4) Piezokeramische Werkstoffe und ihre Anwendungen in der Technik

- Dr. Günter Helke,
  CeramTec AG,
  Lauf a. d. Pegnitz

Die Folien finden Sie ab Seite 163.

Piezoelektrische Keramiken

Physikalische Eigenschaften und praktische Anwendungen in der Ultraschalltechnik und Sensortechnik

Zusammenfassung

Piezoelektrische Keramiken sind spezielle Ferroelektrika, die durch Polung piezoelektrische Eigenschaften besitzen. Die Polung der keramischen Ferroelektrika wird durch Einwirkung eines starken elektrischen Gleichfeldes unterhalb der Curietemperatur möglich. Piezokeramiken auf der Basis des binären Systems der festen Lösungen von Bleizirkonat $PbZrO_3$ und Bleititanat $PbTiO_3$ werden wegen ihrer excellenten, durch Dotierungen auf die jeweiligen Anwendungen zugeschnittenen physikalischen Eigenschaften in der industriellen Fertigung favorisiert. Dank der großen Vielfalt der aus ihnen herzustellenden Bauteile kommen die piezoelektrischen Keramiken für elektromechanische Wandler in vielen Bereichen der Technik zum Einsatz.

Einleitung

Die epochemachende Entwicklung von Bleizirkonat- Titanat- Keramiken (PZT) vor mehr als 30 Jahren führte zu einer Vielfalt von piezokeramischen Bauteilen für die praktische Anwendung. Gegenwärtig ist nicht abzusehen, daß eine andere Werkstoff- Kategorie auch nur annähernd

Eigenschaften wie die der Bleizirkonat- Titanat- Keramiken aufweisen könnte.

Informationszentrum

Durch Modifikation der chemischen Zusammensetzung von Piezokeramiken auf der Basis von Bleizirkonat- Titanat ist die Optimierung der funktionellen Eigenschaften entsprechend den Erfordernissen der jeweiligen praktischen Anwendung möglich.

Hauptanwendungsgebiete der piezoelektrischen Bleizirkonat- Titanat-Keramiken sind die Ultraschalltechnik und Hydroakustik, die Automobiltechnik, die Medizintechnik , die Meßtechnik sowie die Haushaltstechnik.

1. Physikalische Eigenschaften piezoelektrischer Keramiken

Die Piezoelektrizität

Die Piezoelektrizität ist eine Eigenschaft von dielektrischen festen Körpern und beschreibt eine Kopplung zwischen mechanischen und elektrischen Größen. Wenn ein frei deformierbarer fester Körper einer mechanischen Spannung T_i (Druck, Zug) ausgesetzt ist, tritt eine zusätzliche elektrische Polarisation P_j auf.

Dementsprechend wird an der Oberfläche eines piezoelektrischen Körpers durch eine mechanische Spannung T_i eine elektrische Ladung induziert. Mit diesem Vorgang ist der direkte piezoelektrische Effekt definiert (Bild 1, links).

Eine Umkehrung ist gegeben durch eine Deformation S_j, die bei Einwirkung einer elektrischen Feldstärke E_i entsteht. Ein elektrisches Feld E_i bewirkt in Abhängigkeit von der Richtung eine Dilatation oder eine Kontraktion, die der elektrischen Feldstärke E_i proportional ist.

Mit diesem Vorgang ist der inverse piezoelektrische Effekt definiert (Bild 1, rechts).

Die Proportionalitäts- Konstante d_{ij} ist die piezoelektrische Konstante, die für beide Effekte numerisch identisch ist.

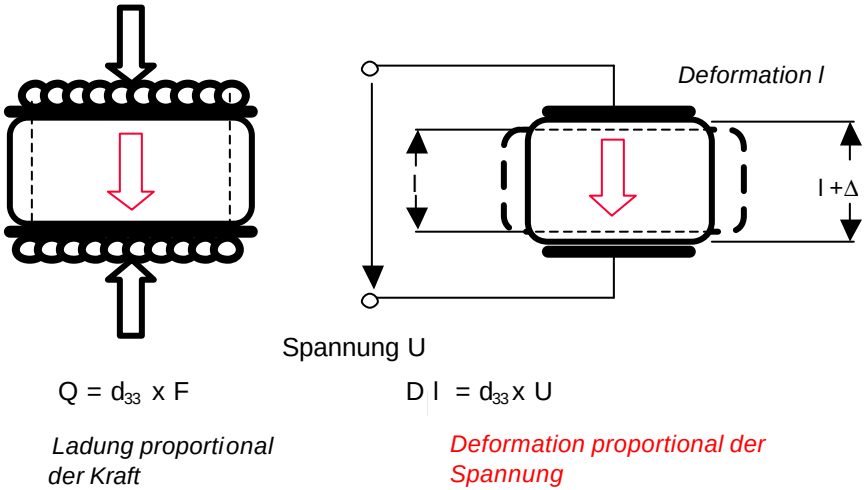


Bild 1. Direkter und inverser piezoelektrischer Effekt

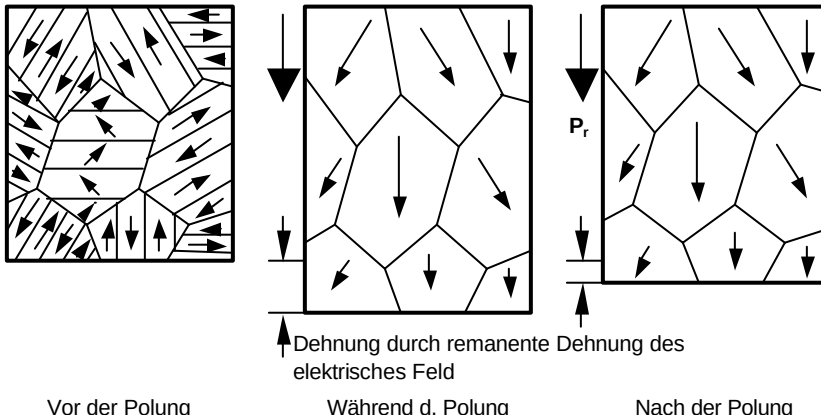
Die Piezoelektrizität ferroelektrischer Keramiken

