
Dielektrika im elektrischen Feld II

Vorlesung 2 - 02.06.2017

Piezoelektrizität

Pyroelektrizität

Elektrokalendarischer Effekt

Ferroelektrizität

Zusammenfassung

Kontakt: Peter.Neumeister@ikts.fraunhofer.de

Plattenkondensator:

Ladungsbilanz

elektrische Flussdichte D

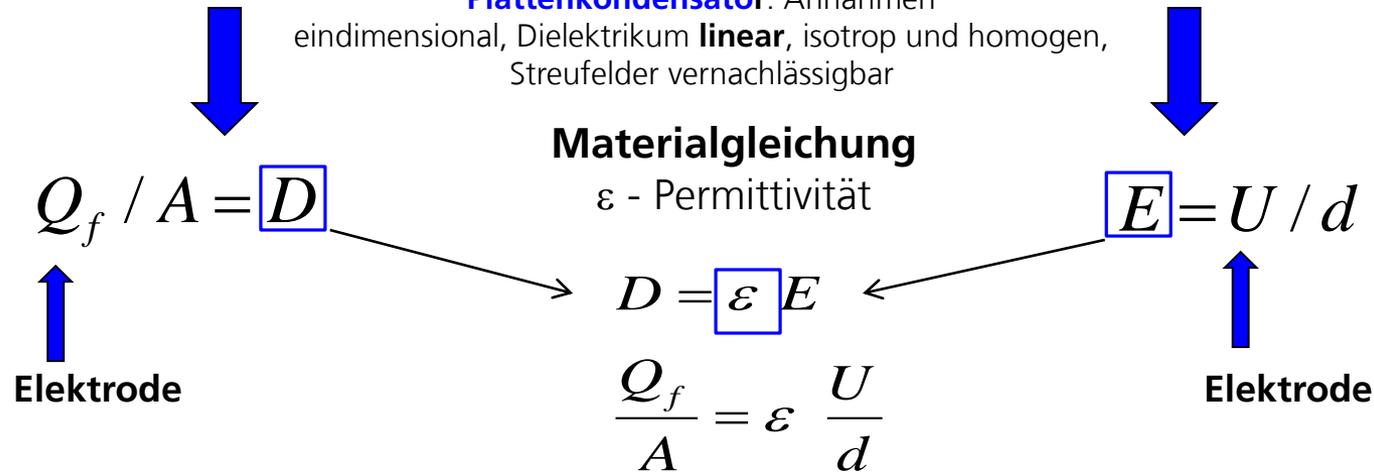
$$\oint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = \int_V \rho_f dV = Q_f$$

Induktionsgesetz

elektrisches Feldstärke E

$$\vec{E} = -\text{grad } \Phi$$

Plattenkondensator: Annahmen
eindimensional, Dielektrikum **linear**, isotrop und homogen,
Strefelder vernachlässigbar



Definition C

$$C = \frac{Q_f}{U} = \frac{\epsilon \cdot A}{d}$$

Ladung vorgegeben (Elektrode offen)

$$U = \frac{Q_f \cdot d}{\epsilon \cdot A}$$

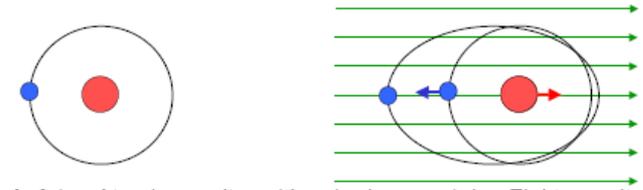
Spannung vorgegeben (Elektrode angeschlossen)

$$Q_f = \frac{\epsilon \cdot A \cdot U}{d}$$

Polarisationsarten

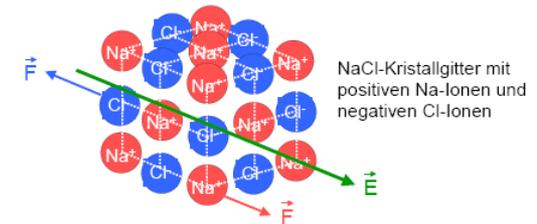
Elektronenpolarisation:

Die Ladungswolke der Elektronen wird gegenüber dem Kern verschoben. Hieraus resultiert ein Dipolmoment. Dies tritt immer auf.



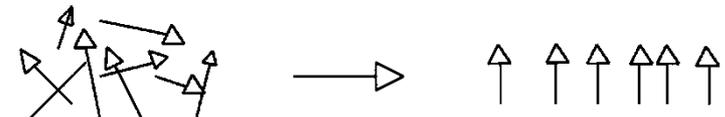
Ionenpolarisation: z.B. NaCl

Verschiebung der Position der Ionen (in Festkörpern mit gebundener Ladung)



Orientierungspolarisation: H₂O, BaTiO₃

In Flüssigkeiten, Gasen und Ferroelektrika sind bereits Dipole vorhanden, die durch das angelegte Feld ausgerichtet werden.



Raumladungspolarisation (Komposite):

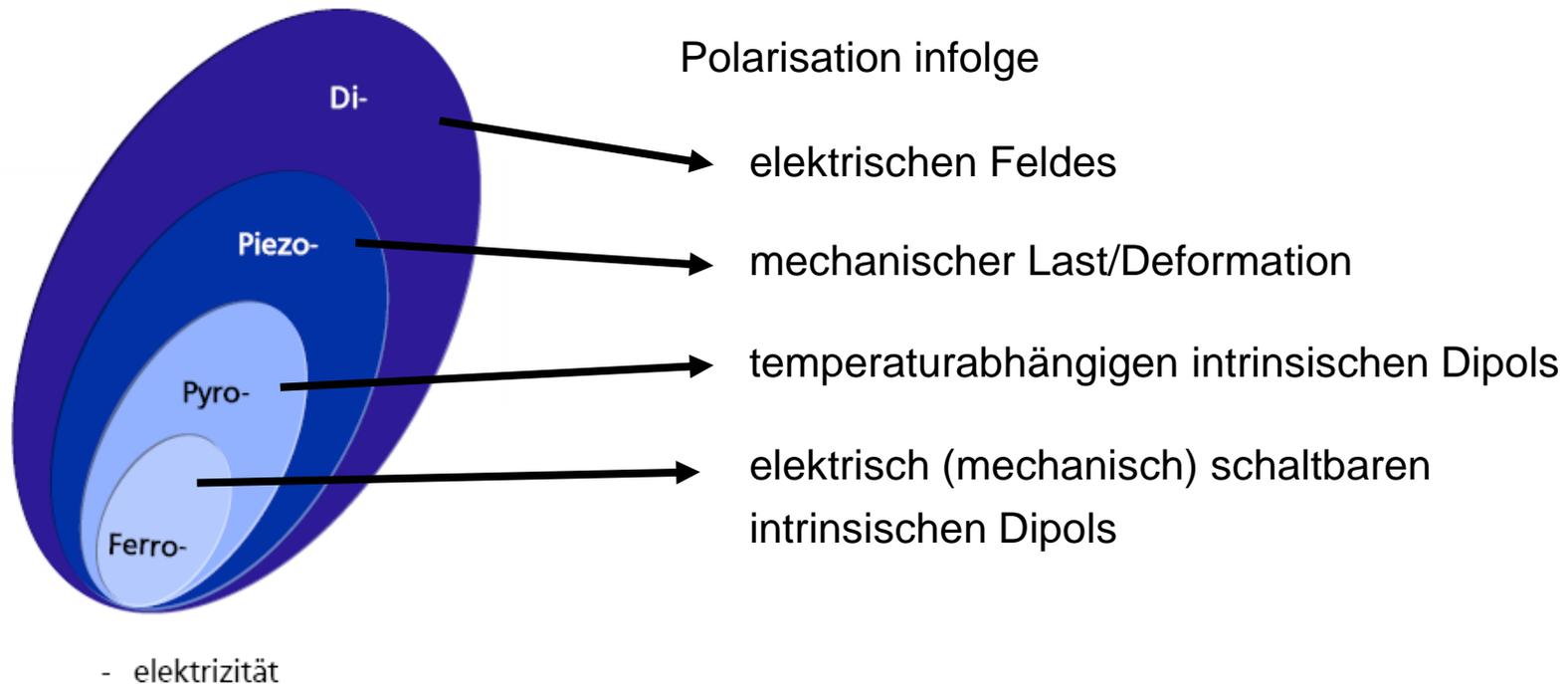
Sie tritt auf, wenn im Material in räumlich begrenzten Bereichen freie Ladungsträger vorhanden sind.



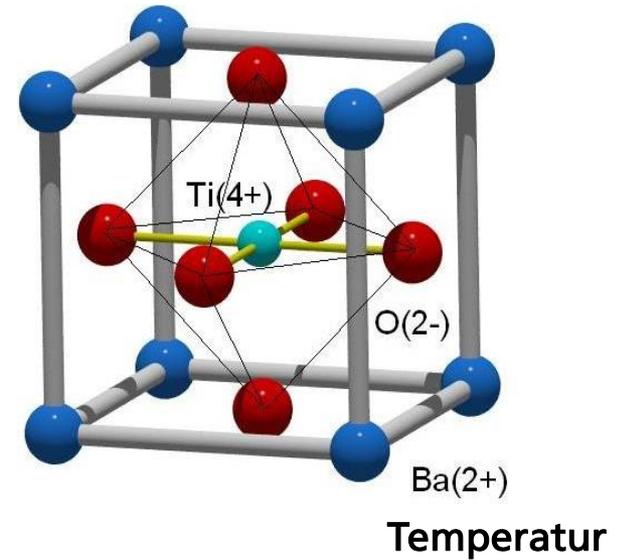
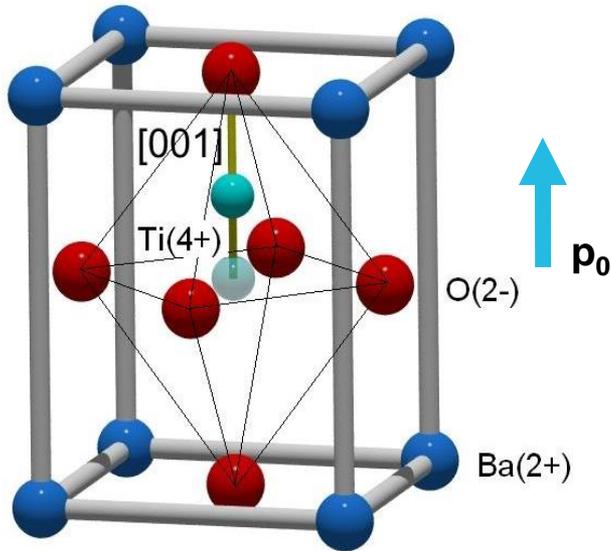
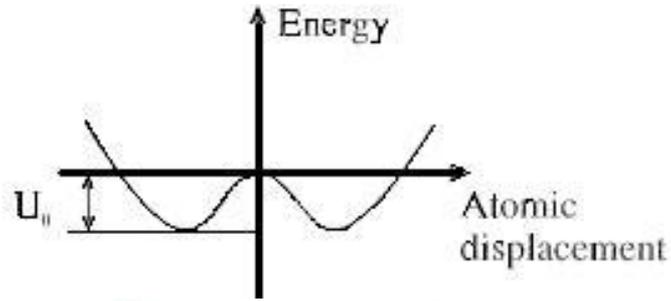
Klassifizierung dielektrischer Werkstoffe

Die Materialeigenschaften werden durch die Polarisierbarkeit $P(E, T, \text{mechanische Spannung, Vorgeschichte})$ beschrieben

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}(T, E, \omega, t, \dots) \quad \text{Stoffgleichung, allgemeiner Ansatz}$$



BaTiO₃ – Elementarzelle, Phasenübergang bei T_c



400 K

ferroelektrisch

Piezoelektrizität

-
- Erscheinungsbild, Mechanismus,
 - mathematische Beschreibung
 - Anwendungsbeispiel Kraftsensor
 - Piezoelektrische Resonatoren
 - Anwendungsbeispiel Zerstäuber

Piezelektrizität – Entdeckung 1880 -1882

Experimente von Pierre und Jacques Curie offenbarten, dass bei einer Reihe von Kristallen (Turmalin, Quarz, Topas, Rochelle Salz) Oberflächenladungen auftreten, wenn diese Kristalle mechanisch belastet werden. Sie fanden, dass dieses Effekts von der Kristallstruktur und dem Kristallschnitt abhängt [1880].

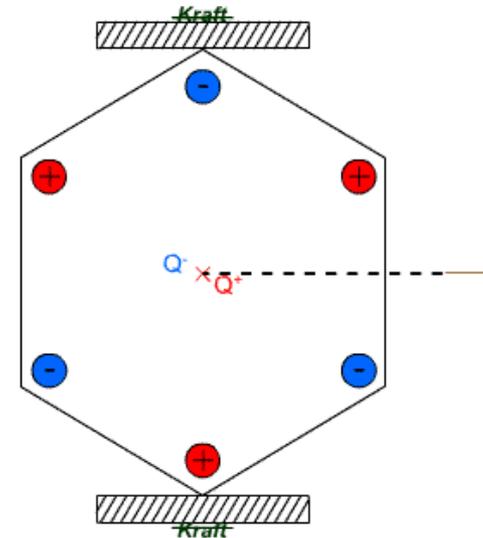
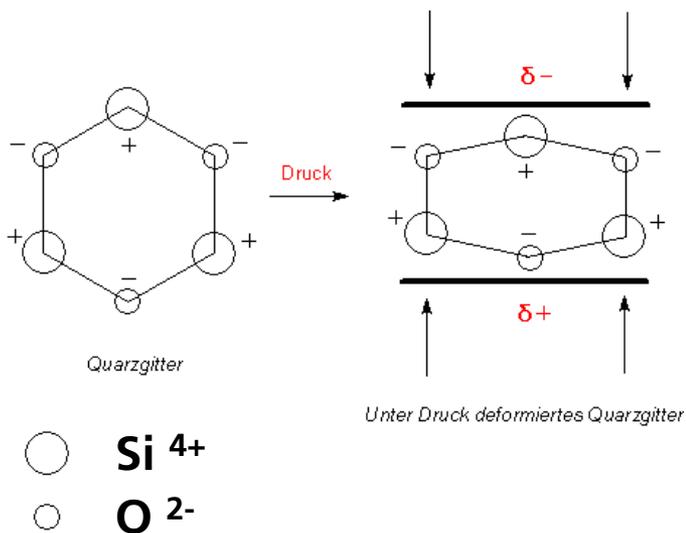
Sie bezeichneten diese Phänomene als „**Piezelektrizität**“ zur Unterscheidung zu den damals bereits bekannten Effekten der reibungsinduzierten statischen Aufladung und der Pyroelektrizität, d.h. der Ladungsfreisetzung durch Erwärmung.

1881 leitete Lippmann auf Basis thermodynamischer Rechnungen ab, dass die piezoelektrischen Kristalle auf ein elektrisches Feld durch Verformung reagieren. Die Brüder Curie bestätigten diesen „**inversen piezoelektrischen Effekt**“ experimentell. Sie führten den quantitativen Beweis für die komplette Reversibilität der elektro-elasto-mechanischen Verformung piezoelektrischer Kristalle.

Piezelektrizität - Mechanismus

Atomare Ursache für den piezoelektrischen Effekt ist die Änderung der Polarisation (Dipoldichte im Volumen) durch Verformung des Kristalls. Die Änderung der Polarisation ändert gleichzeitig die Dichte von Oberflächenladungen, messbar als Spannung zwischen den entsprechenden Oberflächen bzw. als Stromfluß bei elektrischer Verbindung der entsprechenden Oberflächen.

Zur Größe des Effekts: 1 x 1 x 1 cm³ Würfel aus Quarz liefert bei 2 kN korrekt eingekoppelter Kraft eine Spannung von 12.500 V [7].



Direkter piezoelektrischer Effekt: Durch mechanischen Druck verlagert sich der positive (Q+) und negative Ladungsschwerpunkt (Q-). Dadurch entsteht ein Dipol, eine elektrische Spannung am Element.

Piezelektrizität – Materialgleichung

Piezelektrizität ist eine Kopplung zwischen elektrischem und mechanischem Verhalten.

