

2.3 Piezokeramische Bauteile im Fahrzeug

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

Die Folien finden Sie ab Seite 145.

2.3.1 Einleitung

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

Andere Bauteile finden sich am Übergang zum breiteren Einsatz. Hierzu zählen die Piezokeramischen Multilayeraktoren, die es erlauben Dieselmotoren verbrauchs- und abgasoptimiert zu betreiben.

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

2.3.2. Grundlagen für den Einsatz piezokeramischer Werkstoffe

Die Piezoelektrizität wurde zunächst am Quarz entdeckt. Allerdings ist der Effekt dort sehr klein. Außerdem lassen sich aus den Kristallen nicht beliebig geformte Bauteile herstellen. Daher wurden piezoelektrische Bauteile erst mit der Entdeckung des ferroelektrischen Effektes an Bariumtitanat und Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) praktisch herstellbar. Diese Keramiken zeigen im gepolten Zustand einen deutlich größeren piezoelektrischen Effekt als Quarz und sind auch in nahezu beliebiger Geometrie herstellbar. Der Nachteil, ist eine größere Nichtlinearität und eine höhere Temperaturabhängigkeit. Die Polungsrichtung ist durch ein äußeres Feld vorzugeben. Zur Unterscheidung der Begriffe Piezoelektrika, Pyroelektrika, Ferroelektrika siehe *Bild 1*.

Piezoelektrika: fehlendes Symmetriezentrum
z.B. Quarz

Pyroelektrika: spontane Polarisierung
z.B. Turmalin

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

Bild 1: Begriffserläuterung Piezoelektrika-Pyroelektrika-Ferroelektrika
(nach [SCHÄUFELE])

Dieser Effekt ist in der Gitterstruktur begründet. Piezoelektrika sind dadurch gekennzeichnet, dass dem Gitter ein Symmetriezentrum fehlt. Durch mechanischen Druck kann eine Ladungsverschiebung erfolgen, die sich in einer makroskopisch messbaren Ladung oder Spannung manifestiert. Pyroelektrika sind Piezoelektrika, die auch im unbelasteten Zustand eine Trennung des Schwerpunktes des Kationen- und Anionen- Teilgitters aufweisen.

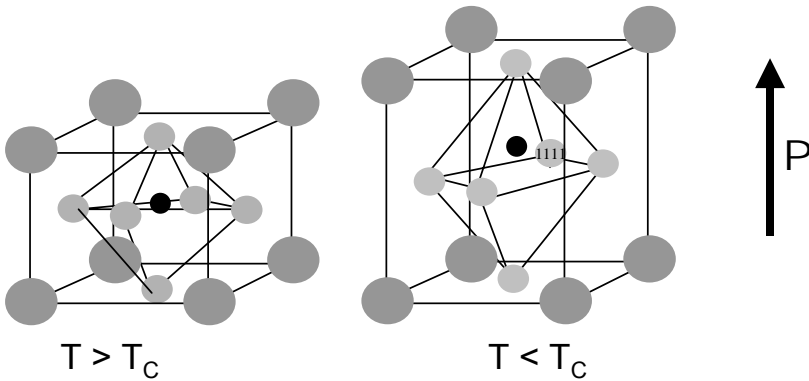


Bild 2: Kristallstruktur ober und unterhalb der Curietemperatur am Beispiel von tetragonalem PZT

Hieraus ergibt sich eine spontane Polarisation. Ferroelektrika wiederum sind Pyroelektrika, bei denen sich die Richtung der spontanen Polarisation durch ein äußeres elektrisches Feld verändern lässt. Dadurch erhält das Bauteil, das zuvor makroskopisch keine Piezoelektrizität zeigt, seine makroskopisch messbaren piezoelektrischen Eigenschaften. Dieser Vorgang ist die oben schon angesprochene „Polarisation“. Die meisten kommerziell genutzten piezokeramischen Bauteile bestehen aus PZT. Die Kristallstruktur ist ein Perowskit. Zur vereinfachten Darstellung ist in *Bild 2* die Situation an einer tetragonalen Struktur dargestellt.

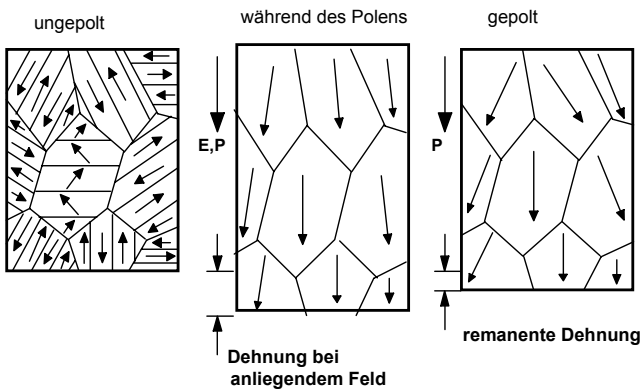


Bild 3: Polungsvorgang bei ferroelektrischen Keramiken (verändert nach [Helke])

Oberhalb der sogenannten Curietemperatur (T_c) und damit beim Herstellprozess der Keramiken durch Sintern, ist das Material kubisch. Es existiert ein Symmetriezentrum für die Teilgitter. Wir haben hier kein ferroelektrisches Material vorliegen. Erst unterhalb der Curietemperatur wird das Gitter tetragonal und das Material liegt in seiner ferroelektrischen Phase vor. Es kommt zur Ausbildung von Domänen, Bereichen gleicher spontaner Polarisation. Nach außen hebt sich diese Polarisation durch die Vielzahl an Domänen auf. Durch Anlegen eines äußeren Feldes werden nun diese in den Kristalliten vorliegenden Domänen ausgerichtet (*Bild 3*).

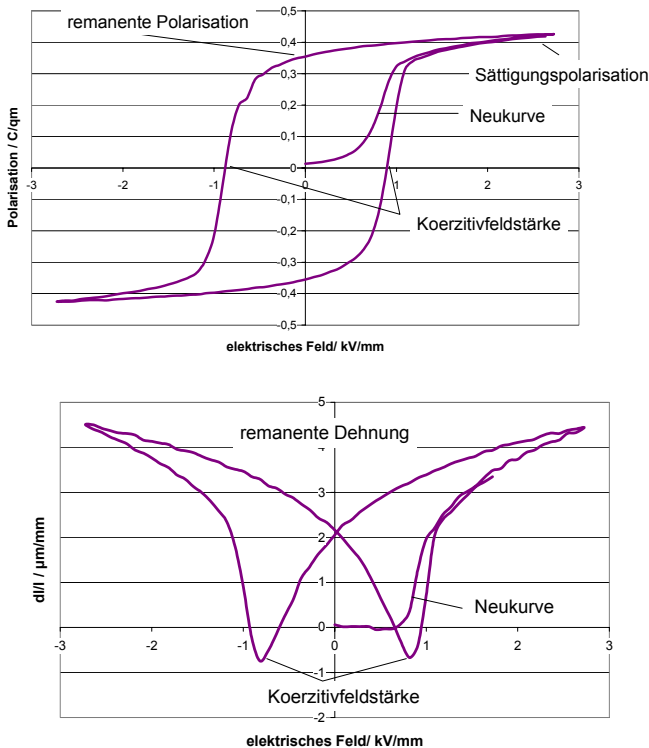


Bild 4: Hysteresekurve für Polarisation (links) und Dehnung (rechts) bei Anlegen eines äußeren elektrischen Feldes. Nach dem Polarisationsvorgang bleiben eine remanente Polarisation und eine remanente Dehnung zurück.

Durch den Polungsvorgang wird eine remanente Polarisierung und eine remanente Dehnung erzeugt, die die Geometrie des Bauteils nochmals verändert. Zeichnet man Polarisierung und Wegänderung in Abhängigkeit der elektrischen Feldstärke auf, so erhält man die Kurven in *Bild 4*.

2.3.3. Eigenschaften piezokeramischer Werkstoffe für den Einsatz im Fahrzeug

Das gewünschte Eigenschaftsprofil piezokeramischer Werkstoffe ist natürlich von Anwendung zu Anwendung unterschiedlich. Trotzdem lassen sich einige allgemeine Betrachtungen anstellen [HELKE].

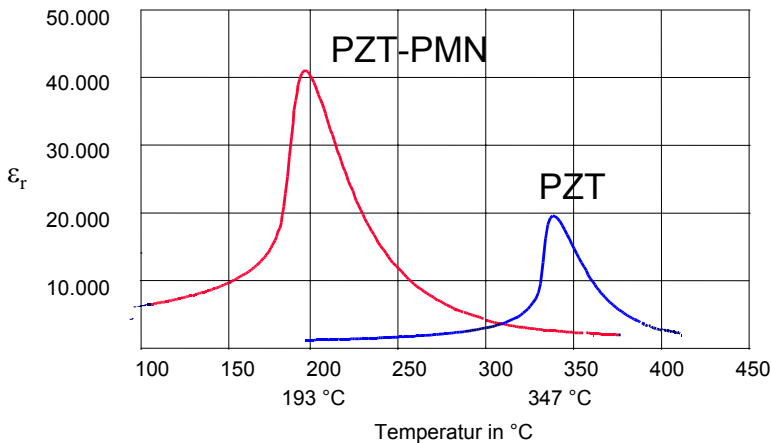


Bild 5: Variation der Dielektrizitätskonstanten ϵ_r für zwei verschiedene Werkstoffe in Abhängigkeit von der Temperatur. Eingetragen sind zusätzlich die jeweiligen Curietemperaturen

Die meisten piezokeramischen Bauteile werden nur ein einziges Mal polarisiert und dann mit Feldstärken betrieben, die deutlich niedriger als die Polungsfeldstärke sind. Auch Sensorelemente erhalten ihre Sensitivität durch die Polung. Das bedeutet, dass die Stabilität der remanenten Polarisierung unter Temperatur- und Druckbeanspruchung möglichst groß sein sollte. Dies wird bei modernen Werkstoffen zum einen durch den gezielten Einsatz von Dotierungen, optimierte Gefüge und auch durch entsprechend angepasste Polarisierungsbedingungen erreicht. Eine weitere gewünschte Eigenschaft ist eine geringe

Variation der Eigenschaften mit der Temperatur. Bei typischen Temperaturspannen von -50 bis 150 °C, wie sie motornah beispielsweise gefordert werden, sind Werkstoffe mit hoher Curietemperatur erforderlich. In *Bild 5* ist die Variation der Dielektrizitätskonstanten über der Temperatur gezeigt.

In *Bild 6* sind für den in Bild 5 mit PZT bezeichneten Werkstoff die Änderungen der Kapazität und der piezoelektrischen Spannungskonstanten g_{33} im interessanten Temperaturbereich zwischen -50 und $+150$ °C gezeigt.

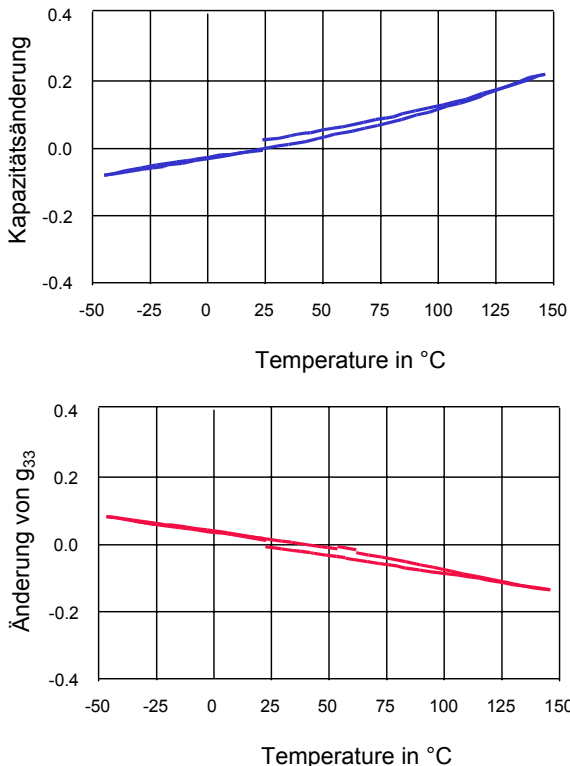


Bild 6: Temperaturabhängigkeit von Dielektrizitätskonstante und g_{33} für den in Bild 5 mit PZT bezeichneten Werkstoff

Die piezoelektrischen Daten der Werkstoffe werden in Datenblättern veröffentlicht, die die Grundlage für eine Materialauswahl bilden (z. B. [CERAMTEC])

3.2.4. Ausgewählte Anwendungen im Fahrzeug

Aufgrund der Vielzahl möglicher Anwendungen (siehe Tabelle 1), werden einige Beispiele ausgewählt, die die Grundprinzipien vermitteln und an verschiedenen Punkten der Realisierung stehen.

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

Tabelle 1

2.3.4.1 Klopfensensoren

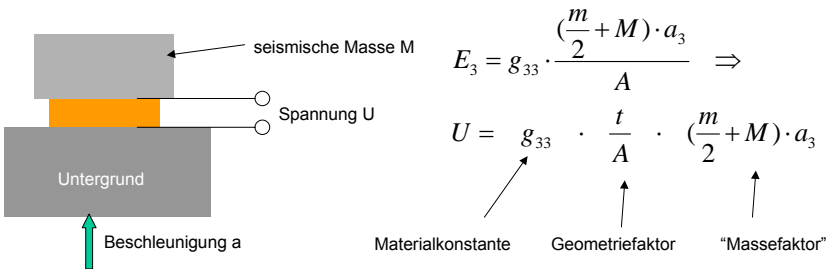


Bild 7: Prinzipieller Aufbau eines Beschleunigungssensors mit Berechnung der zu erwartenden Sensorspannung U, t: Dicke

Diese Sensoren dienen in Motornähe dazu ungleichmäßige Verbrennungen im Motorraum zu detektieren (Klopfen). Der gebräuchlichste Sensor ist als Beschleunigungssensor wie in Bild 7 gezeigt aufgebaut. Die durch die ungleichmäßige Verbrennung erzeugte Erschütterung wird als Beschleunigung (a) aufgenommen. Durch die seismische Masse (M) sowie die Hälfte der Eigenmasse (m) des eigentlichen Sensors wird die Beschleunigung in eine Kraft umgewandelt. Durch

die piezoelektrische Spannungskonstante g_{33} ergibt sich so eine messbare Spannung.

