Kraft; ausgedrückt in Coulomb/Newton (direkter Piezoeffekt) oder:

Verhältnis von erzeugter Dehnung zu angelegter elektrischer Spannung, ausgedrückt in Meter/Volt (inverser Piezoeffekt).

Bei kurzgeschlossenem piezokeramischem Element ( $E = 0$ ) gilt:

$$Q = d \cdot F$$

Q: Ladung (erzeugte)

F: Kraft (auferlegte)

Für den mechanisch unbelasteten Zustand ( $T = 0$ ) gilt:

$$S = d \cdot U$$

S: Dehnung (erzeugte)

U: elektrische Spannung (angelegte)

### Nachgiebigkeit, elastische s

Die elastische Nachgiebigkeit  $s$  besteht in dem Verhältnis zwischen Dehnung  $S$  und mechanischer Spannung  $T$  und entspricht dem Kehrwert des Elastizitätsmoduls (auch Youngscher Modul).

### Spannungskonstante, piezoelektrische g

Verhältnis von erzeugter elektrischer Feldstärke zu beaufschlagter mechanischer Spannung, ausgedrückt in Voltmeter/Newton (direkter Piezoeffekt), oder:

Verhältnis von erzeugter Dehnung zu beaufschlagter Ladungsdichte, ausgedrückt in Quadratmeter/Coulomb (inverser Piezoeffekt).

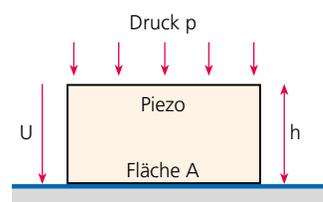
Spannungskonstante und Ladungskonstante sind über die Kapazität des Bauteils miteinander verknüpft. Es gilt:

$$d = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot g$$

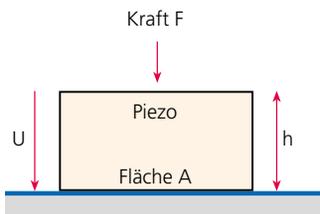
$\epsilon_r$ : relative Permittivität

$\epsilon_0$ : siehe Dielektrizitätszahl, relative

Im Folgenden sind einige Beispiele dargestellt, wie unter Verwendung der Spannungskonstanten die am Piezokeramikteil entstehende Spannung berechnet werden kann.



$$U = g_{33} \cdot h \cdot p$$



$$U = g_{33} \cdot h \cdot \frac{F}{A}$$



Beschleunigung  $a$

$$U = g_{33} \cdot h \cdot \frac{a (M + \frac{1}{2} \cdot \zeta \cdot h \cdot A)}{A}$$

$$= \frac{d_{33}}{C} \cdot (M + \frac{m}{2}) \cdot a$$

$M$ : Masse der aufgesetzten seismischen Masse

$\zeta$ : Dichte der Piezokeramik

$h$ : Höhe der Piezokeramik

$A$ : Fläche der Piezokeramik

$m$ : Masse der Piezokeramik

### Temperaturkoeffizient $\alpha_k$

Gibt die relative Änderung des elektro-mechanischen Koeffizienten pro Kelvin Temperaturänderung an.

### Verlustfaktor, dielektrischer $\tan \delta$

Verhältnis von Verlustleistung zu Blindleistung bei sinusförmiger Ansteuerung des Bauteils weit unterhalb seiner ersten Eigenresonanzfrequenz; üblicherweise gemessen bei 1 kHz. Für Leistungswandleranwendungen sollten Piezokeramiken mit entsprechend niedrigen Verlustfaktorwerten verwendet werden.

### Kennwerte piezoelektrischer Keramiken

Zur Charakterisierung piezoelektrischer Werkstoffe werden bestimmte Kenngrößen in der nebenstehenden Datentafel angegeben. Diese Kenngrößen werden an Normprüfkörpern als Kleinsignalwerte nach EN 50324 ermittelt und zeigen Temperatur- und Zeitabhängigkeit. Aus diesem Grunde wird üblicherweise bei Temperaturen zwischen 20 °C und 25 °C sowie 24 Stunden nach der Polarisierung gemessen. Die Eigenschaften können hiervon bei anderen Abmessungen und Herstellungsverfahren abweichen.

Die polykristalline Natur von Piezokeramik, statistische Schwankungen der Zusammensetzung und Einflüsse des Produktionsprozesses bedingen, dass die angegebenen Kenngrößen typische Mittelwerte darstellen. Diese Kennwerte können daher nur Richtwerte für das Design von piezokeramischen Anwendungen sein. Übliche Toleranzen sind  $\pm 20\%$ .

