

# 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 $\mu\text{m}$ Steifigkeit bis 2000 N/ $\mu\text{m}$ 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 $\mu\text{m}$ Last 500 N Eigenfrequenz > 1 kHz	Translatoren (keine Stapelbauweise erforderlich), Wurmmotor, Einspritzventil für Dieselkraftstoff, aktive Schwingungsdämpfer

**Effekt:**

**Ursache:**

**Anwendungsbsp.:**

# 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:**

**Ursache:**

**Anwendungsbsp.:**

# Neuartige Aktoren

## Übersicht

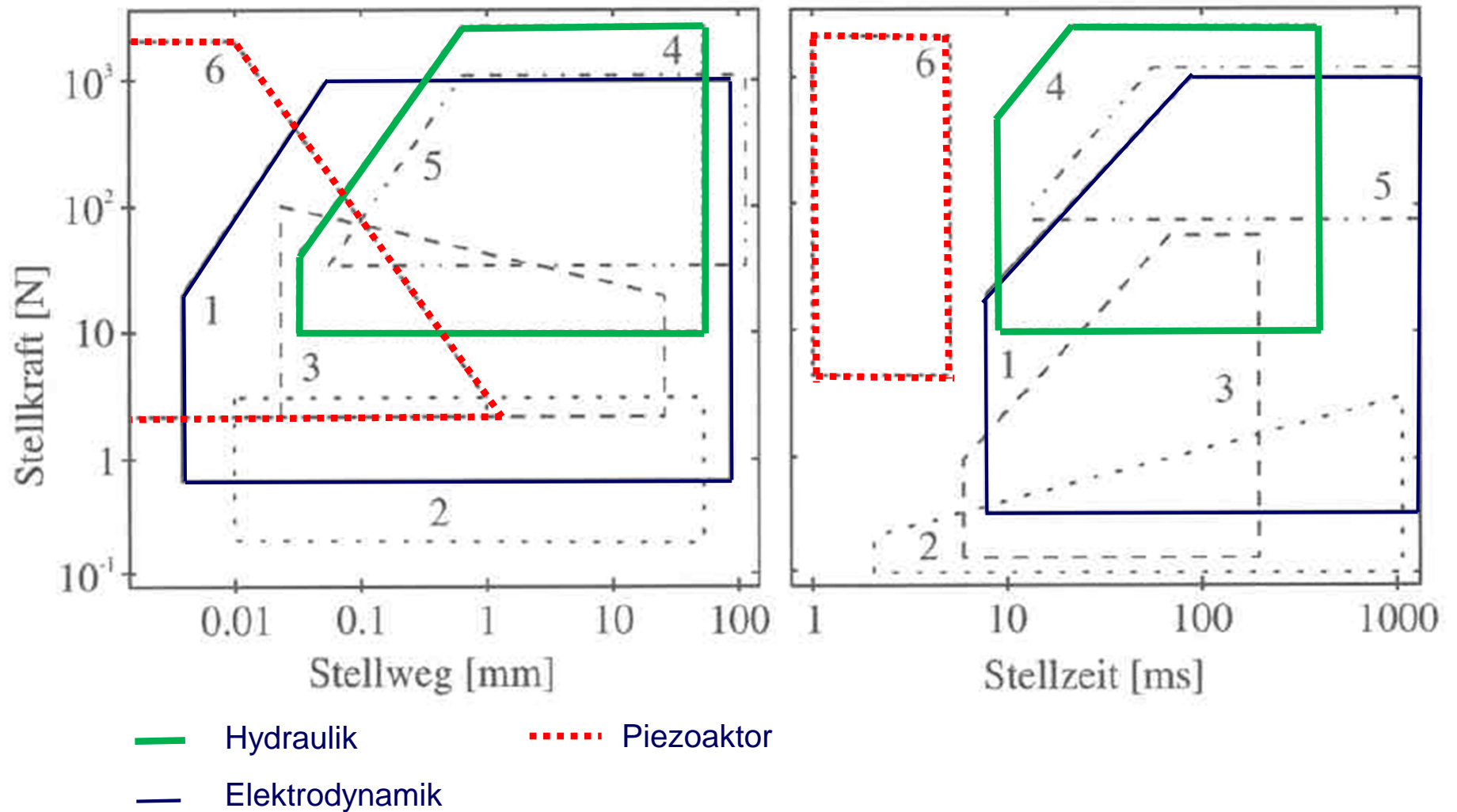
Physikalischer Effekt	Technische Daten (Anhaltswerte)	Anwendungen
Thermobimetall-Aktoren		
Bei einer Erwärmung krümmen sich zwei fest miteinander verbundene Metalle unterschiedlicher Wärmedehnung.	spezifische Krümmung $28,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ Elastizitätsmodul $170 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$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