Piezoelektrische Keramiken sind spezielle Ferroelektrika , deren Verhalten im elektrischen Feld die Piezoelektrizität bedingt. Die Polarisationseffekte in ferroelektrischer Keramik ergeben sich aus den Besonderheiten der keramischen Mikrostruktur bei Auftreten der spontanen Polarisation bei einer bestimmten Temperatur, der sog. Curietemperatur. Als Ergebnis des Sinterprozesses ist jedes kristalline Korn von anderen Körnern umgeben. Bei der Temperatur der Umwandlung in den ferroelektrischen Zustand wird jedes Korn in einheitlich polarisierte Domänen aufgespalten.

Die Dipolmomente sind allerdings aufgrund der statistischen Verteilung der Polarisationsrichtungen kompensiert. Demzufolge ist die Mikrostruktur der ferroelektrischen Keramik nach der Synthese und Abkühlung un-

Informationszentrum

ter die Curietemperatur isotrop. Erst durch die Einwirkung eines äußeren elektrischen Gleichfeldes wird die Polung des polykristallinen Körpers möglich (Bild 2), und es tritt eine endliche remanente Polarisation auf.



Die Keramik ist nach Abschalten des elektrischen Feldes gepolt.

Bild 2. Polare Struktur von Piezokeramiken

Nach der Polung entsteht ein metastabiler Zustand von Domänenkonfigurationen. Die für die Polung erforderliche Beweglichkeit der Domänen trägt in direkter Weise zu dem dielektrischen und elektromechanischen Verhalten der Piezokeramiken bei.

Die Stabilität der sich aus dem Polungsprozeß ergebenden remanenten Polarisation bestimmt auch die Alterungsrate der jeweiligen piezoelektrischen, elastischen oder dielektrischen Koeffizienten.

2. Zusammensetzung piezoelektrischer Keramiken

Bleizirkonat- Titanat- Keramik (PZT)

Bleizirkonat- Titanat- Keramik zeigt als ferroelektrisches Material mit großer remanenter Polarisation und hoher Dielektrizitätszahl einen großen piezoelektrischen Effekt.

Piezokeramiken auf der Basis des binären Systems der festen Lösungen von Bleititanat $PbTiO_3$ und Bleizirkonat $PbZrO_3$ werden wegen ihrer excellenten, durch Dotierungen auf die jeweiligen Anwendungen zugeschnittenen physikalischen Eigenschaften seit langem in der industriellen Fertigung favorisiert.

3. Anwendung piezoelektrischer Keramiken

Die Anwendung der piezoelektrischen Keramiken dehnte sich aus in dem Maße, wie der Herstellungsprozeß für diese Keramiken entwickelt werden konnte. Ein wesentlicher Aspekt ist die Synthese von Bleizirkonat- Titanat- Keramiken mit einer anspruchsvollen Spezifikation bei niedrigen Kosten einer großvolumigen Produktion. Nicht zu unterschätzen ist dabei jedoch, daß auch spezielle Anwendungen, die keine großvolumige Produktion voraussetzen und relativ hohe Kosten und Preise tolerieren, weiterhin ein außergewöhnliches Wachstum erfahren.

Der vorteilhafte Einsatz von Piezokeramiken als Wandler- Werkstoffe folgt aus den hervorragenden piezoelektrischen Eigenschaften der in großer Formenvielfalt herstellbaren Bauteile.

Piezokeramische Bauteile können entsprechend der Anwendung der piezoelektrischen Effekte (vgl. Bild1) in drei Gruppen klassifiziert werden, je nachdem ob der direkte piezoelektrische Effekt (Umwandlung einer mechanischen Größe in eine elektrisches Signal), der inverse piezoelektrische Effekt (Erzeugung von Deformationen/ Schwingungen durch eine elektrische Spannung) oder beide Effekte genutzt werden, s. Tabelle 1.

Informationszentrum

Direkter piezoelektrischer Effekt	***Inverser piezoelektrischer Effekt***	***Beide Effekte***
Mechano- elektrische Wandler • *Piezotasten* • *Sensoren* ***Elektroakustische Wandler*** • *Schall- und Ultraschall-Empfänger* *Hochspannungsquellen* • *Zündlemente*	***Schall- und Ultraschallgeber*** • *Tongeber* • *Leistungs- Ultraschallgeber* ***Aktoren*** • *Multilayer* • *Biegestäbe* • *Membrane*	***Ultraschall- Signalverarbeitung*** • *Sonartechnik* • *Ultraschall-Materialprüfung* • *Medizinische Diagnostik* • *Entfernungs- und Füllstandsmessung* • *Annäherungs-Detektoren* • *Erkennungssysteme*

Tabelle 1. Einsatzbereiche piezoelektrischer Wandler

Die piezokeramischen Bauteile sind elektromechanische bzw. elektroakustische Wandler. Mit solchen Wandlern ist die Umwandlung einer Form von Energie in eine andere in Sensoren ebenso wie in Ultraschall-Gebern und Ultraschall –Empfänger möglich.

Bei Nutzung des direkten piezoelektrischen Effektes sind mechanisch-elektrische Wandler entsprechend den Anregungsbedingungen Signal-Generatoren für quasistatische oder dynamische Sensoren, die der Messung von Kräften bzw. Beschleunigungen dienen sowie elektroakustische Schall- oder Ultraschall- Empfänger (“Mikrofone“). Die Größe des direkten piezoelektrischen Effektes bestimmter Piezokeramiken ermöglicht zudem auch die Generierung hoher Spannungen für die Zündung von Gasen.