Hinweis: Die Kennwerte der Werkstoffgruppen sind in den separaten Datenblättern ersichtlich.

# Piezo Terminology: A Glossary

## Aging rate c

The aging rate indicates the relative change in a given property per unit time, over intervals expressed on a decimal exponent basis ("decades").

The following variables are used:

$c_c$ : capacitance aging rate

$c_f$ : resonance frequency aging rate

$c_k$ : aging rate of the electromechanical coupling factor

Thus, if the capacitance aging rate of SONOX® P4 ceramics is given as -4.5 % per decade, the aging curve is as for example:

1 day after polarization: 100 nF

10 days after polarization:

95.5 nF (-4.5 %)

100 days after polarization:

91.2 nF (-4.5 %)

1000 days after polarization:

87.1 nF (-4.5 %)

## Capacitance C

Capacitance of a piezoelectric transducer, measured at a frequency far below its minimum resonance frequency (usually 1 kHz).

By using the relative dielectric permittivity, this parameter can be computed from the data sheet for a defined component geometry and material by means of the following formula:

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot (A/d)$$

A: electrode area

d: electrode spacing

A good approximation of the capacitance (in pF) of a piezoceramic body can be achieved by means of the following simplified equations:

Round disk/cylinder:

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot d^2}{t \cdot 144} \text{ [pF]}$$

t: thickness / height in mm

d: diameter in mm

Rectangular plate:

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot l \cdot w}{t \cdot 113} \text{ [pF]}$$

l: length in mm

w: width in mm

t: thickness in mm

## Charge constant, piezoelectric d

Denotes the ratio between charge generated and the force applied, indicated in Coulomb per Newton (direct piezo effect), or the ratio between the strain produced and the electrical voltage applied, indicated in meters per volt (inverse piezo effect).

For a short-circuited piezoceramic element ( $E = 0$ ), the following equation applies:

$$Q = d \cdot F$$

Q: charge (generated)

F: force (applied)

For a mechanical no-load condition ( $T=0$ ), the following equation can be expressed:

$$S = d \cdot U$$

S: strain (generated)

U: electrical voltage (applied)

## Compliance, elastic s

The elastic compliance  $s$  reflects the ratio between the strain  $S$  and the mechanical stress  $T$  and is equal to the inverse of the modulus of elasticity (Young's modulus).

## Coupling factor, electromechanical k

Measures for the efficiency of the electrical-to-mechanical energy conversion.

For electrically "driven" components, the following equation applies:

$$k^2 = \frac{\text{stored mechanical energy}}{\text{total energy stored}}$$

For mechanically "driven" components, we may write

$$k^2 = \frac{\text{stored electrical energy}}{\text{total energy stored}}$$

Depending on the boundary conditions, there exist five different coupling factors reflecting the form factors and oscillation mode of the component. Where boundary conditions like a specific diameter/thickness ratio are not granted, the effective coupling factor is normally used as a standard. It can be approximated by means of the following simplified formula:

$$k_{\text{eff}}^2 = \frac{f_p^2 - f_s^2}{f_p^2}$$

$f_s$ : series resonance frequency

$f_p$ : parallel resonance frequency

## Curie temperature, $T_c$

This is the temperature at which the dielectric permittivity of ferroelectric ceramics will reach its maximum.

At this temperature, a piezoelectric ceramic will lose its polarized state. For this reason, operating temperatures normally should not exceed half the Curie temperature.

## Dielectric permittivity, relative $\epsilon_r$

Denotes the ratio between the absolute dielectric constant and the permittivity of free space ( $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ).

### Dissipation factor, dielectric $\tan \delta$

Denotes the ratio between power loss and reactive power when the component is excited with a sine-wave signal at a frequency far below its lowest resonant frequency (usually measured at 1 kHz). For power conversion applications it is recommended to use piezoceramics with suitably low dissipation factor.

### Frequency constant $N$

Product of the mechanical resonance frequency and the dimension determining that frequency. The index indicates the oscillation form.

$N_p$ : Frequency constant for the planar oscillation of a circular disk

$N_t$ : Frequency constant for the thickness-mode oscillation of a thin plate

$N_1$ : Frequency constant for the longitudinal or transverse oscillation of a thin rectangular plate

$N_3$ : Frequency constant for the longitudinal oscillation of a slender rod or cylinder polarized in that direction

Since geometrically induced coupled-mode vibrations may occur in all of the above oscillation forms, the geometrical configuration of the specific oscillating body must be taken into account when using the frequency constant for calculating resonance frequencies (refer also to the section "Basic Oscillation Modes of Piezoelectric Resonators").