- linear
- symmetrisch

Zur Beschreibung des piezelektrischen Verhalten werden beide Gleichungen kombiniert. Darin sind

D - Vektor der dielektrischen Verschiebung
S - Tensor der mechanischen Dehnung
T - Tensor der mechanischen Spannung
E - Vektor der elektrischen Feldstärke

Werkstofftensoren in Voigt-Notation zur Beschreibung der Werkstoffeigenschaften

d_{ij} – **piezelektrische Ladungskonstanten**

ϵ_{ij} - Dielektrizitätskonstanten, ϵ^T – konstante mechanische Spannung

s_{ij} - elastische Nachgiebigkeit, s^E – konstantes E-Feld

$$D = \epsilon_0 E + P = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r E$$

$$S = sT$$

S - Dehnung, s - Nachgiebigkeit, T – Spannung

$$D = d \cdot T + \epsilon^T \cdot E$$

$$S = s^E \cdot T + d_t \cdot E$$

$()_t$ - transponiert

Piezoelektrizität – Materialgleichung

Lineares Gleichungssystem vollständig oder teilweise invertierbar

=> 4 übliche Notationen

$$\begin{array}{l} E,T\text{-Form} \\ D = \varepsilon^T E + d T \\ S = d_t E + s^E T \end{array}$$

$$\begin{array}{l} E,S\text{-Form} \\ D = \varepsilon^S E + e S \\ T = -e_t E + c^E S \end{array}$$

$$\begin{array}{l} D,S\text{-Form} \\ E = \beta^S D - h S \\ T = -h_t D + c^D S \end{array}$$

$$\begin{array}{l} D,T\text{-Form} \\ E = \beta^T D - g T \\ S = g_t D + s^D T \end{array}$$

- d, h, e, g – piezoelektrische Kopplung
- ε, β – Permittivität, inverse Permittivität
- s, c – mechanische Nachgiebigkeit, Steifigkeit
- $(\)^T, (\)^S, (\)^E, (\)^D$ – Werte bei konstanter mech. Spannung, Verzerrung, elektrischem Feld, dielektrischer Verschiebung

Piezoelektrizität – Materialgleichung

$$D_i = \sum_{j=1}^6 d_{ij}^E \cdot T_j + \sum_{k=1}^3 \varepsilon_{ik}^T \cdot E_k$$

$i, k - 1, 2, 3$
(kartesische Raumrichtungen)
 $j - 1, 2, 3, 4, 5, 6$

$$S_i = \sum_{j=1}^6 s_{ij}^E \cdot T_j + \sum_{k=1}^3 d_{ki} \cdot E_k$$

$$[T_j] = \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{13} \\ T_{12} \end{bmatrix}$$

Die Koeffizienten eines bestimmten Werkstoffes werden üblicherweise in einer Matrix zusammengefasst (Van Dyke Matrix).

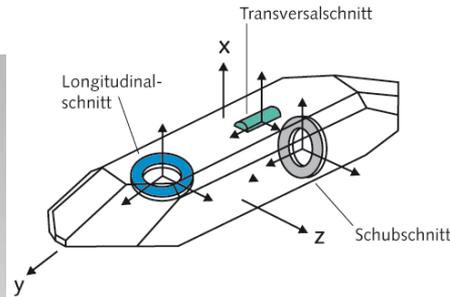
Z.B. gilt für α – Quarz folgende Form ->

s_{11}^E	s_{12}^E	s_{13}^E	s_{14}^E	0	0	d_{11}	0	0
s_{12}^E	s_{11}^E	s_{13}^E	$-s_{14}^E$	0	0	$-d_{11}$	0	0
s_{13}^E	s_{13}^E	s_{33}^E	0	0	0	0	0	0
s_{14}^E	$-s_{14}^E$	0	s_{44}^E	0	0	d_{14}	0	0
0	0	0	0	s_{44}^E	$2s_{14}^E$	0	$-d_{14}$	0
0	0	0	0	$2s_{14}^E$	s_{66}^E	0	$-2d_{11}$	0
d_{11}	$-d_{11}$	0	d_{14}	0	0	ε_{11}^T	0	0
0	0	0	0	$-d_{14}$	$-2d_{11}$	0	ε_{11}^T	0
0	0	0	0	0	0	0	0	ε_{33}^T

Van Dyke Matrix für die Koeffizienten s^E , d und ε^T von α - Quarz

Piezoelektrizität – Anwendungsbeispiel Kraftsensor

$$D = d \cdot T + \varepsilon^T \cdot E$$



Die „Press Force“ Sensoren basieren auf dem piezoelektrischen Messprinzip.

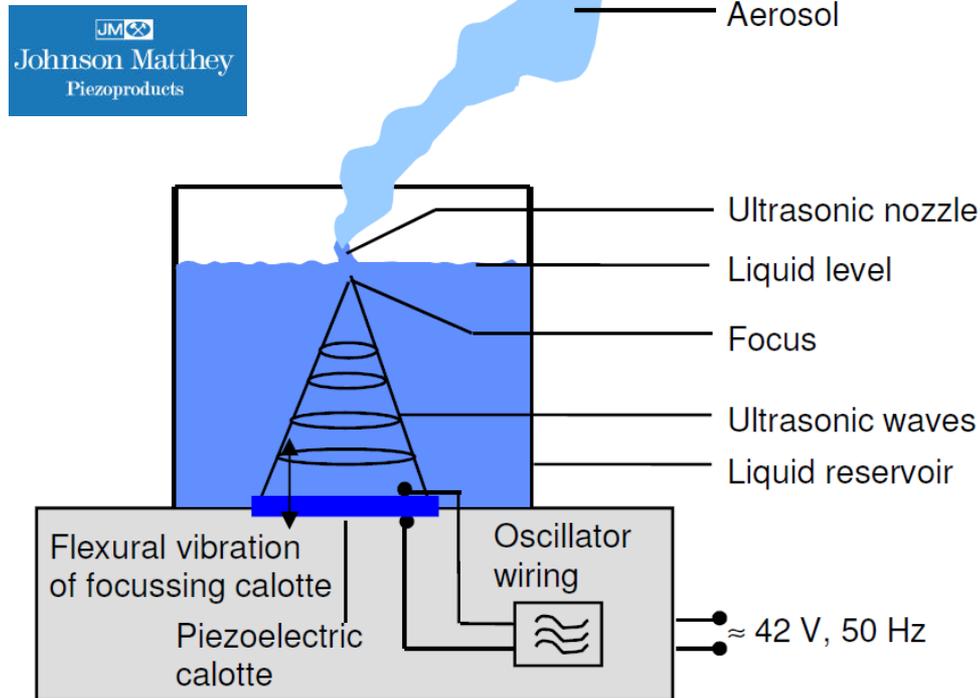
Die auf den Quarz wirkende Kraft erzeugt am Signalausgang eine proportionale Ladung. Der nachzuschaltende Messverstärker (z.B. ICAM Typ 5073A...) wandelt diese in ein auswertbares Prozesssignal um (z.B. 0 ...10 V).

Abhängig vom Sensortyp werden Zugkräfte bis zu 16 % des Druckkraftbereichs gemessen. Sie werden jedoch häufig für die Detektierung von Werkzeugabzugskräften z.B. nach Einpressvorgängen verwendet.

Piezoelektrizität, Anwendungsbeispiel Resonatoren

$$D = d \cdot T + \epsilon^T \cdot E$$

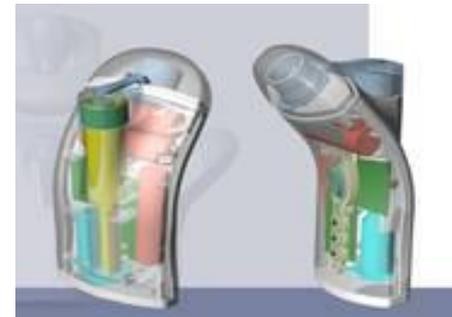
$$S = s^E \cdot T + d \cdot E$$



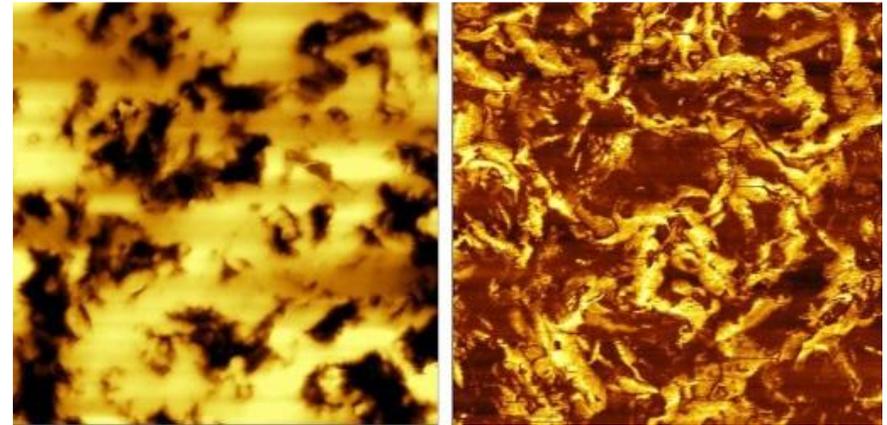
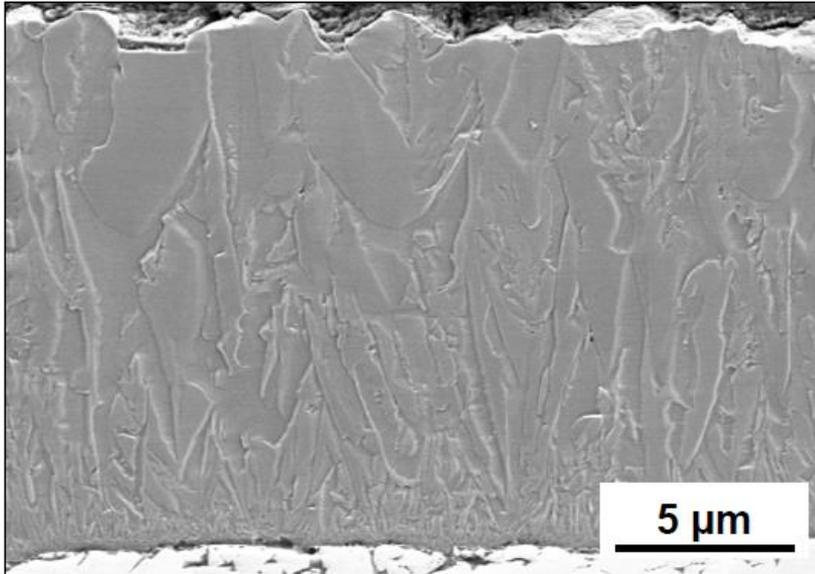
Bereitstellung von Aerosolen



Inhalationsgeräte

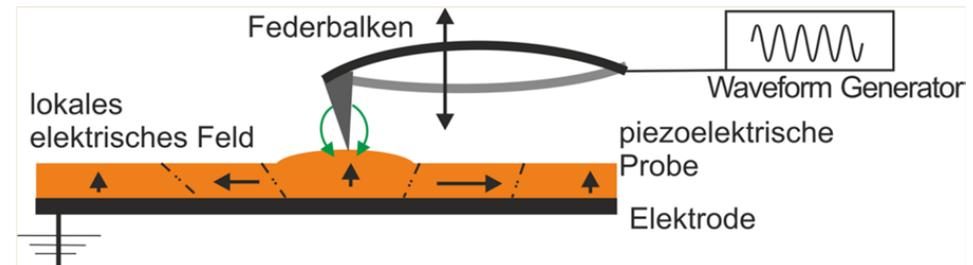


Piezoelektrische AlN – Schichten für Hartmetallwerkzeuge



AFM-Aufnahmen einer 20 μm AlN-Schicht auf WC/Co-Hartmetall. Die Schicht hat eine $\langle 103 \rangle$ -Textur. Bildgröße 30 x 30 μm.

Geeignet für Prozesskontrolle ?



Piezelektrische Zustandsgleichungen für Piezokeramik, Kopplungsfaktoren

Van Dyke Matrix für gepolte Piezokeramiken

- Polungsrichtung in z-Richtung
- Bsp. für E,S-Form (Struktur für andere Gleichungsformen analog)

$$\begin{bmatrix}
 c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{13} \\
 c_{12}^E & c_{11}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{13} \\
 c_{13}^E & c_{13}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{33} \\
 0 & 0 & 0 & c_{66}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & 0 & 0 & -e_{15} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44}^E & -e_{15} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & \varepsilon_{11}^S & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 & \varepsilon_{11}^S & 0 \\
 e_{13} & e_{13} & e_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^S
 \end{bmatrix}$$

$$c_{66}^E = \frac{1}{2}(c_{11}^E - c_{12}^E)$$

- transversalisotrop
- 10 Koeffizienten (5 mechanisch, 3 piezelektrisch, 2 dielektrisch)

Bestimmung eines konsistenten Datensatzes der piezoelektrischen Koeffizienten durch Kombination geeigneter Resonatoren [DIN 50324-2]

Kopplungsfaktoren $k^2 = \frac{\text{Teil der elektrischen Energie, der in mechanische Energie gewandelt wird}}{\text{eingekoppelte elektrische Energie}}$

Beispiel Längsschwingung: $k_{33}^2 = \frac{d_{33}^2}{\epsilon_{33}^T s_{33}^E}$

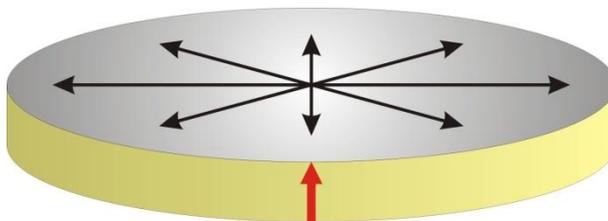
Bauteilformen



Dickenscherschwingung



Transversalschwingung



Radialschwinger, Dickenschwinger



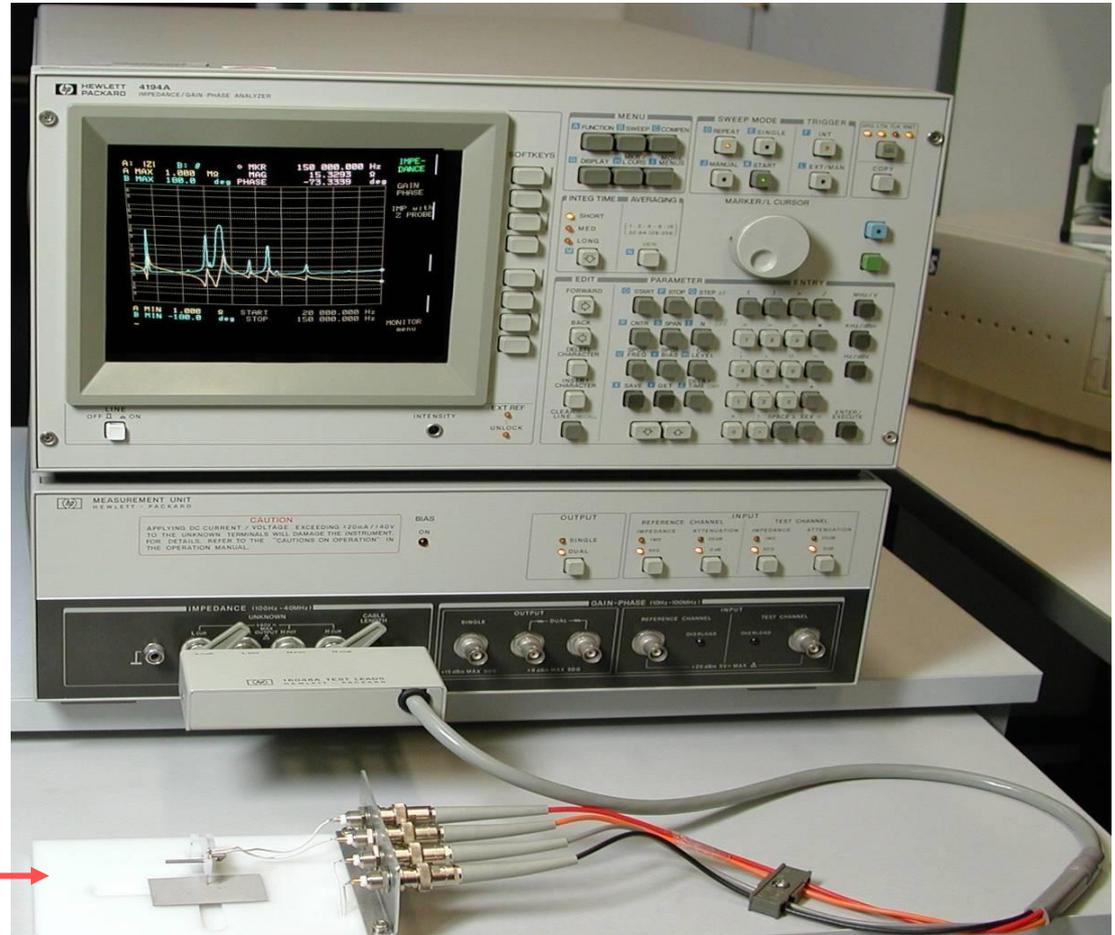
Längsschwinger

Impedanzmesstechnik

Impedanzmessung erfolgt mittels Impedanzanalysator, z.B. HP4149A

Ausgabe:

$$|z|, \theta = f(\omega)$$



Messprobe

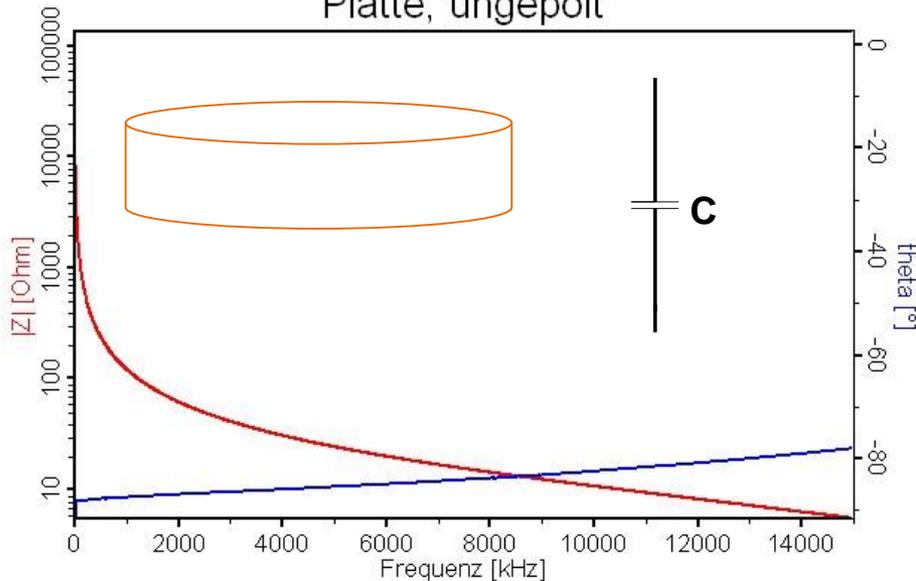
Impedanzverhalten piezoelektrischer Resonatoren