Bei Nutzung des inversen piezoelektrischen Effekts werden die elektrisch- mechanischen Wandler als Schall- und insbesondere als Ultraschallgeber eingesetzt. Gerade durch die Möglichkeit der effektiven Erzeugung und Umwandlung von Ultraschall haben Piezokeramiken sehr bald einen vorrangigen Platz in der Ultraschalltechnik eingenommen. Die Ultraschalltechnik kann in zwei Segmente unterteilt werden: Hochleistungs- und Kleinsignal- Ultraschall.

Die Leistungsdichte von Hochleistungs- Ultraschall- Systemen kann im Bereich der niedrigen Ultraschall- Frequenzen von 20...60 KHz im Bereich von 1 W/cm^2 bis mehreren kW/cm^2 liegen. Ausgesprochene Hochleistungs- Ultraschall- Systeme in diesem Bereich sind Ultraschall-Reinigungsgeräte und Geräte zur Ultraschall- Bearbeitung (Bohren, Schweißen). Die in der industriellen Praxis weit verbreiteten Ultraschall-Reinigungsgeräte kommen beispielsweise bei der Reinigung von Präzisionsteilen, Halbleitern und elektronischen Bauteilen in unterschiedlichen Fertigungsabschnitten ebenso zum Einsatz wie bei der Reinigung von Uhren und optischen Gläsern. Mit Hochleistungs- Ultraschall können besonders spröde und harte Werkstoffe (Quarz, Ferrite, Edelsteine, ultraharte Legierungen, Halbleiter- Kristalle) bearbeitet werden. Ein Beispiel für Hochleistungs- Ultraschall- Systeme sind auch Ultraschall- Vernebler von Flüssigkeiten (Wasser, Medikamente), die vornehmlich bei Frequenzen im Bereich von 1 ... 2 MHz betrieben werden und bis zu 20 Watt eine Verneblungsrate von 0,3 ... 0,5 l/h erzeugen.

Ultraschall- Sensoren können als direkte Ultraschall- Wandler passiv durch Nutzung des direkten piezoelektrischen Effektes (Mikrofone, Hydrofone; Klopfsensoren) oder aktiv in der Umgebung ihrer Eigenfrequenz betrieben werden. Davon zu unterscheiden sind Sonar- Sensoren.

Der Gebrauch des inversen und des direkten piezoelektrischen Effektes ist übliche Weg zu Erzeugung und zum Empfang von Ultraschall bei der Signal- Übertragung in der Sonartechnik. Sonar- Systeme dienen der Identifikation von Objekt- Strukturen, der Messung von Distanzen oder der Messung von Material- oder Objekt- Eigenschaften. In Sensor- Systemen wird der Ultraschall ausgestrahlt und nach Durchdringung des Mediums oder Reflexion empfangen. Die Sonartechnik umfaßt Systeme der Hydroakustik (Ortung, Navigation; Fisch- Finder), der zerstörungsfreien Ultraschall- Materialprüfung, der medizinischen Diagnostik, aber auch Anordnungen zur Füllstands- und Abstandsmessung(z. B. PKW-Einparkhilfen) sowie Systeme der Mengen- und Durchflußmessung.

Bei Sonar- Systemen der Hydroakustik im niederfrequenten Ultraschallbereich (20 ... 200 kHz) kann der Ultraschall- Pegel einige Hundert Watt erreichen. Der Terminus „Kleinsignal“ bezieht sich gewöhnlich auf Sonarsysteme im hochfrequenten Bereich (0,5 ... 20 MHz). Typische Leistungs- Pegel für „Kleinsignal- Ultraschall“ werden in Milliwatt gemessen. Der hochfrequente Ultraschall- Strahl niedriger Leistung durchdringt

Informationszentrum

jeweils Werkstoffe und Grenzflächen (s. zerstörungsfreie Materialprüfung) oder im Fall von biologischem Material Gewebe unterschiedlicher Dichte (s. medizinische Diagnostik), wird teilweise reflektiert, und die resultierenden Echos (Impuls- Echo) werden durch einen Wandler empfangen und als elektrisches Signal mit bildgebenden Verfahren ausgewertet.

Dank der großen Vielfalt der aus piezoelektrischen Keramiken herzustellenden Bauteile kommen diese für elektromechanische Wandler in einem weiten Frequenzbereich zum Einsatz (Tabelle 2).

<table>
<tr><th>Frequenz, Hz</th><th>Anwendung</th><th>Gas</th><th>Liquid</th><th>Solid</th></tr>
<tr><td rowspan="3">10^7
-
10^0</td><td rowspan="2">Ultraschall</td><td colspan="2">Dickenschwinger
+Anpaßschichten</td><td>Dickenschwinger,
Dicken-
Scherschwinger</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Biegeschwinger</td><td>Verbundschwinger</td><td rowspan="2">Längsschwinger</td></tr>
<tr><td>Hörbarer Schall</td><td>Biegeschwinger</td></tr>
<tr><td></td><td>Quasistat. Signal</td><td>Biegeschwinger</td><td>Dickenschwinger</td></tr>
</table>

Tabelle 2: Elektromechanische Wandler für verschiedene akustische Medien

Spezifikation von piezoelektrischen Keramiken für die praktische Anwendung

Für die unterschiedlichen Anwendungen erfüllen piezoelektrische Keramiken als Modifikationen des Bleizirkonat- Titanat unterschiedlicher Spezifikation unterschiedliche Anforderungen. Für solche Anwendungen, wie Ultraschallgeneratoren hoher Leistung für die Ultraschallreinigung und die Sonartechnik, kommen "harte" piezoelektrische Keramiken (moderate Dielektrizitätszahl, große piezoelektrische Aktivität hohe elektrische und mechanische Güte und geringe dielektrische Verluste,

hohe Stabilität bei hohen Betriebsfeldstärken und hohen mechanischen Belastungen) zum Einsatz.