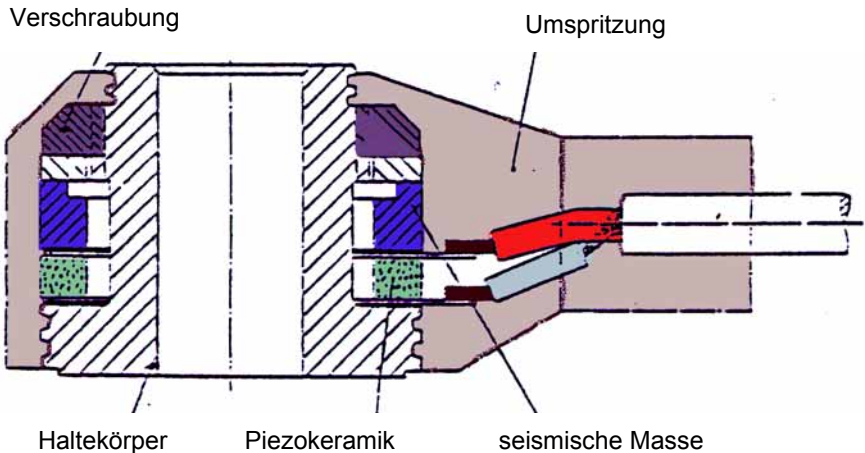


Bild 8: Schnittbild durch einen Klopfsensor [BINDER]

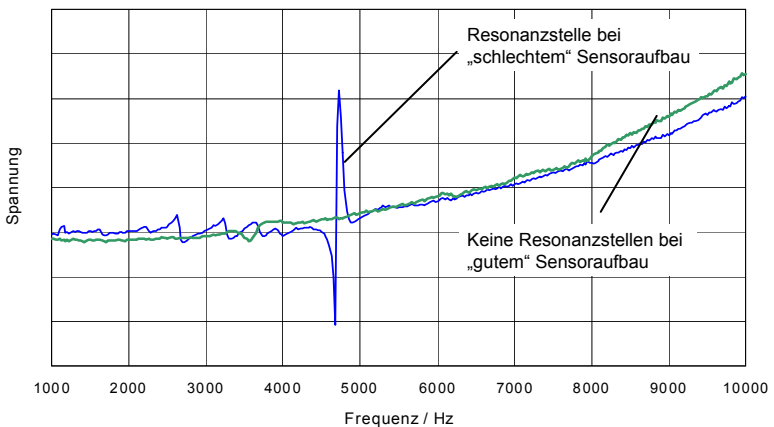


Bild 9: Frequenzabhängigkeit der Sensorspannung bei Beschleunigung mit 3g: Resonanzstellen bei ungünstigem Sensoraufbau

Ein Schnittbild eines solchen breitbandigen, weil nicht resonant betriebenen, Sensors ist in *Bild 8* dargestellt. *Bild 9* zeigt reale Messkurven die verdeutlichen, wie wichtig ein gutes Sensordesign ist, da bei ungünstigem Aufbau Resonanzstellen auftreten können, die bei ei-

nem solchen Sensor unerwünscht sind.

Die hauptsächlichsten Anforderungen sind hier eine geringe, zumindest bekannte, Temperaturabhängigkeit und Langzeitstabilität der piezoelektrischen Eigenschaften auch unter Temperaturwechselbeanspruchung. Dies kann durch passend hergestellte Piezokeramiken erfüllt werden.

Sensoren die nach einem ähnlichen Prinzip arbeiten, sind Kraft- oder Druckaufnehmer. Hier entfällt die seismische Masse. Anwendungen hierfür sind Druckaufnehmer für die Zylinderdruckmessung oder Sensoren zur Erkennung eines plötzlichen Druckabfalls im Reifen.

2.3.4.2 Ultraschallsensoren

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

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

2.3.4.3 Piezokeramiken als Aktoren

Die bisherigen Beispiele nutzten das sogenannte Kleinsignalverhalten der Piezokeramik aus. Das bedeutet, dass die angelegten bzw. erzeugten Spannungen sehr viel kleiner als die Polungsspannung sind. Das folgende Beispiel zeigt Bauteile, die im Großsignal und nicht resonant betrieben werden um Auslenkungen im Bereich von μm bis mm zu erzeugen: Piezoelektrische Aktoren.

Es existieren verschiedene Bauformen mit verschiedenen Betriebsbereichen, wie in *Bild 10* gezeigt. Bieger werden aus meist zwei Schichten aufgebaut die so angesteuert werden, dass sich ein Teil verkürzt, während sich das andere ausdehnt. Die Ansteuerung erfolgt derart, dass die senkrecht zur Ansteuerungsrichtung (und Polarisationsrichtung) erzielte Längenänderung ausgenutzt wird. Es wird ein „Bimetall-Effekt“ erzielt. Es werden sehr kurze Ansprechzeiten bei Auslenkungen im Millimeterbereich erreicht. Die erzielte Kraft ist allerdings gering. Für verschiedenste Anwendungen, vor allem im Nicht-Automobilbereich werden solche Biegewandler eingesetzt, z. B. Blindenlesegeräte, Fadenführungen für Textilmaschinen. Die zweite Gruppe der Biegeaktoren ist mit den Stapelaktoren verwandt, nur dass hier eine Längsdehnung mittels Verkleben auf einem Substrat in eine Biegebewegung umgewandelt wird. Ausführlicher sollen daher die Stapelaktoren, speziell die monolithisch gefertigten Stapelaktoren, beschrieben werden.

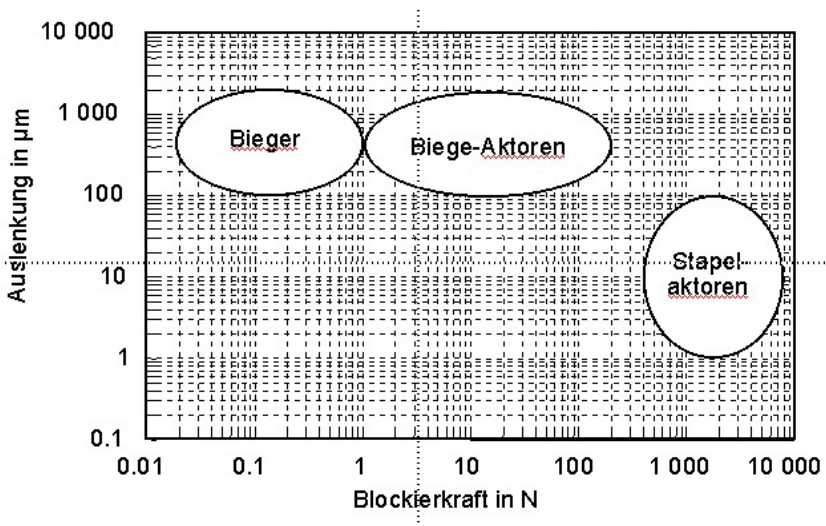


Bild 10: Betriebsbereiche verschiedener Aktoren im Kraft-Weg Diagramm

Solche monolithischen Stapelaktoren finden zum Beispiel Einsatz in Einspritzsystemen bei Dieselmotoren.

Der Aufbau ist aus *Bild 11* zu entnehmen. Die interdigital angeordneten Innenelektroden werden wechselseitig an eine Außenfläche ge-

führt und dort kontaktiert. Dies geschieht analog zum Aufbau eines keramischen Vielschichtkondensators. Somit sind die einzelnen Keramiksichten elektrisch parallel geschaltet. Die Einzelkapazitäten addieren sich. Die Richtung des angelegten Feldes ist parallel der Polungsrichtung und der Wirkrichtung (33-Effekt). Mechanisch sind die Auslenkungen in Reihe geschaltet, das bedeutet, die Auslenkungen addieren sich. So können je nach Bauhöhe Auslenkungen von 5 bis 50 (80) μm erzielt werden. Je nach Grundfläche und sonstigem Aufbau liegen die Blockierkräfte typisch zwischen 1000 und 3000 N. Die Blockierkraft ist die bei Null Auslenkung erzielbare Kraft.

Eine typische Leerlaufauslenkung ist in *Bild 12* gezeigt. In *Bild 12* ist auch schon eine mögliche Ansteuerung mittels Vorgabe der Spannung gezeigt. Die vorgegebene Spannung ist unipolar in Richtung der Polungsrichtung. Nur so können Lastzyklen bis größer eine Milliarde erreicht werden, wie sie bei dynamischen Anwendungen gefordert sind. Bei solchen dynamischen Anwendungen sollte der Aktor vorgespannt sein, um unzulässige Zugkräfte am Aktor zu vermeiden. Gut zu sehen ist die beim Betrieb von ferroelektrischen Werkstoffen auftretende Hysterese in *Bild 12*. Bei Auftragung der Auslenkung gegen die Ladung des Aktors ist diese Hysterese deutlich weniger ausgeprägt.

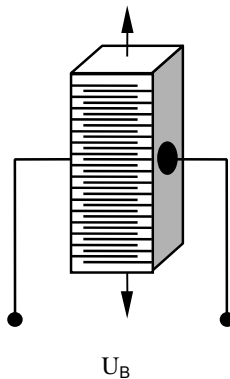


Bild 11: Aufbau eines monolithischen Multilayer Aktors.
 U_B Ansteuerspannung

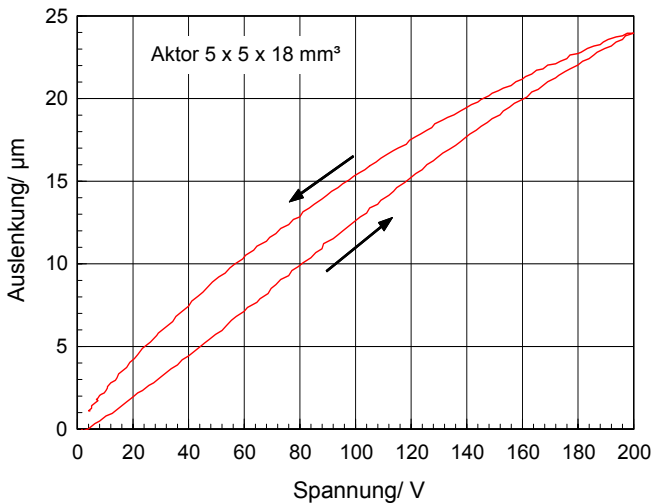


Bild 12: Auslenkung gegen angelegte Spannung , typischer Verlauf

Die Auslenkung folgt der Ladung nahezu linear. Man kann also folgende Beziehungen aufstellen, die für erste Abschätzungen nützlich ist(Q: Ladung des Aktors, dl:Längenänderung, I: Strom):

$$Q \propto dl$$

$$\frac{dQ}{dt} = I \propto \frac{dl}{dt}$$

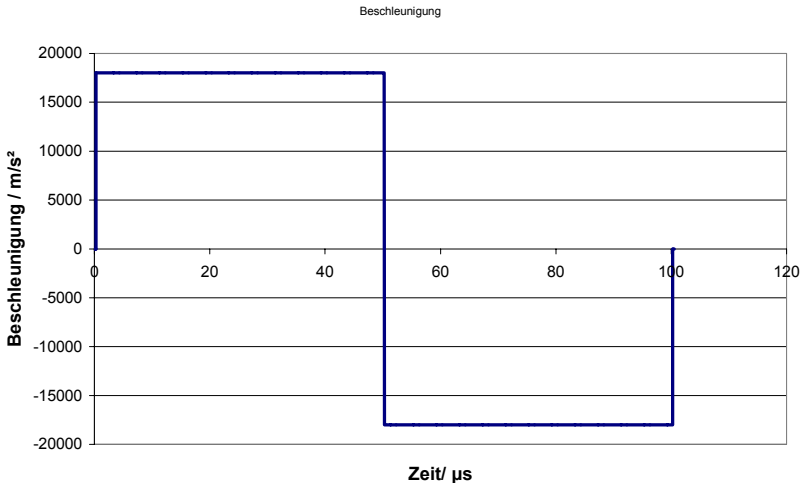
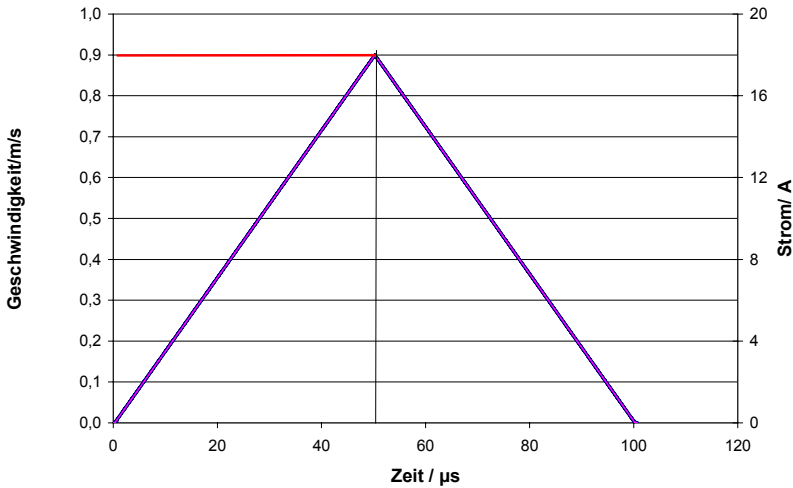
$$\frac{d^2}{dt^2} Q = \frac{dI}{dt} \propto \frac{d^2 l}{dt^2}$$

Die auf das Aktorende wirkende Beschleunigung (entsprechend die Kraft) kann also durch Kontrolle der Stromänderung begrenzt werden. Dies wird durch die Beobachtung unterstützt, dass selbst vorgespannte Aktoren durch schnelle Strompulse bei niedriger Spannung zerstört werden können. Es besteht dann nämlich die Möglichkeit, dass die Vorspanneinrichtung vom Aktor „abhebt“ und damit dieser unter sehr große Zugkräfte gerät.

Eine Möglichkeit der optimierten Ladungsansteuerung ist in Bild 13 zusammengefasst. Ausgehend von der vorzugebenden und im Einzelfall zu ermittelnden maximalen Beschleunigung a kann der Strom-

Einführung in die Technische Keramik

verlauf und der Verlauf der Auslenkung mittels dieser Annahmen ermittelt werden. In der Praxis kann man meist mit harmonischen Stromverläufen wie in Bild 14 gezeigt arbeiten (Hinweis: gezeigt sind nur die Ladekurven und nicht die Entladekurven). Eine detailliertere Darstellung findet sich in [SCHUGT], hier werden auch nichtlineare Effekte bei einer Stromansteuerung diskutiert.



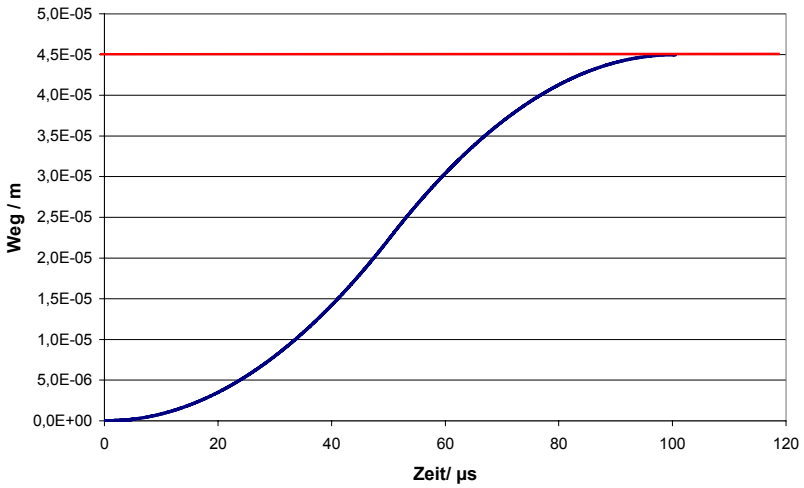
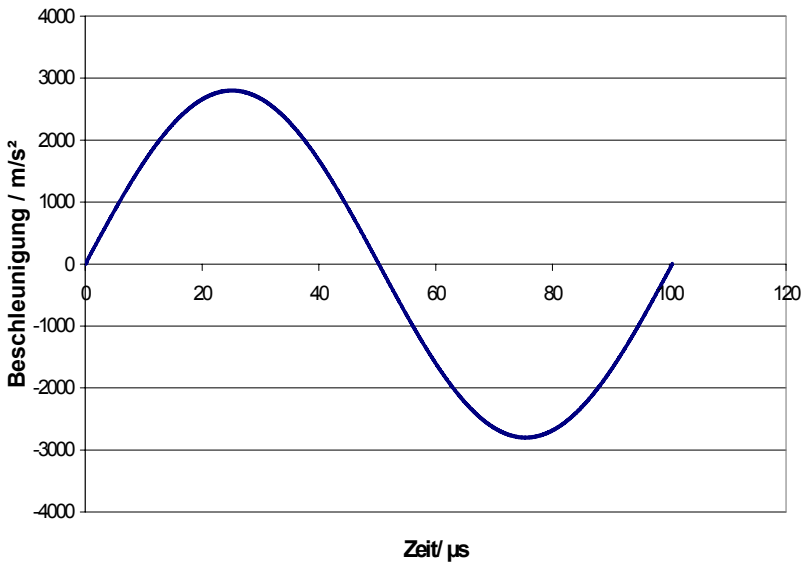