Apart from  $N_p$ , the frequency constants indicated equal one-half the sound propagation velocity in the piezoceramic material.

### Indices

In piezoelectric materials, the direction of positive polarization is usually made to coincide with the z-axis of a rectangular system of crystallographic axes. These coordinates are normally designated 1, 2, 3, with direction 3 indicating the polarization direction. Mechanical and electrical influ-

ences acting in any of these directions are identified with the corresponding index. Since piezoelectric components are already polarized in a given direction (i.e., 3) and will therefore show an anisotropic behavior, the coefficients given in the material property data charts are direction-related and will often comprise two subscripts (plus, occasionally, one superscript).

The superscript indicates the variable that remains constant, while the two subscripts identify the direction in which the different variables (electric field, electric displacement, mechanical stress and strain) are linked.

### Superscripts

T: at constant mechanical stress

S: at constant strain

E: at constant electrical field strength

D: at constant dielectric displacement

### Subscripts

1,2: perpendicular to the direction of polarization – directions 1 and 2 are orthogonal to each other and equivalent (isotropic behavior of ceramics)

3: in the direction of polarization

Example:

A piezoelectric charge constant  $d_{33}$  (refer also to the data sheet) indicates that the mechanical stress applied during the measurement acts in direction 3 (polarization direction), whereas the electric displacement produced will also occur in direction 3.

### Quality factor, mechanical $Q_m$

Amplitude magnification of an oscillating piezoelectric component at resonance. Defined as the ratio of energy input per oscillation cycle over the amount of energy consumed (i.e., dissipated) per oscillation cycle. The mechanical quality factor can be computed as follows:

$$Q_m = \frac{f_p^2}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot Z_s \cdot C \cdot (f_p^2 - f_s^2)}$$

$f_p$ : parallel resonance frequency

$f_s$ : series resonance frequency

C: capacitance

$Z_s$ : impedance at resonance

Thus, the mechanical quality factor is a dimensionless measure for a component's mechanical losses in dynamic driving mode.

### Temperature coefficient $\alpha_k$

Indicates the relative change of the electromechanical coupling factor per Kelvin of temperature change.

### Voltage constant, piezoelectric $g$

Denotes the ratio between the electric field strength produced and the mechanical stress applied, indicated in voltmeters/Newton (direct piezo effect), or the ratio between the strain produced and the charge density applied, indicated in square meters per Coulomb (inverse piezo effect).

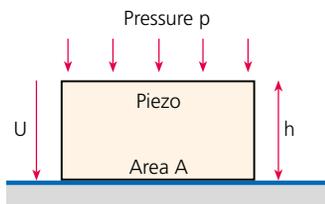
The voltage constant and charge constant are interrelated via the capacitance of the component. This relationship is expressed by the following formula:

$$\mathbf{d} = \boldsymbol{\varepsilon}_r \cdot \boldsymbol{\varepsilon}_0 \cdot \mathbf{g}$$

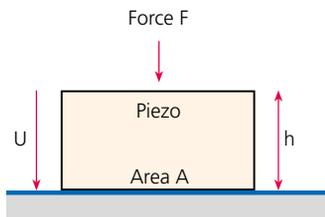
$\boldsymbol{\varepsilon}_r$ : relative permittivity

$\boldsymbol{\varepsilon}_0$ : permittivity of free space

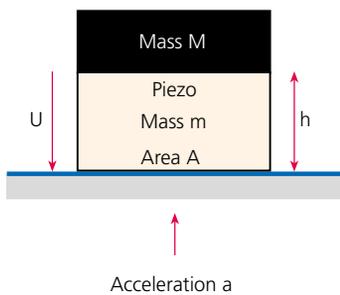
The following examples illustrate how the voltage across the piezoelectric component can be calculated by means of the voltage constant.



$$U = g_{33} \cdot h \cdot p$$



$$U = g_{33} \cdot h \cdot \frac{F}{A}$$



$$U = g_{33} \cdot h \cdot \frac{a (M + \frac{1}{2} \cdot \zeta \cdot h \cdot A)}{A}$$

$$= \frac{d_{33}}{C} \cdot (M + \frac{m}{2}) \cdot a$$

*M*: Mass of the attached seismic mass

$\zeta$ : Density of the piezoceramic material

*h*: Height of piezoceramic component

*A*: Area of piezoceramic component

*m*: Mass of the piezoceramic component

## Characteristics of Piezoelectric Ceramics

Piezoelectric materials are characterized by specific parameters, some of which are summarized in the adjacent table. The values of these parameters are determined on standardized specimens in the form of small-signal measurements according to EN 50324 and exhibit a dependence on temperature and time.