Einsatzgebiete der "weichen" piezoelektrischen Keramiken (Tabelle 3) sind die Elektroakustik (Schallgeber und Schallempfänger) und die Meßtechnik (Sensoren).

Werkstoff			Sonox P 5	Sonox P 502	Sonox P 53
Dielektrizitätszahl	$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$		1850	1850	3800
Verlustfaktor	$\tan\delta$	10^{-3}	20	12.5	16
Curietemperatur	ϑ_C	°C	305	335	215
Kopplungsfaktor	k_p		.62	.62	.65
Ladungskonstanten	d_{33},		450	440	680
Spannungskonstanten	g_{33}	10^{-3} V	27.5	25.5	19.0
Dichte	γ	10^3 kg / m	7.65	7.74	7.83
Gütefaktor	Q_m		80	80	75
Temperaturkoeffizienten	α_ε,		65	25	24
	α_f		-3.5	2.9	4.7
	α_k		-1.8	-5.2	-1.0

Tabelle 3: Eigenschaften von SONOX® Piezokeramiken für Sensoren

Die verwendeten Vortragsfolien (Nr. 1 bis 12) finden sich auf den folgenden Seiten.

Informationszentrum

think ceramics

Piezoelektrische Keramiken

Physikalische Eigenschaften und
praktische Anwendungen
in der Ultraschalltechnik und Sensortechnik

Dr. Günter Helke
CeramTec AG. Lauf

UKI_2001.ppt

Informationszentrum
Technische Keramik

Folie 1

think ceramics

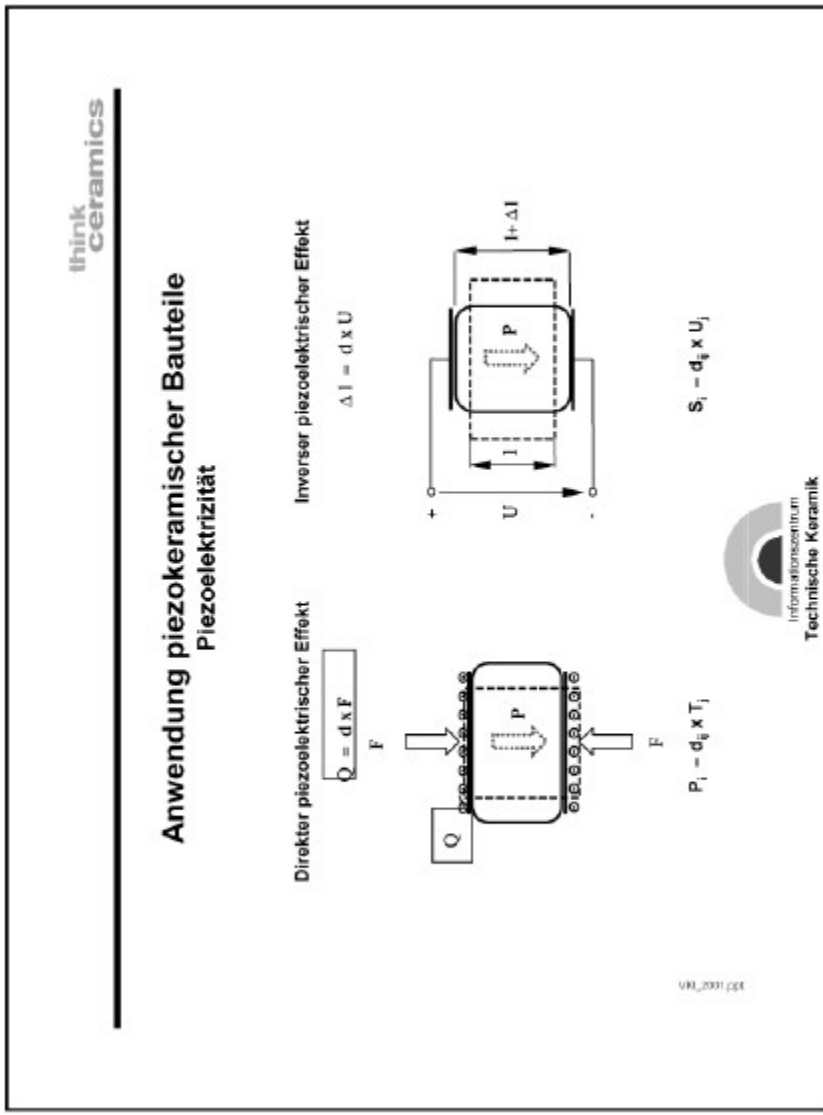
Piezoelektrische Keramiken

- Die Piezoelektrizität ferroelektrischer Keramiken
- Zusammensetzung piezoelektrischer Keramiken
- Einsatzbereiche piezoelektrischer Wandler
- Elektromechanische Wandler für verschiedene akustische Medien
- Spezifikation von piezoelektrischen Keramiken für die praktische Anwendung

Informationszentrum Technische Keramik

VN_2001.ppt

Folie 2


think ceramics
Anwendung piezokeramischer Bauteile
Piezoelektrizität
Direkter piezoelektrischer Effekt
Q = d x F
F
Q
P
F
$P_i = d_{ij} \times T_j$
Inverser piezoelektrischer Effekt
$\Delta l = d \times U$
+
U
-
l
P
l+Δl
$S_i = d_{ij} \times U_j$
Informationszentrum
Technische Keramik
VKI_2001.ppt