Bild 13: Verlauf von Beschleunigung, Geschwindigkeit/Strom und Auslenkung in Abhängigkeit von der Zeit für eine angenommene konstante Beschleunigung/ Stromänderung



Einführung in die Technische Keramik

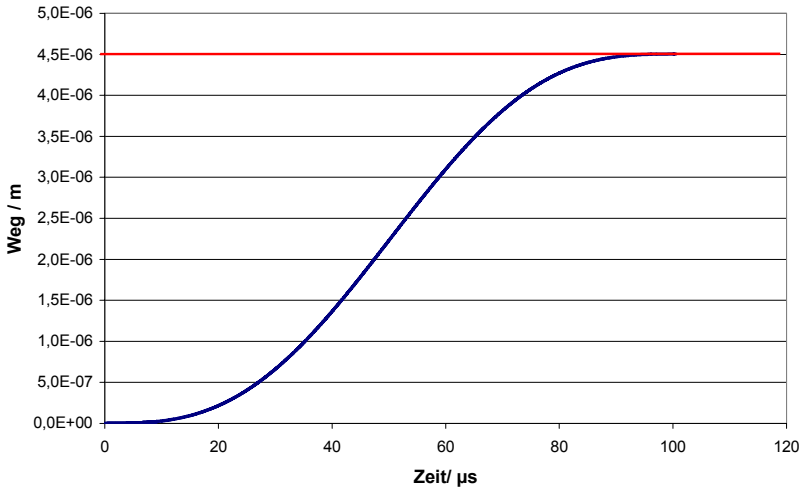
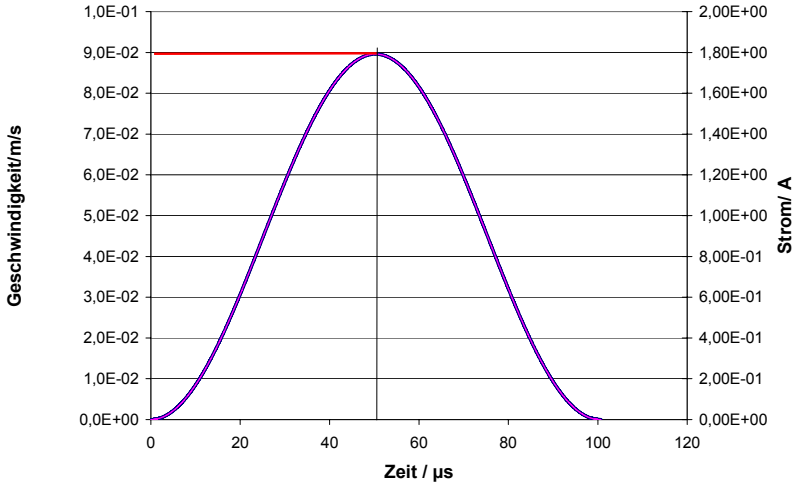


Bild 14: Verlauf von Beschleunigung, Geschwindigkeit, Strom und Weg bei sinusförmigem Beschleunigungsverlauf. Die in gleicher Zeit bei gleicher maximaler Beschleunigung erreichbare Wegänderung ist deutlich kleiner wie in Bild 13 gezeigt.

5. Zusammenfassung

Die Anwendungsgebiete von piezokeramischen Bauelementen sind äußerst vielseitig. Es wurde an einigen Beispielen die grundlegenden Wirkmechanismen und Voraussetzungen erläutert. Über die gezeigten Beispiele hinaus gibt es natürlich noch andere, deren Mechanismen aber großteils auf die diskutierten Effekte zurückgeführt werden können. Die einzelne Anwendung stellt jeweils spezifische Anforderungen an die Bauteile, so dass schon in einem frühen Entwicklungsstadium eine enge Zusammenarbeit zwischen Anwender und Piezokeramikhersteller wertvoll ist.

6. Literaturverzeichnis

- [BINDER] Binder J., Podeswa R., Schrey U.; Anforderungen an das Packaging von KFZ-Sensoren; Technisches Messen 56 11/89; S.449-453
- [BORCHARD] Borchard, G.; Zur Applikation von piezoelektrischen Luftultraschallwandlern; Mitteilung aus dem Zentrum für Forschung und Technologie- Piezolanlabor; HTM 69 (1986); S. 2196-2204
- [CERAMTEC] Piezoelektrische Bauteile, CeramTec AG, Geschäftsbereich Piezotechnik
- [HELKE] Kap. 2 in: Ruschmeyer, K (Hrsg.); Piezokeramik: Grundlagen, Werkstoffe, Applikationen; Renningen-Malmsheim: expert-Verlag 1995
- [RUSCHMEYER] Ruschmeyer, K (Hrsg.); Piezokeramik: Grundlagen, Werkstoffe, Applikationen; Renningen-Malmsheim: expert-Verlag 1995
- [SCHÄUFELE] Schäufele, A. ; Ferroelastische Eigenschaften von Blei-Zirkonat-Titanat-Keramiken, Fortschrittberichte VDI, Reihe 5, Nr. 445, 1996
- [SCHUGT] Schugt, M. ; Aktor-Sensorverhalten von Piezoelementen in Kfz-Diesel-Einspritzsystemen, Berichte aus der Elektrotechnik, Shaker-Verlag, Aachen 2002

Einführung in die Technische Keramik

Die verwendeten Vortragsfolien kommen aus den Folien Nr. 23 bis 48
finden sich ab Seite 145.

Einführung

Piezokeramische Bauteile im Fahrzeug

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



Piezoelektrika - Pyroelektrika - Ferroelektrika



Voraussetzung: Kristall ohne Symmetriezentrum, trennen der Ladungsschwerpunkte durch mechanische Beanspruchung (Piezoeffekt) oder elektrisches Feld (inverser Piezoeffekt)

Piezoelektrika: fehlendes Symmetriezentrum
z.B. Quarz: Einkristalle Kraftmessdosen

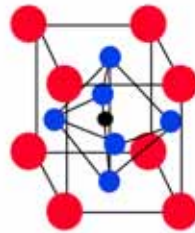
Pyroelektrika: spontane Polarisation
z.B. Turmalin: Einkristalle Pyrosensoren

Ferroelektrika: spontane Polarisation,
Richtung durch elektrisches Feld
veränderbar, auftreten von Domänen
z.B. Bariumtitanat, Bleizirkonat-Titanat
Einkristalle + Keramiken Sensoren/ Aktoren

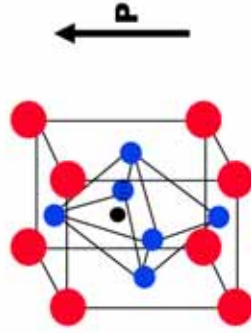
Gitteraufbau ferroelektrischer Stoffe

Ferroelektrika: 1. auftreten einer spontanen (mikroskopischen) Polarisation unterhalb der Curietemperatur T_C : Domänenbildung

Beispiel: Bariumtitanat mit Phasenübergang zwischen kubischem Perowskitgitter und tetragonalem Perowskitgitter bei $T = T_C$



$T > T_C$

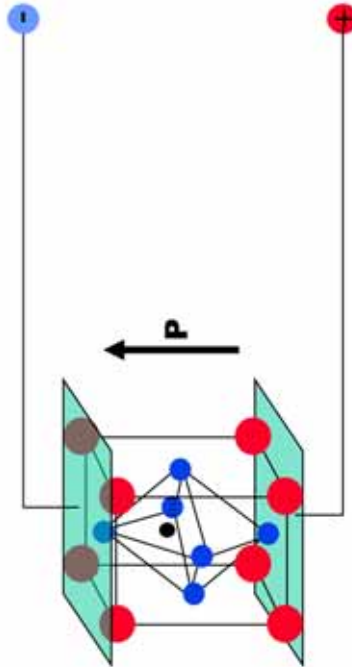


$T < T_C$

Gitteraufbau ferroelektrischer Stoffe



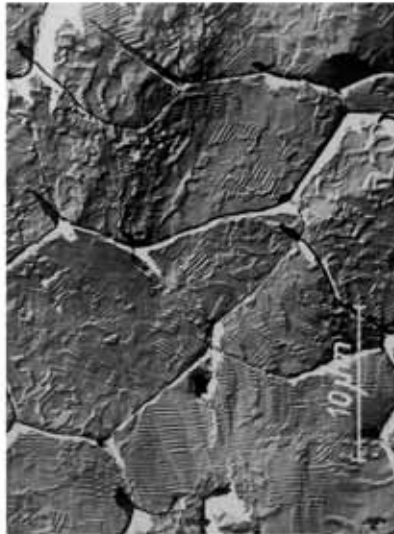
Ferroelektrika: 2. Polarisation kann durch anlegen eines elektrischen Feldes ausgerichtet werden (erzeugen einer makroskopischen Polarisation) Vorgang: „Polarisieren“



2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 4

Polarisation von Keramiken

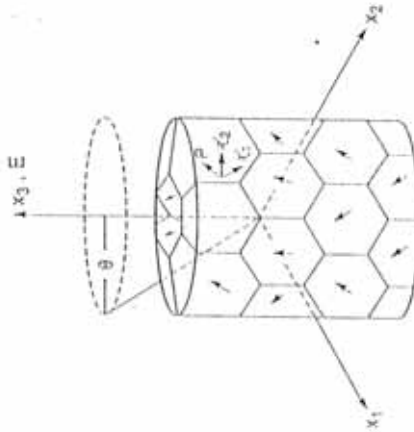
Mikrostruktur von ferroelektrischen Keramiken: Domänen
Domänen:
Bereiche mit gleicher Richtung der mikroskopischen Polarisation



Polarisation von Keramiken



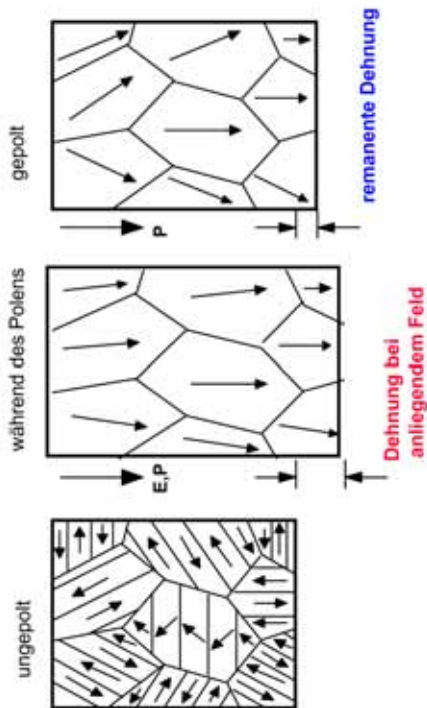
Polarisation von Keramiken: Ausrichten der mikroskopischen Polarisation
Ausrichtungsgrad und Stärke der mikroskopischen Polarisation \Rightarrow
Stärke der makroskopischen Polarisation

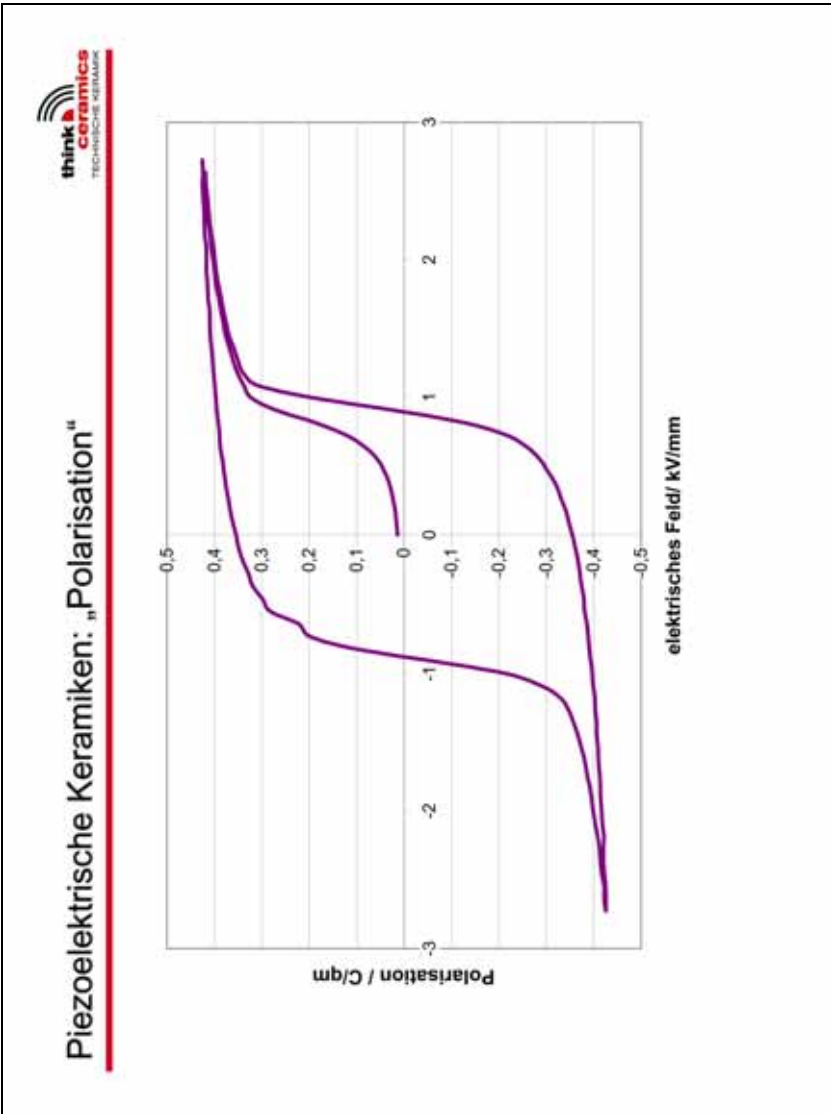


2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 6

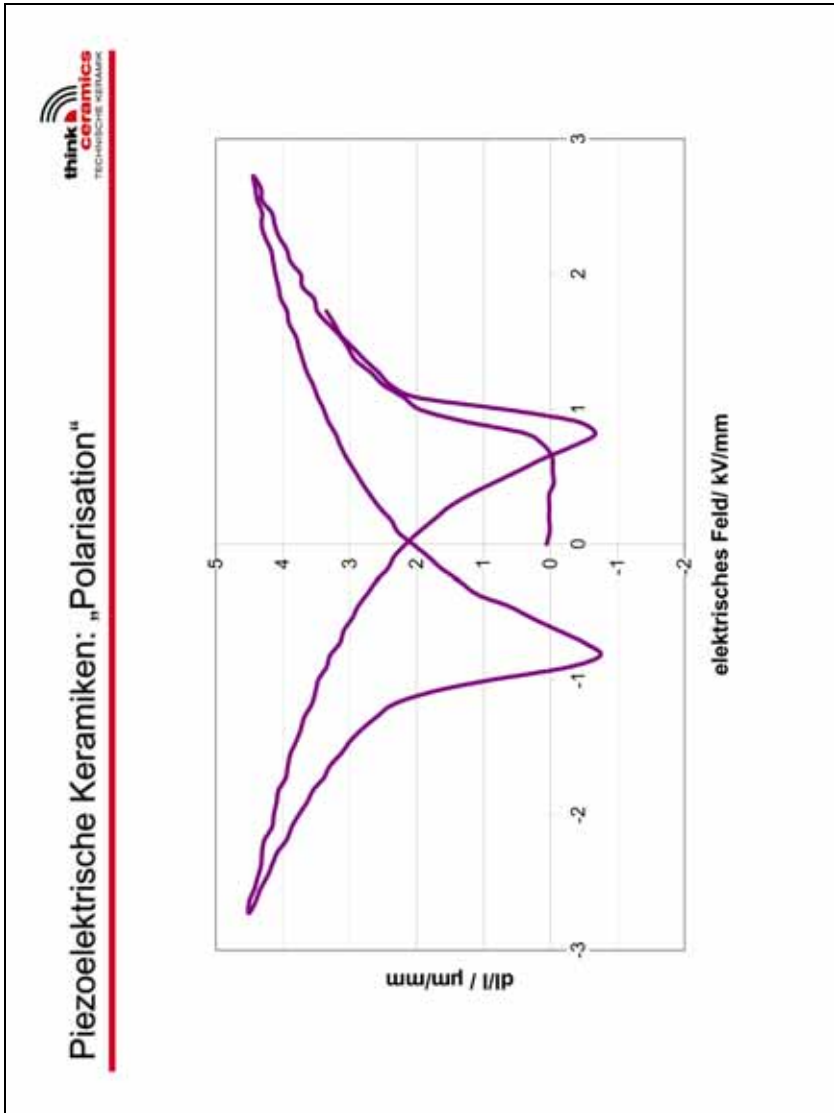
Polarisation von Keramiken

Polarisation von Keramiken: Ausrichten der mikroskopischen Polarisation
Ausrichtungsgrad und Stärke der mikroskopischen Polarisation \Rightarrow
Stärke der makroskopische Polarisation