**Effekt:**

**Ursache:**

**Anwendungsbsp.:**

# Neuartige Aktoren Gegenüberstellung



# Grundlagen piezoelektrischer Aktoren

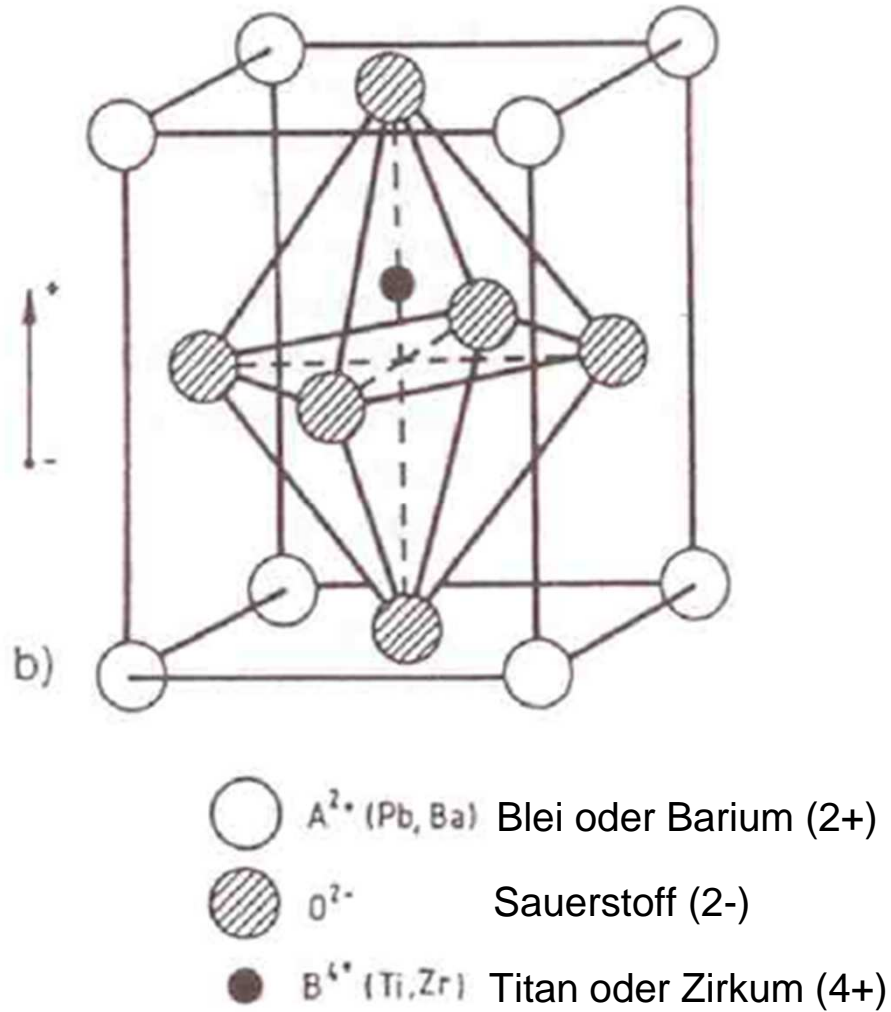
## Entdeckung des piezoelektrischen Effektes

1880 entdeckten die Brüder **Pierre und Jacque Curie**, dass z.B. Quarz ( $\text{SiO}_2$ , 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