Folie 3

think ceramics

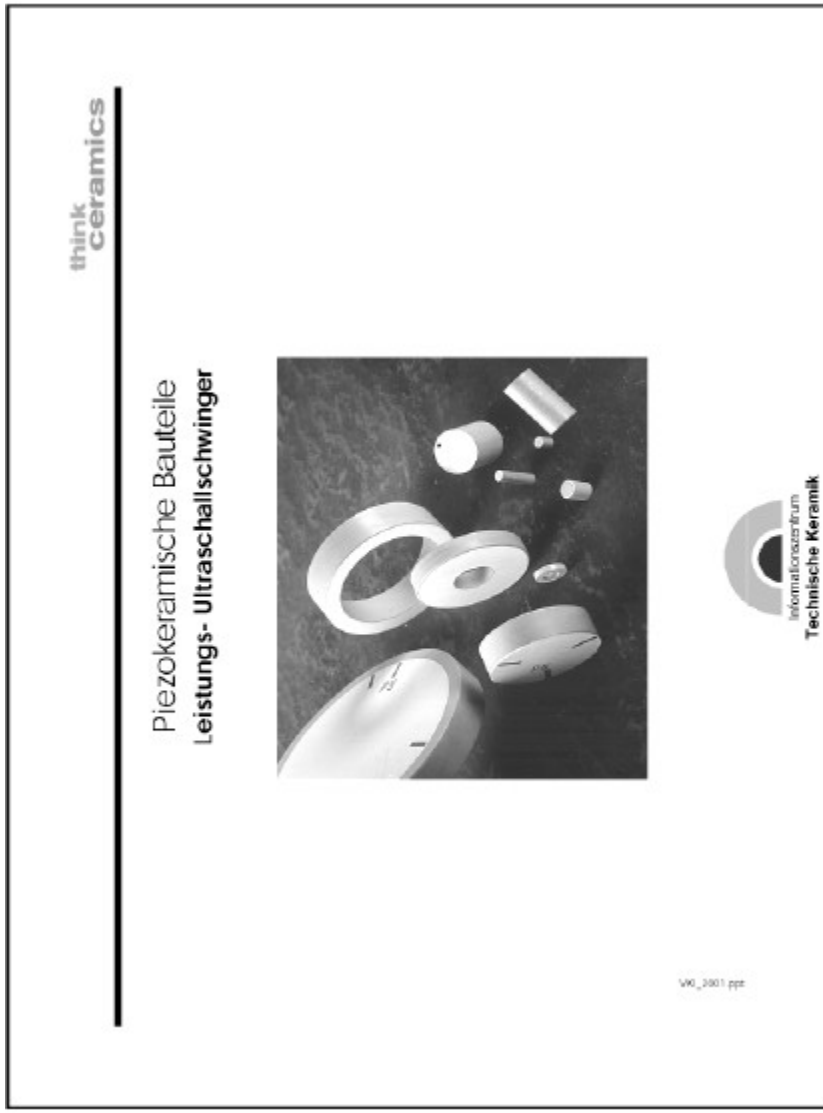
Anwendung des direkten und inversen piezoelektrischen Effektes

direkter piezoelektrischer Effekt	inverser piezoelektrischer Effekt	beide Effekte
mechano - elektrische Wandler	Schall- und Ultraschall- Geber	Ultraschall-Signalverarbeitung
• Piezotasten • Sensoren	• Tongeber • Leistungs - Ultraschallgeber	• Sonartechnik • Ultraschall- Marialprüfung • medizinische Diagnostik • Entfernungs - und Füllstands- Messung • Annäherungs - Detektoren • Erkennungs - Systeme
elektro- akustische Wandler • Schall- und Ultraschall-Empfänger: Mikrofone, Hydrofone	Aktoren • Multilayer • Biege- Stäbe und - Membrane	
Hochspannungsquellen: • Zündelemente	Motoren	