Kondensator, Dielektrikum ohne Piezoeffekt
Verhalten eines Kondensator mit

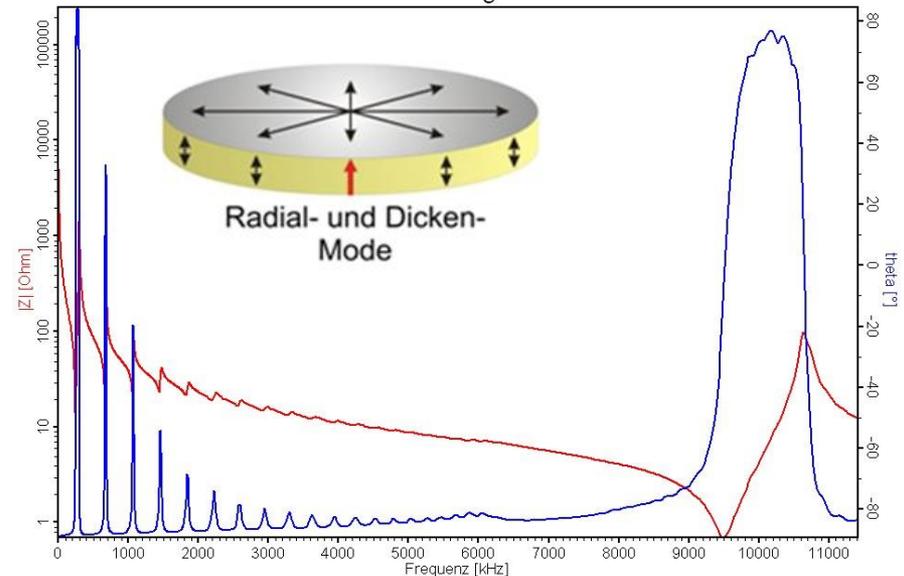
$$|Z| = \left| \frac{U_{\max}}{I_{\max}} \right| = \frac{1}{\omega C} \quad \varphi = -90^\circ$$

Kondensator, Dielektrikum mit Piezoeffekt,
Impedanzkurve des Kondensator ist durch
Resonanzschwingungen überlagert

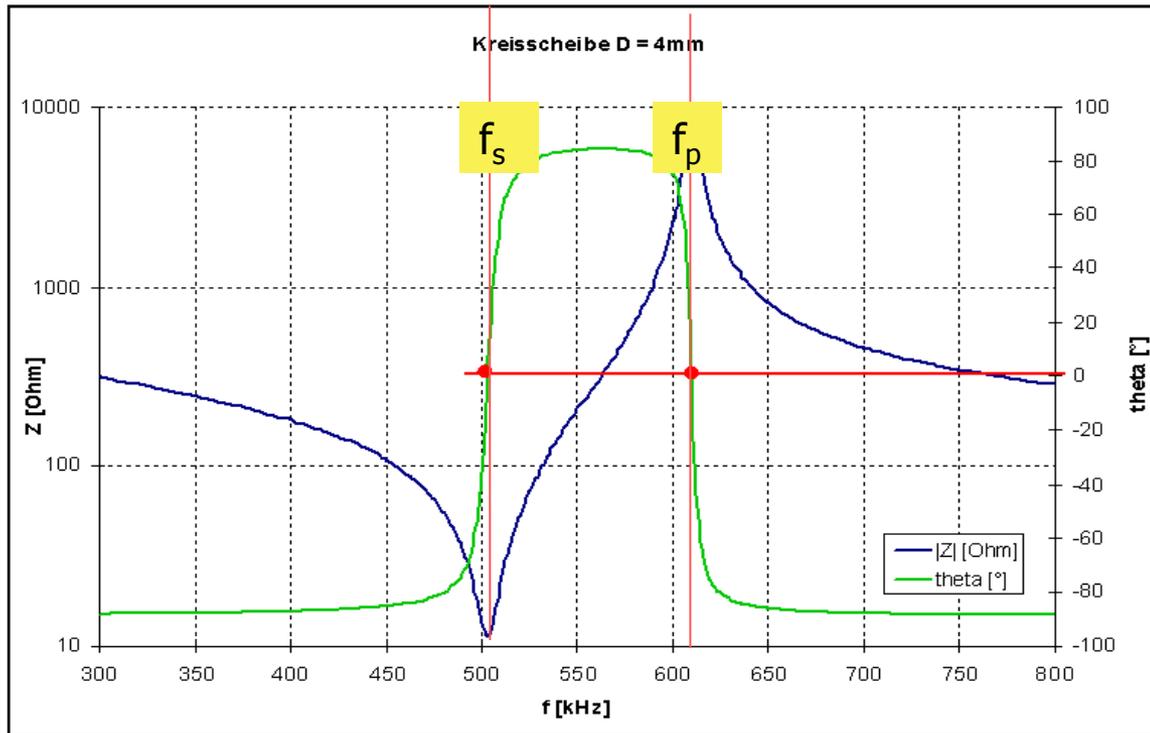
Platte, ungepolt



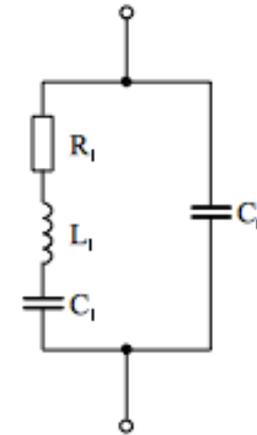
Radialschwinger 8mm



Impedanzverhalten piezoelektrischer Resonatoren



Elektrisches Ersatzschaltbild



Elektromechanische Analogie

C_1 – Reziprokwert der Federsteifigkeit
 L_1 – träge Masse
 R_1 – interne Verluste

Serien- und Parallelfrequenz

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L_1 \cdot C_1}}$$

$$f_p = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{C + C_1}{L_1 \cdot C \cdot C_1}}$$

Resonator-Kopplungsfaktor

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

beschreibt die Verteilung der piezoelektrisch gewandelten Energie zur Gesamtenergie

Experimentelle Bestimmung der piezoelektrischen Koeffizienten

Beispiel: Kopplungsfaktor k_p für die Radialschwingung

Die piezoelektrischen Koeffizienten können durch Kombination der beiden Gleichungen bestimmt werden. Messgrößen sind f_s , f_p , und ϵ_{33}^T

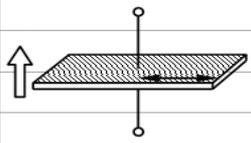
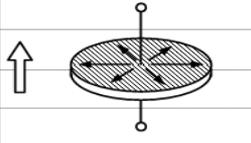
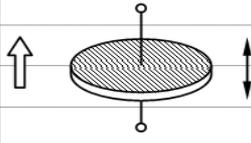
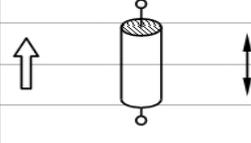
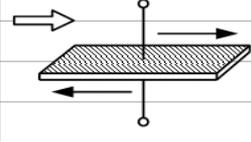
Resonator-Kopplungsfaktor

$$k_p^2 = \frac{5}{2} \cdot \frac{f_p - f_s}{f_p} - \left(\frac{f_p - f_s}{f_p} \right)^2$$

Materialkopplungsfaktor

$$k_p^2 = 2 \cdot \frac{d_{31}}{(s_{11}^E + s_{12}^E) \cdot \epsilon_{33}^T}$$

Mess- und Rechenschema [DIN 50324-2]

Transverse Length Mode		C^T f_r, f_a		ϵ_{33}^T S_{11}^E k_{31}		S_{11}^D d_{31}		g_{31}
Radial Mode		C^T f_r, f_a		ϵ_{33}^T k_p		ϵ_{33}^S σ^E		S_{12}^E
Thickness Extension Mode		f_{rm} f_r, f_a		k_t C_{33}^D		ϵ_{33}^S C_{33}^E		S_{13}^E
Longitudinal Length Mode		f_r, f_a C^T		k_{33} S_{33}^D ϵ_{33}^T		d_{33} S_{33}^E		g_{33}
Thickness Shear Mode		f_r, f_{rm} C^T		k_{15} S_{55}^D ϵ_{11}^T		d_{15} S_{55}^E ϵ_{11}^S		g_{15} C_{55}^D

Details in: Heywang u.a., Piezoelectricity, Springer Verlag

Pyroelektrizität

-
- Erscheinungsbild, Mechanismus
 - mathematische Beschreibung
 - Anwendungsbeispiel IR Sensor
 - Elektrokalorischer Effekt

Pyroelektrizität

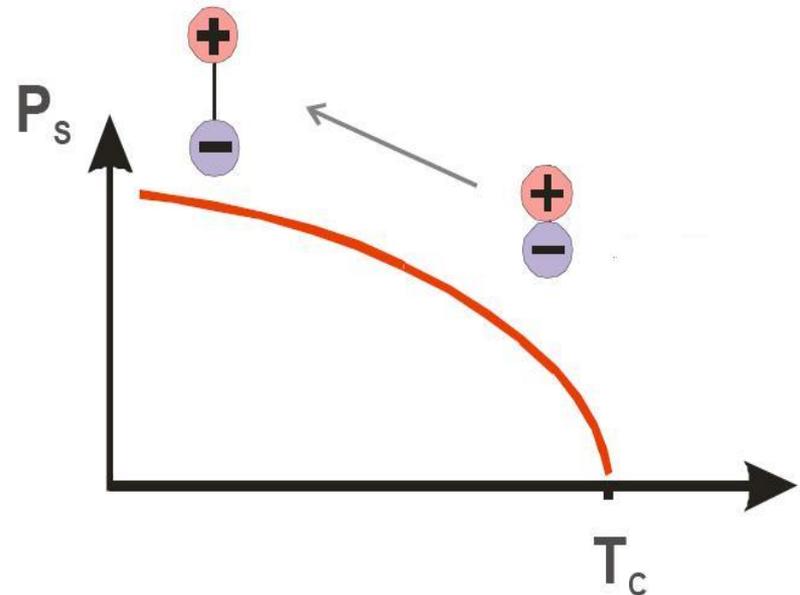
Pyroelektrizität bezeichnet die Freisetzung gebundener Ladungen an Oberflächen polarer Werkstoffe bei Erwärmung. Diese Ladungsfreisetzung resultiert aus der Temperaturänderung der spontanen Polarisation.

Freie Ladungen können durch Messung der Spannung zwischen den Oberflächen bzw. durch Stromfluss bei Zwischenschaltung eines Messkreises bestimmt werden.

Bei steigender Temperatur sinkt die Größe des Dipolmomentes (Verringerung des Abstandes der Ladungen). Das ist äquivalent zur Verkleinerung der Polarisation. Als Folge werden Ladungen in den Elektroden frei, die entweder über einen Außenkreis abfließen oder die Spannung erhöhen.

P_s – spontane Polarisation der Elementarzelle infolge intrinsischen Dipols

analog gilt dies für bleibende (remanente) Polarisation P_r eines gepolten Körpers



Pyroelektrizität – Materialgleichung

Man geht von der dielektrischen Verschiebung eines polaren Werkstoffes aus.

$$D = \varepsilon_0 E + P_{total}$$

Die Polarisation wird in den feldunabhängigen/bleibenden Beitrag P_r und den feldinduzierten Anteil P_{ind} aufgetrennt, wobei P_{ind} mit der Dielektrizitätszahl $\varepsilon = \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1)$ erfasst wird.

$$D = \varepsilon_0 E + P_{ind} + P_r = \varepsilon E + P_r$$

Die Ableitung nach der Temperatur ergibt:
(Temperaturunabhängiges elektrisches Feld)

$$\frac{\partial D}{\partial T} = p_g = \frac{\partial P_r}{\partial T} + E \frac{\partial \varepsilon}{\partial T}$$

Darin sind
 p_g – der generalisierte Pyrokoeffizient
 p – der wahre Pyrokoeffizient

$$p_g = p + E \frac{\partial \varepsilon}{\partial T}$$

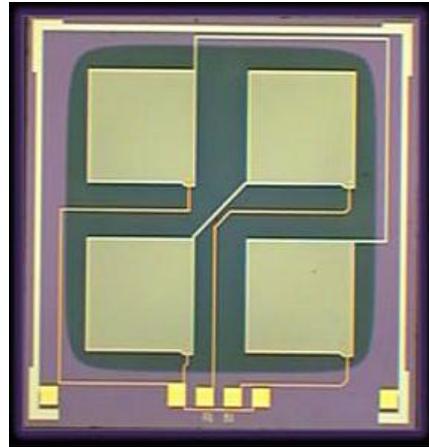
(elektrisches Feld in Richtung von P_r)

Pyroelektrizität – Sensoren für IR Strahlung

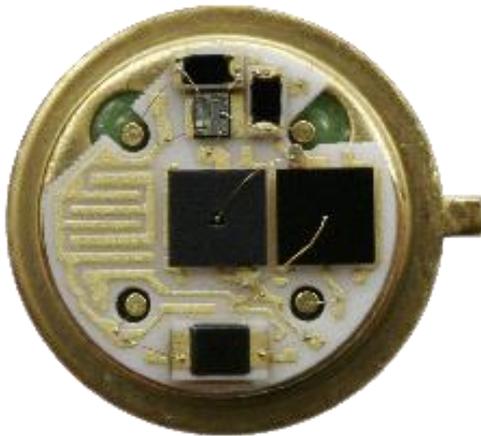
Pyroelektrischer Detektor,
Dünnschichttechnologie



Pyroelektrischer Detektor,
Hybridbauweise



Bauthermografie



Elektrokalorischer Effekt – Inverse Pyroelektrizität?

Reversible adiabatische Temperaturänderung infolge einer reversiblen Änderung der Entropiedichte durch Einbringen eines elektrischen Feldes

Thermodynamik reversibler Materialien liefert Gleichung zur Vorhersage der Temperaturänderung

$$\Delta T = -\frac{T}{c_E} \int_{E_1}^{E_2} T \left(\frac{\partial D}{\partial T} \right)_{E,S} \cdot dE$$

T – Temperatur

c_E – spezifische Wärme

Änderung des Polarisationsverhaltens mit der Temperatur

Großer Effekt ist durch die Änderung von ϵ über der Temperatur, also in der Nähe der Phasenübergangstemperatur zu erwarten.

Physikalische Ursache noch nicht hinreichend geklärt.