For this reason, measurements are usually taken at temperatures between 20°C and 25°C 24 hours after polarization. Properties can deviate in using different dimensions and production technologies. With other dimensions and production methods properties can be different.

Due to the polycrystalline nature of piezoceramics, but also as a result of statistical variations in their composition and production-related influences, the data stated should be viewed as typical values only. They are intended as a guide for the design of piezoceramic applications. The standard tolerance range is  $\pm 20\%$ .

Note: The characteristic values of the material groups are provided in detail in separate data sheets.

**Алматы** (727)345-47-04  
**Ангарск** (3955)60-70-56  
**Архангельск** (8182)63-90-72  
**Астрахань** (8512)99-46-04  
**Барнаул** (3852)73-04-60  
**Белгород** (4722)40-23-64  
**Благовещенск** (4162)22-76-07  
**Брянск** (4832)59-03-52  
**Владивосток** (423)249-28-31  
**Владикавказ** (8672)28-90-48  
**Владимир** (4922)49-43-18  
**Волгоград** (844)278-03-48  
**Вологда** (8172)26-41-59  
**Воронеж** (473)204-51-73  
**Екатеринбург** (343)384-55-89

**Иваново** (4932)77-34-06  
**Ижевск** (3412)26-03-58  
**Иркутск** (395)279-98-46  
**Казань** (843)206-01-48  
**Калининград** (4012)72-03-81  
**Калуга** (4842)92-23-67  
**Кемерово** (3842)65-04-62  
**Киров** (8332)68-02-04  
**Коломна** (4966)23-41-49  
**Кострома** (4942)77-07-48  
**Краснодар** (861)203-40-90  
**Красноярск** (391)204-63-61  
**Курск** (4712)77-13-04  
**Курган** (3522)50-90-47  
**Липецк** (4742)52-20-81

**Магнитогорск** (3519)55-03-13  
**Москва** (495)268-04-70  
**Мурманск** (8152)59-64-93  
**Набережные Челны** (8552)20-53-41  
**Нижний Новгород** (831)429-08-12  
**Новокузнецк** (3843)20-46-81  
**Ноябрьск** (3496)41-32-12  
**Новосибирск** (383)227-86-73  
**Омск** (3812)21-46-40  
**Орел** (4862)44-53-42  
**Оренбург** (3532)37-68-04  
**Пенза** (8412)22-31-16  
**Петрозаводск** (8142)55-98-37  
**Псков** (8112)59-10-37  
**Пермь** (342)205-81-47

**Ростов-на-Дону** (863)308-18-15  
**Рязань** (4912)46-61-64  
**Самара** (846)206-03-16  
**Санкт-Петербург** (812)309-46-40  
**Саранск** (8342)22-96-24  
**Саратов** (845)249-38-78  
**Севастополь** (8692)22-31-93  
**Симферополь** (3652)67-13-56  
**Смоленск** (4812)29-41-54  
**Сочи** (862)225-72-31  
**Ставрополь** (8652)20-65-13  
**Сургут** (3462)77-98-35  
**Сыктывкар** (8212)25-95-17  
**Тамбов** (4752)50-40-97  
**Тверь** (4822)63-31-35

**Тольятти** (8482)63-91-07  
**Томск** (3822)98-41-53  
**Тула** (4872)33-79-87  
**Тюмень** (3452)66-21-18  
**Улан-Удэ** (3012)59-97-51  
**Ульяновск** (8422)24-23-59  
**Уфа** (347)229-48-12  
**Хабаровск** (4212)92-98-04  
**Чебоксары** (8352)28-53-07  
**Челябинск** (351)202-03-61  
**Череповец** (8202)49-02-64  
**Чита** (3022)38-34-83  
**Якутск** (4112)23-90-97  
**Ярославль** (4852)69-52-93

**Россия** +7(495)268-04-70

**Казахстан** +7(727)345-47-04

**Беларусь** +(375)257-127-884

**Узбекистан** +998(71)205-18-59

**Киргизия** +996(312)96-26-47