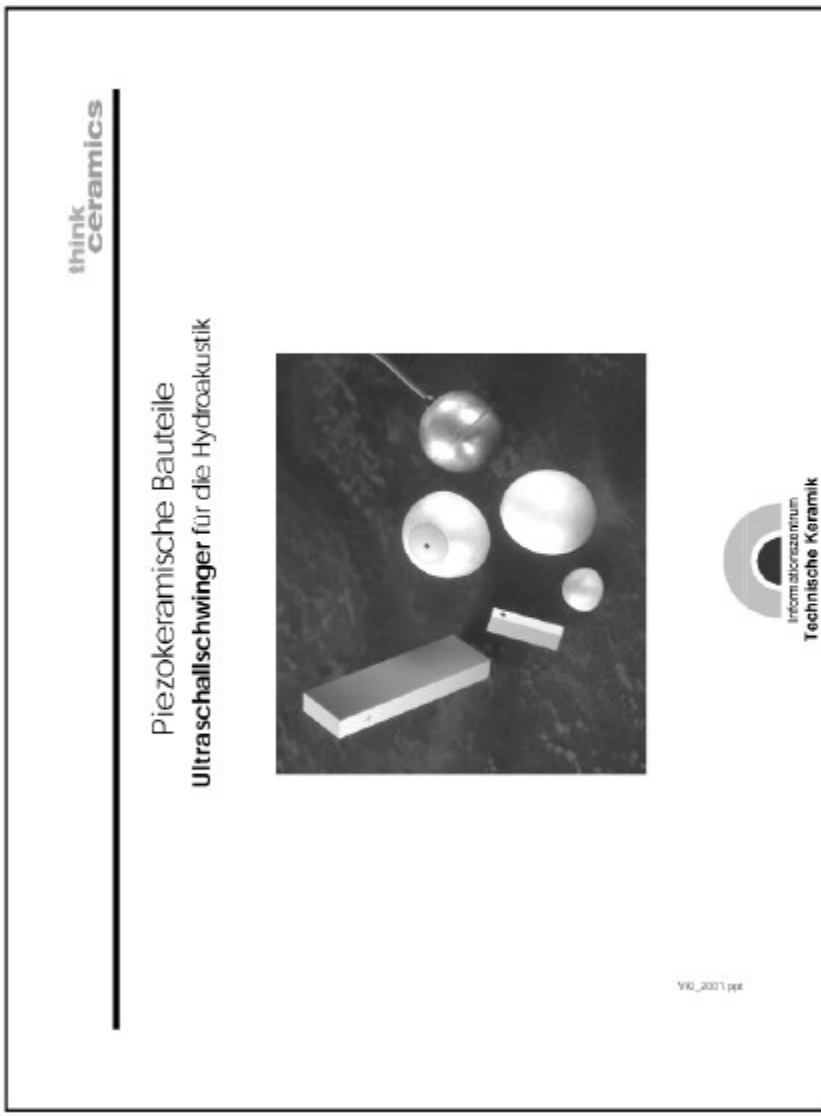
VRI_2001.ppt

Informationszentrum Technische Keramik

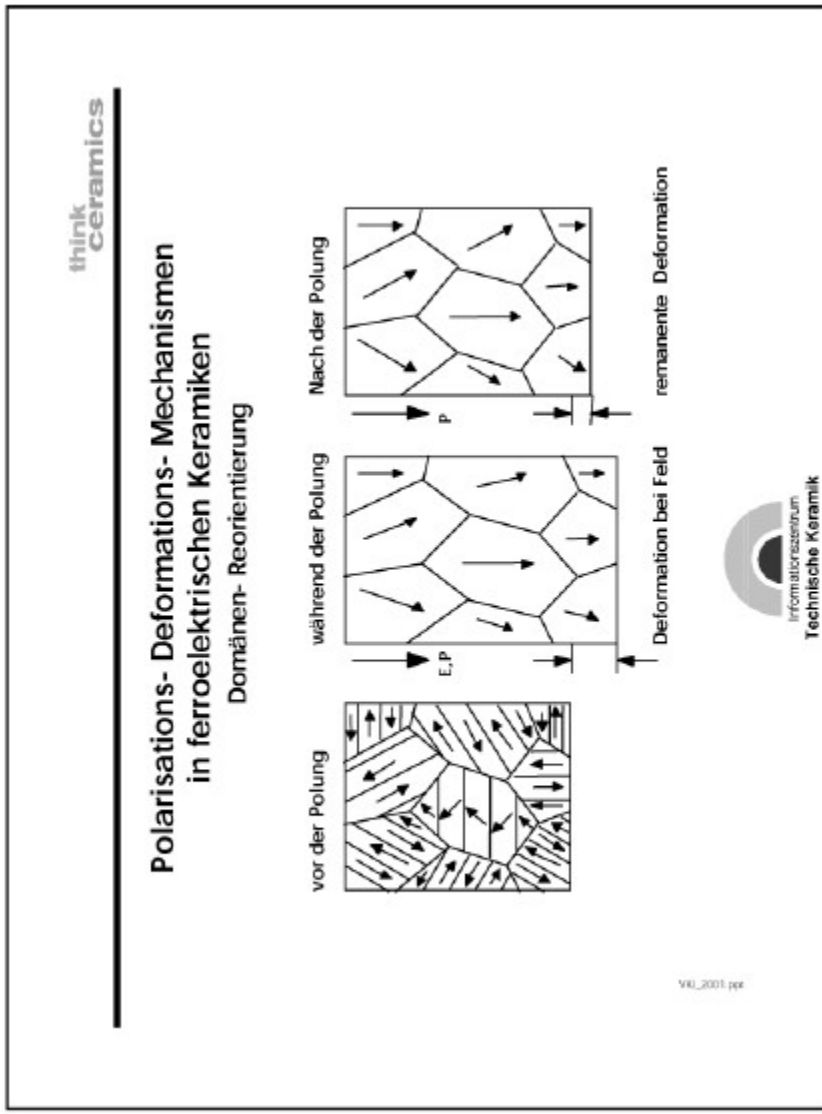
Folie 4


think ceramics
Piezokeramische Bauteile
Leistungs- Ultraschallschwinger
Informationszentrum
Technische Keramik

Folie 5


think ceramics
Piezokeramische Bauteile
Ultraschallschwinger für die Hydroakustik
Informationszentrum
Technische Keramik
VIO_2007.ppt

Folie 6


think ceramics
Polarisations- Deformations- Mechanismen in ferroelektrischen Keramiken
Domänen- Reorientierung
vor der Polung
während der Polung
Nach der Polung
E,P
P
Deformation bei Feld
remanente Deformation
Informationszentrum Technische Keramik
VKI_2001.ppt