Elektrokalorischer Effekt

A. S. Mischenko, et al.

Giant Electrocaloric Effect in Thin-Film $\text{PbZr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05}\text{O}_3$,
Science 311, 1270 (2006); DOI: 10.1126/science.1123811

Materialsystem

$\text{PbZr}_{0.95}\text{Ti}_{0.05}\text{O}_3$ Dünnschicht, Dicke 350 nm

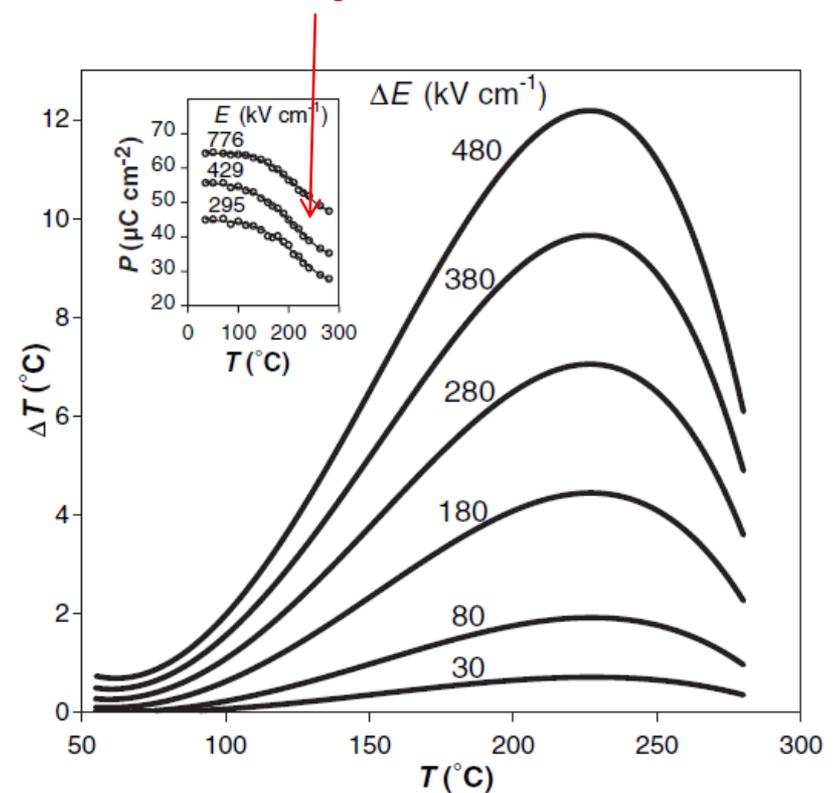
Abschätzung:

Elektrokalorische Temperaturänderung durch
Änderung des angelegten elektrischen Feldes von
12 K für $E_2 = 776 \text{ kV/cm}$ und $\Delta E = 480 \text{ kV/cm}$ bei
 $T = 226 \text{ }^\circ\text{C}$, Wärmemenge $c\Delta T = 4,02 \text{ kJ/kg}$

Elektrokalorischer Effekt ΔT

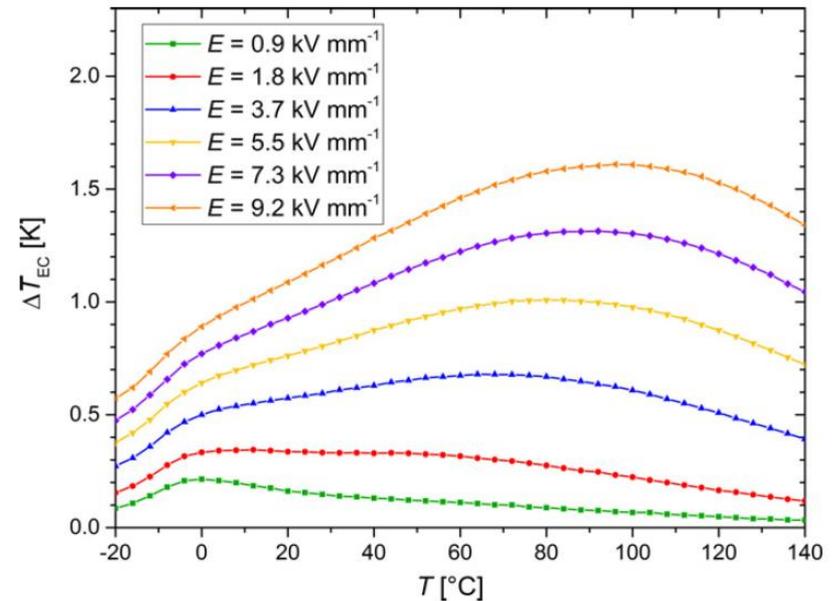
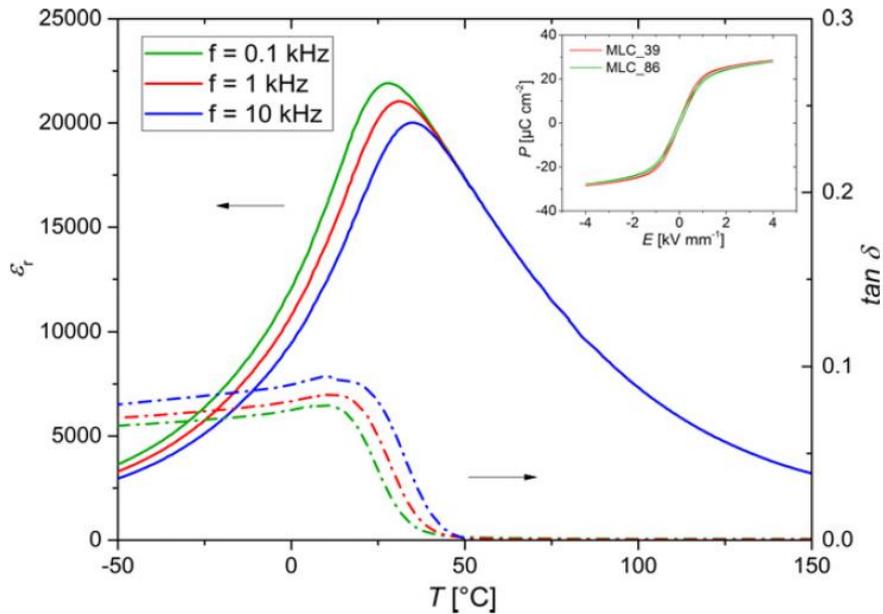
$$\Delta T = -\frac{T}{c_E} \int_{E_1}^{E_2} T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_{E,S} \cdot dE$$

Maximale Änderung $P(T)$



elektrokalendarischen Effektes in keramischen Multilayern

■ PMN-PT-Multilayer (0.925PMN-0.075PT)



$$\Delta T_{\text{aus}} \sim \Delta T_{\text{ein}}$$

Molin et. al., JACS 2017

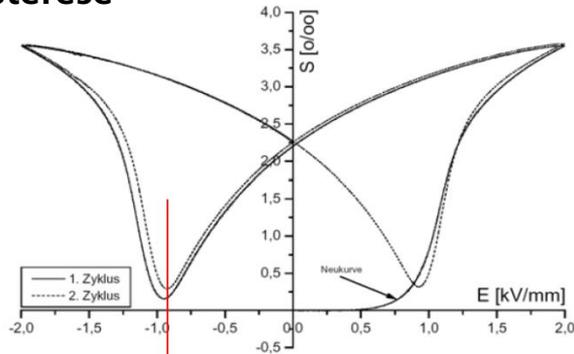
Ferroelektrizität

- Erscheinungsbild
- Spontane Polarisierung und Bildung ferroelektrischer Domänen
- Struktur von Domänenwänden
- Polarisationsänderung durch ein äußeres elektrisches Feld
- Zusammenhang Dehnung und Polarisation
- Polarisationsänderung durch einen mechanischen Druck
- Kraft-Dehnungs-Kennfeld

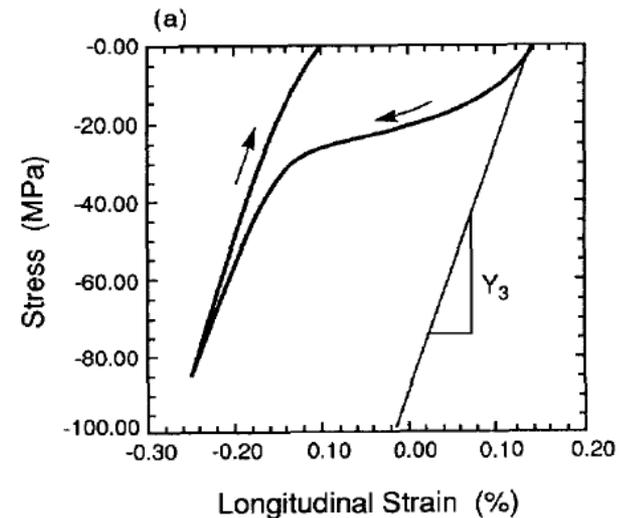
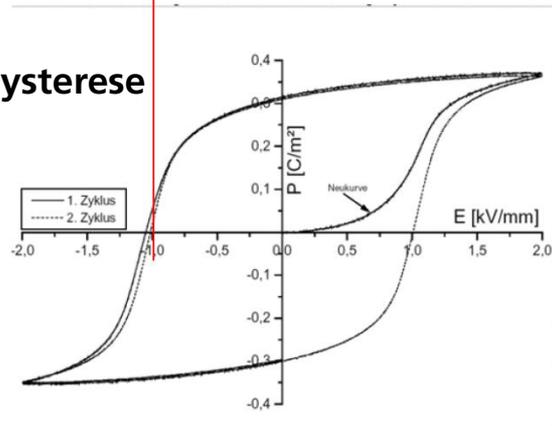
Ferroelektrizität - Erscheinungsbild

Kennzeichen der Ferroelektrizität ist die Schaltbarkeit der Polarisation durch eine äußeres elektrisches Feld (ferroelektrisches Verhalten) bzw. eine äußere mechanische Spannung (ferroelastisches Verhalten).

Dehnungshysteresese

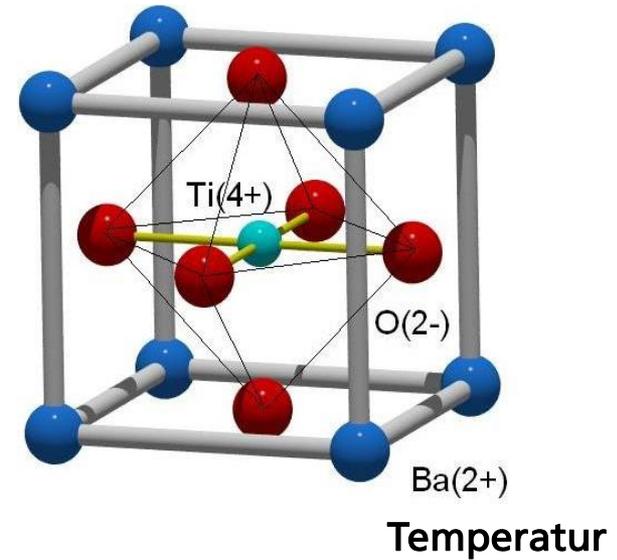
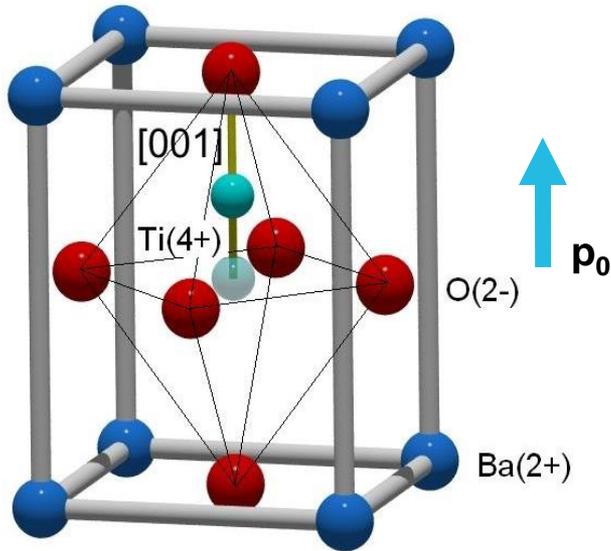
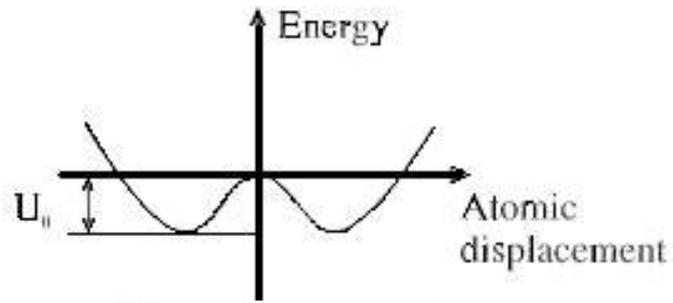


Polarisationshysteresese



Ferroelastische Verformung

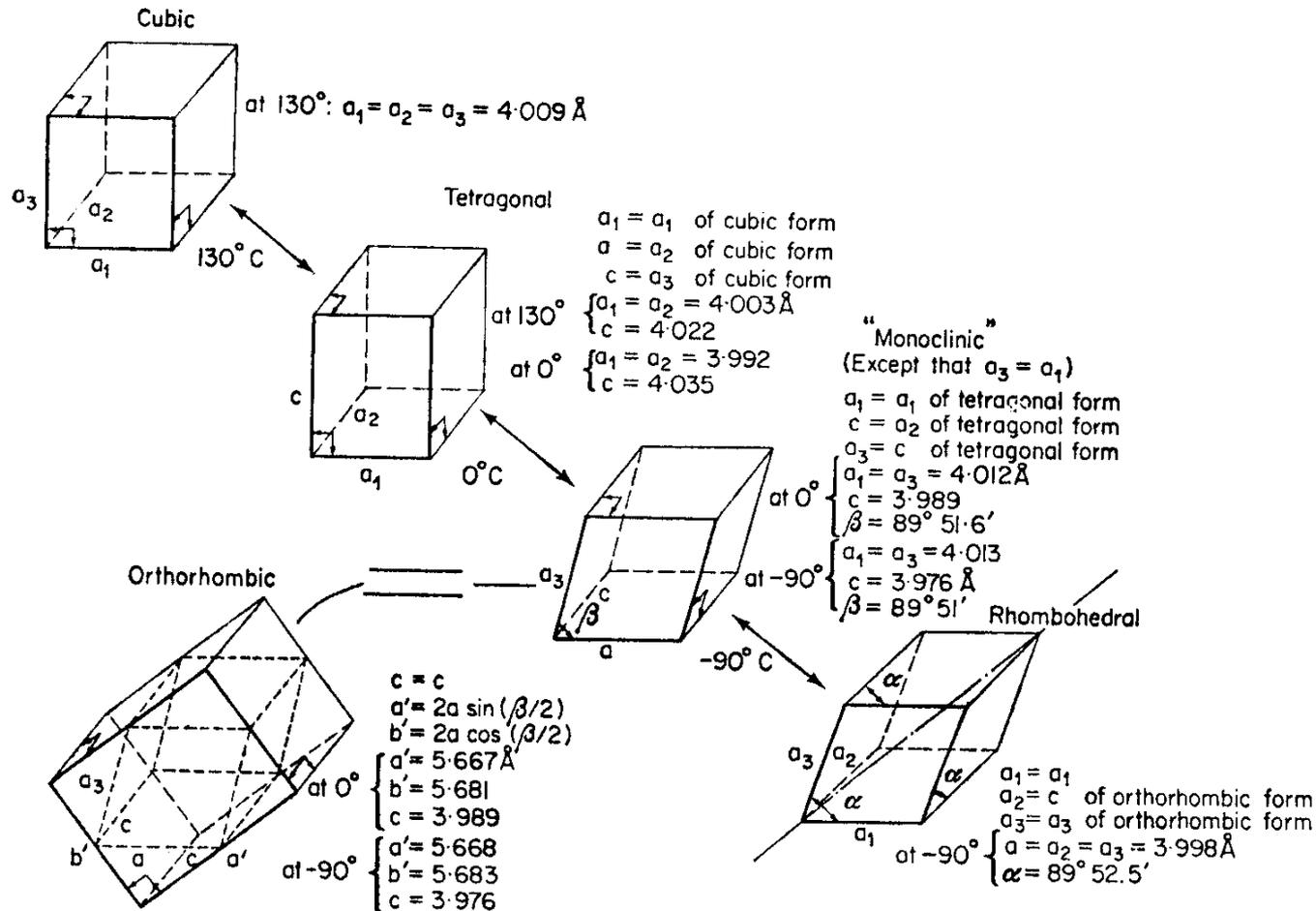
BaTiO₃ – Elementarzelle, Phasenübergang bei T_c



400 K

ferroelektrisch

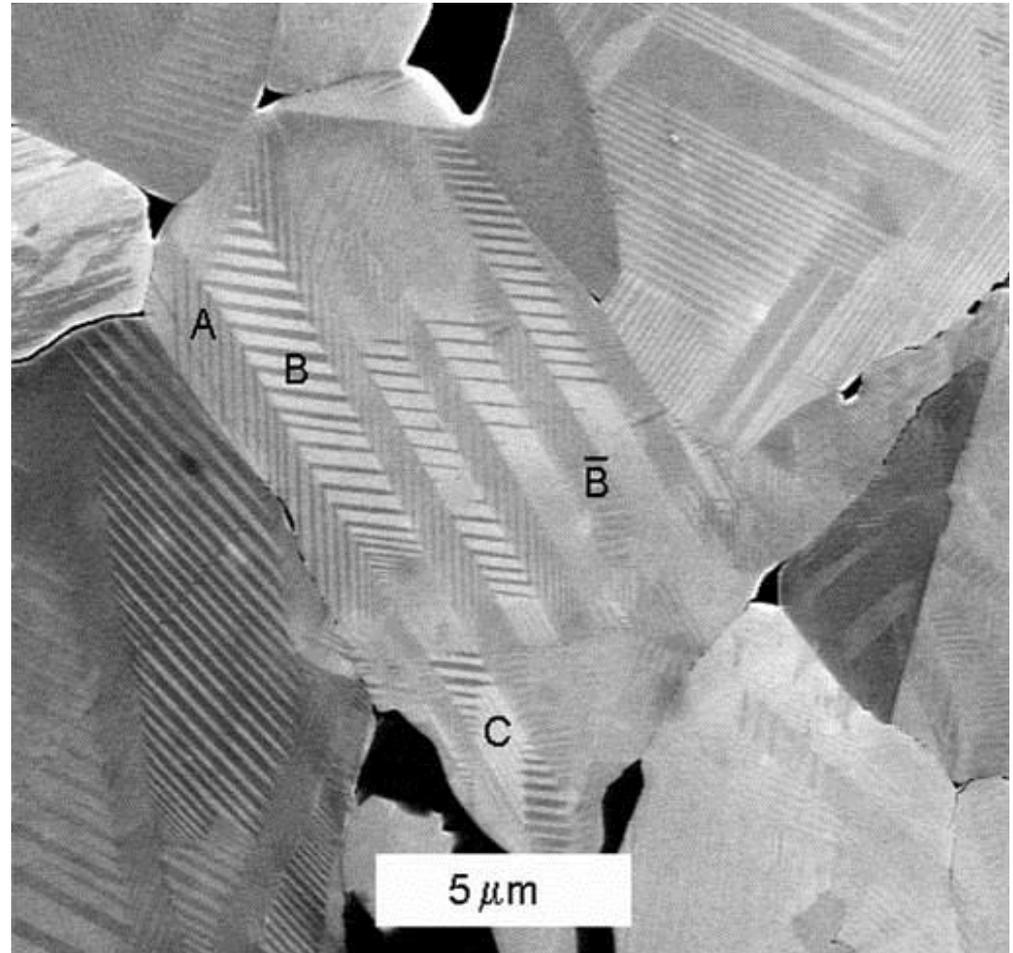
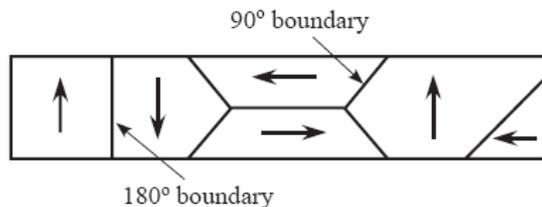
Ferroelektrische Symmetrien am Beispiel BaTiO₃