2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 8



2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 9

Piezoelektrische Grundgleichungen



Nicht piezoelektrischer Festkörper:

$$\vec{S} = \underline{s} \cdot \vec{T}$$

$$\vec{D} = \underline{\varepsilon} \cdot \vec{E}$$



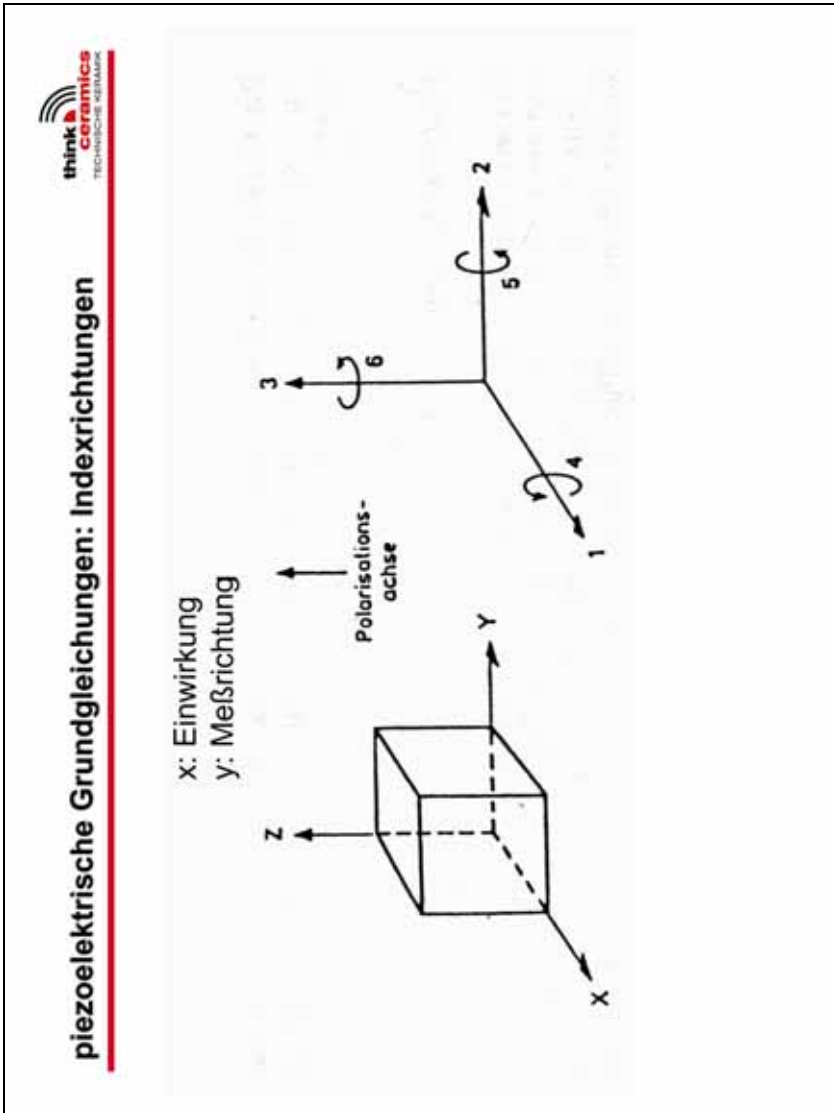
piezoelektrischer Festkörper:

$$\vec{S} = \underline{s}^E \cdot \vec{T} + \underline{d} \cdot \vec{E}$$

$$\vec{D} = \underline{d} \cdot \vec{T} + \underline{\varepsilon}^T \cdot \vec{E}$$

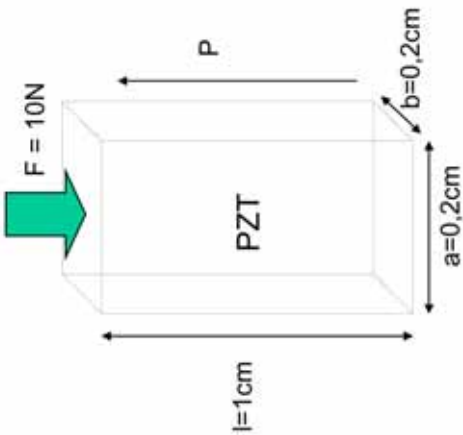
S: Dehnung, s: Elastizitätskonstante
 D: dielektrische Verschiebung,
 ε: Dielektrizitätskonstante

d: Ladungskonstante [C/N] oder [m/V]



2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 11

Piezelektrische Grundgleichungen: Beispiel



$$Q = d_{33} \cdot F_3 \quad \text{im Beispiel: } Q = 4,1nC$$

$$\text{mit } C = \frac{Q}{U}$$

$$U = \frac{d_{33} \cdot F_3}{C} = \frac{d_{33} \cdot F_3}{\epsilon_{33}^T} \cdot \frac{l}{a \cdot b} = \frac{d_{33} \cdot T_3}{\epsilon_{33}^T} \cdot l$$

$$U \approx 700V$$

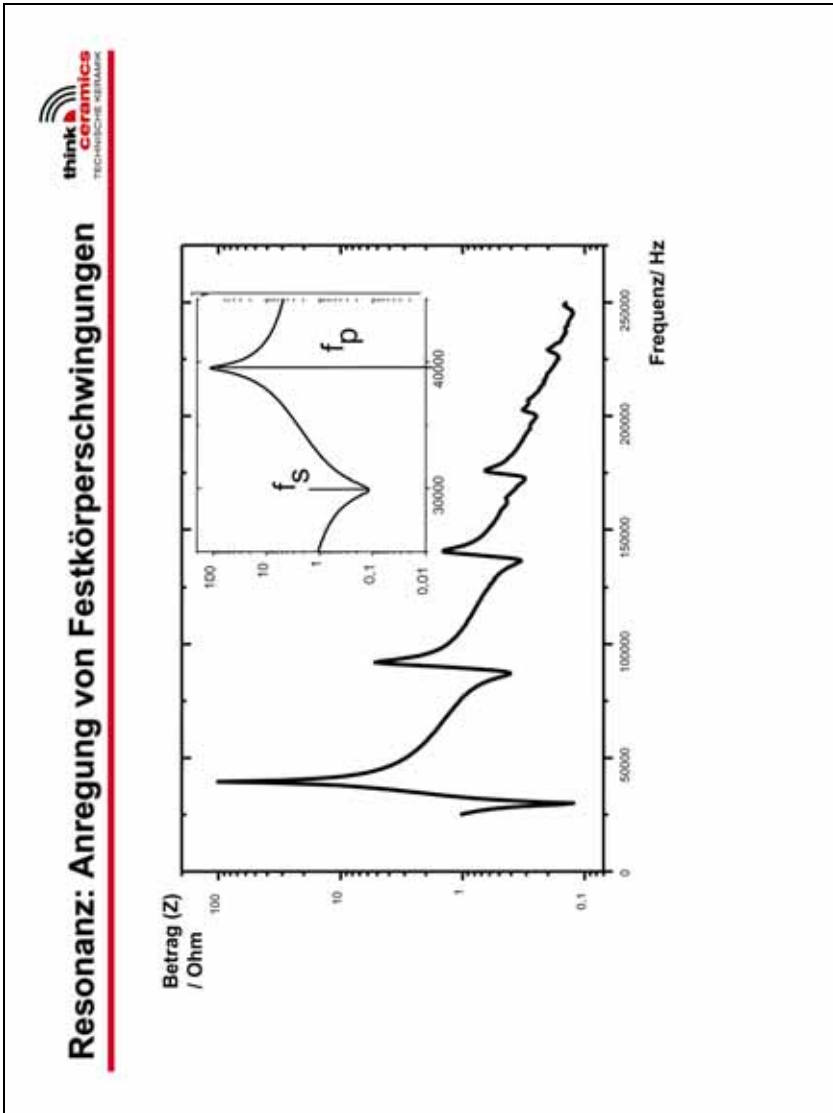
$$\Leftrightarrow E = \frac{d_{33} \cdot T_3}{\epsilon_{33}^T} = g_{33} \cdot T_3$$

$$d_{33} = 410 \cdot 10^{-12} C/N$$

$$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0 = 1700$$

$$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} F/m$$

g_{33} : Spannungskonstante

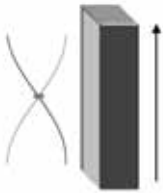


2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 13

Resonanz: Anregung von Festkörperschwingungen



Beispiel: Längsschwinger in 33-Richtung



$$\lambda = 2l$$

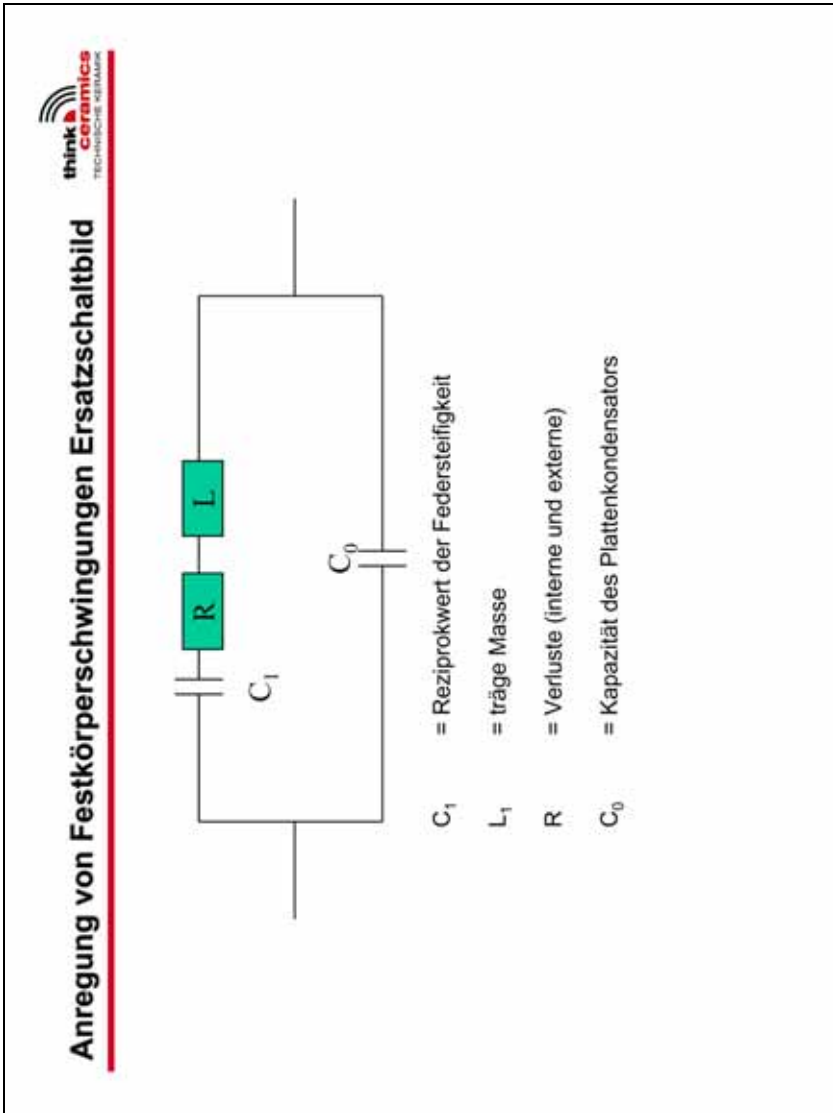
$$v = \lambda \cdot f$$

$$v_3^D = f_p \cdot \frac{l}{2}$$

L = Länge

v_{33}^D = Schallgeschwindigkeit in 3 Richtung
bei konstanter dielektrischer Verschiebung

f_p = Parallelresonanzfrequenz

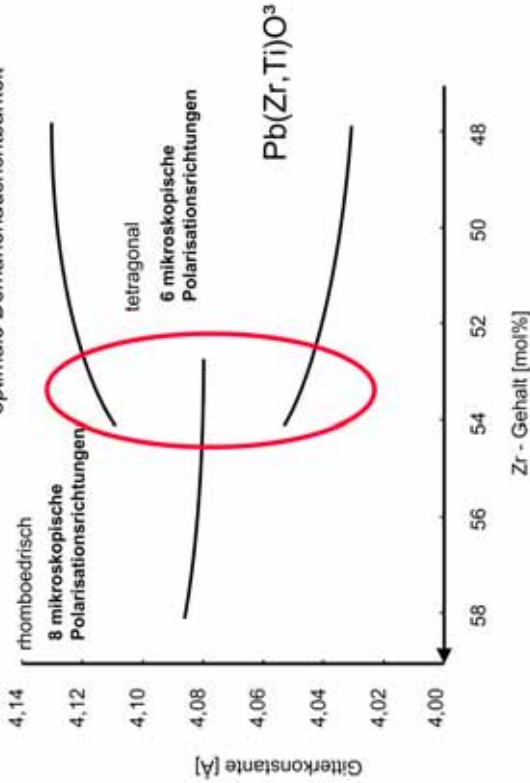


2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 15

PZT-Keramiken für den Einsatz im Fahrzeug



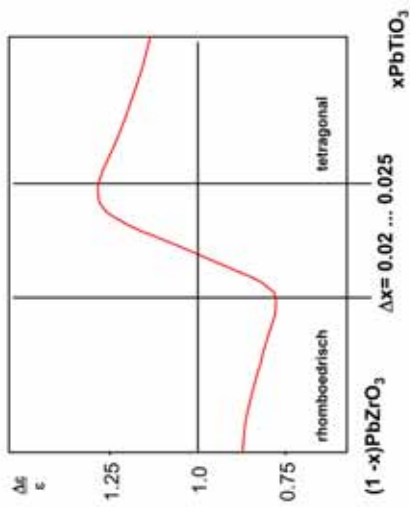
morphotrope Phasengrenze:
 14 mikroskopische Polarisationsrichtungen
 optimale Domänenausrichtbarkeit