Folie 7

think ceramics

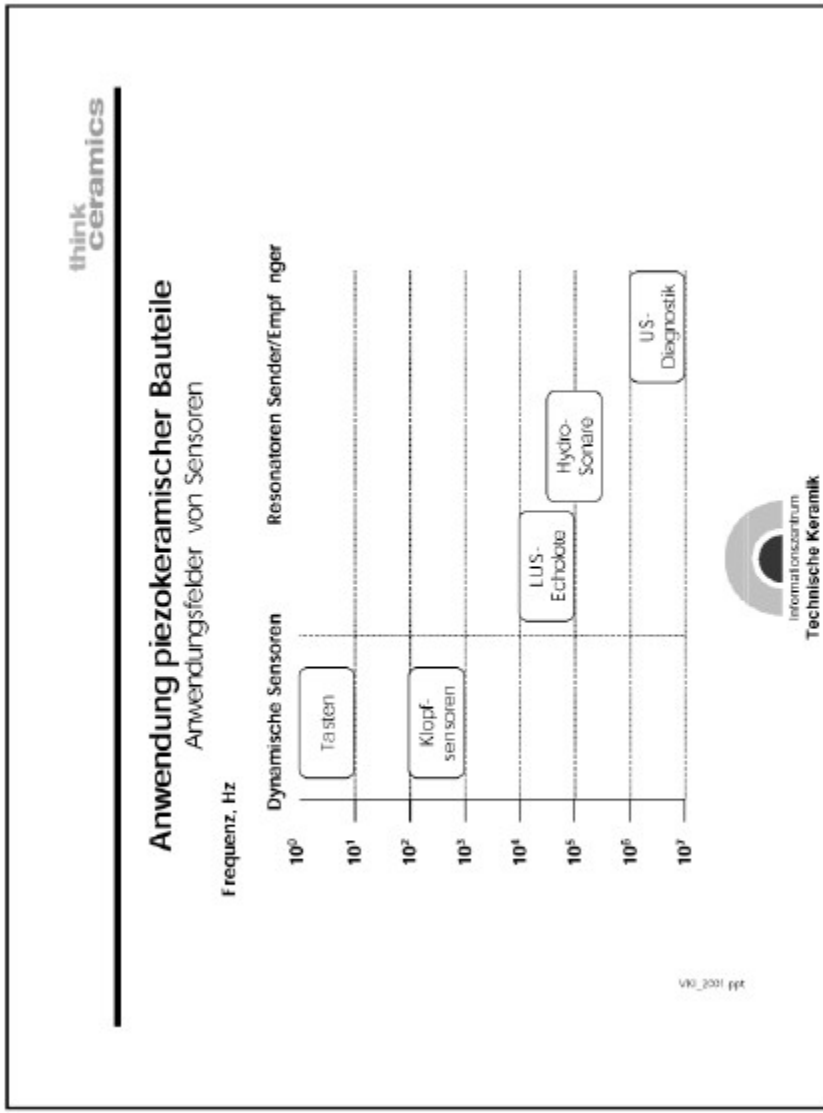
Anwendung piezokeramischer Bauteile

Direkte Sensoren einfache Wandler		Sonar- Sensoren Sender/Empfänger	
	Passive (Empfangs-) Wandler	Übertragungs-Sensoren	Distanz- Sensoren
• **Aktive**	• Detection von Geräusch	• Akustische Impedanz	• Vorhandensein von Objekten
• **(Resonanz-)**			
• **Wandler**		• Schall-geschwindigkeit Dichte	• Distanz Position
• **Vorhandensein**	• Schallemission (SEA)		
• **von Medium**			• Füllstand
• **Akustische**		• Gas - Konzentration	
• **Impedanz**			• Erkennung von Strukturen und Objekten
• **(Dichte)**		• Durchfluß-profile (Vortexmeter)	
• **Viskosität**			• Durchfluß-Geschwindigkeit (Doppler- Effekt)

VIII_2001.ppt

Informationszentrum **Technische Keramik**

Folie 8


think ceramics
Anwendung piezokeramischer Bauteile
Anwendungsfelder von Sensoren
Frequenz, Hz
Dynamische Sensoren
Resonatoren Sender/Empf nger
10^0
10^1
10^2
10^3
10^4
10^5
10^6
10^7
Tasten
Klopf-sensoren
LUS-Echolote
Hydro-Sonare
US-Diagnostik
Informationszentrum
Technische Keramik
VKI_2001.ppt