Ferroelektrizität – Ausbildung ferroelektrischer Domänen

BaTiO₃ – Keramik

- Dipole ordnen sich über viele Elementarzellen und bilden ferroelektrische Domänen
- Diese sind z.B. im FESEM nachweisbar.
- Richtungen der Polarisationsvektoren entsprechen den kristallografischen Hauptrichtungen [100, 010, 001] => tetragonale Symmetrie



Atomic-scale study of electric dipoles near charged and uncharged domain walls in ferroelectric films

CHUN-LIN JIA, SHAO-BO MI, KNUT URBAN, IONELA VREJOIU, MARIN ALEXE AND DIETRICH HESSE

Nature materials, Vol 7, JANUARY 2008 www.nature.com/naturematerials

-> Measurement of ion positions by aberration-corrected transmission electron microscope

PZT – SrTiO₃ – thin film heterostructures

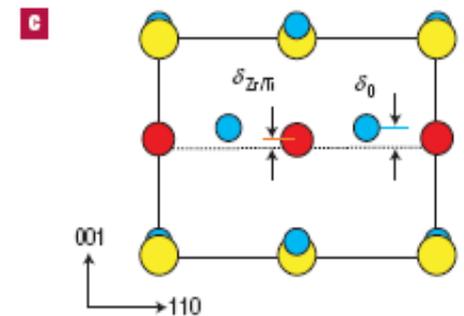
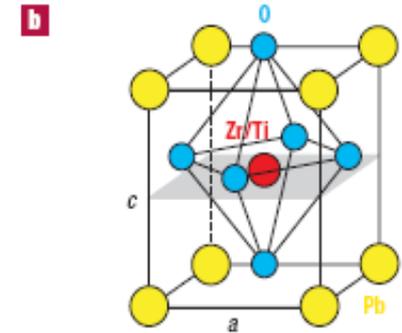
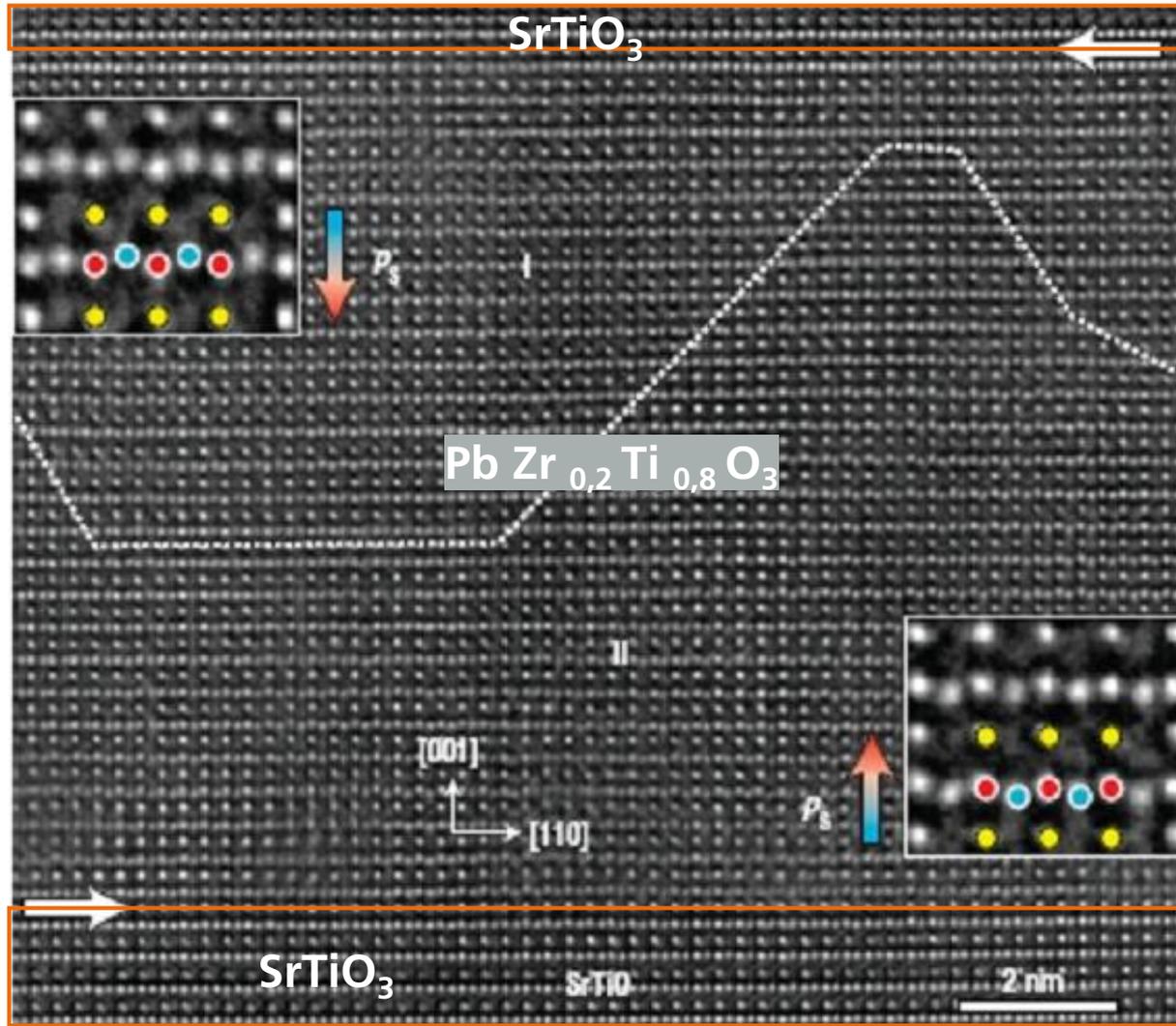
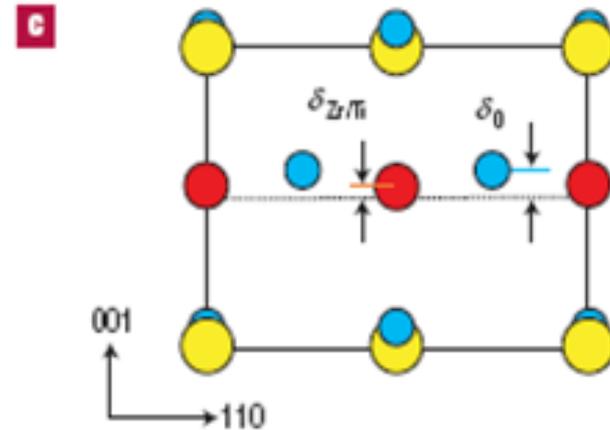
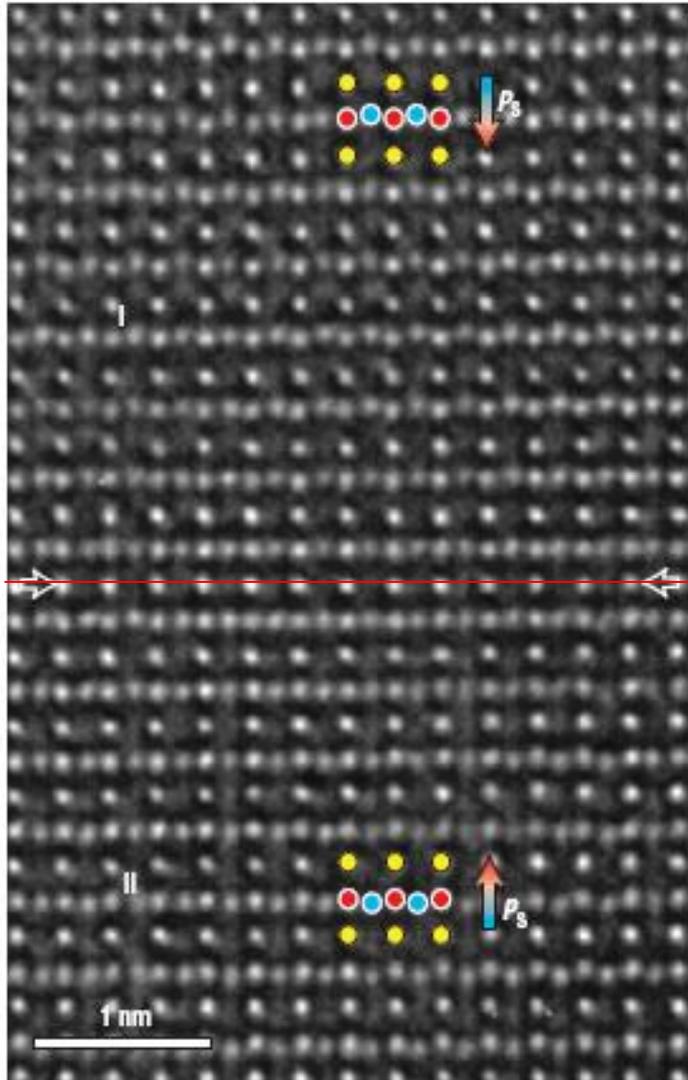


Image of an longitudinal domain wall (LDW) segment



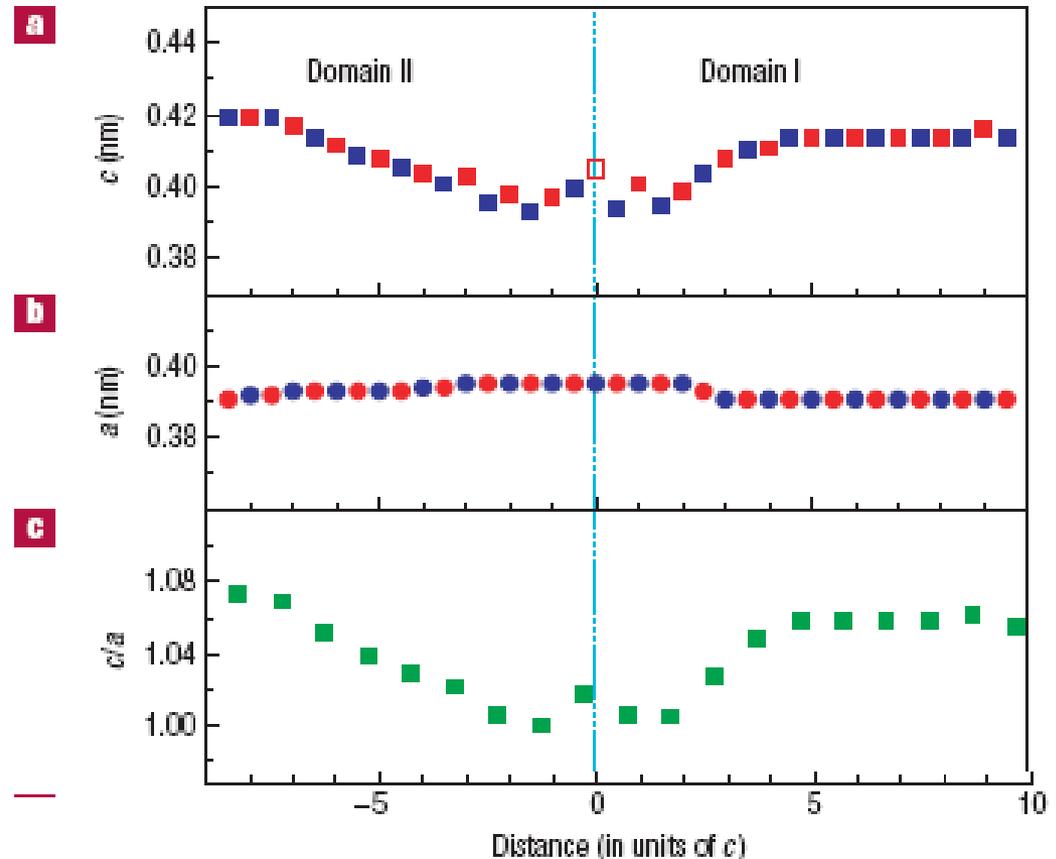
Arrows denote the geometric central plane of the wall, which is referred to as the origin for quantitative analysis of the dipole distortion across the wall area.

LDW quantities as a function of the distance expressed in units of c from the central plane of the LDW

a, c -axis lattice parameter. Blue squares and red squares show the values measured from Pb to Pb atom positions and from Zr/Ti to Zr/Ti, respectively.

b, a -axis lattice parameter. Blue circles and red circles show the values measured from Pb to Pb atom positions and from Zr/Ti to Zr/Ti, respectively.

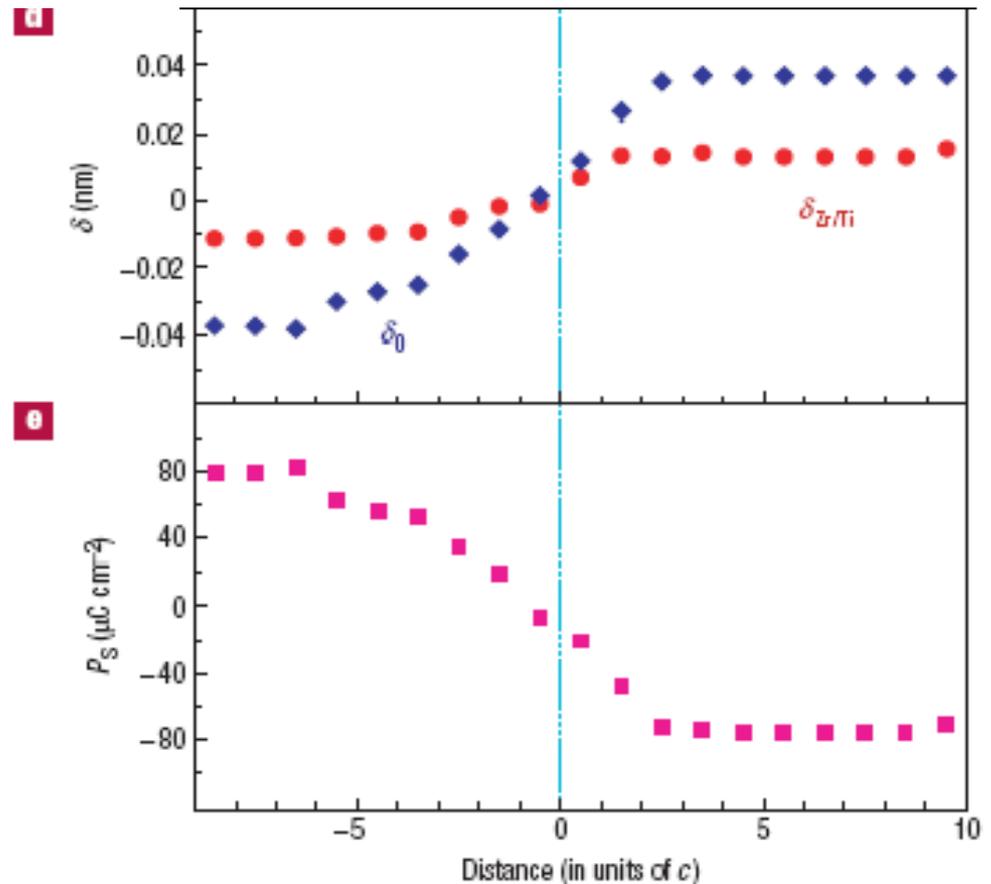
c, Tetragonality c/a calculated from displacement parameters



LDW quantities as a function of the distance expressed in units of c from the central plane of the LDW

d, The displacements of the Zr/Ti atoms (Zr/Ti) and the O atoms (O) across the LDW. Positive values denote upward shifts and negative values downward shifts.

e, Polarization



Polung ferroelektrischer Keramiken

Einprägen einer permanenten Polarisation (Polung) durch Ausrichtung der Polarisationsvektoren (Domänenwandverschiebung) und Aufladung

$$Q = \int idt = P_r$$

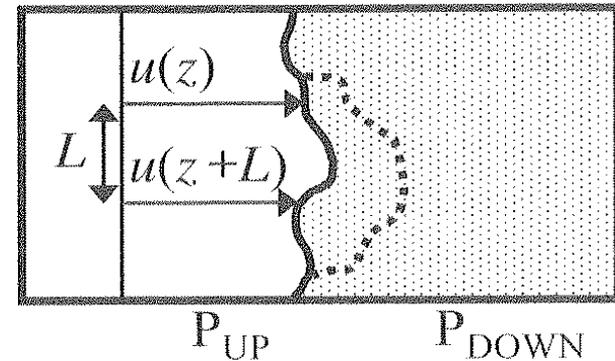
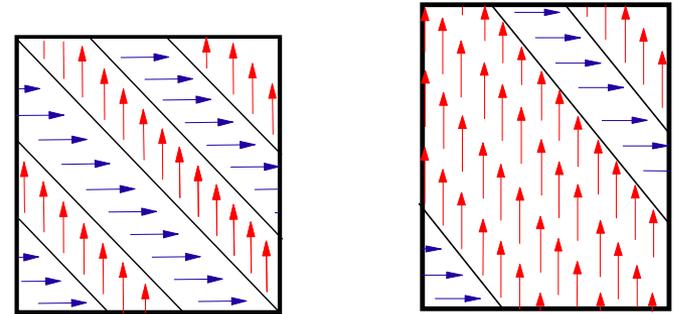
Typische Daten

