

Fahrzeugmechatronik I

Aktoren



Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller

M.Sc. Osama Al-Saidi

Fachgebiet Kraftfahrzeuge • Technische Universität Berlin

Neuartige Aktoren

Übersicht

| Physikalischer Effekt | Technische Daten (Anhaltswerte) | Anwendungen |
|---|---|--|
| Piezoelektrische Aktoren | | |
| Bei Anlegen einer elektrischen Spannung an einen scheibenförmigen Piezokristall tritt aufgrund des reziproken piezoelektrischen Effektes eine Dickenänderung auf. | Nennspannung 800–1500 V Nennstellweg 70–200 μm <i>+ klarer ~ 50 μm</i> Steifigkeit bis 2000 N/ μm Eigenfrequenz 2–50 kHz | Stapel- und Streifentranslatoren, Biegeelemente, Inchworm-Motor, Ultraschall-Motor, Tintentropfenerzeugung |
| Magnetostriktive Aktoren | | |
| Bei Anlegen eines magnetischen Feldes an ferromagnetische Kristalle tritt aufgrund des magnetostriktiven Effektes eine volumeninvariante Längenänderung auf. | Stromstärke 2 A Erregung 50 kA/m Nennstellweg 50 μm Last 500 N Eigenfrequenz > 1 kHz | Translatoren (keine Stapelbauweise erforderlich), Wurmmotor, Einspritzventil für Dieselkraftstoff, aktive Schwingungsdämpfer |

Effekt:

Dicken- / Längenänderungen

Ursache:

Spannung / Magnetfeld

Anwendungsbeispiel in der Fahrzeugtechnik:

aktive Schwingungsdämpfung

Neuartige Aktoren

Übersicht

| Physikalischer Effekt | Technische Daten (Anhaltswerte) | Anwendungen |
|--|---|---|
| Elektrorheologe Aktoren (ERA) | | |
| Bei Anlegen eines elektrischen Feldes zeigen bestimmte Flüssigkeiten eine Erhöhung der Viskosität. | Scherspannung pro Feldstärke 600–800 Pa/(kV/mm) | schaltbare Kupplungen, Ventile, Motorlager, Stoßdämpfer |
| Magnetorheologe Aktoren (MRA) | | |
| Bei Anlegen eines magnetischen Feldes zeigen bestimmte Flüssigkeiten eine Erhöhung der Viskosität. | | ähnlich ERA |

Effekt:
Viskositätsänderung

Ursache:
Spannung/
Magnetfeld
**Anwendungs-
beispiel
in der Fahrzeug-
technik:**

Dämpfungs-/
Reibungssysteme

Neuartige Aktoren

Übersicht

| Physikalischer Effekt | Technische Daten (Anhaltswerte) | Anwendungen |
|---|---|---|
| Thermobimetall-Aktoren | | |
| Bei einer Erwärmung krümmen sich zwei fest miteinander verbundene Metalle unterschiedlicher Wärmedehnung. | spezifische Krümmung $28,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ Elastizitätsmodul $170 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$ zulässige Biegespannung 200 N/mm^2 | Thermoschalter aller Art für kleine Stellkräfte |
| Aktoren mit Formgedächtnislegierungen (FGL) | | |
| Die bei Raumtemperatur aufgebrachte Verformung eines Bauteils aus einer FGL verschwindet bei Erwärmung. | Einwegeffekt und Zweiwegeffekt möglich. Umwandlungstemperatur ca. -100 °C bis $+100 \text{ °C}$ Überhitzung ca. 160 °C bis 400 °C | Thermoschalter aller Art, Stellglieder mit geringer Dynamik |
| Dehnstoff-Aktoren | | |
| Bei Erwärmung treten bei Dehnstoffen starke Volumenvergrößerungen auf. | Arbeitstemperaturen ca. -20 °C bis $+120 \text{ °C}$ Hub 5–25 mm Stellkraft 250–1500 N Reaktionszeit 8–50 s | einfache Stellantriebe für Heizkörper, Starteinrichtung für Vergasermotoren |

Effekt:

Verformung

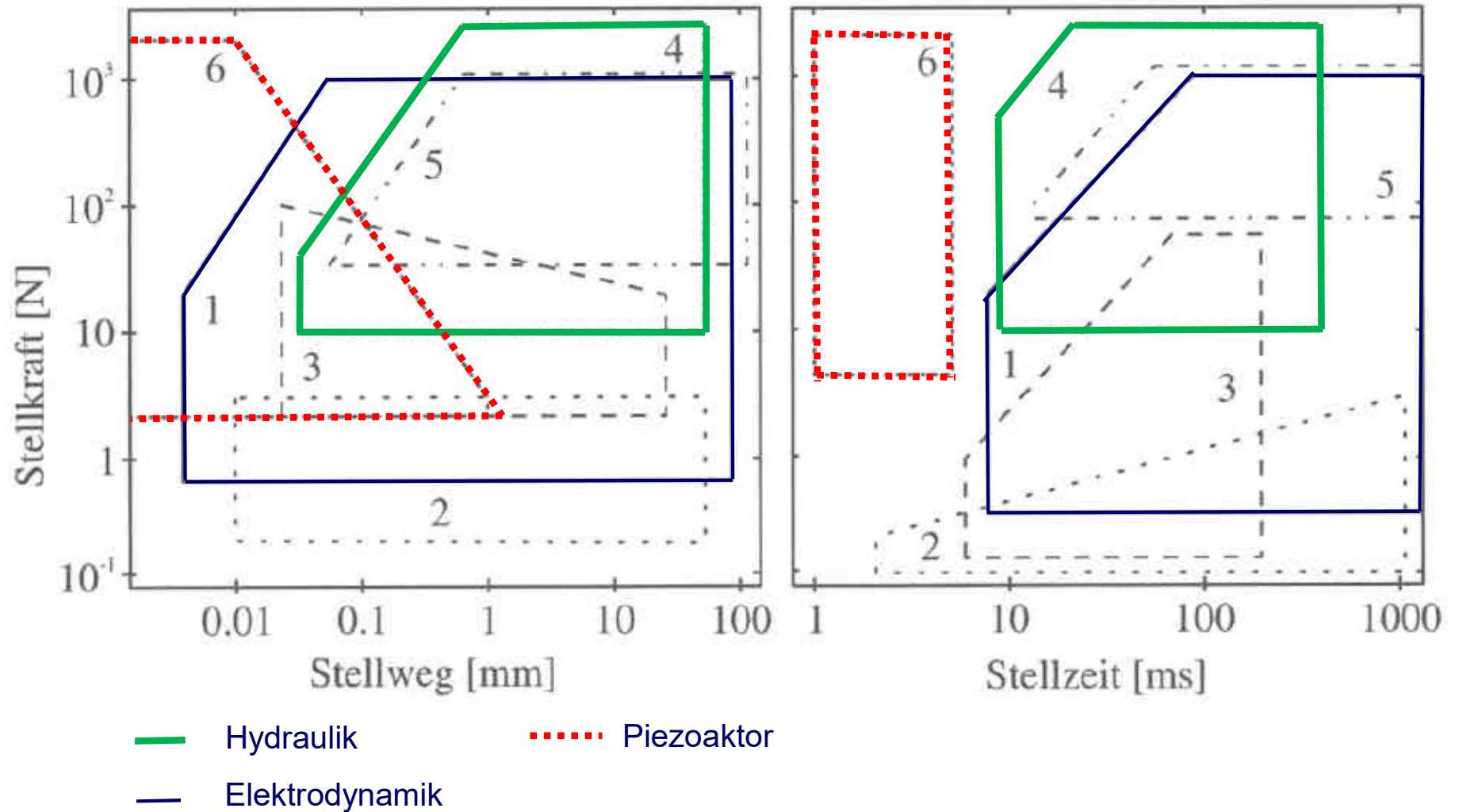
Ursache:

Temperatur

**Anwendungs-
beispiel
in der Fahrzeug-
technik:**

Schalter

Neuartige Aktoren Gegenüberstellung



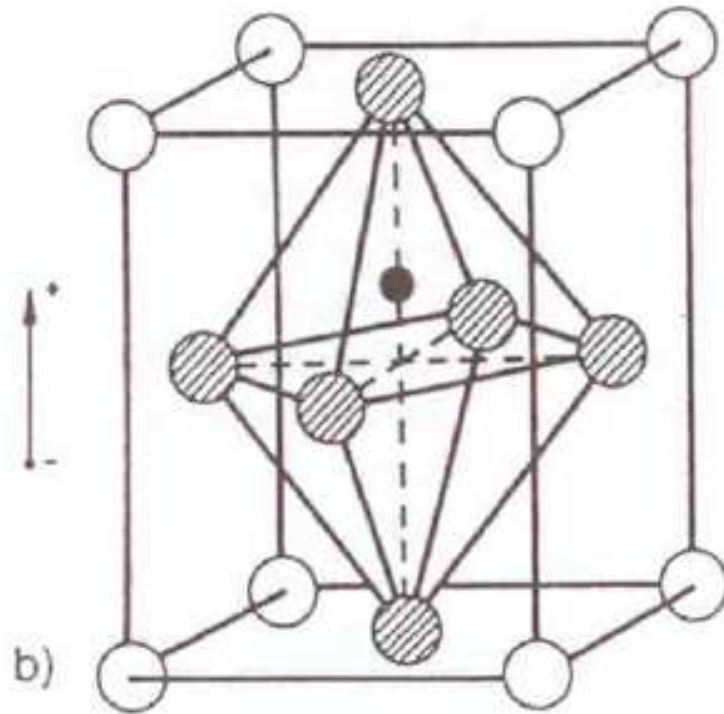
Grundlagen piezoelektrischer Aktoren




Entdeckung des piezoelektrischen Effektes

1880 entdeckten die Brüder **Pierre und Jacque Curie**, dass z.B. für Quarz (SiO_2 , Grundmaterial für Herstellung Keramik, Si ist Halbmetall (Si: *Silicia* (lat) – „Kieselerde“ bzw. *Silex* (lat.) – „Kieselstein“) **mechanische Beanspruchungen zu Ladungen** (Piezoeffekt) und **elektrische Felder zu Verformungen** (inverser Piezoeffekt) führen.

Grundlagen piezoelektrischer Aktoren

Entdeckung des piezoelektrischen Effektes



-  A^{2+} (Pb, Ba) Blei oder Barium (2+)
-  O^{2-} Sauerstoff (2-)
-  B^{4+} (Ti, Zr) Titan oder Zirkon (4+)

Schwerpunkt der Ladungen fällt nicht zusammen

⇒ Ausbreitung eines Dipols

Durch Oberflächenladungen ist dieser nach außen hin neutral

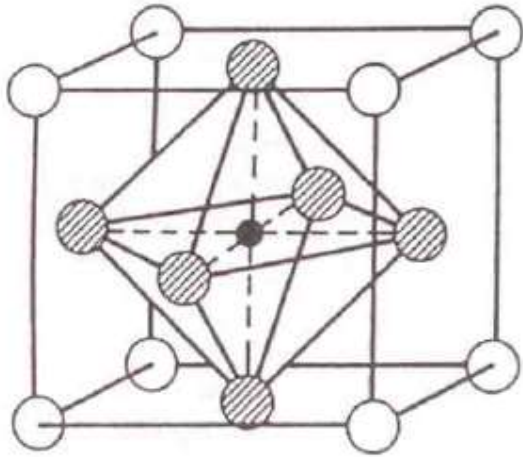
Beispiele für piezokeramische Elemente

Bariumtitanat , -zirkonat oder
Blei-Zirkonat-Titanat (PZT)