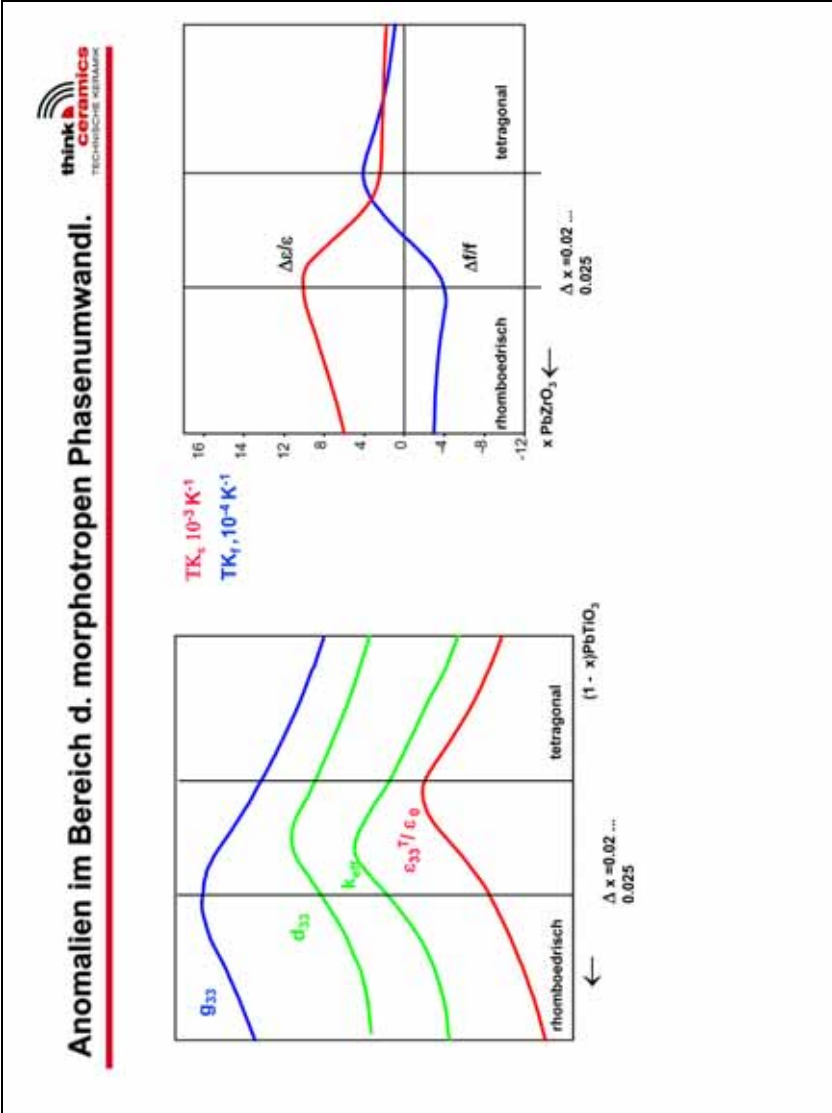


2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 16

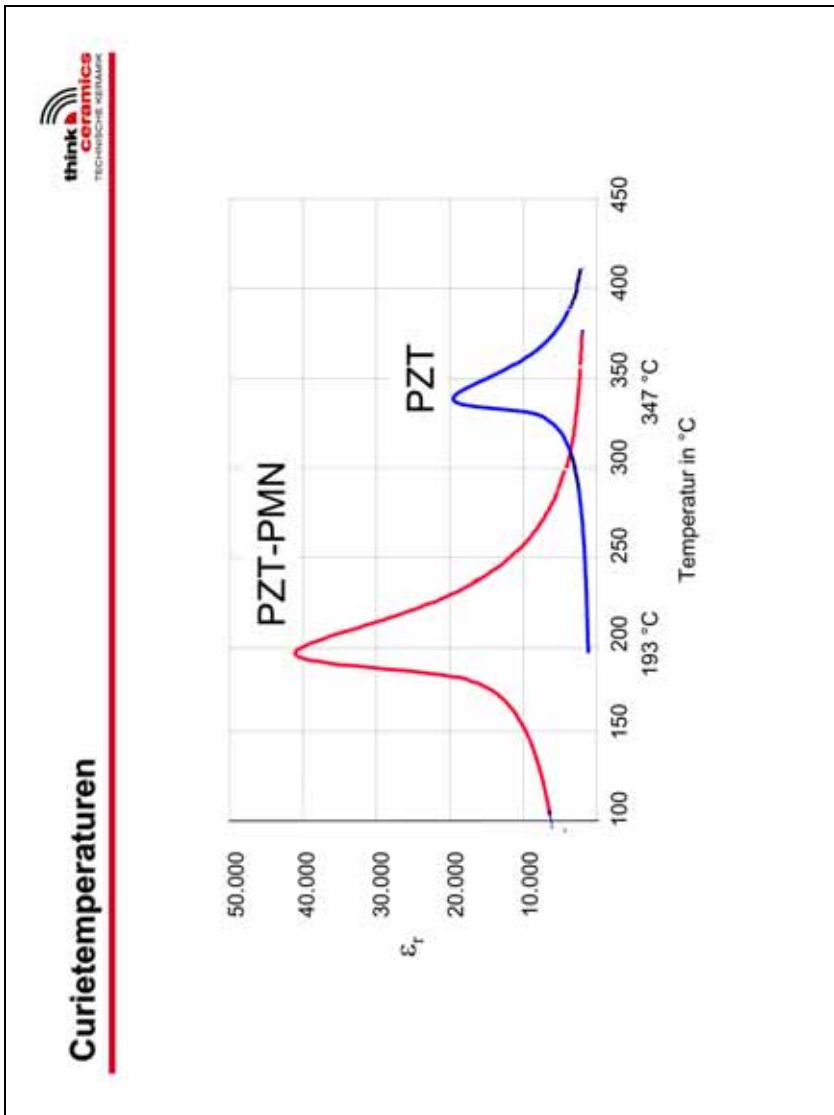
Anomalien im Bereich d. morphotropen Phasenumwandl.

Änderung der DK durch die Polung



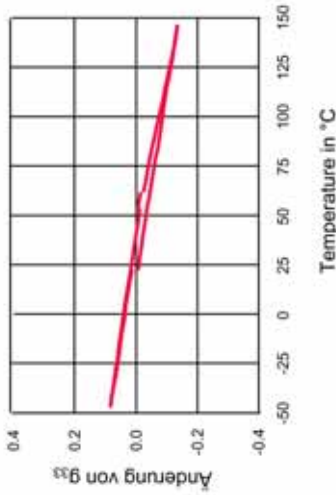
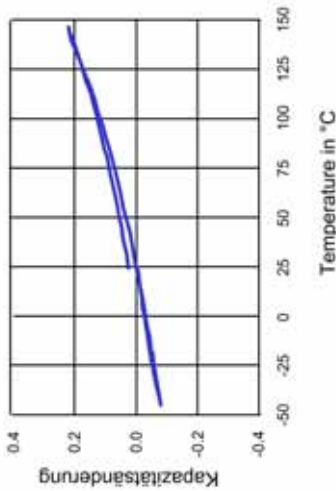


2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 18



2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 19

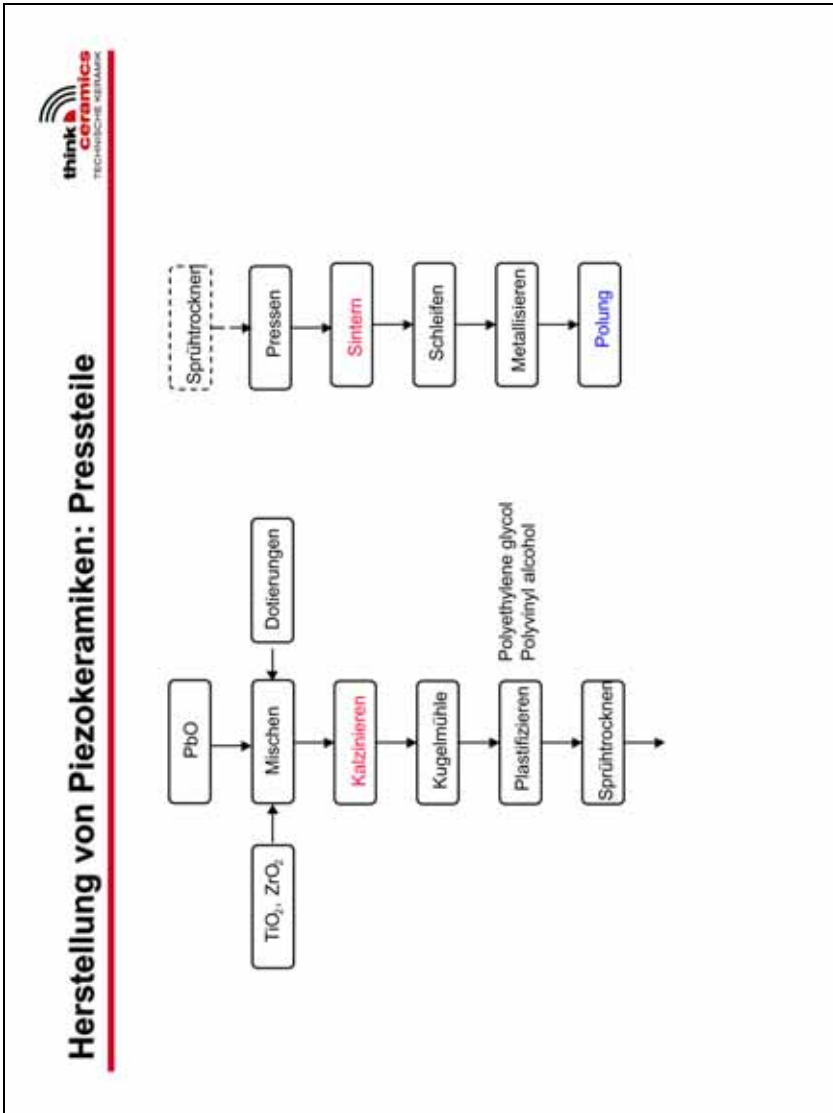
Temperaturabhängigkeit von Kapazität und Spannungskonstante



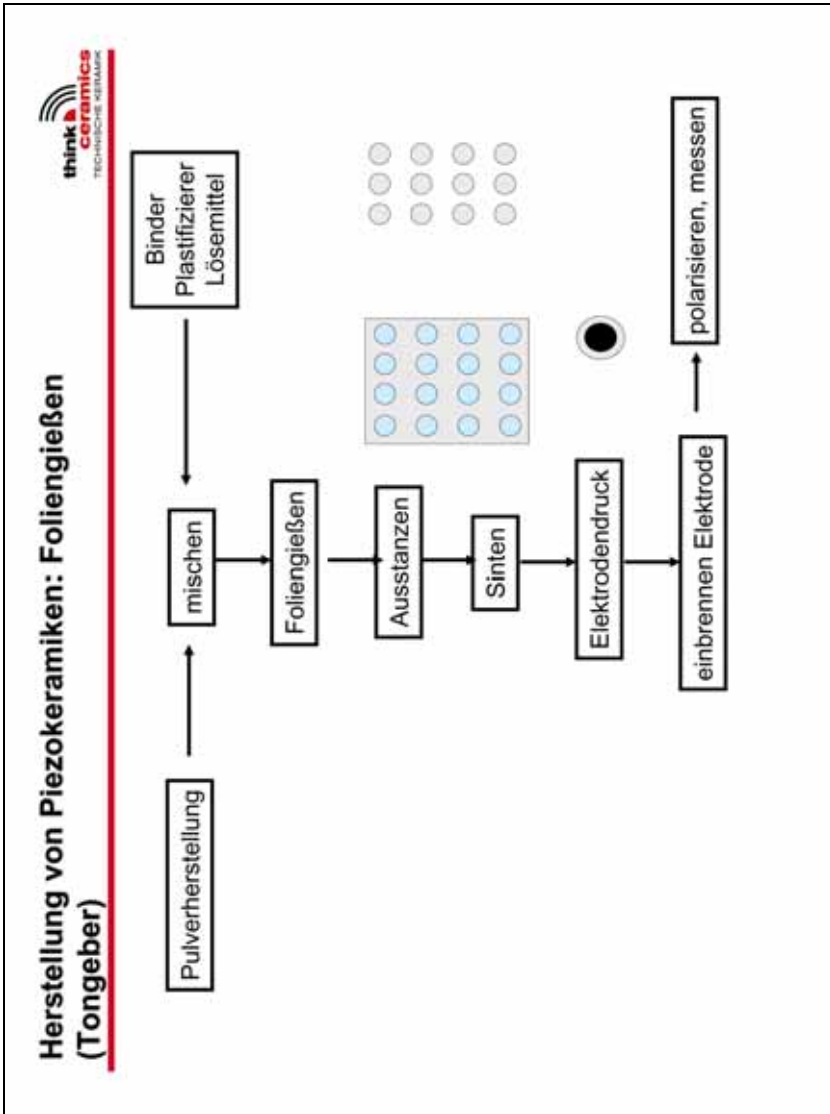
$$g_{33} = \frac{d_{33}}{\epsilon_{33}^T}$$

$$\frac{\partial}{\partial T} g_{33} = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{d_{33}}{\epsilon_{33}^T} \right) = \frac{1}{\epsilon_{33}^T} \frac{\partial d_{33}}{\partial T} - \frac{d_{33}}{\epsilon_{33}^{T^2}} \frac{\partial \epsilon_{33}^T}{\partial T} \quad | : g_{33}$$

$$Tk(g_{33}) = Tk(d_{33}) - Tk(\epsilon_{33}^T)$$



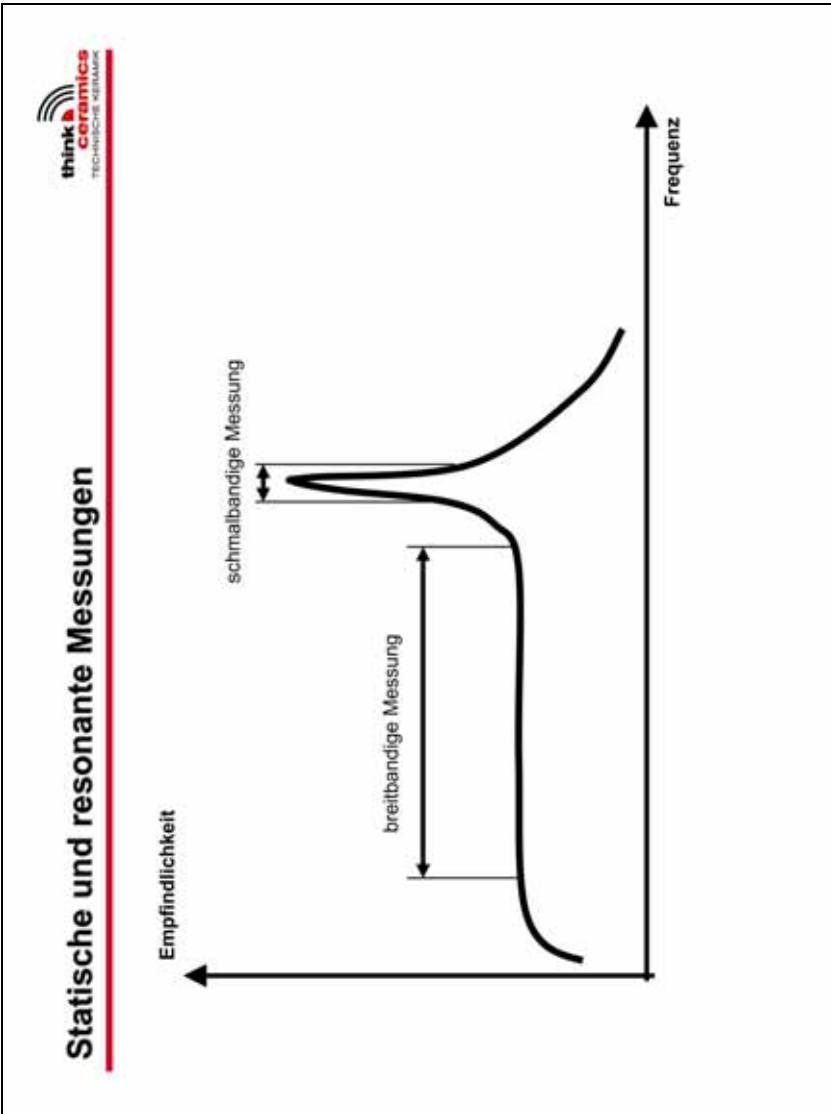
2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 21



2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 22

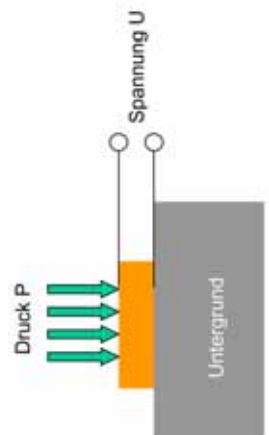
Übersicht

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



2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 24

Axiale Sensoren: Drucksensoren



Druck P

Spannung U

Untergrund

Piezokeramik:
Masse m
Dicke t
Fläche A
Spannungskonstante g_{33}

Materialekonstante

Dicke

$$E_3 = g_{33} \cdot P \Rightarrow$$

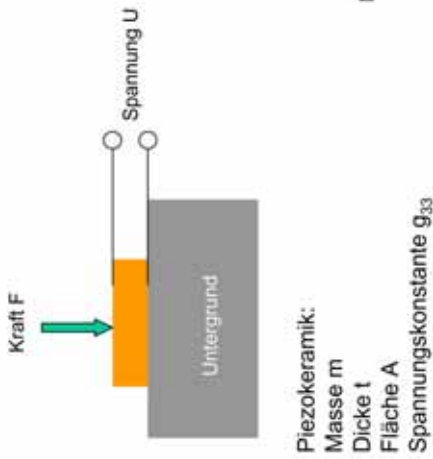
$$U = g_{33} \cdot t \cdot P$$

Bemerkung: Druck darf nicht auf die Seitenflächen wirken!

think
ceramics
TECHNISCHE KERAMIK

2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 25

Axiale Sensoren: Kraftsensoren



2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 26

Axiale Sensoren: Beschleunigungssensoren

seismische Masse M

Spannung U

Untergrund

Beschleunigung a

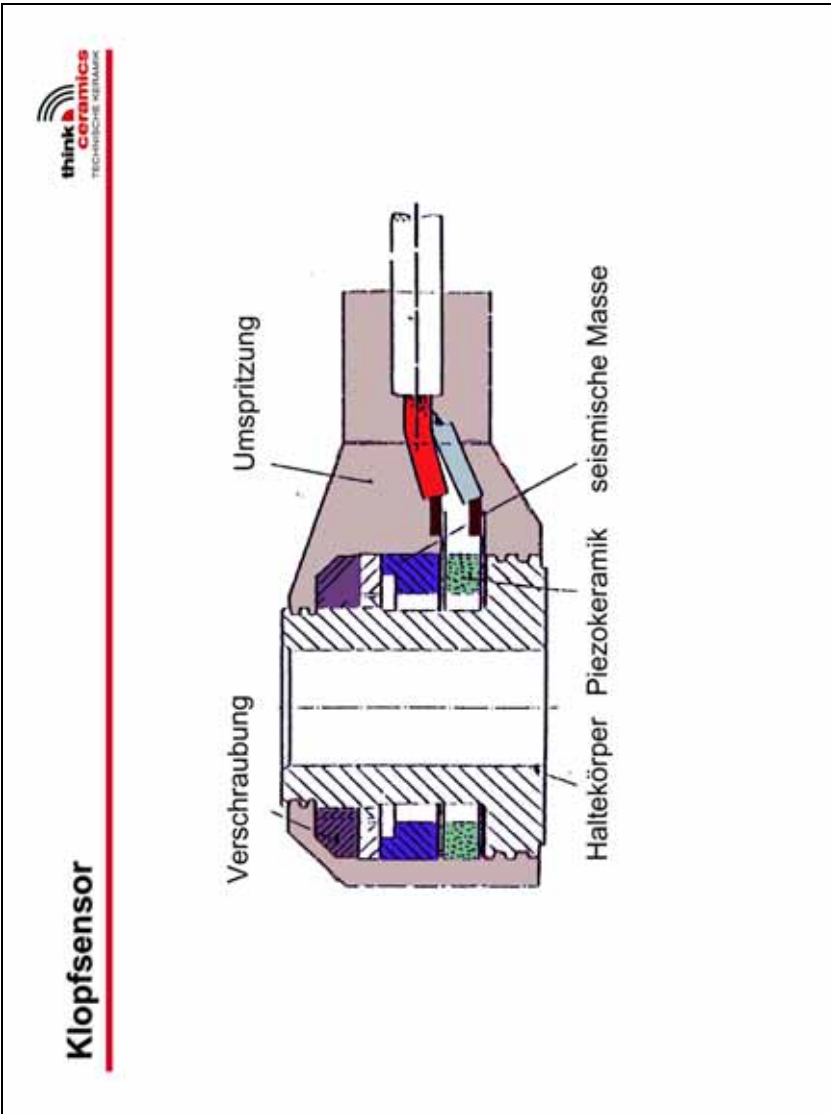
$$E_3 = g_{33} \cdot \frac{\left(\frac{m}{2} + M\right) \cdot a_3}{A} \Rightarrow$$

$$U = g_{33} \cdot \frac{t}{A} \cdot \left(\frac{m}{2} + M\right) \cdot a_3$$

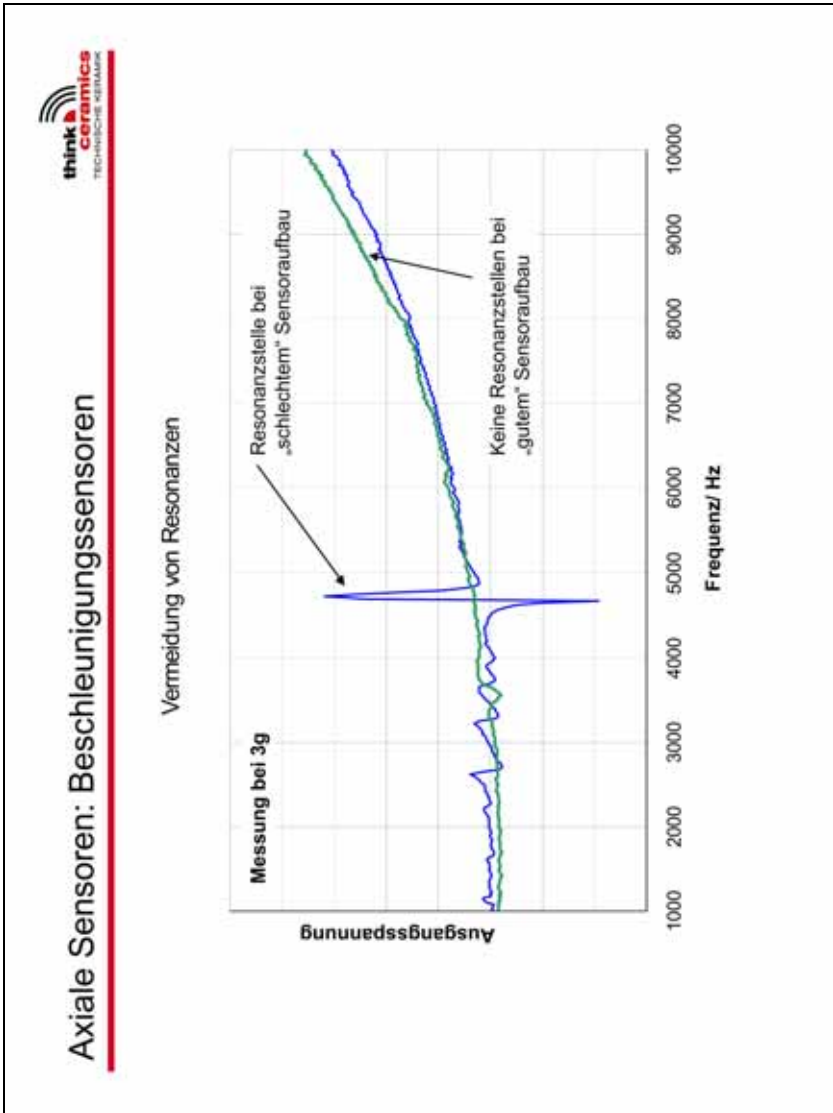
Materialkonstante Geometriefaktor "Massefaktor"

Piezokeramik: Masse m Dicke t Fläche A Spannungskonstante g_{33}	Weitere Randbedingungen	Ursache
	Resonanzfrequenz	Aufbau (physikalisch)
	Leitungseinflüsse, Quellwiderstand	Bauteilkapazität

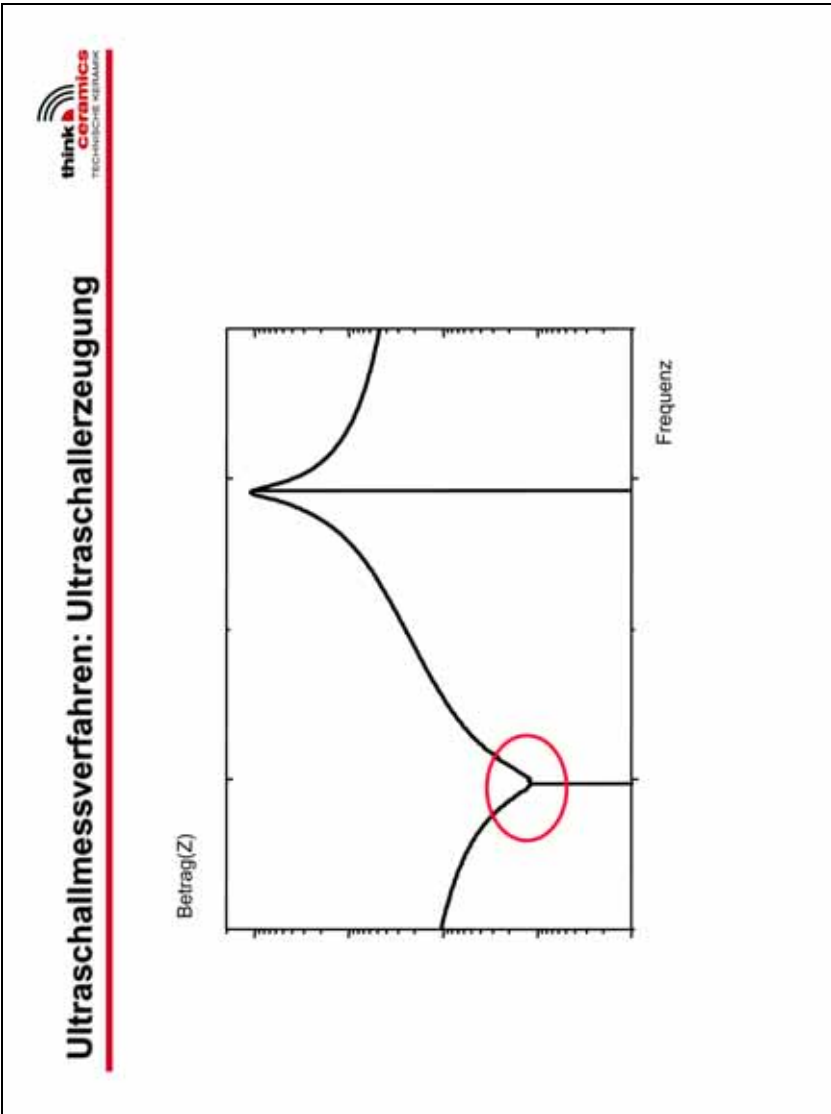
2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 27



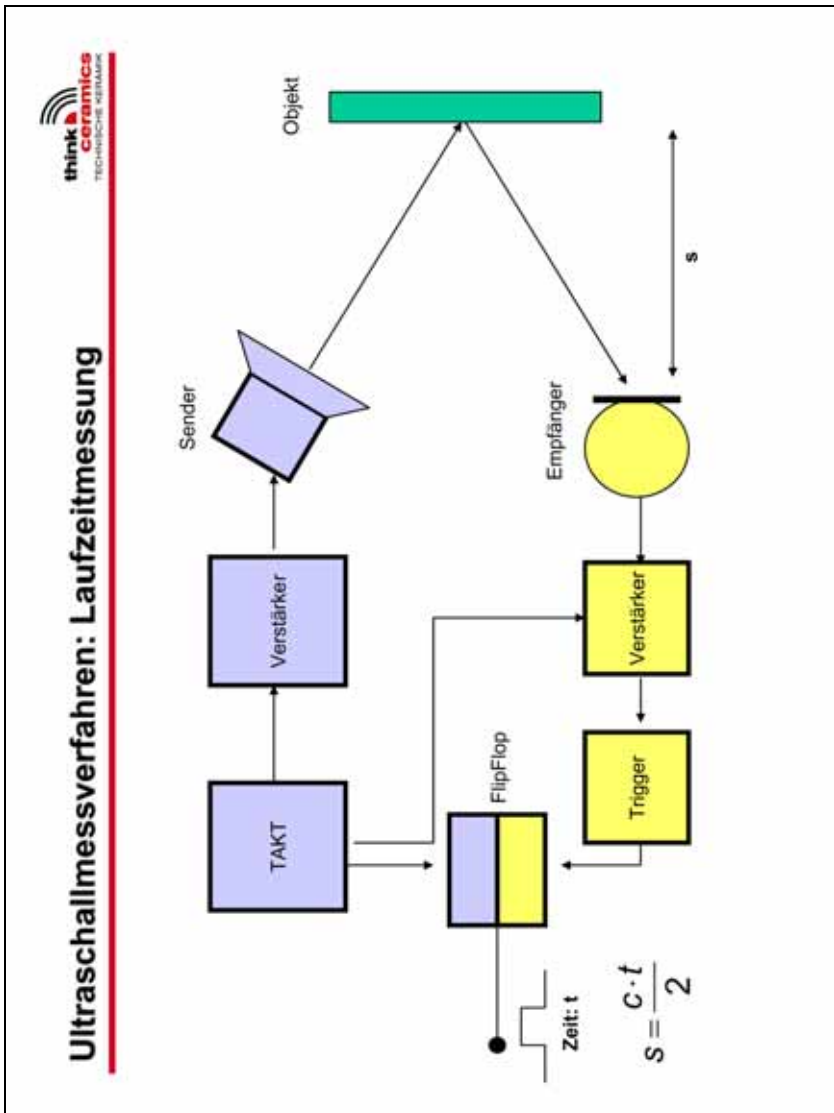
2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 28



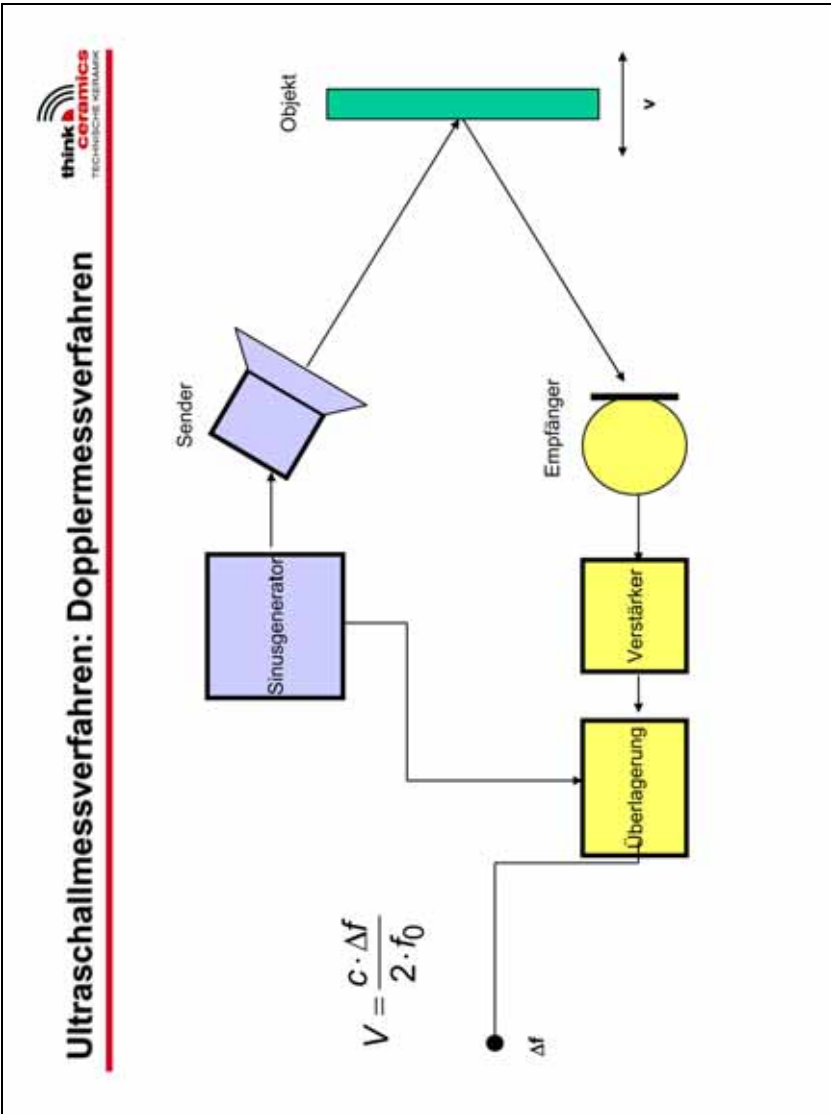
2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 29



2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 30

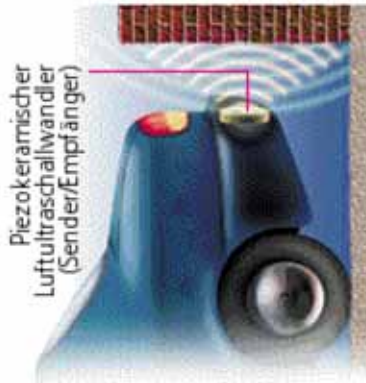


2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 31



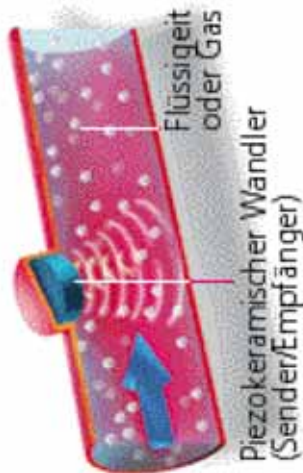
2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 32

Ultraschallmessverfahren: Beispiel

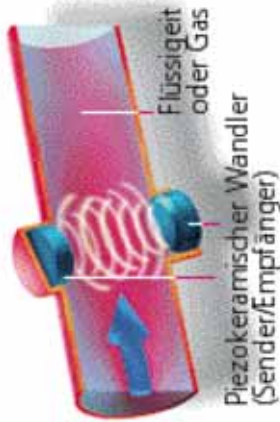


Anwendung: Rückfahrsonar

Ultraschallmessverfahren: Beispiel



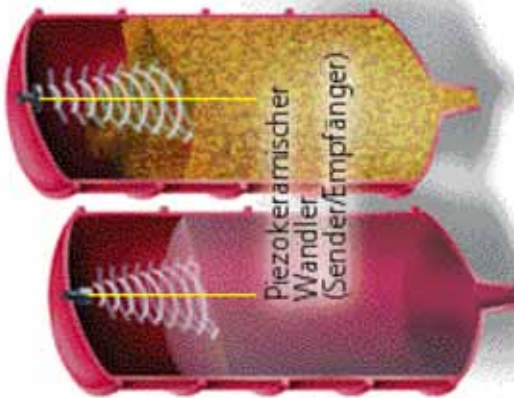
Dopplermessverfahren



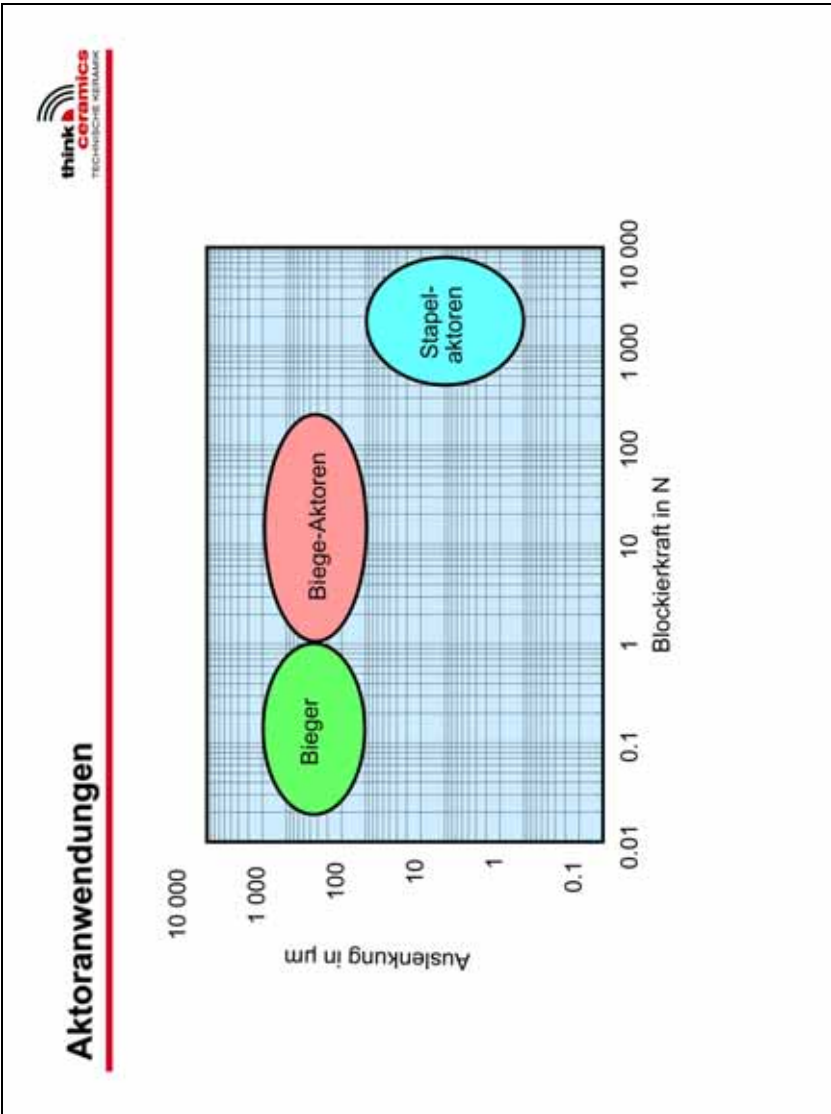
Mitführprinzip

Anwendung: Durchflussmessung

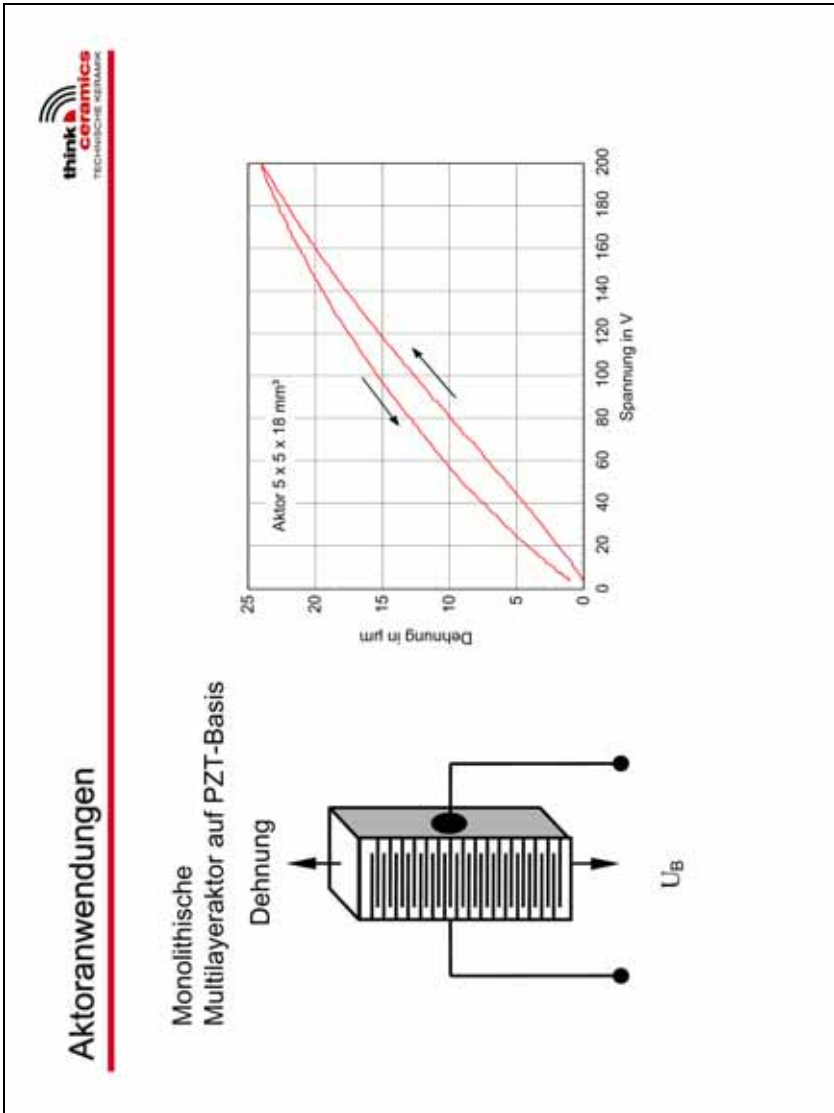
Ultraschallmessverfahren: Beispiel



Anwendung: Füllstandsmessung

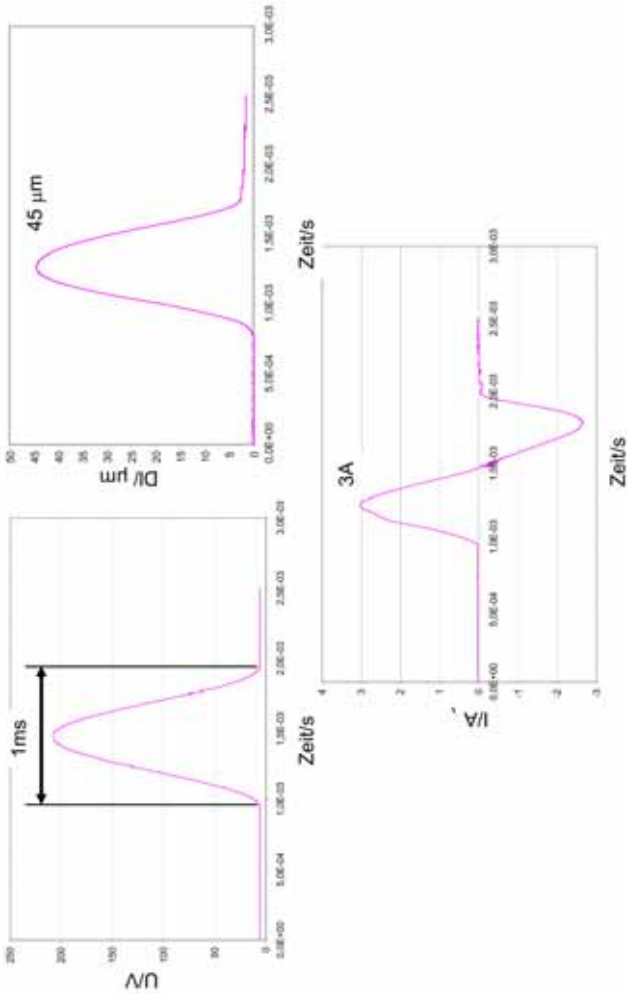


2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 36



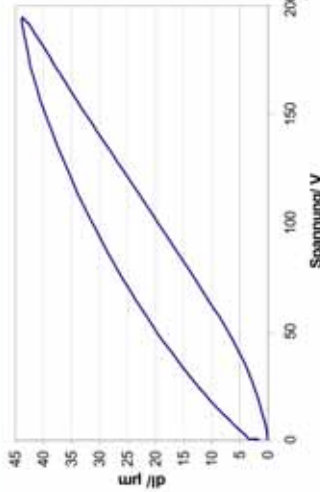
2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 37

Aktoranwendungen: Ansteuerkonzept



2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 38

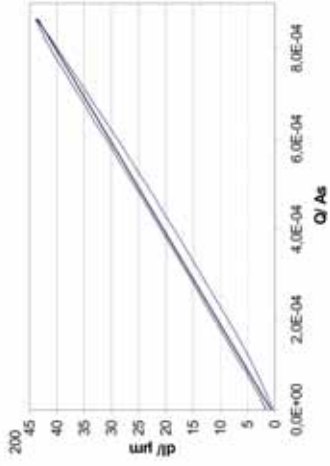
Aktoranwendungen: Ansteuerkonzept



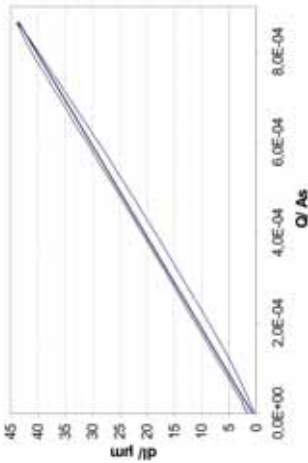
$$Q \propto dl$$

$$\frac{dQ}{dt} = I \propto \frac{dl}{dt}$$

$$\frac{d^2}{dt^2} Q = \frac{dI}{dt} \propto \frac{d^2 l}{dt^2}$$



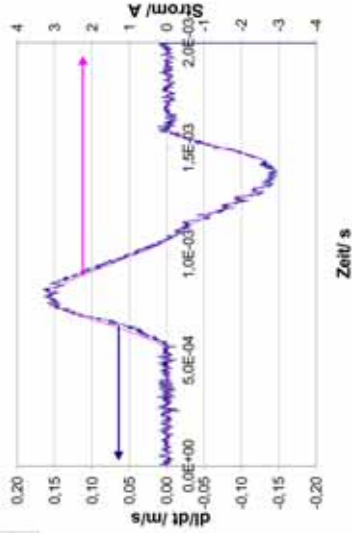
Aktoranwendungen: Ansteuerkonzept

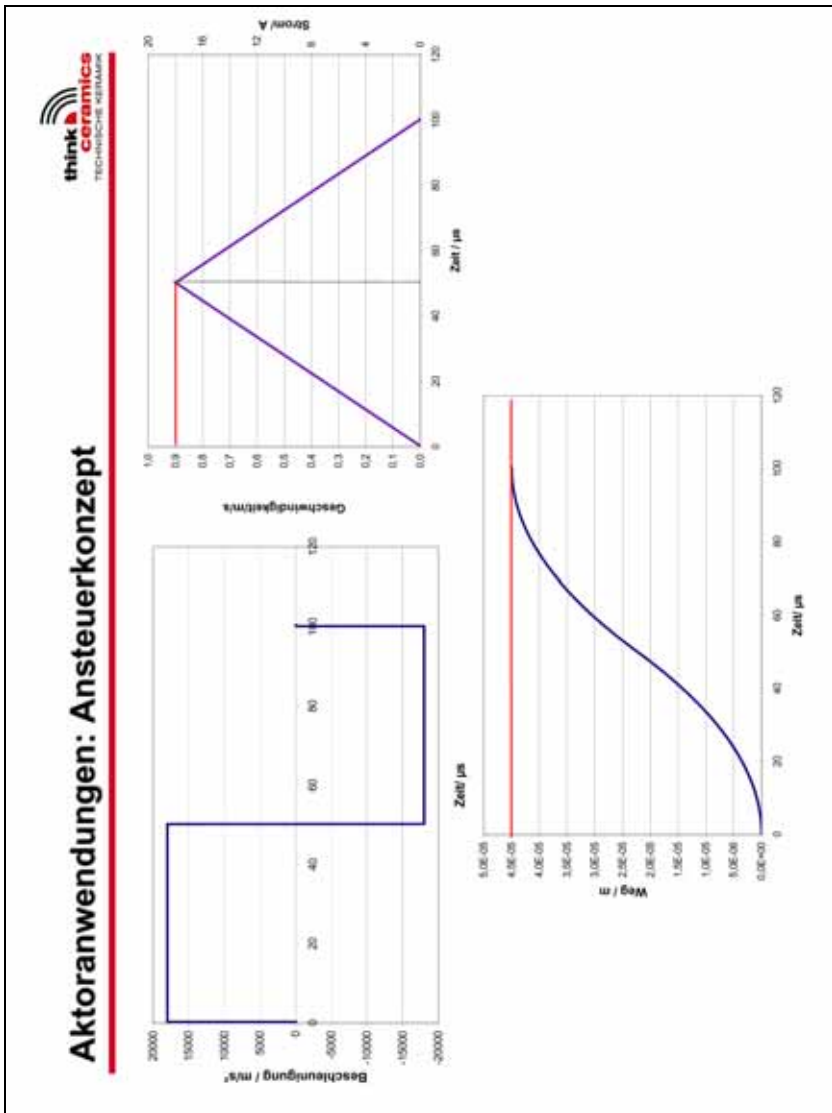


$$Q \propto dl$$

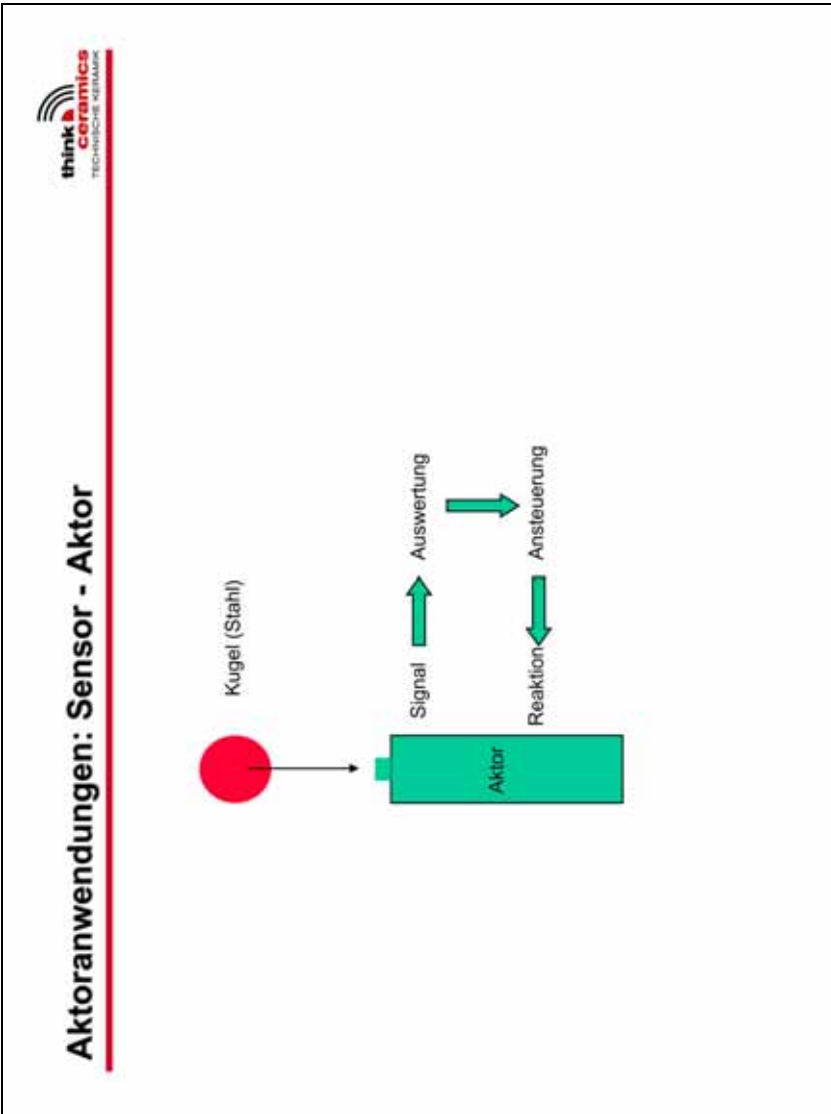
$$\frac{dQ}{dt} = I \propto \frac{dl}{dt}$$

$$\frac{d^2}{dt^2} Q = \frac{d^2 l}{dt^2} \propto \frac{d^2 l}{dt^2}$$

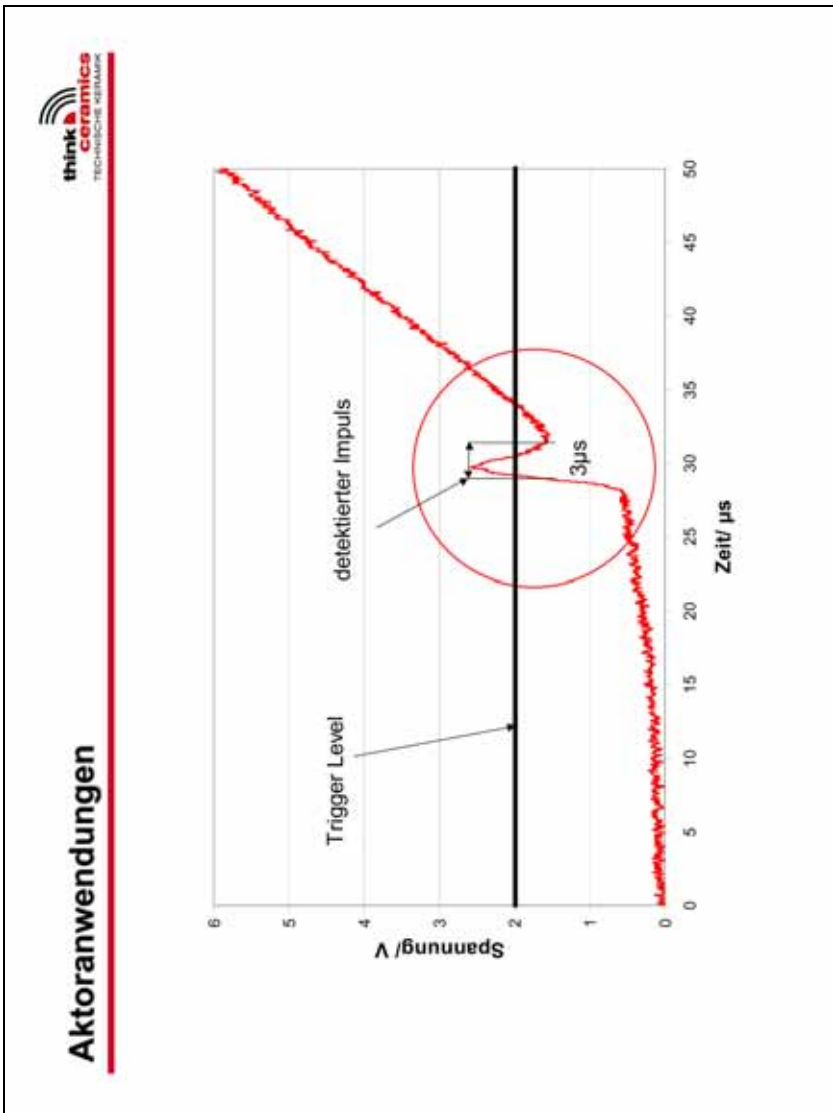




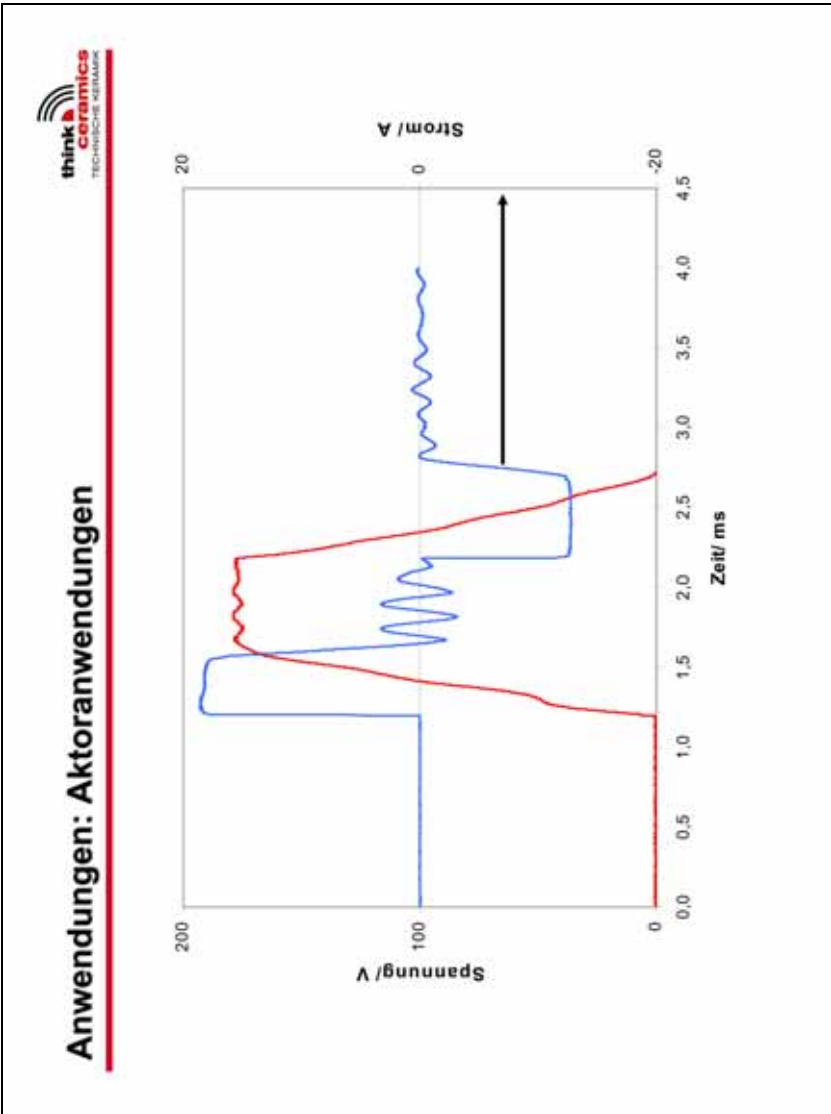
2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 41



2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 42



2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 43



2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 44

Literaturverzeichnis (Auswahl)

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

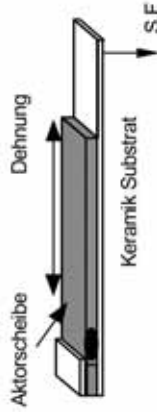
Jaffe, B., Cook, W.R., Jaffe, H.: Piezoelectric Ceramics; London, New York 1979

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

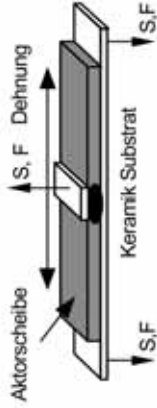
Biegeaktoren



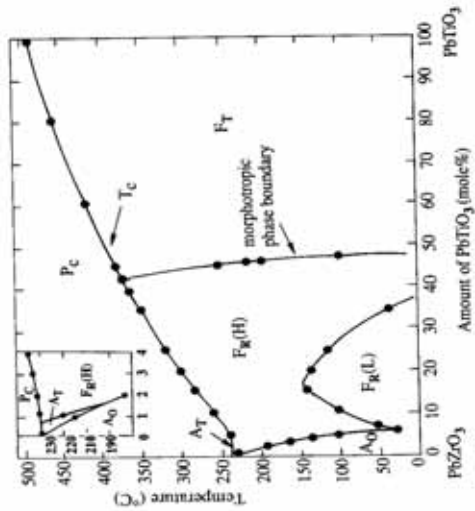
Biegeaktor



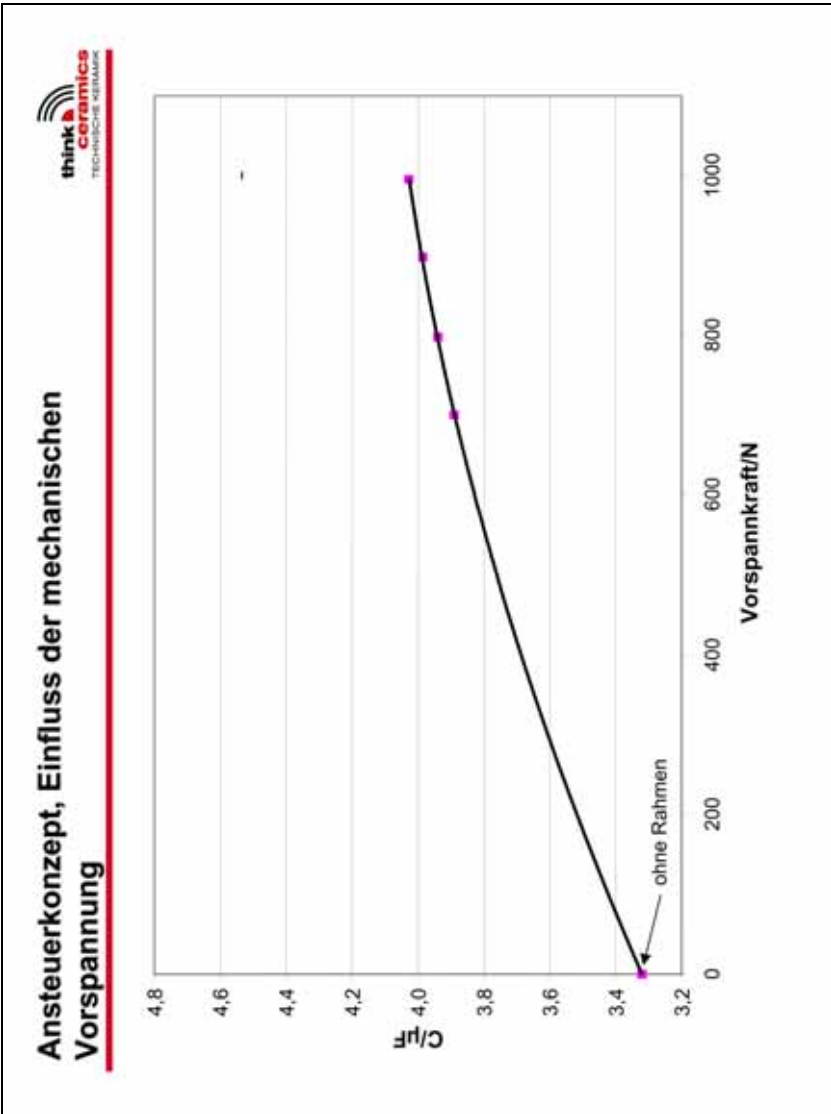
Crossbow-Aktor



PZT-Keramiken für den Einsatz im Fahrzeug



2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 47



2.3. Piezokeramik im Fahrzeug - Folie 48