Remanente Polarisation von PZT-Werkstoffen

$$P_r = 30 \mu\text{C} / \text{cm}^2$$

Polarisationsarbeit

$$W_p = 1,2 \text{ J/cm}^3$$

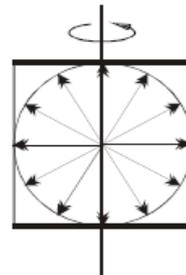
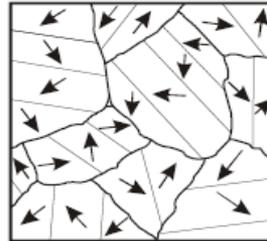


Domänenwände werden in einem zufälligen Potential festgehalten. Die Grenzfläche ist rau. Bei Einleitung einer äußeren Kraft, z.B. das elektrische Feld, kann sich die Wand bewegen (gestrichelter Bereich),

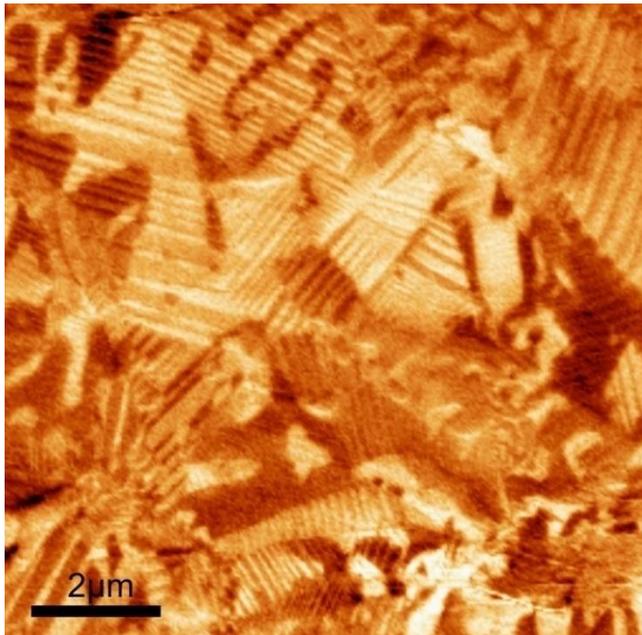
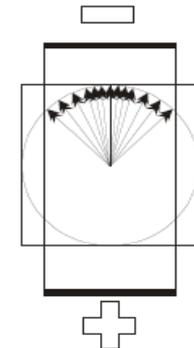
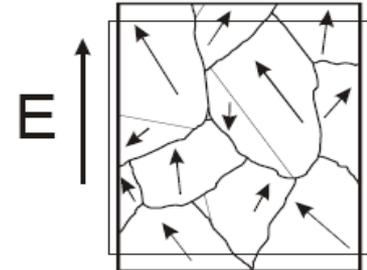
Domänenstruktur ferroelektrischer Keramiken

Makroskopische Polarisation

$P = \text{Null}$



$P, \Delta S > \text{Null}$



PZT, Domänenstruktur gemessen
mittels PFM [Herber, TU HH]

PZT, vereinfachtes Modell der Domänenstruktur und ihrer
Änderung bei Anwendung eines externen elektrischen
Feldes

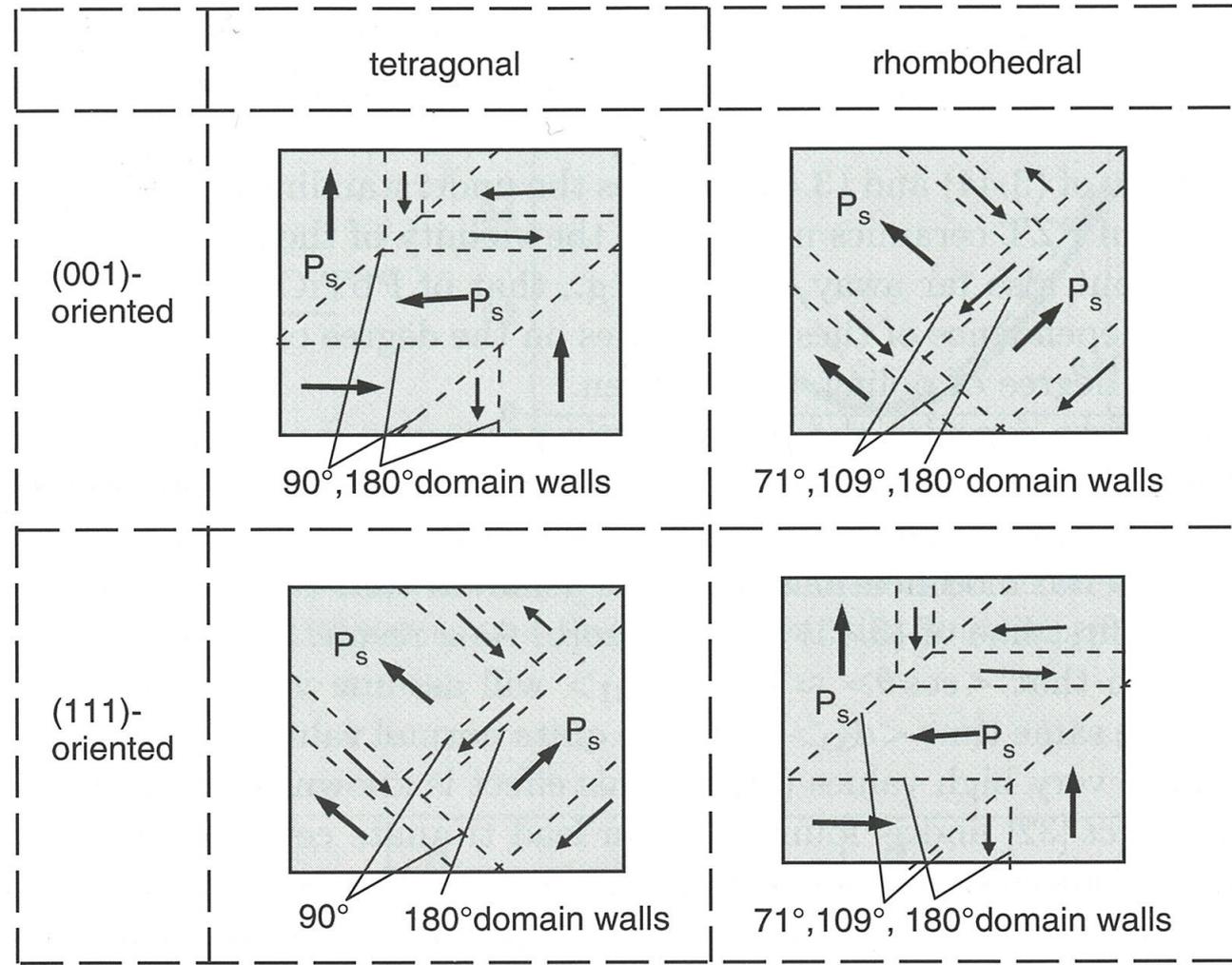
Domänenstruktur in tetragonalen und rhomboedrischen Kristalliten

typische Orientierung der Domänenwände zur spontanen Dipolrichtung der angrenzenden Domänen je nach Kristallsymmetrie

Ursache

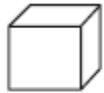
Energieminimierung durch Reduktion von elektr. Eigenfeldern und mech. Eigenspannungen wenn:

$P_{S,n}$ sowie spontane Gitterverzerrungen in Domänenwandenebene stetig

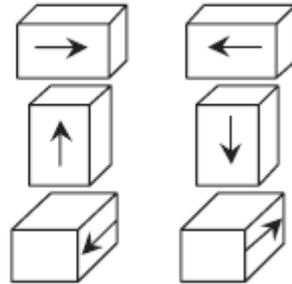


Ferroelektrizität – Modell zur Hysteresebildung

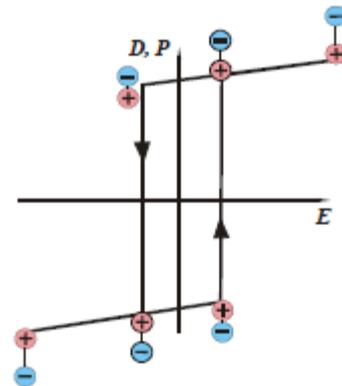
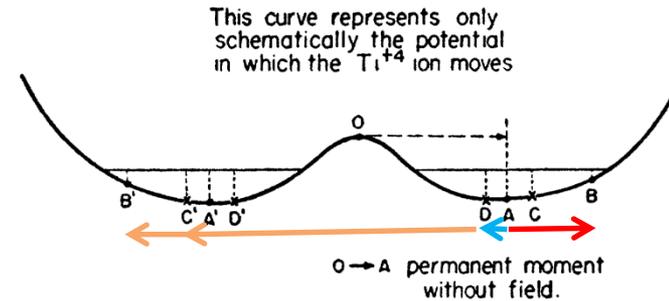
Kubische EZ



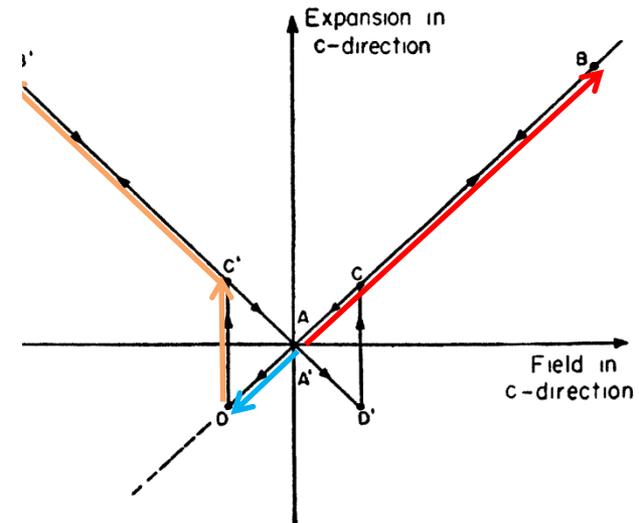
tetragonale EZ



Die Richtungsänderung des P – Vektors über eine Potenzialbarriere ist der Grund für die Ausbildung der Hysteresekurven der Polarisation und der Dehnung bei bipolarer Ansteuerung

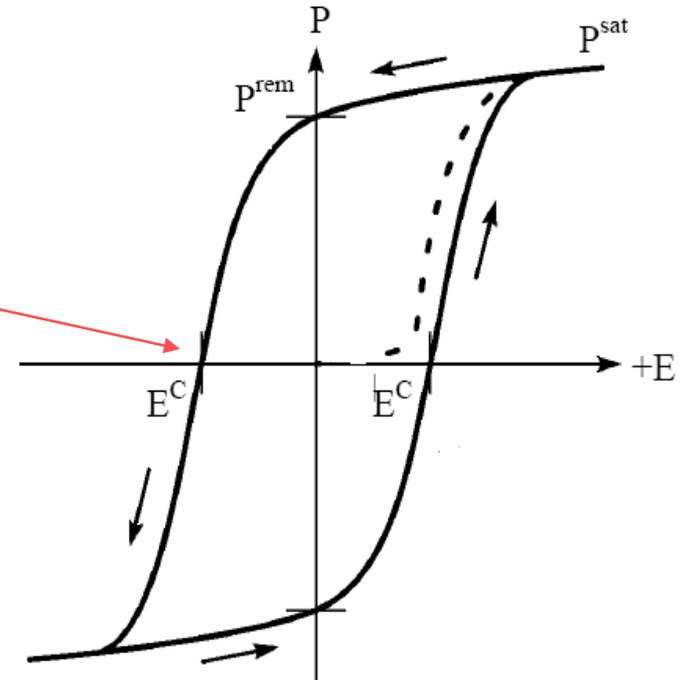
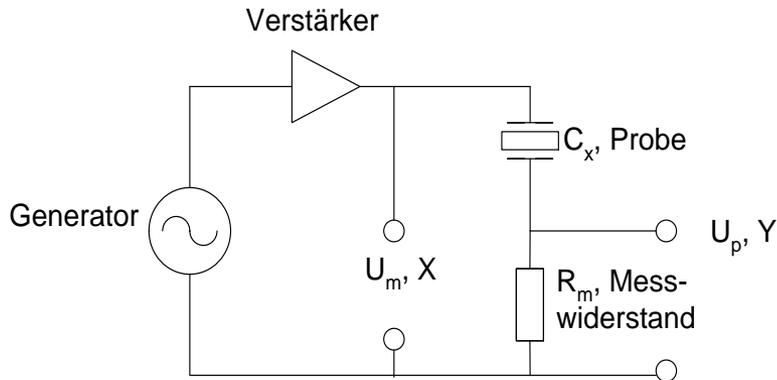
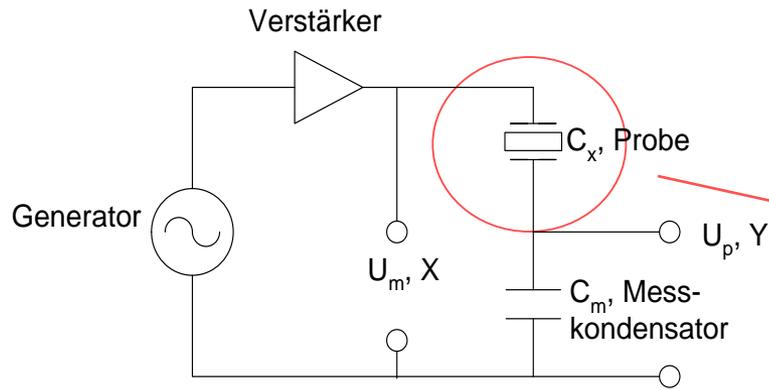


Dielektrische Hysterese
Hysteresekennlinie



Messung der schaltbaren Polarisation (weiche Piezokeramiken), Messschaltungen

a) Messkondensator (Sayer-Tower-Schaltung), Ladungsintegration am Messkondensator