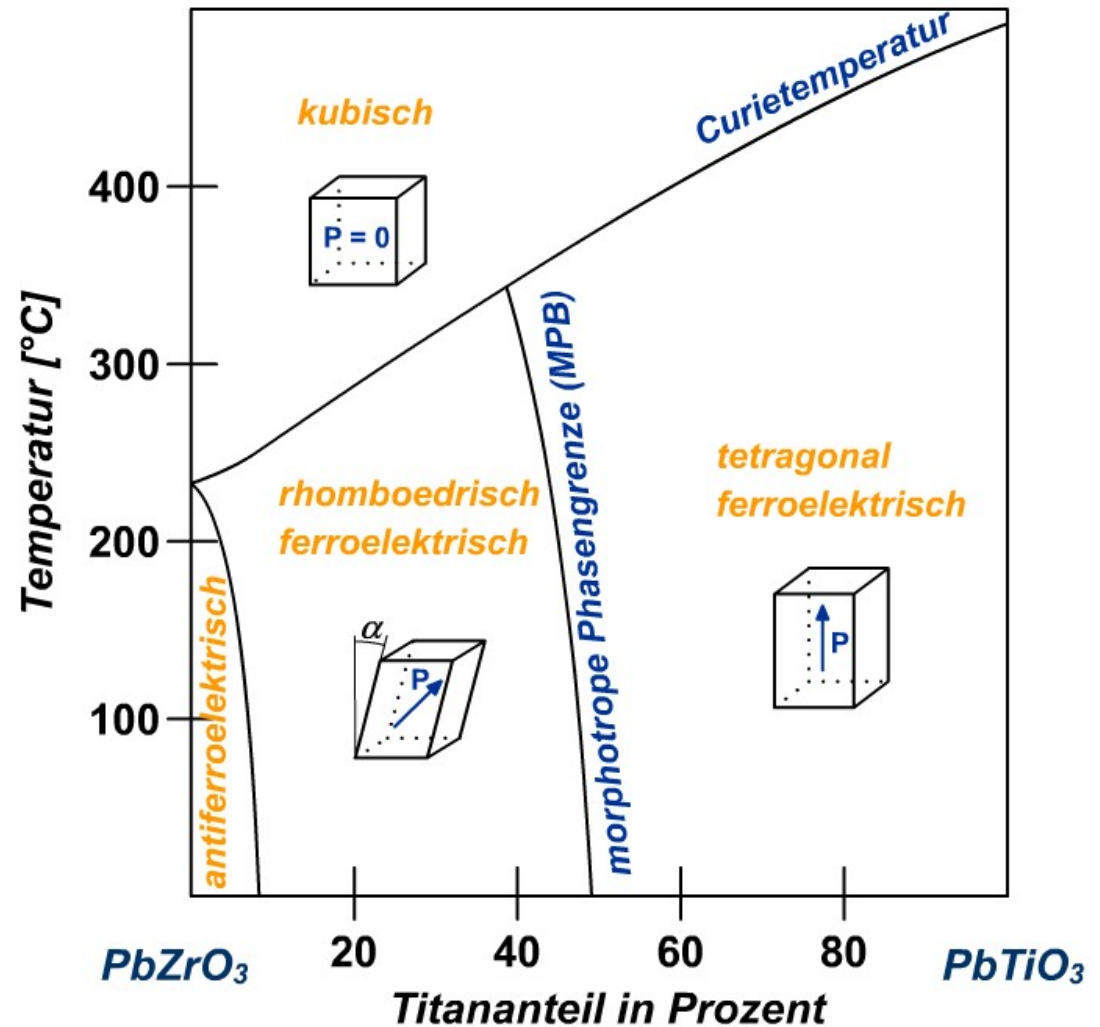
Grundlagen piezoelektrischer Aktoren

Phasendiagramm – Blei-Zirkonat-Titanat (PZT)

Oberhalb der Curie-Temperatur
(kubisches Gitter)



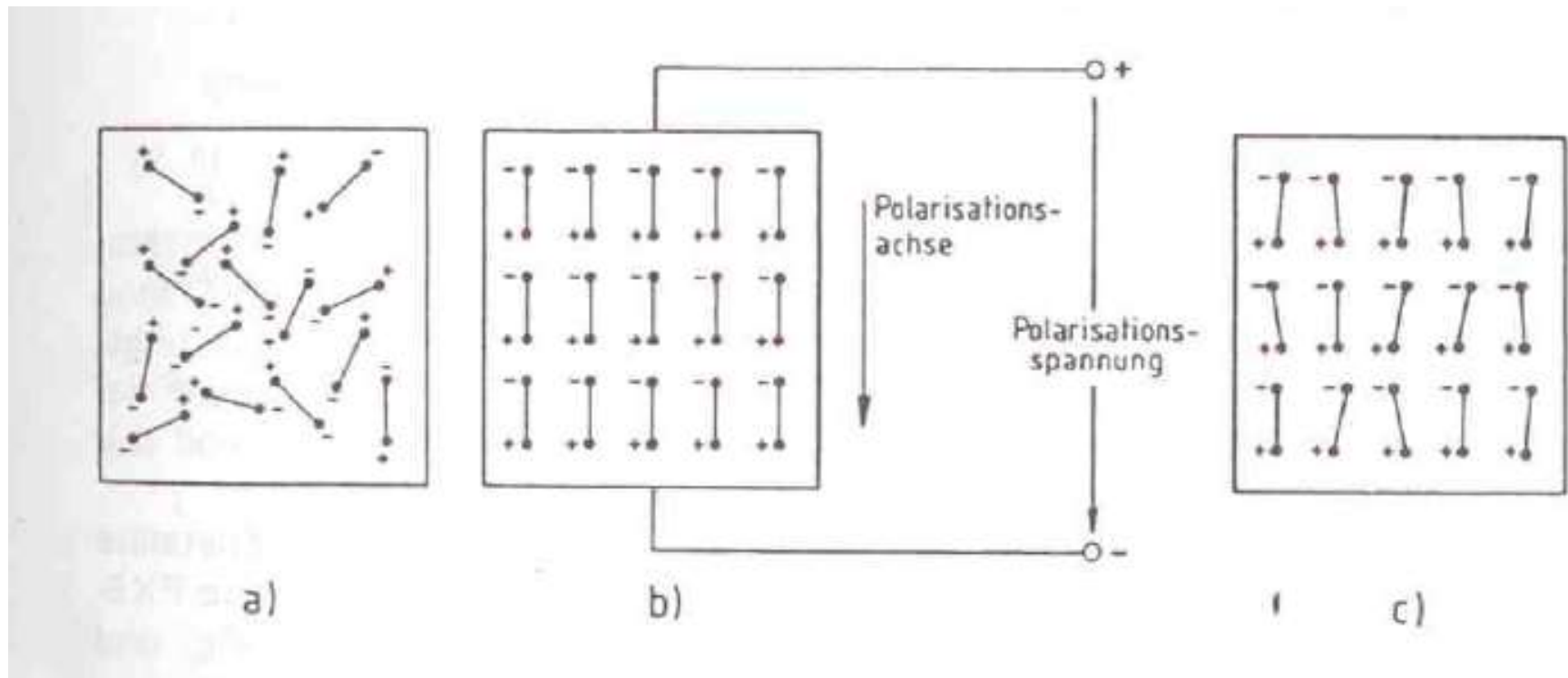
Die Ausbildung eines
Dipols ist T-abh.



Grundlagen piezoelektrischer Aktoren

Polarisation

Für die Nutzung des piezoelektrischen Effektes müssen die Elementarzellen zunächst polarisiert werden.