Folie 9

think ceramics

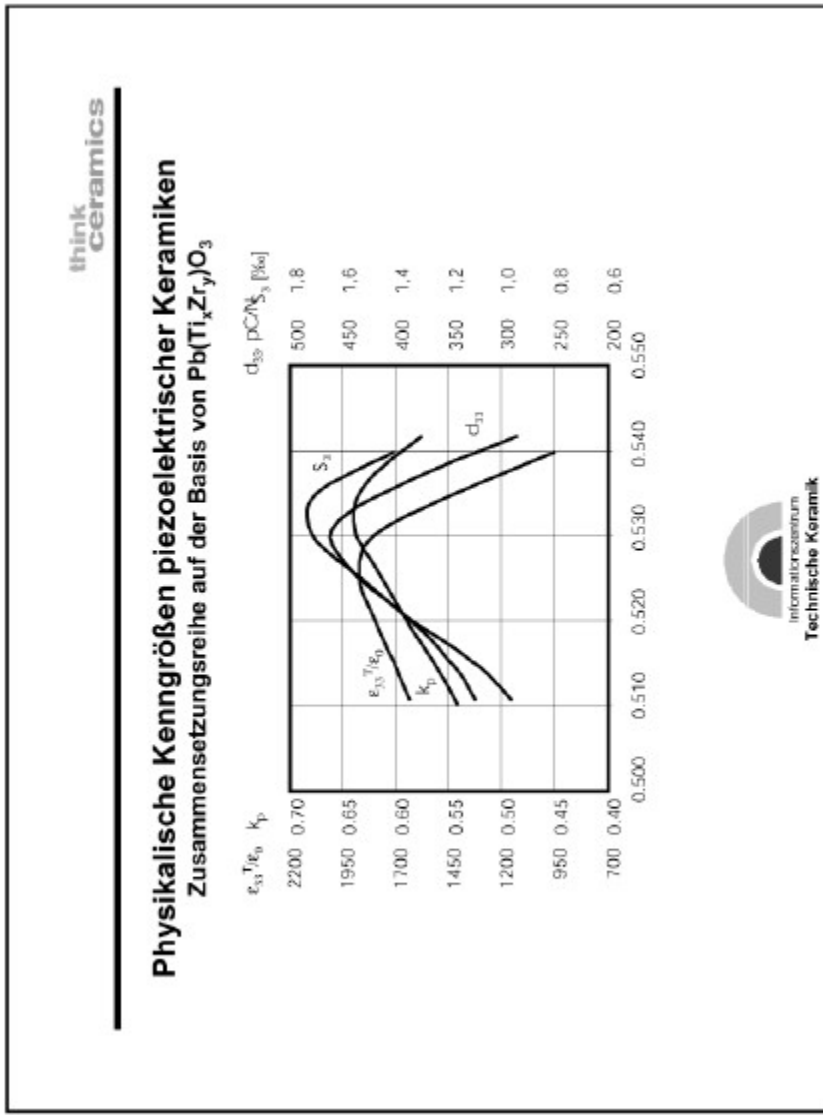
Anwendung piezokeramischer Bauteile

Elektromechanische Wandler für verschiedene akustische Medien

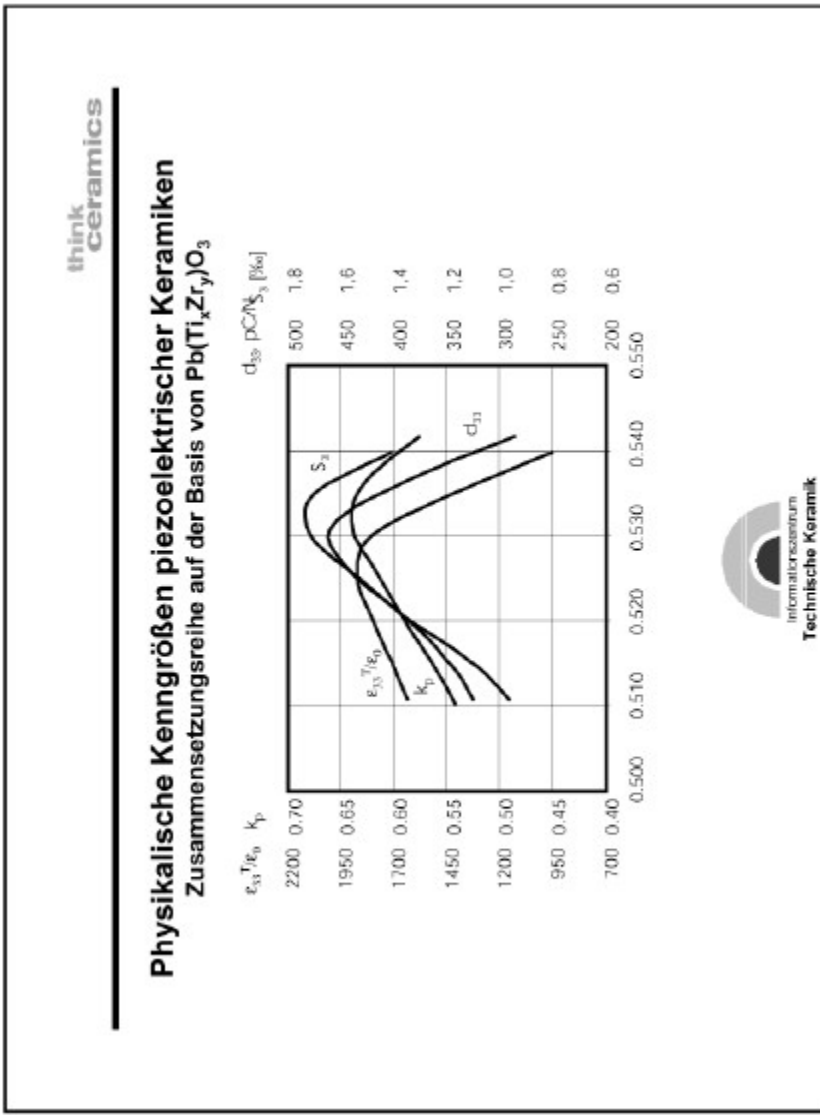
Frequenz, Hz	Anwendung	Gas	Liquid	Solid
10^7	Ultraschall	Dickenschwinger + Anpaßschichten		Dickenschwinger, Dicken-Scherschwinger
↑		Biegeschwinger	Verbundschwinger	Längsschwinger
10^0	Hörbarer Schall		Biegeschwinger	
	Quasistat. Signal		Biegeschwinger	Dickenschwinger

Informationszentrum Technische Keramik

Folie 10


think ceramics
Physikalische Kenngrößen piezoelektrischer Keramiken
Zusammensetzungsreihe auf der Basis von $Pb(Ti_xZr_y)O_3$
$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ k_p
2200 0.70
1950 0.65
1700 0.60
1450 0.55
1200 0.50
950 0.45
700 0.40
d_{33}, pC/N S_3 [‰]
500 1.8
450 1.6
400 1.4
350 1.2
300 1.0
250 0.8
200 0.6
0.500 0.510 0.520 0.530 0.540 0.550
S_3
$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$
k_p
d_{33}
Informationszentrum
Technische Keramik

Folie 11


think ceramics
Physikalische Kenngrößen piezoelektrischer Keramiken
Zusammensetzungsreihe auf der Basis von $Pb(Ti_xZr_y)O_3$
$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ k_p
2200 0.70
1950 0.65
1700 0.60
1450 0.55
1200 0.50
950 0.45
700 0.40
d_{33}, pC/N S_3 [‰]
500 1.8
450 1.6
400 1.4
350 1.2
300 1.0
250 0.8
200 0.6
0.500 0.510 0.520 0.530 0.540 0.550
S_3
$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$
k_p
d_{33}
Informationszentrum
Technische Keramik

Folie 12