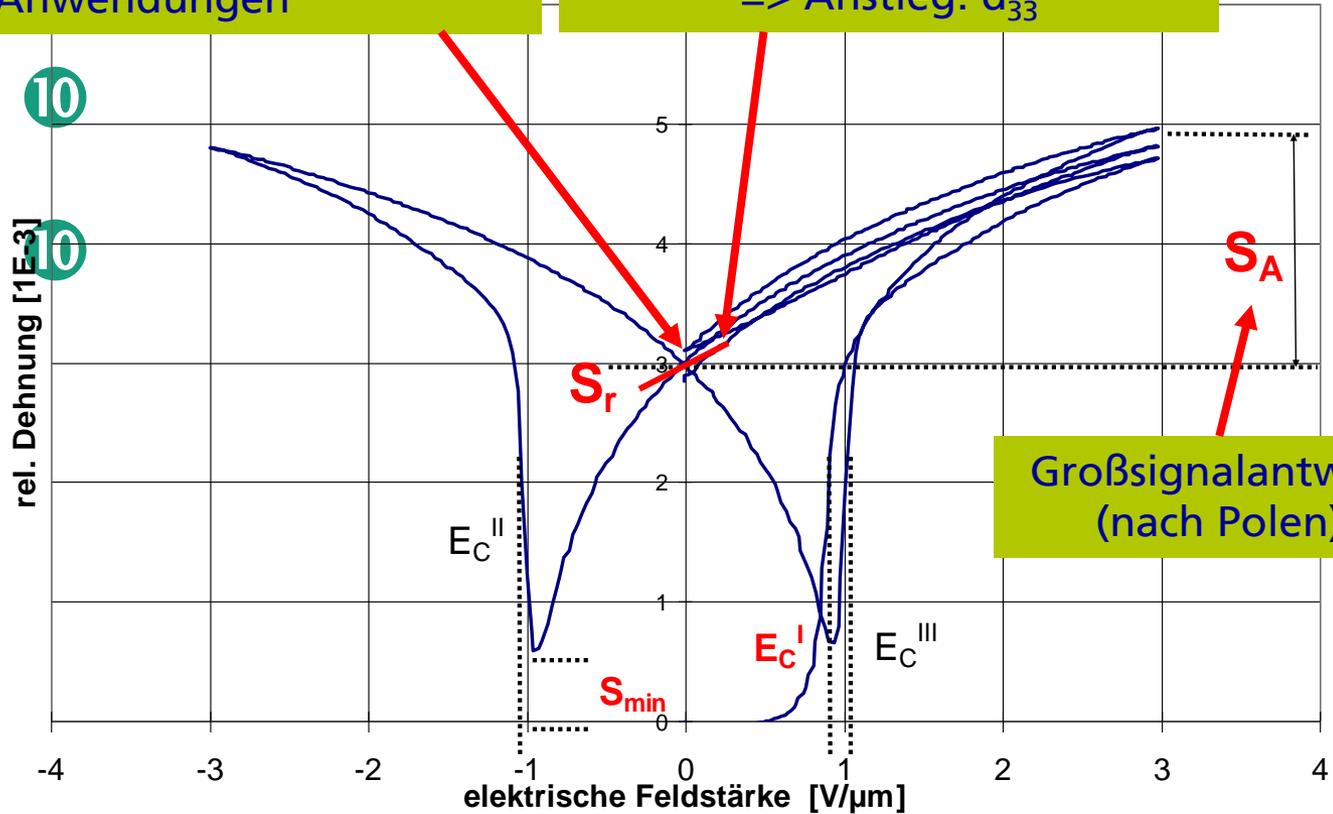


b) mit Messwiderstand, Strommessung und numerische Integration

Dehnungshysterese und piezoelektrischer Arbeitspunkt

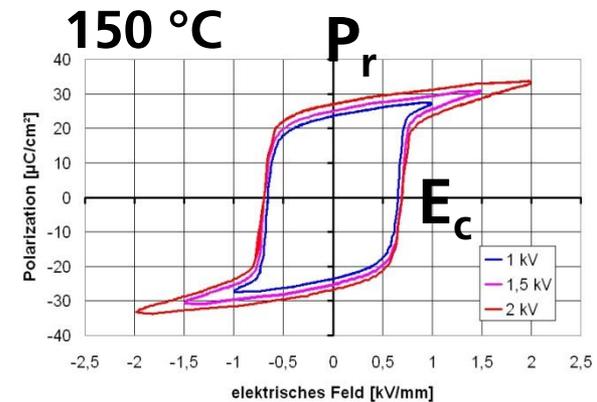
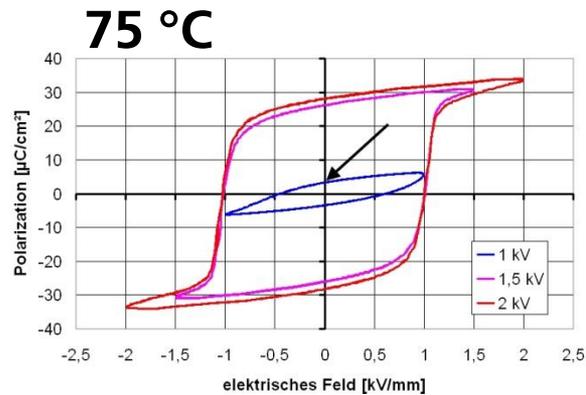
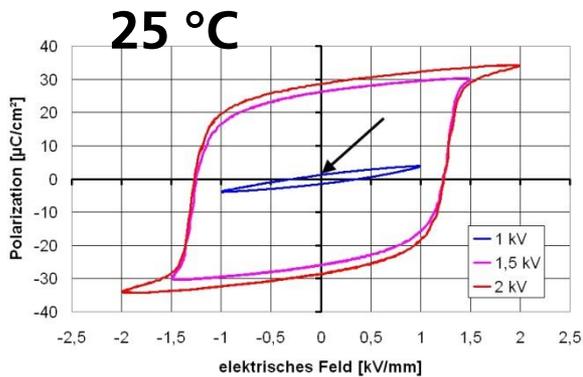
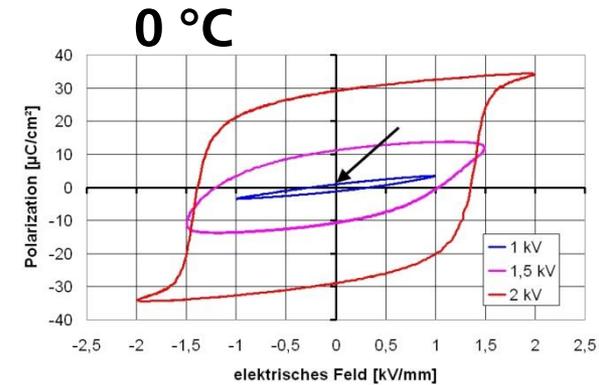
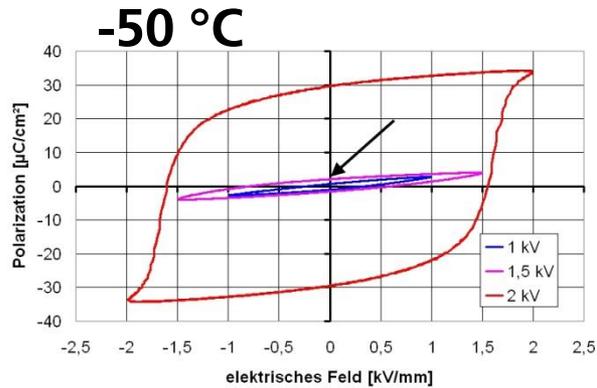
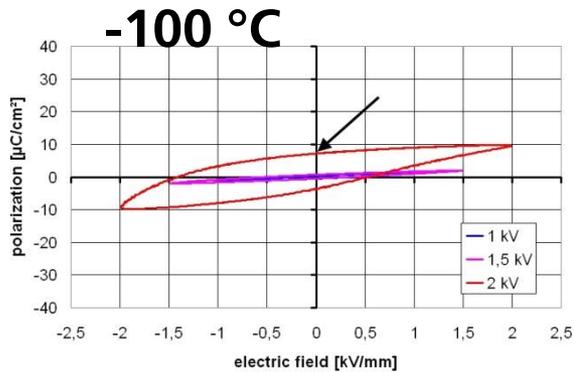
gepolter Zustand
=> Arbeitspunkt für piezoelektrische
Anwendungen

linearisierte Dehnungsantwort
=> Anstieg: d_{33}



Polarisationshysterese vs. T,E

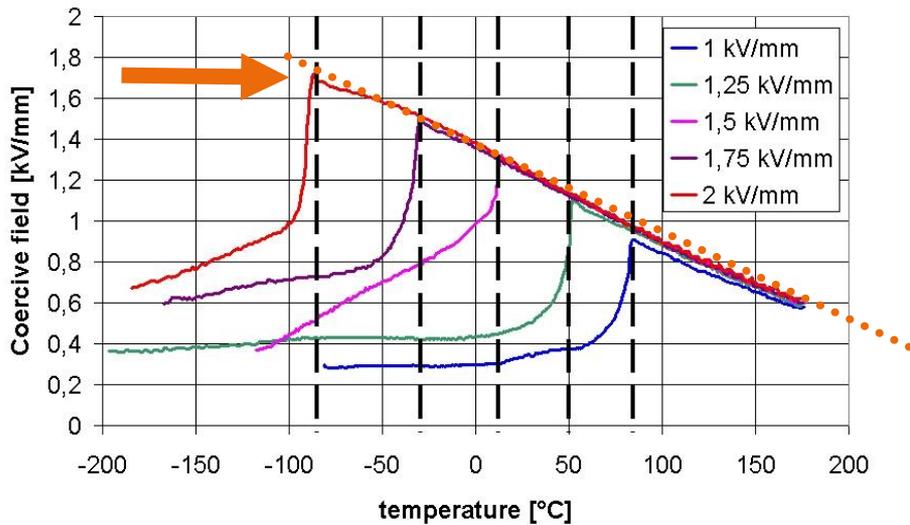
T = [-190 ... 150] °C , E = [1; 1,5 and 2] kV/mm, Werkstoff PIC 255



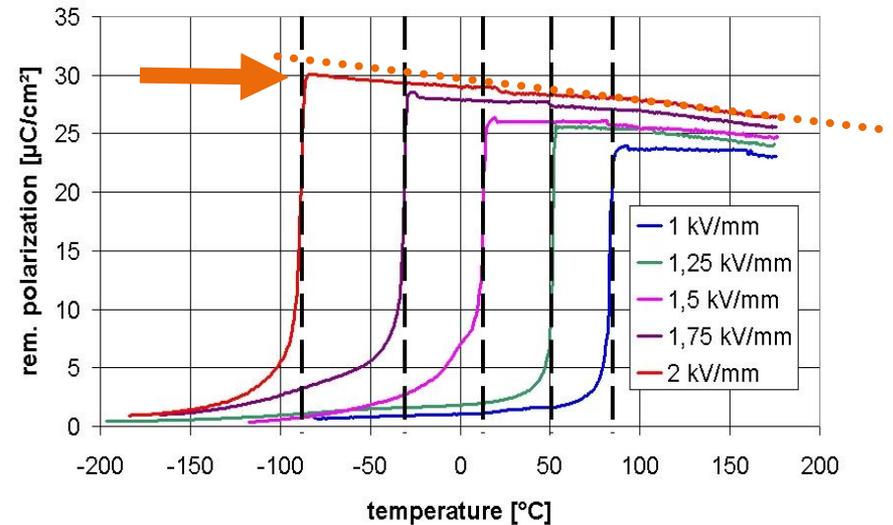
Polarisationshysterese, PIC 255

Domänenpinning bei spezifischen Datenkombinationen [T_N , E_C]

PIC 255 10Hz



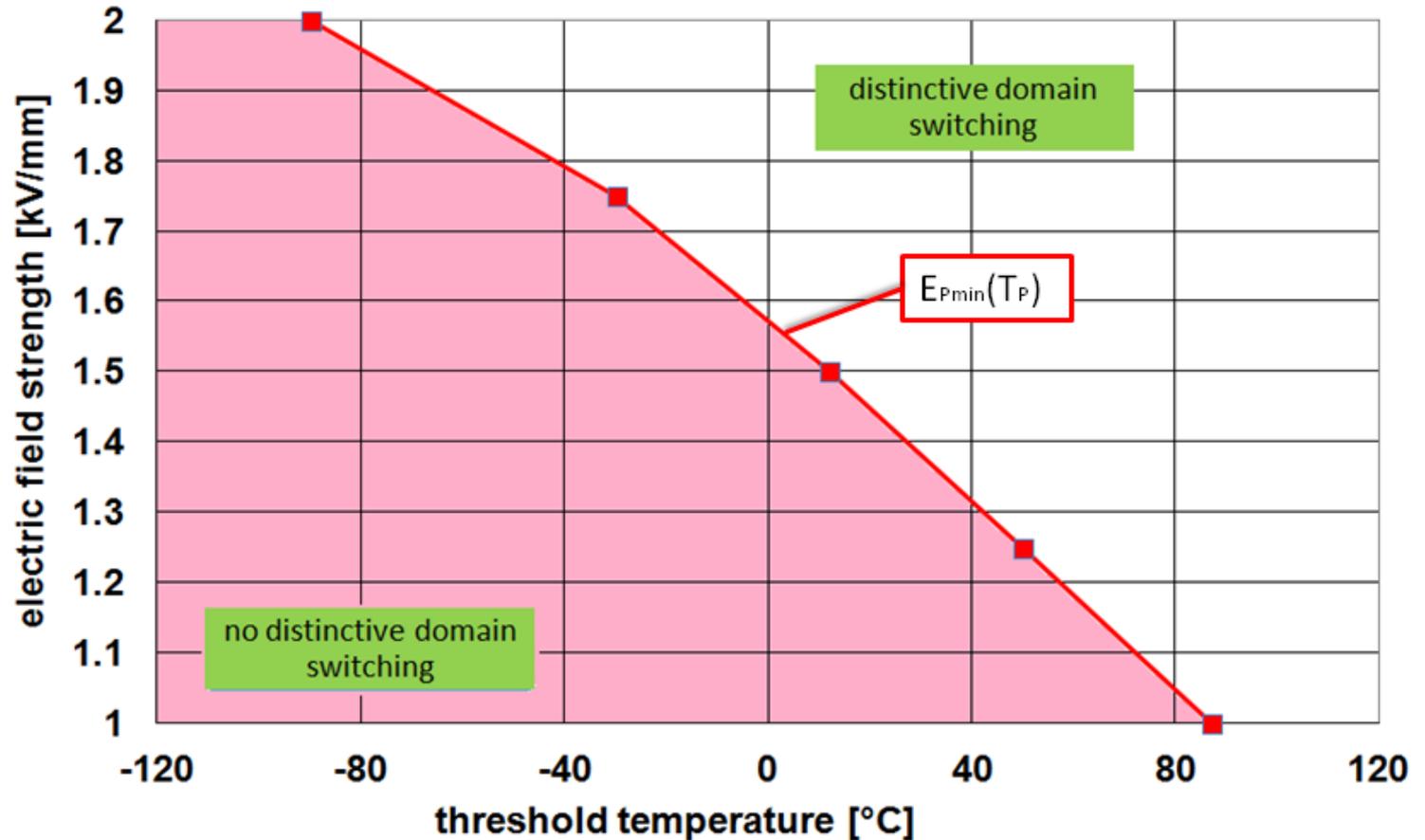
PIC 255 10Hz



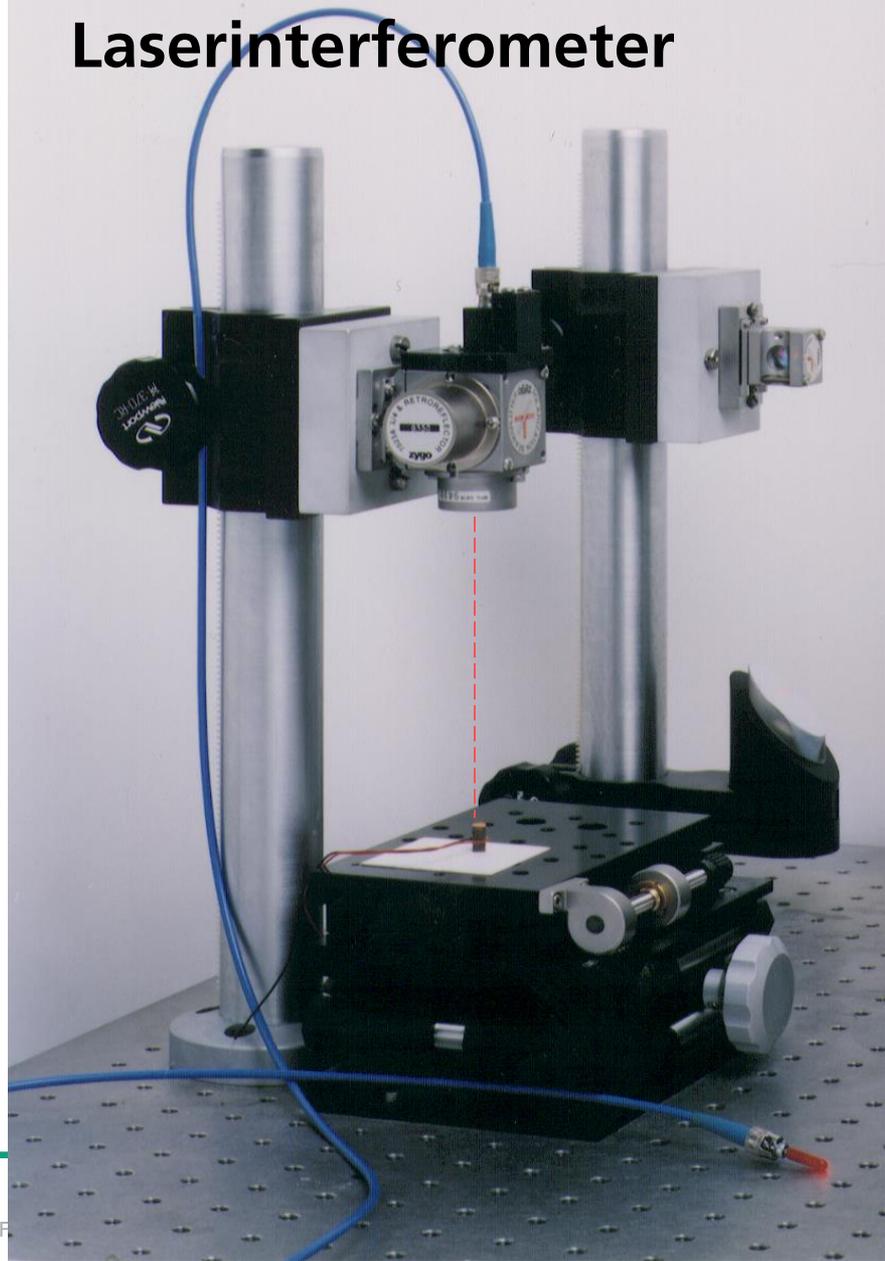
Domänenbewegung oberhalb der [T_N , E_C] - Grenzlinie

Abgeleitetes Technologiediagramm zur Polung

Beispiel PIC 255



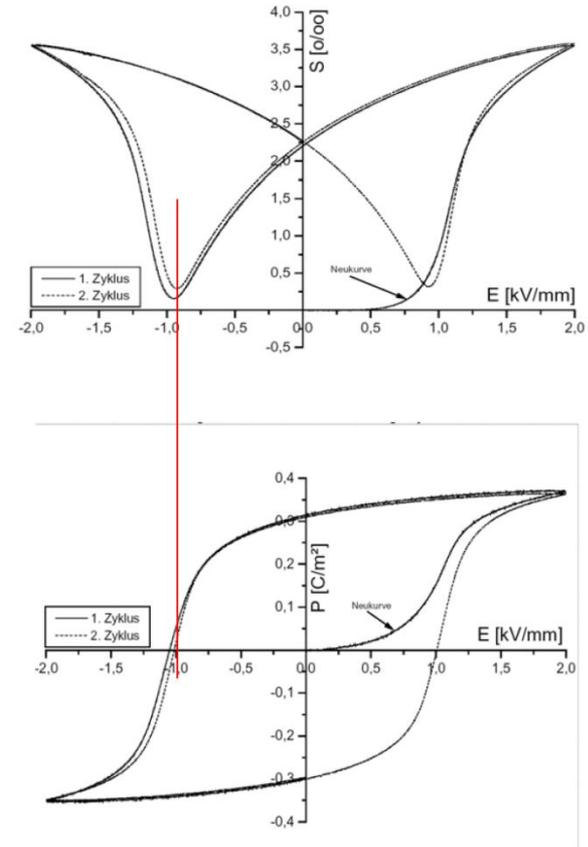
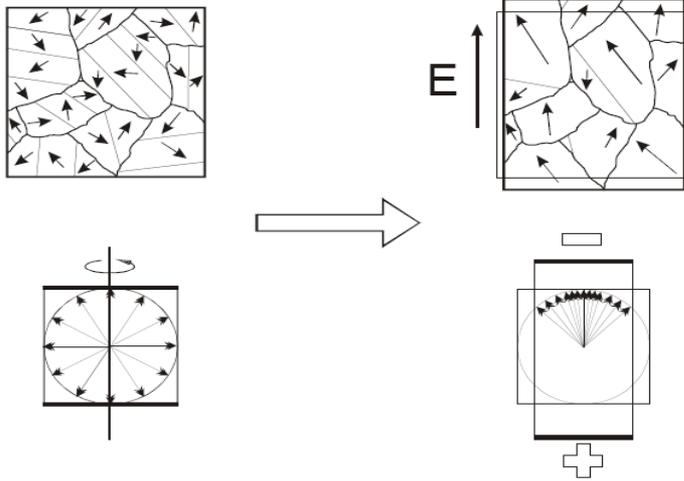
Laserinterferometer