Vor der
Polarisation

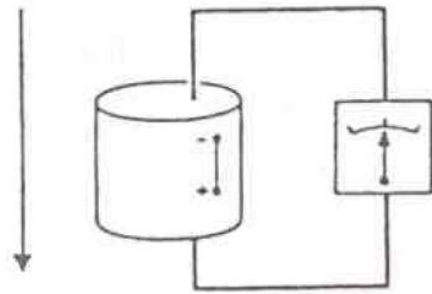
Während der Polarisation
(knapp unterhalb der Curie-Temperatur)

Nach der
Polarisation

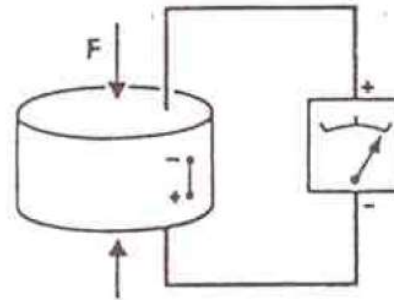
Grundlagen piezoelektrischer Aktoren

Wirkungsweise

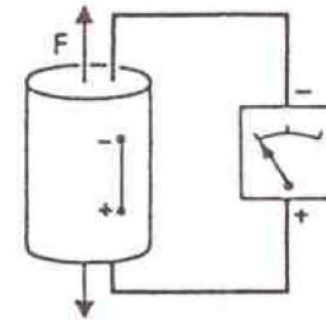
Polarisations-
achse



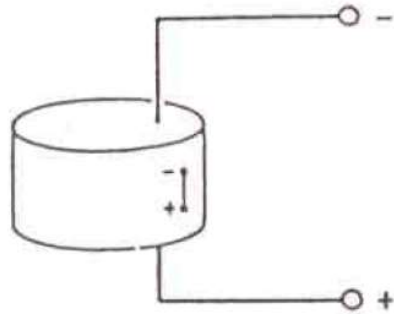
a)



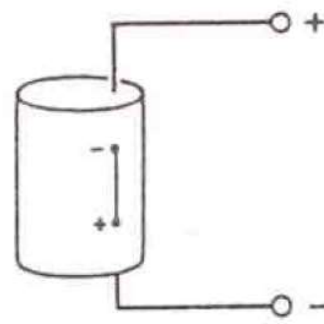
b)



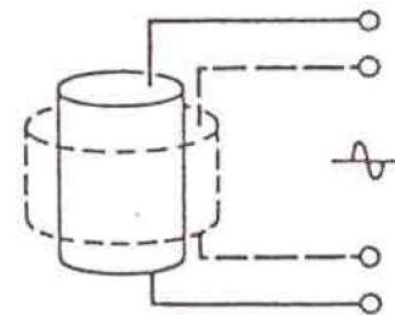
c)



d)



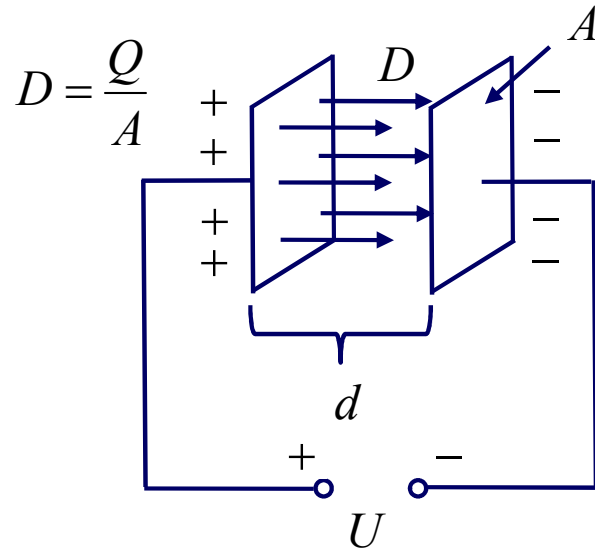
e)



f)

Grundlagen piezoelektrischer Aktoren

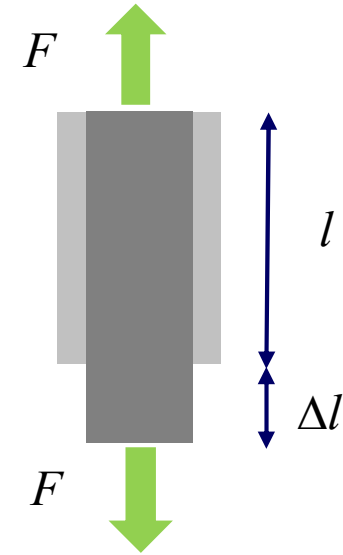
Physikalische Grundbeziehungen



Für die elektr. Flussdichte gilt

$\underline{D} = (\epsilon_0 \epsilon_r) \underline{E}$ Permittivität
mit der elektr. Feldstärke

$$\underline{E} = \frac{U}{d} \quad \text{3-dim: } \underline{D} = \underline{\epsilon}_r \underline{E}$$



Für die Dehnung gilt bei
1-achsigem Spannungszustand
bei Vernachlässigung der
Querkontraktion

$$\underline{\epsilon} = \frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \sigma \quad \text{3-dim: } \underline{\epsilon} = \underline{\hat{C}}^{-1} \underline{\sigma}$$

Grundlagen piezoelektrischer Aktoren

Grundgleichungen

Mit dem piezoelektr. Effekt

$$\underline{\epsilon} = \underline{d} \underline{E}$$

$$\underline{D} = \underline{d}^T \underline{G}$$

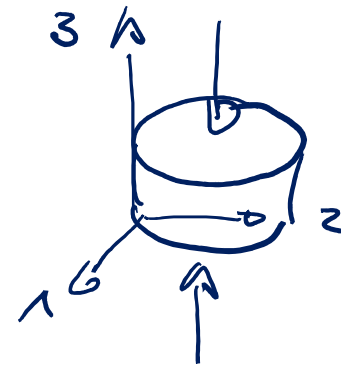
\underline{d} - Matrix der
Piezokonstanten

folgt die Grundgleichung der
Piezokeramik

$$\begin{Bmatrix} \underline{G} \\ \underline{D} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{G}^{-1} & \underline{d} \\ \underline{d}^T & \underline{\epsilon}_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \underline{G} \\ \underline{E} \end{Bmatrix}$$

$[9 \times 9]$

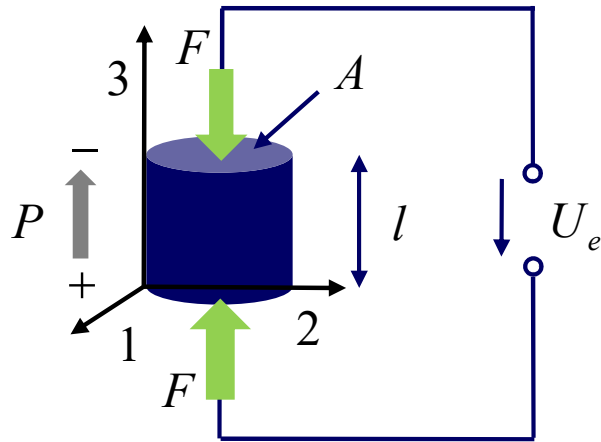
Für den Sonderfall des 1-achsigen
Spannungszustandes ergibt sich



$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{33} \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\epsilon_{33}} & d_{33} \\ d_{33} & \epsilon_0 \epsilon_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} G_{33} \\ E \end{Bmatrix}$$

Grundlagen piezoelektrischer Aktoren

Analyse des grundsätzlichen Verhaltens



Im Fall des 1-achsigen Spannungszustandes gilt

$$\sigma_{33} = -\frac{F}{A}$$

$$\epsilon_{33} = \frac{\Delta l}{l}$$

$$E = \frac{U_e}{l}$$

resultierende
Spannungs-
differenz

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{U_e}{l}$$

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E_{33}} \left(-\frac{F}{A} \right) + d_{33} \frac{U_e}{l}$$

$$\epsilon_0 \epsilon_r \frac{U_e}{l} = d_{33} \left(-\frac{F}{A} \right) + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{U_e}{l}$$

bzw.

$$\begin{Bmatrix} \Delta l \\ U \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{l}{E_{33} A} & d_{33} \\ -\frac{d_{33} l}{\epsilon_0 \epsilon_r A} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F \\ U_e \end{Bmatrix}$$

Grundlagen piezoelektrischer Aktoren

Analyse des grundsätzlichen Verhaltens

$$\begin{Bmatrix} \Delta l \\ U \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{l}{E_{33}A} & d_{33} \\ -\frac{d_{33}l}{A\epsilon_0\epsilon_r} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F \\ U_e \end{Bmatrix}$$

Sonderfall 1: $U_e \neq 0$, Piezo frei

$$\Delta l = d_{33} U_e$$

Sonderfall 2: $U_e \neq 0$, Piezo eingespannt

$$F = \frac{E_{33} A d_{33} U_e}{l} \quad \text{delta}_l = 0$$

Sonderfall 3: Druckbelastung, $U_e = 0$

$$U = -\frac{d_{33} l}{A \epsilon_0 \epsilon_r} F$$

Typische Materialwerte und Abmessungen
(PZT Keramik PXE 52)

$$\epsilon_0 \epsilon_r = 3 \cdot 10^{-8} \frac{As}{Vm} \quad l = 2 \cdot 10^{-2} m$$

$$E_{33} = 110 \cdot 10^9 \frac{N}{m^2}$$

$$A = 1 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$d_{33} = 580 \cdot 10^{-12} \frac{As}{N}$$

Sonderfall 1:

$$50 \mu m = 580 \cdot 10^{-12} \frac{As}{N} 86 kV$$

Sonderfall 2:

$$220 N = 0.319 \frac{As}{m} 690 V$$

Sonderfall 3 (Sensorfunktion):

$$3.9 V = 3.9 \frac{V}{N} 1 N$$

Betriebsverhalten piezoelektrischer Aktoren

Randbedingungen

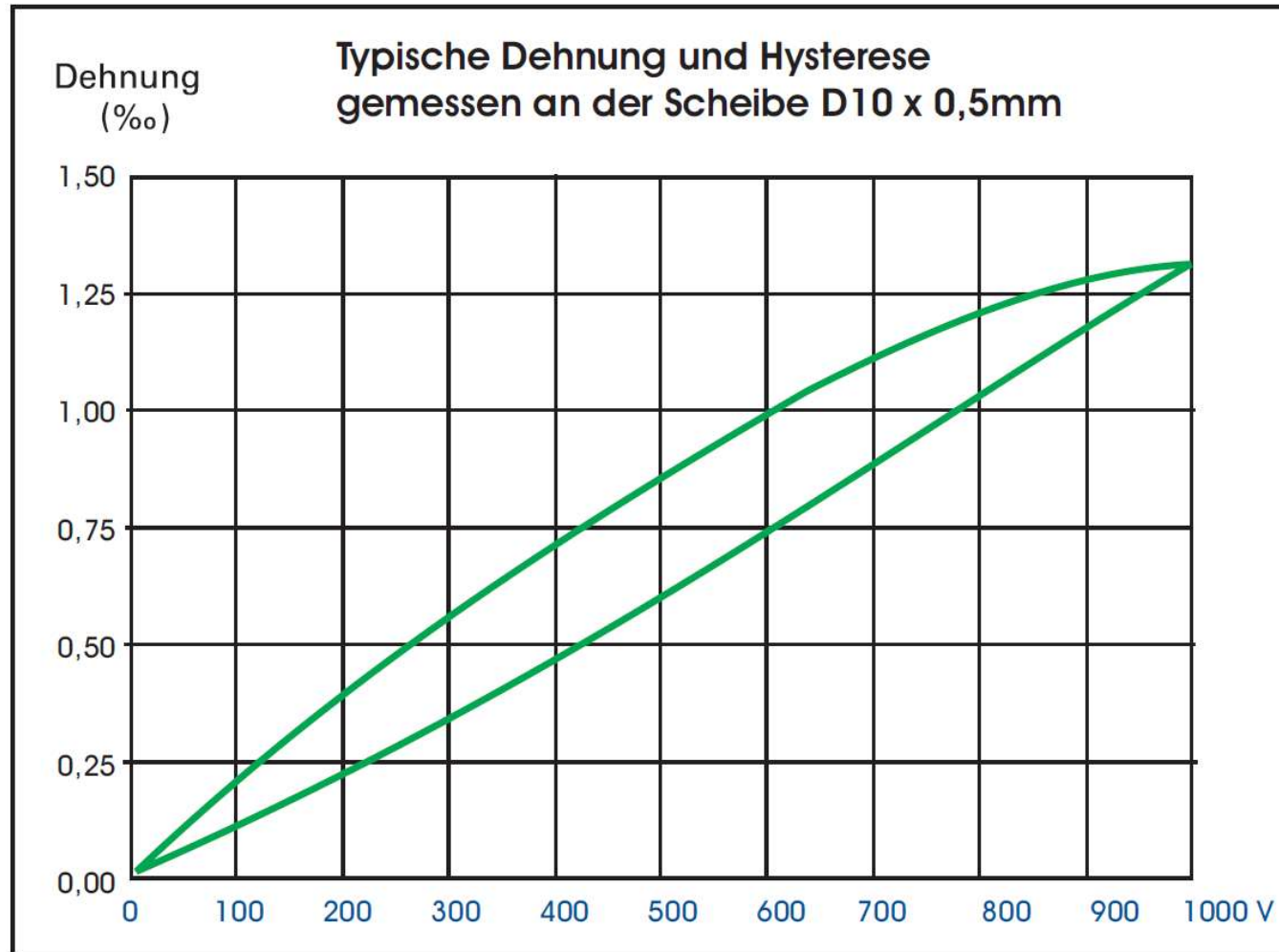
➤ **Vermeidung einer Depolarisation durch**

- zu hohe Zug-/Druckbeanspruchung
- zu hohe elektrische Spannung (Betriebsbereich meist $< 1000\text{V}$)
- zu hohe Temperaturen (PZT: Curie-Temperatur bei ca. $350\text{-}500^\circ\text{C}$)

➤ **Vermeidung von Zug- und Schubbeanspruchungen** (z.B. durch mechanische Vorspannung)

Betriebsverhalten piezoelektrischer Aktoren

Dehnung und Hysterese von PZT

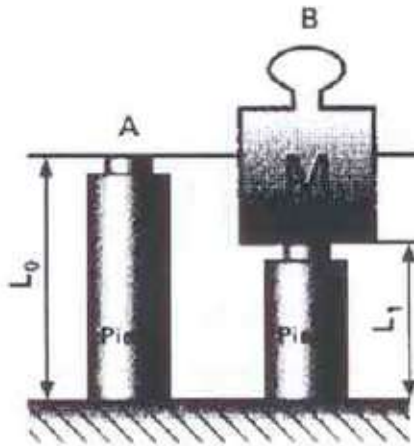


Katalog,
PI Ceramic

Betriebsverhalten piezoelektrischer Aktoren

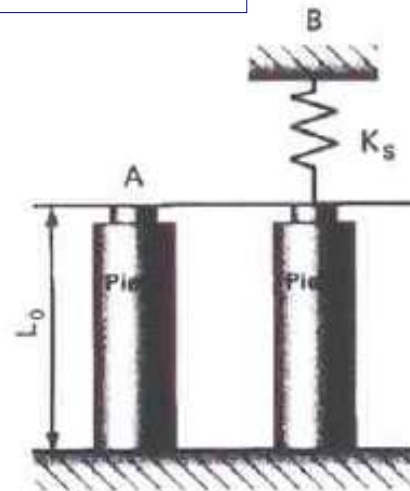
Verschiebungsverhalten von PZT

wegunabhängige
Last



$$\Delta l = -\frac{l}{E_{33} A} \frac{Mg}{\Delta l} + d_{33} U_e$$

$$\Delta l = -\frac{l}{E_{33} A} k_s \Delta l + d_{33} U_e$$



wegabhängige
Last

Katalog,
PI Ceramic

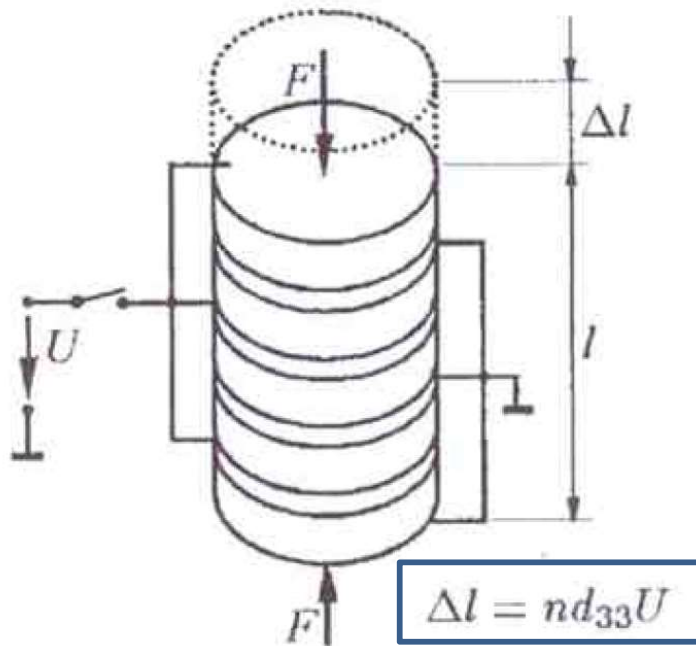
Bauformen piezoelektrischer Aktoren

Verschiebungsverhalten von PZT

- Stapelaktoren
- Streifenaktoren
- Biegeaktoren
- Hybridaktoren

Bauformen piezoelektrischer Aktoren

Stapelaktoren



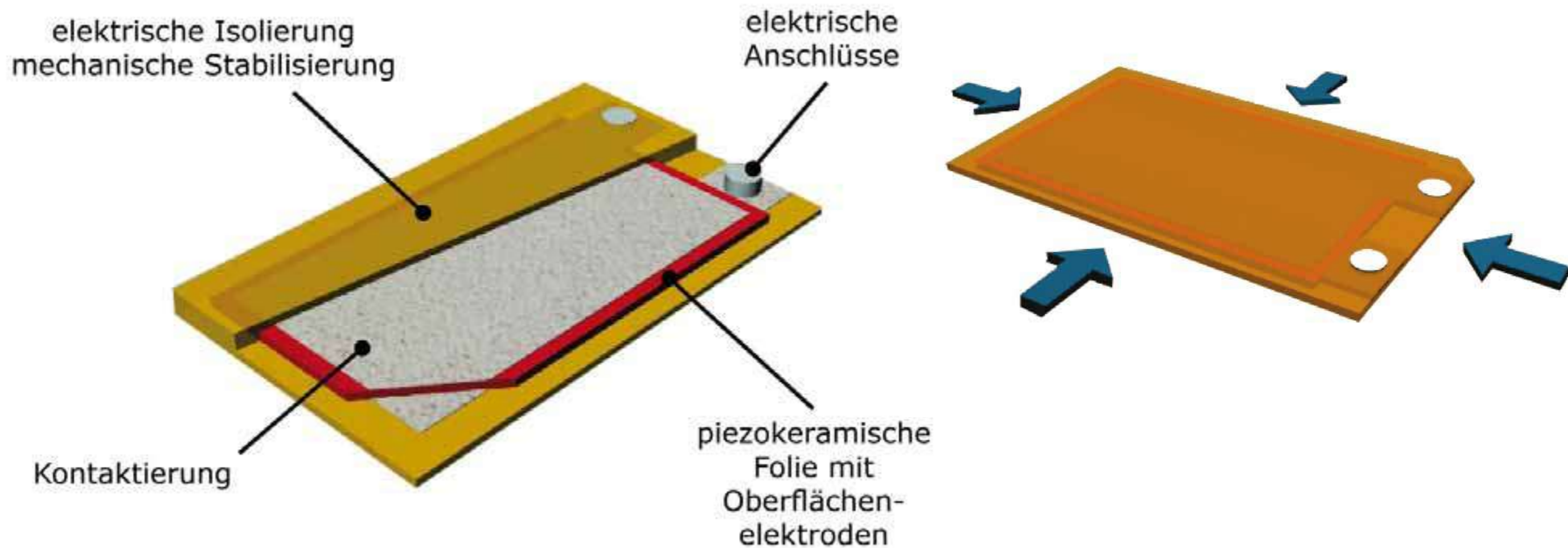
Katalog,
PI Ceramic

- elektrisch parallel (gleiche Spannung)
- mechanisch in Reihe (gleiche Kraft)

Bauformen piezoelektrischer Aktoren

Streifenaktoren

Katalog,
PI Ceramic



➤ Querkontraktion durch piezoelektrischen Quereffekt

Bauformen piezoelektrischer Aktoren

Biegeaktoren

Katalog,
PI Ceramic

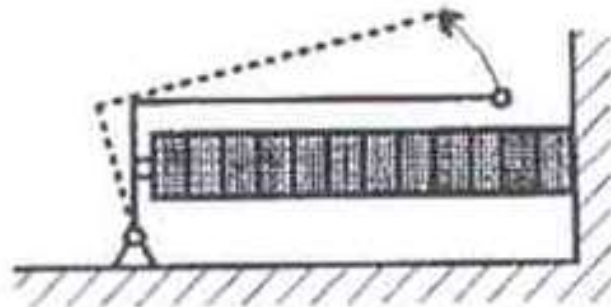


| Bestellnummer* | Betriebs- spannung [V] | Auslenkung [μm] ±20% | Freie Länge [mm]*** | Abmessungen L x W x T [mm] | Blockier- kraft [N] ±20% | El. Kapazität [μF] ±20% | Resonanz- frequenz [Hz] ±20% |
|----------------|------------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| PL112.10** | 0-60 (±30) | ±80 | 12 | 17,8 x 9,6 x 0,65 | 2,0 | 2 x 1,1 | > 1000 |
| PL122.10 | 0-60 (±30) | ±250 | 22 | 25,0 x 9,6 x 0,65 | 1,1 | 2 x 2,4 | 660 |
| PL127.10 | 0-60 (±30) | ±450 | 27 | 31,0 x 9,6 x 0,65 | 1,0 | 2 x 3,4 | 380 |
| PL128.10** | 0-60 (±30) | ±450 | 28 | 35,5 x 6,3 x 0,75 | 0,5 | 2 x 1,2 | 360 |
| PL140.10 | 0-60 (±30) | ±1000 | 40 | 45,0 x 11,0 x 0,60 | 0,5 | 2 x 4,0 | 160 |

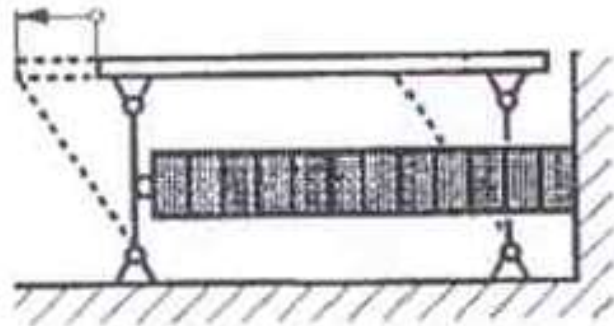
➤ Biegung durch unterschiedliches Kontraktionsverhalten

Bauformen piezoelektrischer Aktoren

Hybridaktoren



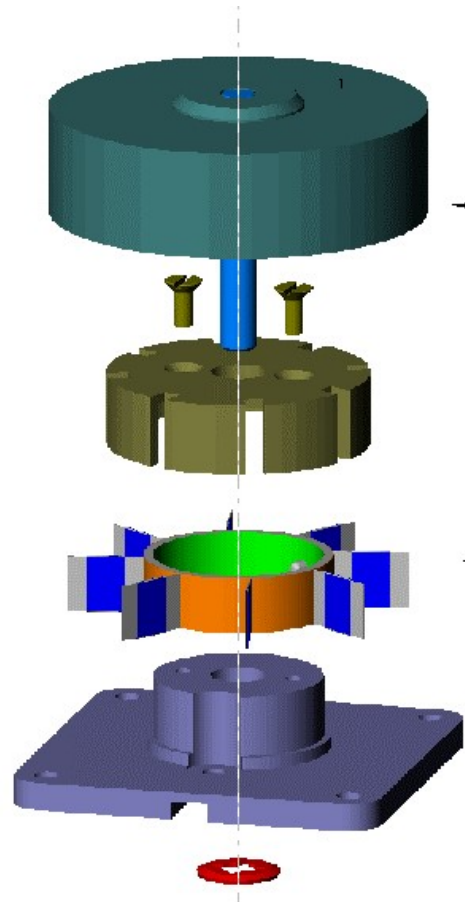
Hebelübersetzung mit
Stapelbauweise



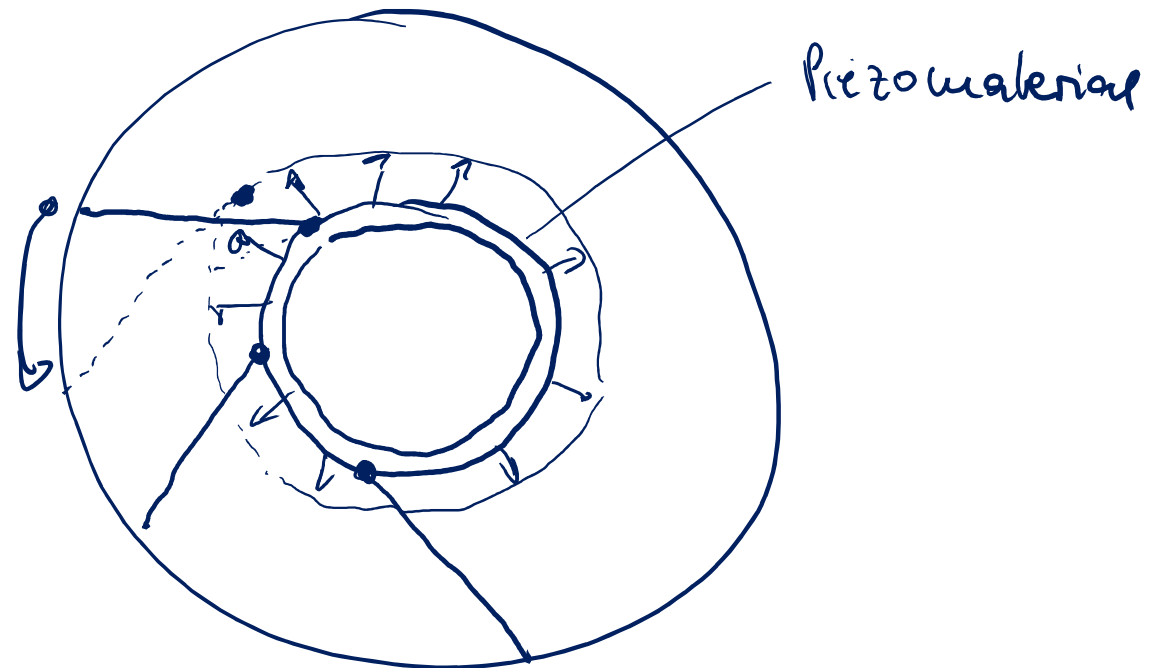
Hebelübersetzung mit
integrierter Geradföhrung

Anwendungen piezoelektrischer Aktoren

Ultraschall-Piezo-Drehmotor



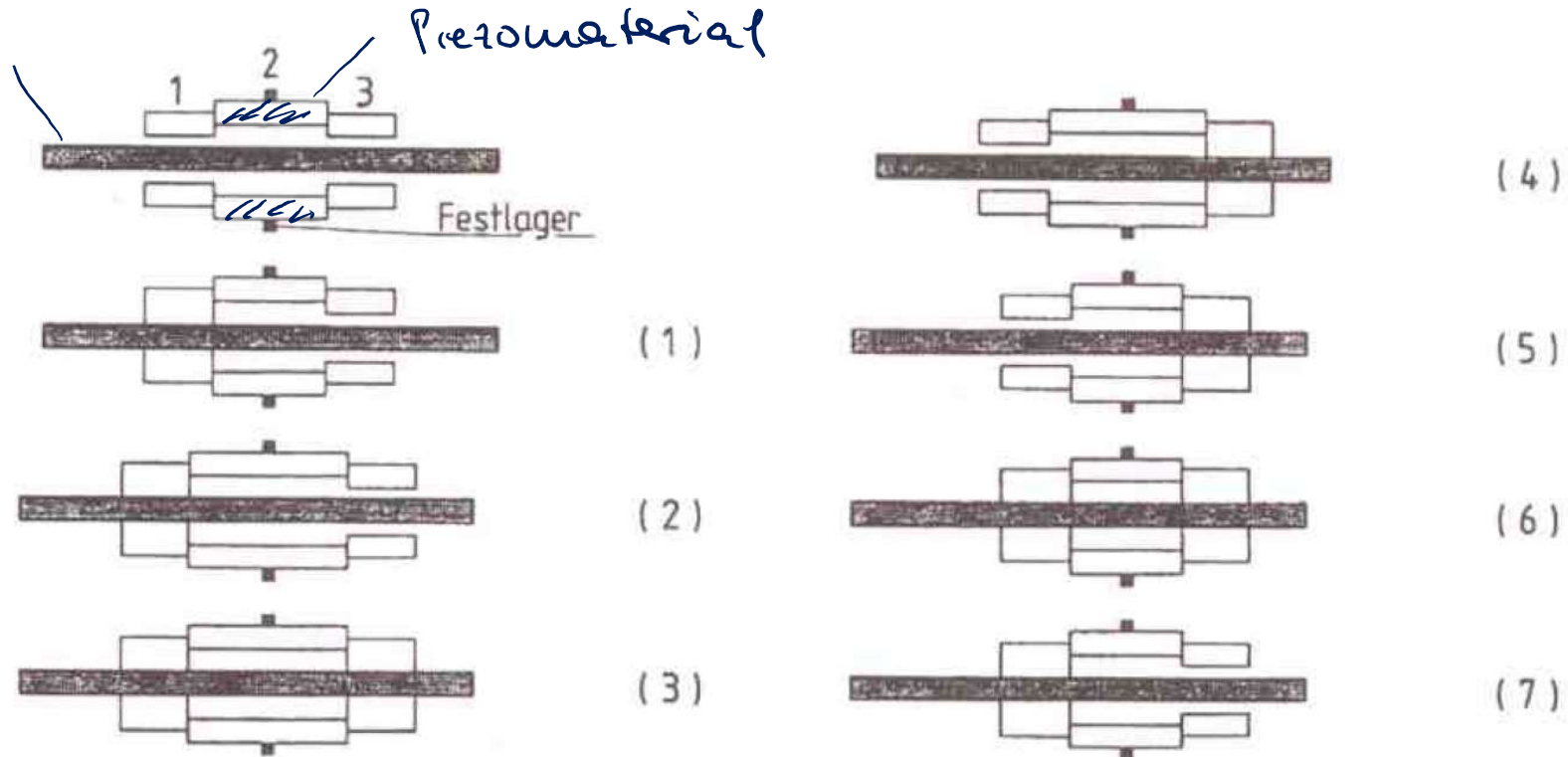
Funktionsprinzip



Anwendungen piezoelektrischer Aktoren

Inch-Worm-Motor

linear-
rotator



| | |
|--|--------------|
| Stellweg | 6...200 mm |
| Wegauflösung | 2...4 nm |
| Geschwindigkeit | 0,5...2 mm/s |
| ($v_{\max}/v_{\min} = 5 \cdot 10^5$) | |
| Axiale Last | 0,5...1,5 kg |

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!