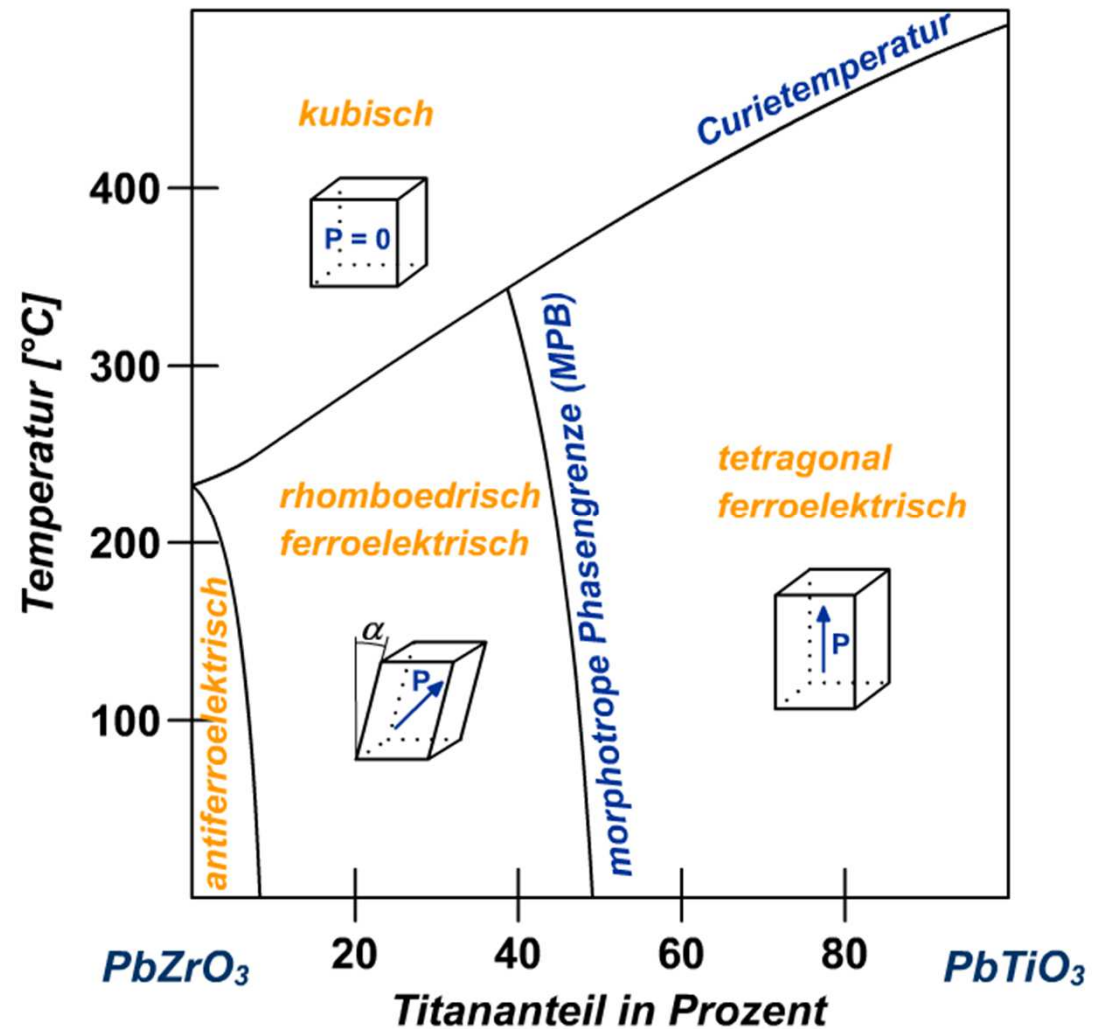
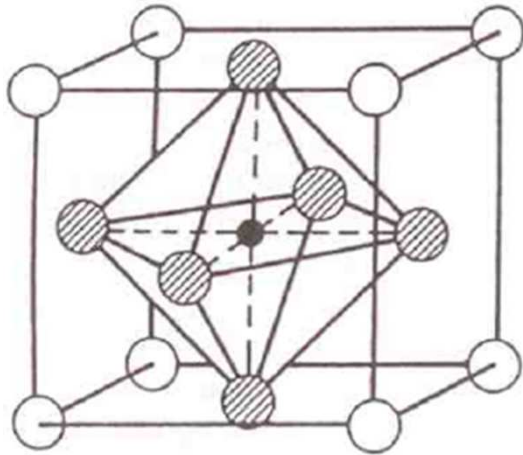
### Beispiele für piezokeramische Elemente

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

# Grundlagen piezoelektrischer Aktoren

## Phasendiagramm – Blei-Zirkonat-Titanat (PZT)

Oberhalb der Curie-Temperatur  
(kubisches Gitter)

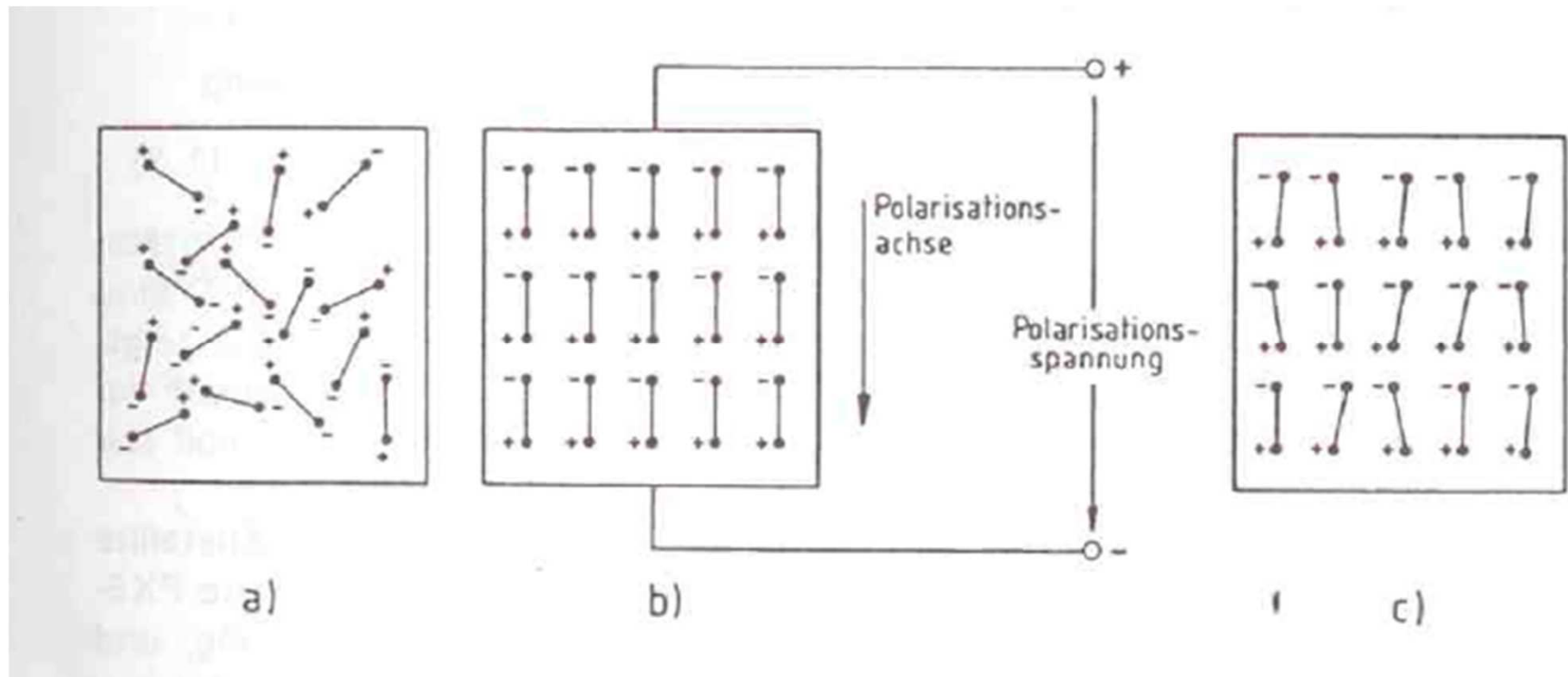




# Grundlagen piezoelektrischer Aktoren

## Polarisation

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



Vor der  
Polarisation

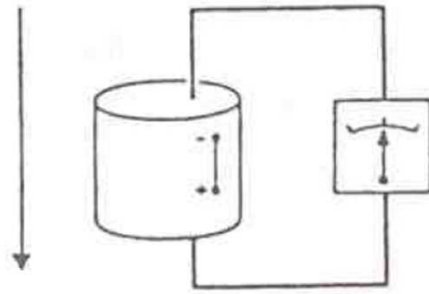
Während der Polarisation  
(knapp unterhalb der Curie-Temperatur)

Nach der  
Polarisation

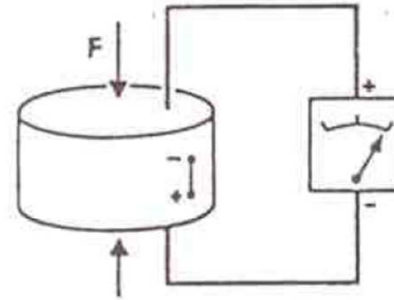
# Grundlagen piezoelektrischer Aktoren

## Wirkungsweise

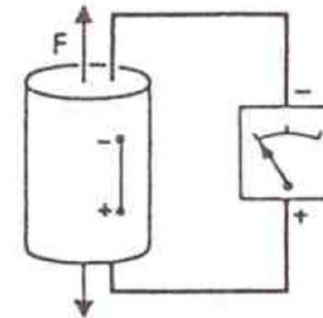
Polarisations-  
achse



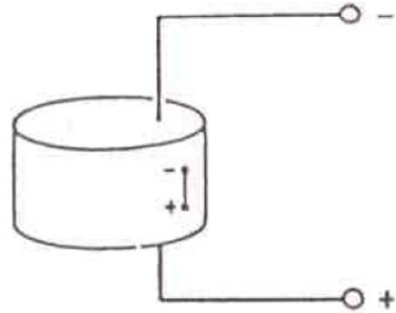
a)



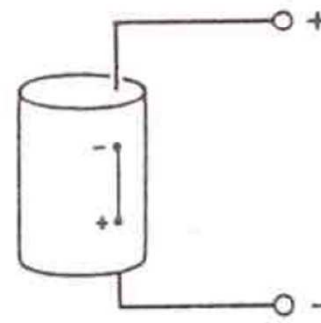
b)



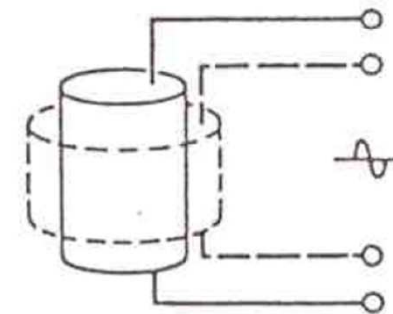
c)



d)



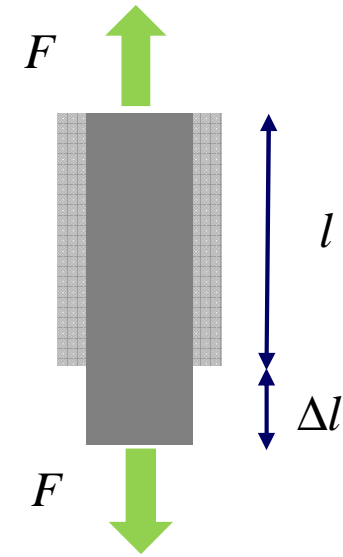
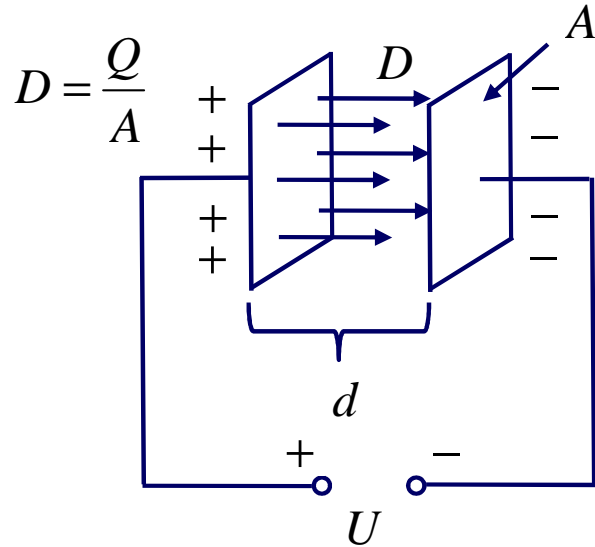
e)



f)

# Grundlagen piezoelektrischer Aktoren

## Physikalische Grundbeziehungen

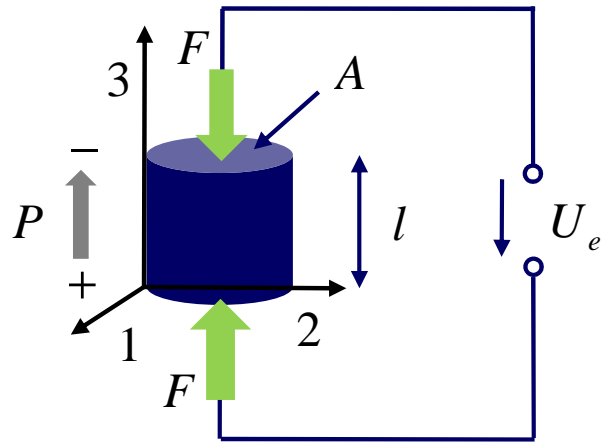


# Grundlagen piezoelektrischer Aktoren

## Grundgleichungen

# Grundlagen piezoelektrischer Aktoren

## Analyse des grundsätzlichen Verhaltens



# Grundlagen piezoelektrischer Aktoren

## Analyse des grundsätzlichen Verhaltens

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

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

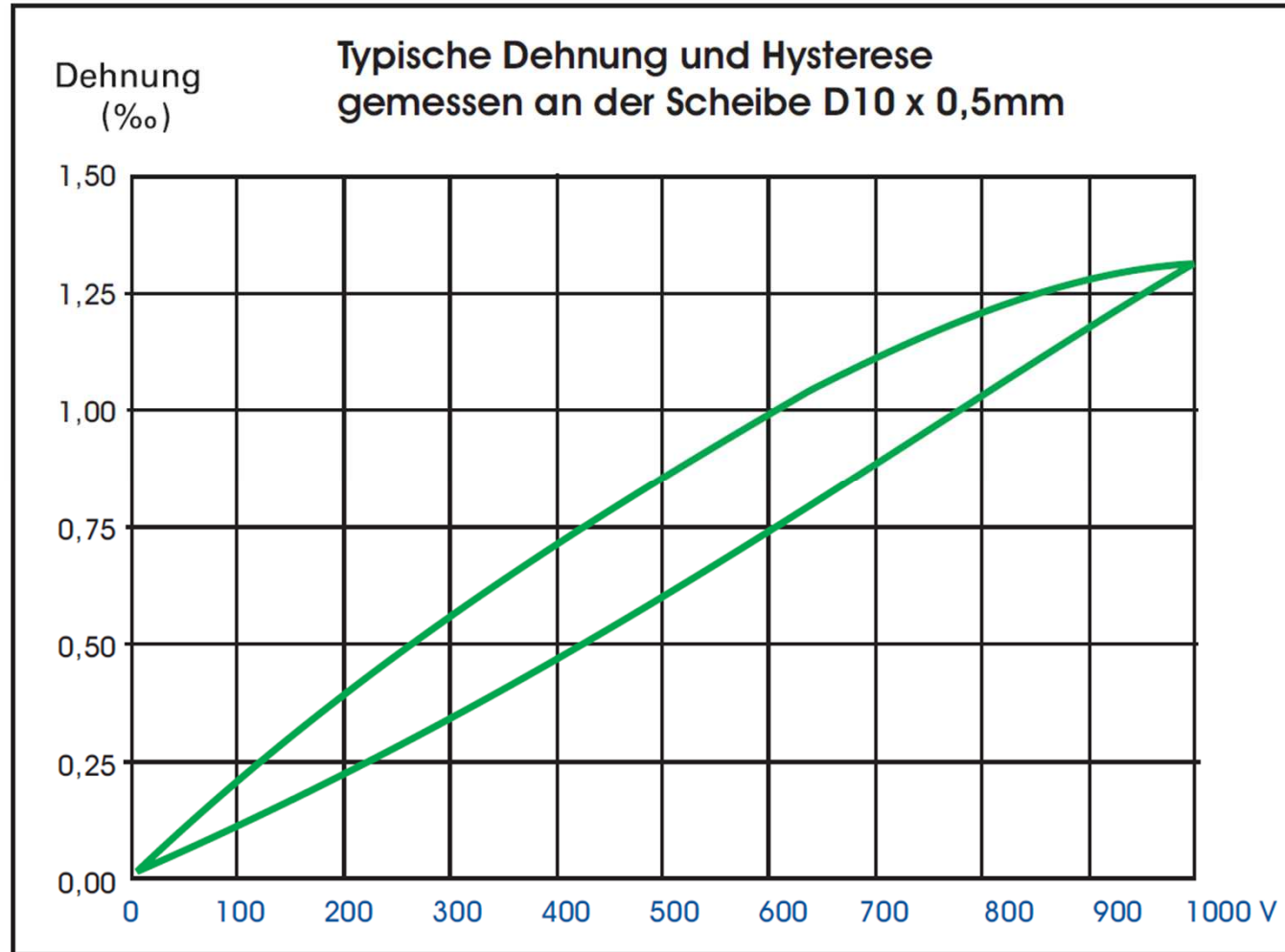
### ➤ **Vermeidung einer Depolarisation durch**

- 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

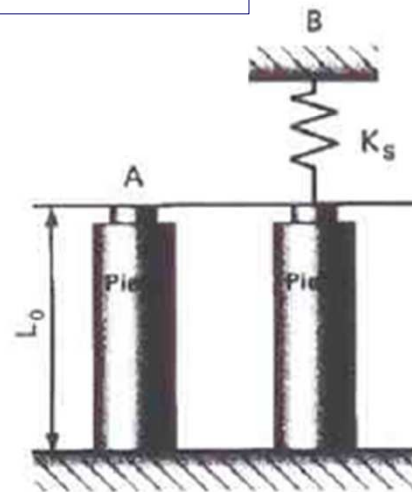
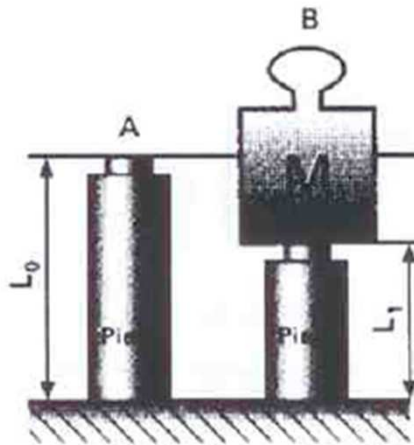


Katalog,  
PI Ceramic

# Betriebsverhalten piezoelektrischer Aktoren

## Verschiebungsverhalten von PZT

wegunabhängige  
Last



wegabhängige  
Last

Katalog,  
PI Ceramic

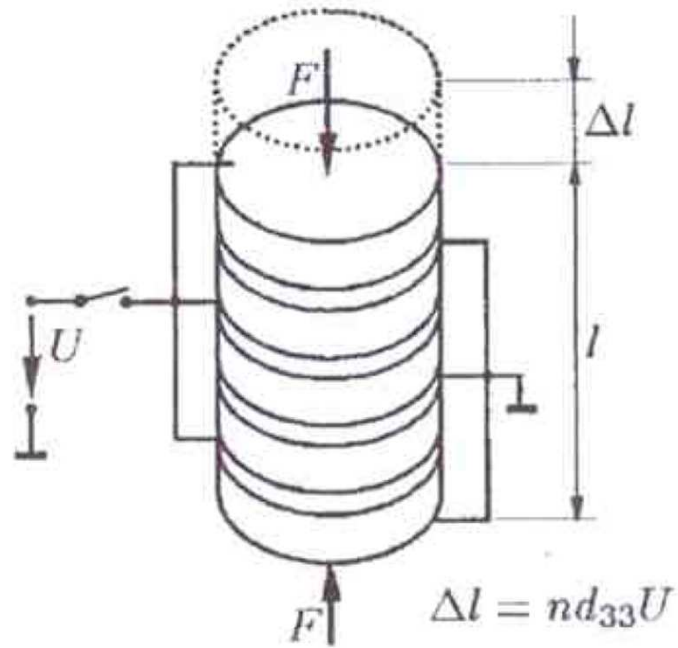
# **Bauformen piezoelektrischer Aktoren**

## **Verschiebungsverhalten von PZT**

- Stapelaktoren
- Streifenaktoren
- Biegeaktoren
- Hybridaktoren

# Bauformen piezoelektrischer Aktoren

## Stapelaktoren



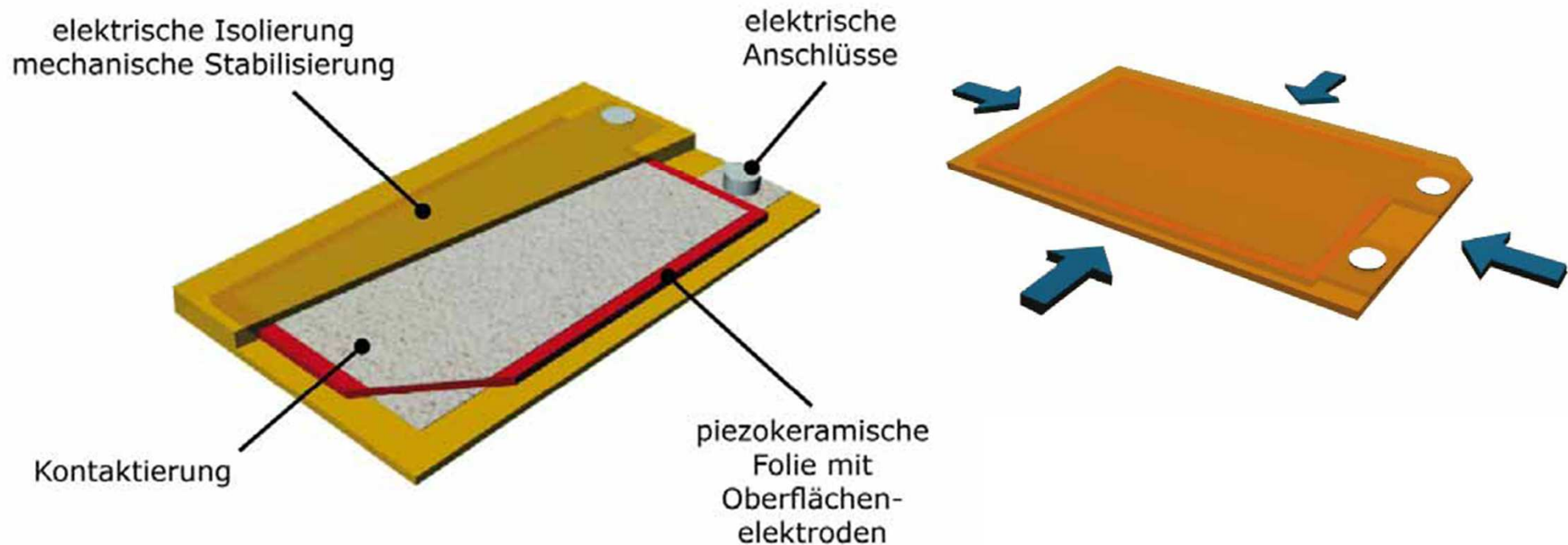
Katalog,  
PI Ceramic

- 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

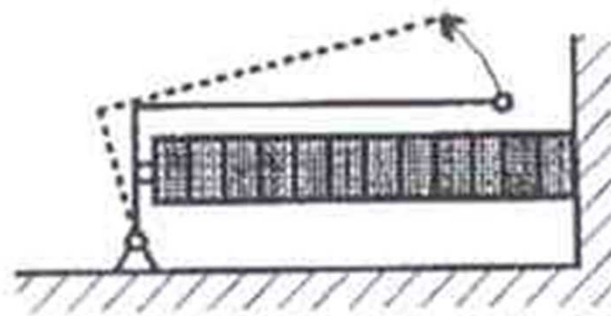


Bestellnummer*	Betriebs- spannung [V]	Auslenkung [μm] ±20%	Freie Länge [mm]***	Abmessungen L x W x T [mm]	Blockier- kraft [N] ±20%	El. Kapazität [μF] ±20%	Resonanz- frequenz [Hz] ±20%
PL112.10**	0–60 (±30)	±80	12	17,8 x 9,6 x 0,65	2,0	2 x 1,1	> 1000
PL122.10	0–60 (±30)	±250	22	25,0 x 9,6 x 0,65	1,1	2 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

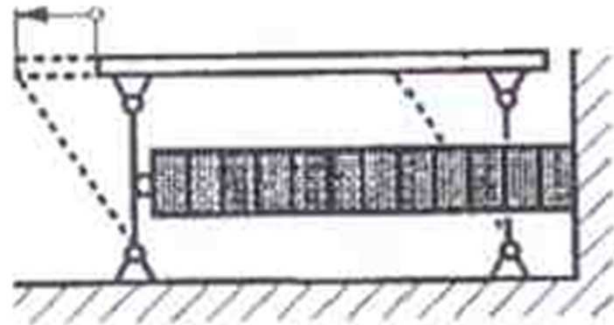
➤ Biegung durch unterschiedliches Kontraktionsverhalten

# Bauformen piezoelektrischer Aktoren

## Hybridaktoren



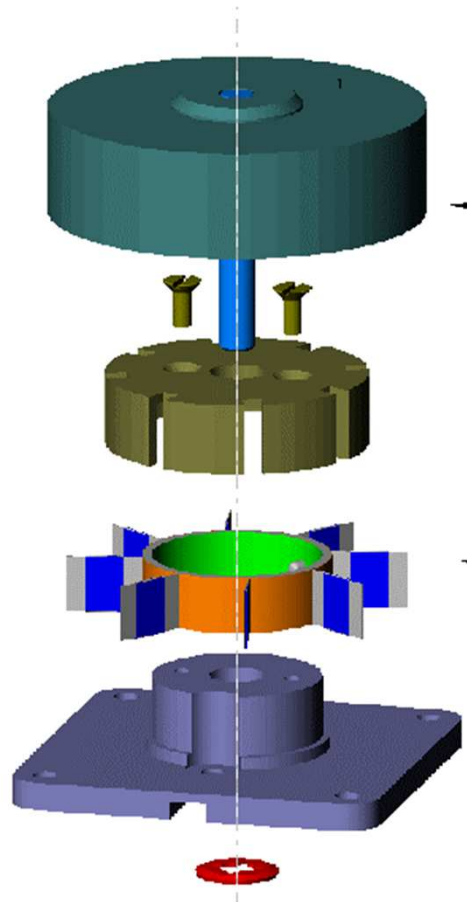
Hebelübersetzung mit  
Stapelbauweise



Hebelübersetzung mit  
integrierter Geradföhrung

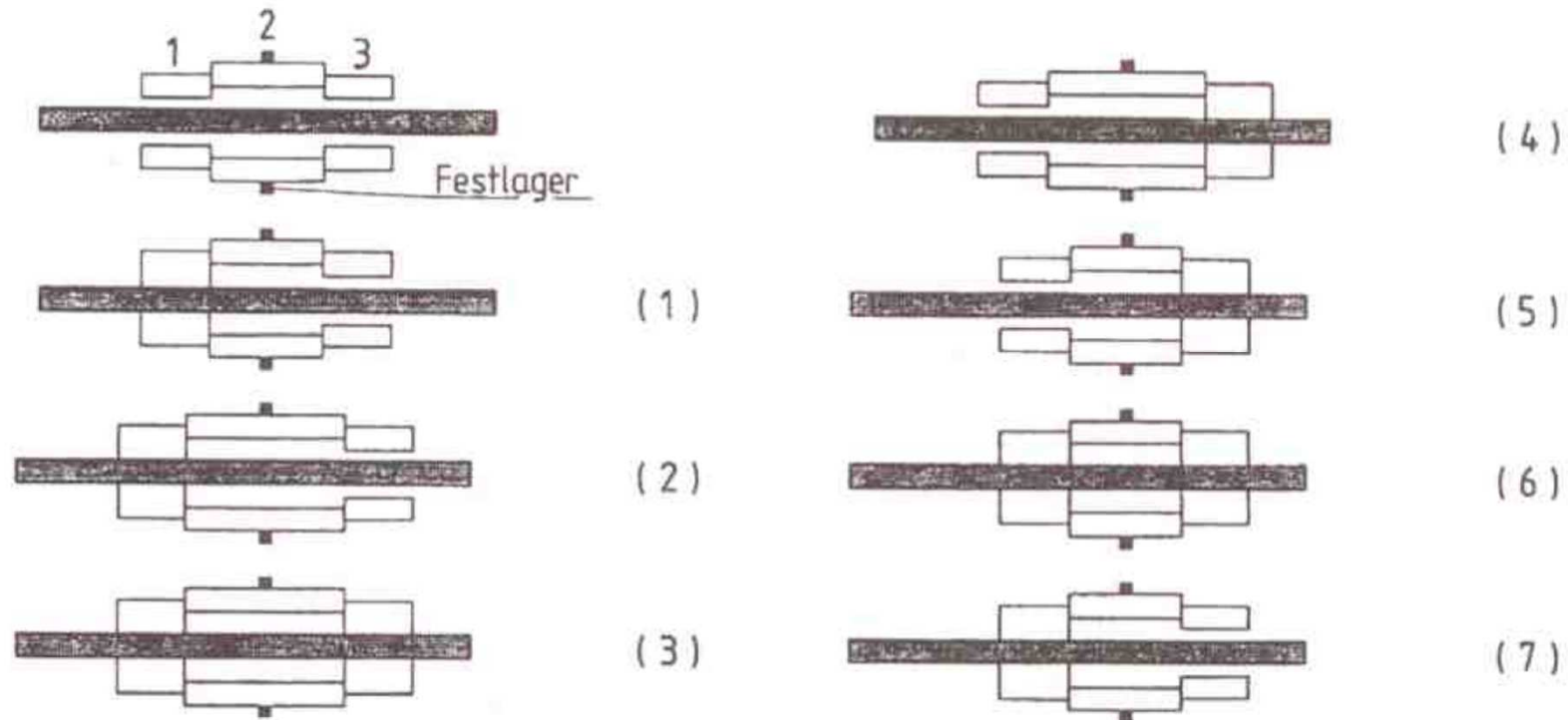
# Anwendungen piezoelektrischer Aktoren

## Ultraschall-Piezo-Drehmotor



# Anwendungen piezoelektrischer Aktoren

## Inch-Worm-Motor



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!**