Laser- Triangulation

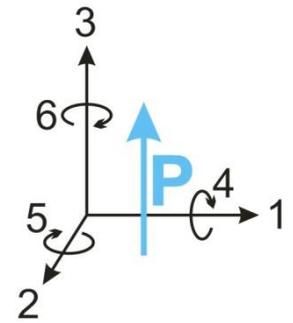


Zusammenhang Dehnung und Polarisation



Zusammenhang Dehnung und Polarisation

phänomenologische Beschreibung



$$S_3 = Q_{33}(P_r + P_3)^2$$

$$S_3 = Q_{33}P_r^2 + 2Q_{33}P_rP_3 + Q_{33}P_3^2$$

$$S_{3r} = Q_{33}P_r^2$$

$$S_3^l(P_3) = 2Q_{33}P_rP_3 = d_{33}E$$

Q_{33} – Elektrostriktionskoeffizient,
 P_r – remanente Polarisation,
 P_3 – Polarisation im E-Feld

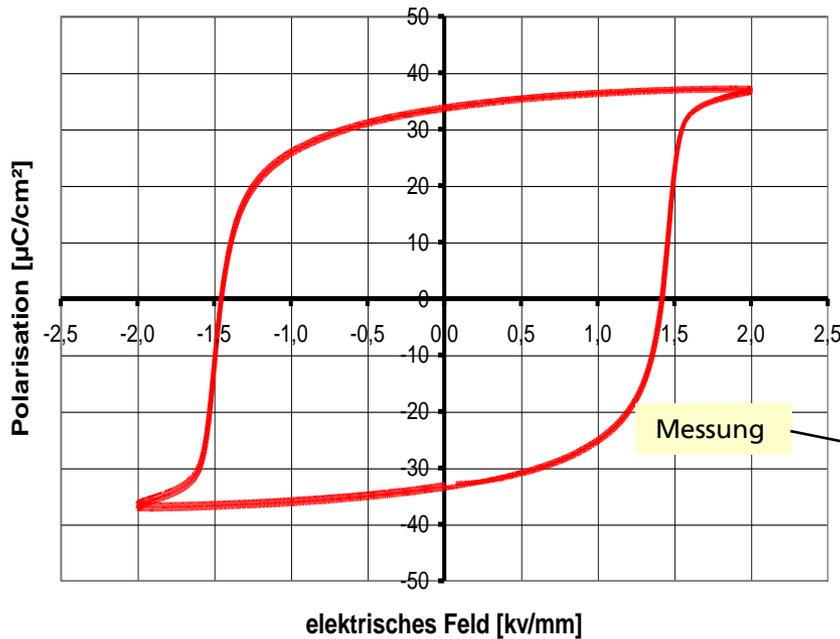
remanenten Dehnung
(Orientierungspolarisation)

Dehnung bei kleiner Feldstärke
um gepolten Zustand
(Ionenpolarisation, $P_r = \text{konst.}$)

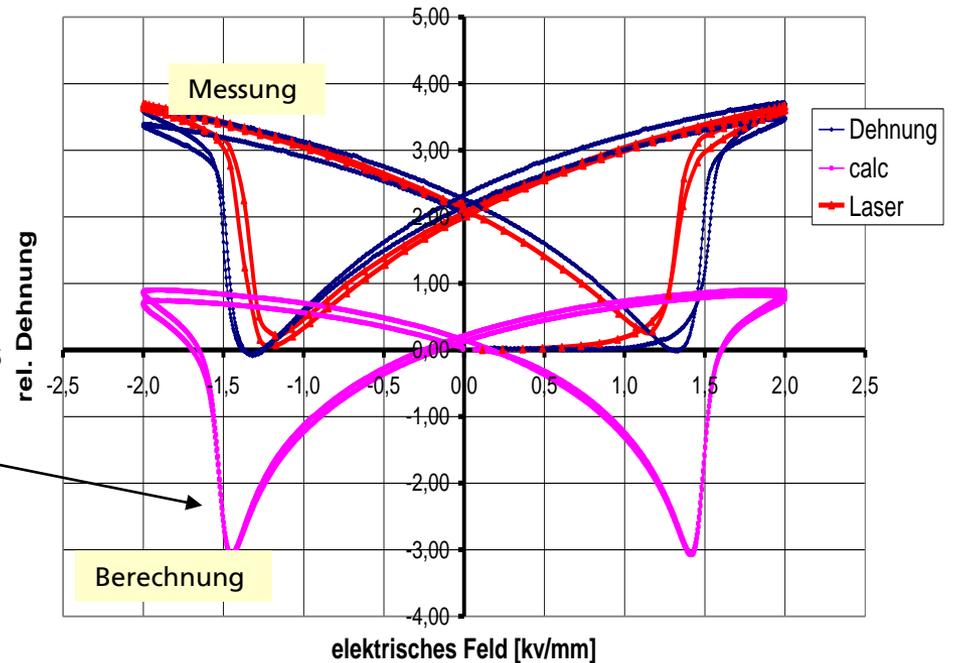
Zusammenhang Dehnung und Polarisation

Vergleich Messung - Rechnung

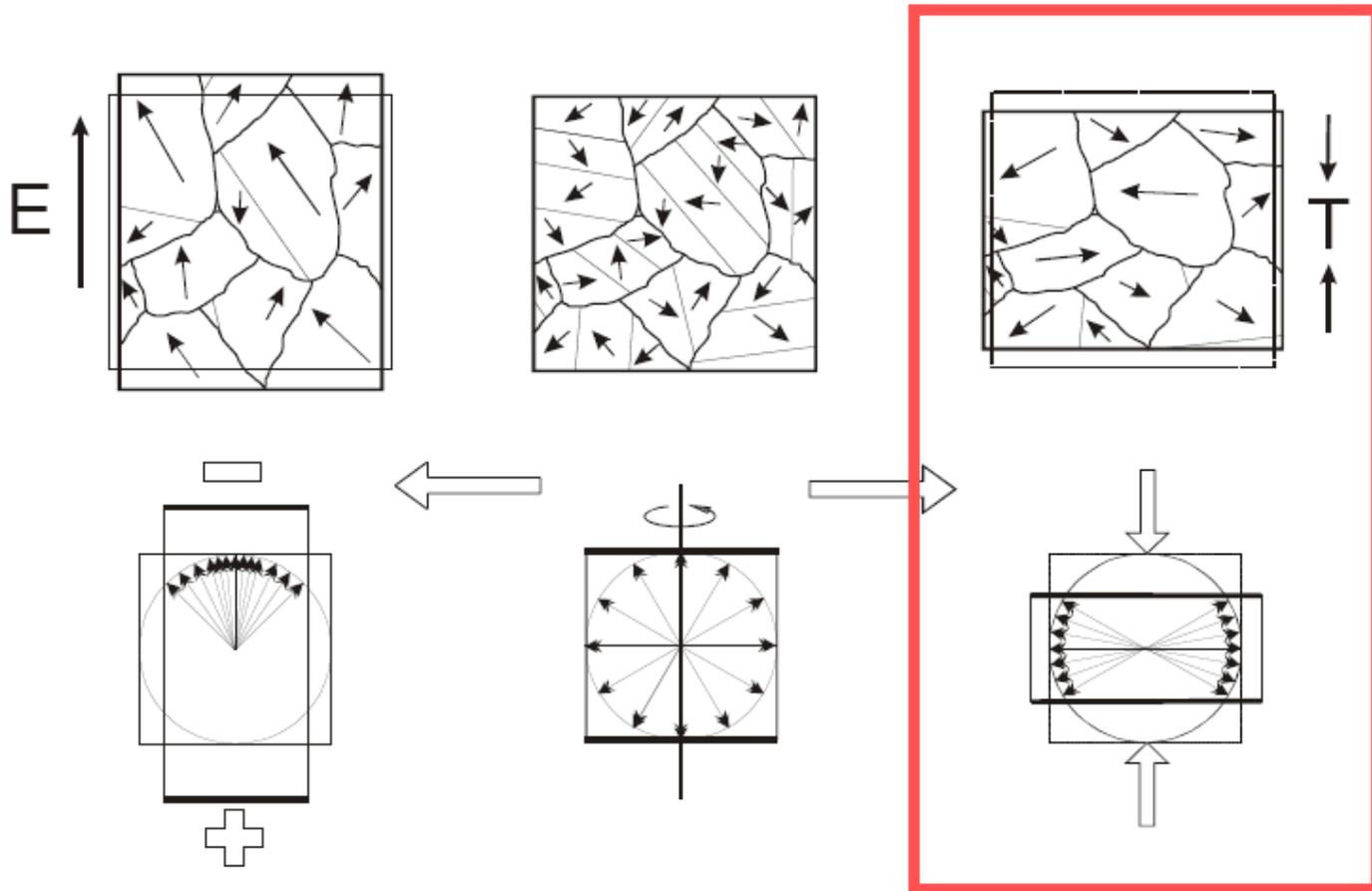
PIC255 1Hz 20°C 2kV 0MPa



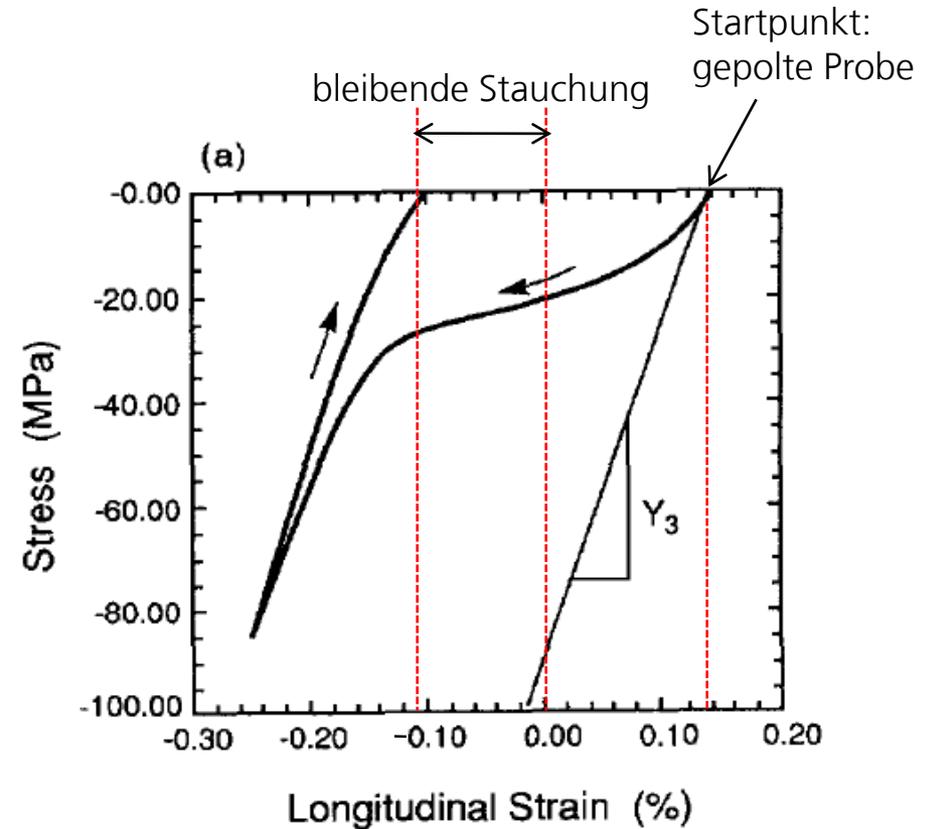
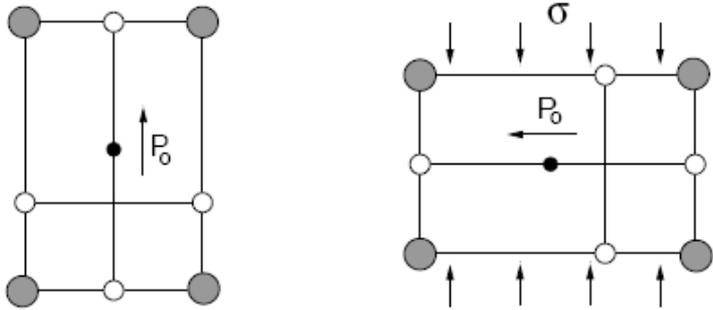
PIC255 100mHz 20°C 2kV 0MPa



Ferromechanischer Effekt (Ferroelastizität)



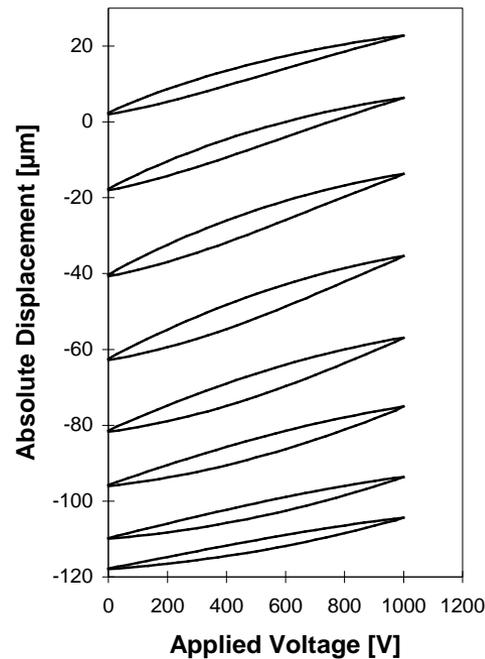
Stauchung unter uniaxialem Druck



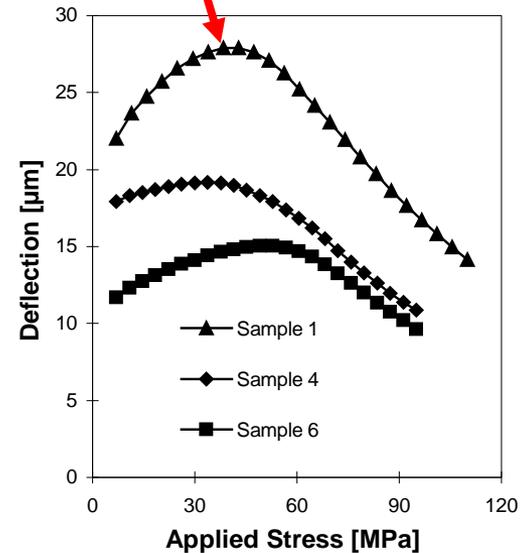
Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer gepolten ferroelektrischen Keramik

Einfluss mechanischer Spannungen auf das Dehnungsverhalten

Auslenkungssteigerung durch Vorspannung



Auslenkungshysterese
unter statischer Vorlast

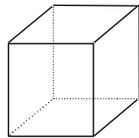


Auslenkung bei 2 kV/mm
und statischer Vorlast

Zusammenfassung

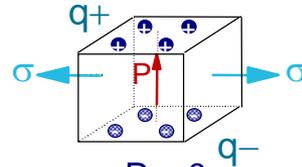
Piezoelektrizität:

vor der Belastung



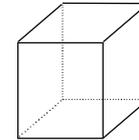
$$P = 0 / Pr$$

mech. Belastung



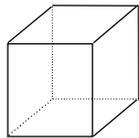
$$\Delta P > 0$$

nach der Belastung



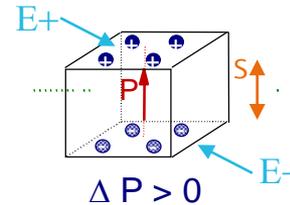
$$P = 0 / Pr$$

vor der Belastung



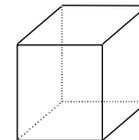
$$P = 0 / Pr$$

Elektr. Belastung



$$\Delta P > 0$$

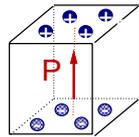
nach der Belastung



$$P = 0 / Pr$$

Pyroelektrizität:

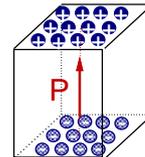
$T = RT$



$$P_s$$

$$E = 0$$

Temperaturerhöhung

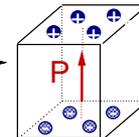


$$\Delta P_s = p \Delta T$$

E-Feld



$T = RT$



$$P_s$$

$$E = 0$$

Ferroelektrizität:

