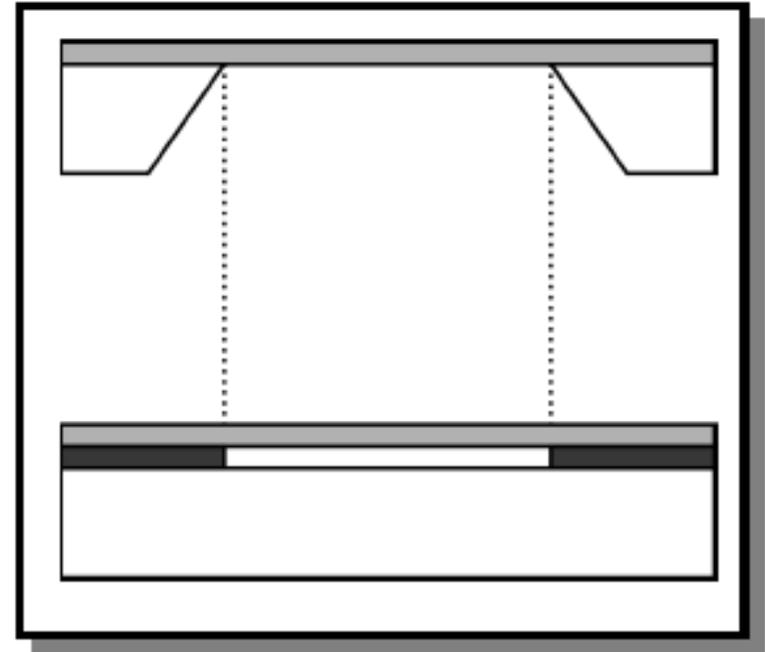


Oberflächenmikromechanik + Wandlerprinzipien

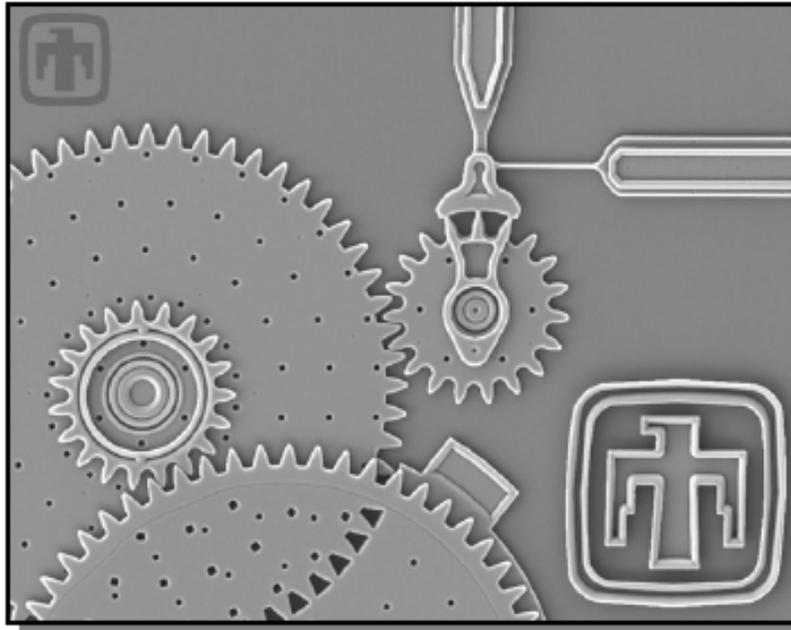
- **Oberflächenmikromechanik**
 - Vergleich zwischen Bulk- und Oberflächenmikromechanik
 - Prozess
 - Opfer- und Funktionsschichten
- **Übersicht zu Wandlerprinzipien**
 - Ladungsträger in Silizium, Dotierung
 - Physikalische Bereiche und Meßgrößen
 - Übersicht zu Wandlerprinzipien

Bulk-Mikromechanik \Leftrightarrow Oberflächenmikromechanik

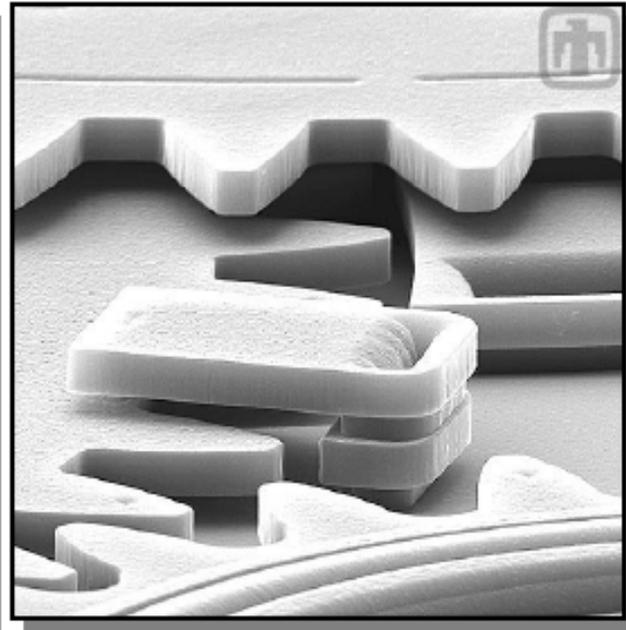
- BULK-Mikromechanik
 - Relevante Strukturen werden aus dem Substrat herausgeätzt
 - Nass- und Trockenätzprozesse werden eingesetzt
- Oberflächenmikromechanik
 - Strukturen werden als Schichten auf dem Wafer aufgebaut (Abscheidung dünner Schichten)
 - Trockenätzprozesse
 - beliebige Formen in Waferenebene, jedoch senkrechte Wände



Beispiel für OMM

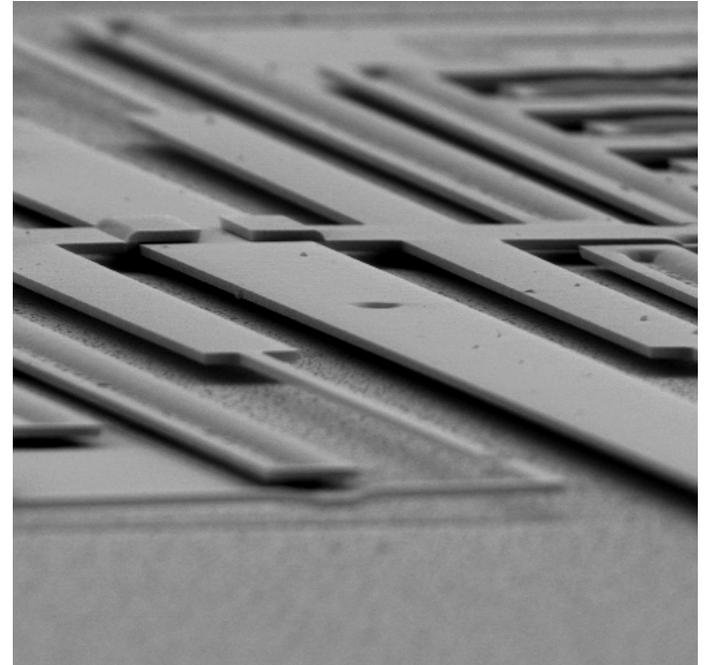
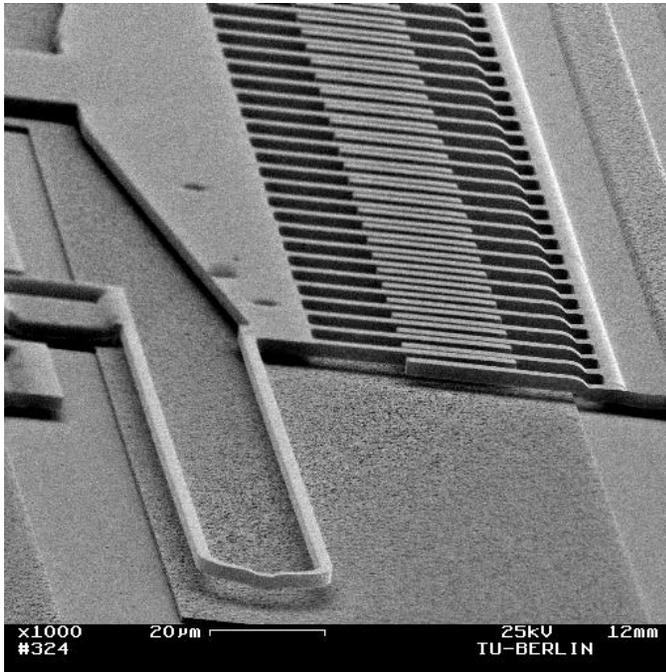


Mikrogetriebe
in OMM



Detailaufnahme des
Mikrogetriebes in OMM
(2 Lagen Funktionsschicht)

Beispiel Beschleunigungssensor



Vergleich

Tabelle 2.8: Vergleich zwischen Bulk- und Oberflächenmikromechanik

Merkmal	Bulk-Mikromechanik	Oberflächenmikro- mechanik
Substrat	Si	Si / beliebig
typ. laterale Strukturgröße	$>10 \mu\text{m}$	$1 - 2 \mu\text{m}$
typ. Strukturtiefe	$>100 \mu\text{m}$	$<10 \mu\text{m}$
Herstellungs- aspekte	Bearbeitung von Vor- und Rückseite; Ätzraten und Strukturform abhängig von Kristallstruktur	Bearbeitung nur von einer Seite; beliebige Strukturformen; mech. Stress in Funktionsschicht kritisch
Anwendungsbeispiele	Drucksensoren, hochempfindliche Beschleunigungssensoren; Düsen	50g Beschleunigungssensoren; Drehratensensoren; Mikromotoren

Quelle: Mescheder: Mikrosystemtechnik

Opferschichttechnologie

Bei freistehenden Komponenten:

- Konstruktion von Membranen, Brücken oder Zungen erfordert gewissen Freiraum zwischen der Komponente und dem Boden
- Opferschichttechnologie

- Zweck der Opferschicht
 - Opferschichten dienen als Distanzschichten
 - tragen die Funktionsschicht
 - definieren den Abstand der Funktionsschicht vom Substrat
 - Kriterien für eine Opferschicht
 - isotrop ätzbar
 - sehr selektiv gegen die Strukturschicht ätzbar
 - Prozesskompatibilität (im Besonderen CMOS-kompatibel).
-

Kombinationsmöglichkeiten

Tabelle 2.9: Kombinationsmöglichkeiten zwischen Opfer- und Funktionsschicht bei der Oberflächenmikromechanik

Funktionsschicht		Opferschicht	
Material	typ. Dicke (μm)	Material	typ. Dicke (μm)
Poly-Silizium	(1 – 10)	Phosphor-silikatglas (PSG)	(1 – 7)
		SiO ₂	2
		poröses Silizium	(1 – 30)
SiO ₂	2	poly-Si	2
TiNi	8	Polyimid	3
		Au	2
NiFe	2	Al	7
W	3	SiO ₂	8

Prozessfolge bei Opferschichttechnologie

1. Abscheiden der Opferschicht

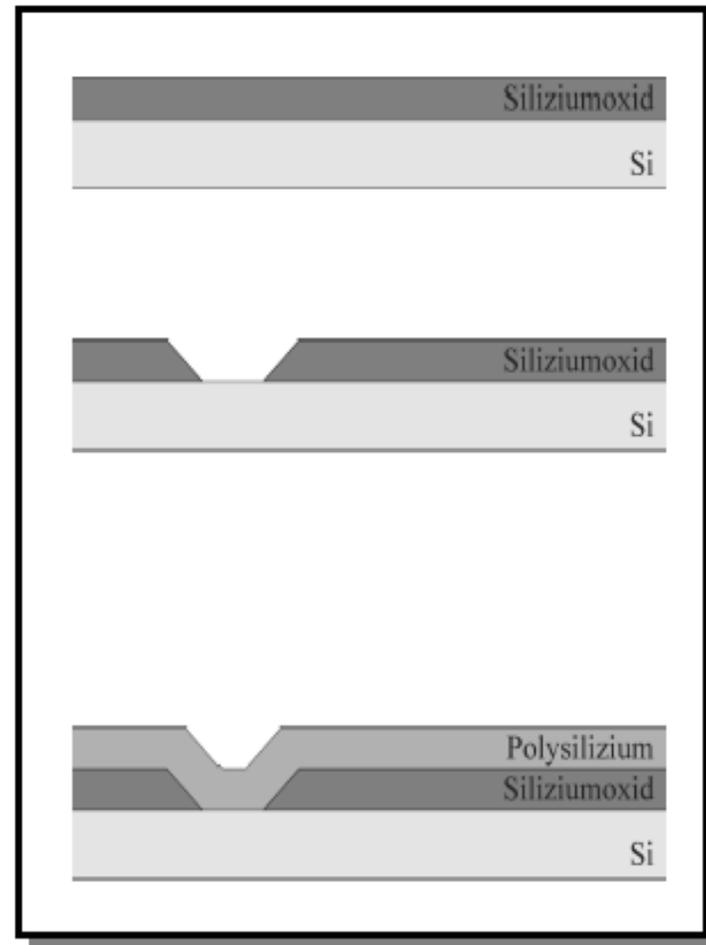
- Prozess je nach Material
- z.B. therm. Oxidation für SiO_2

2. Strukturierung der Opferschicht

- Freilegen der Verankerung zum Substrat
- Strukturierung je nach Anforderung isotrop (nasschemisch mit HF) oder anisotrop (z.B. Trockenätzen)

3. Abscheidung der Strukturschicht

- Prozess je nach Material (z.B. PVD, CVD)
- Opferschicht wird ganzflächig bedeckt



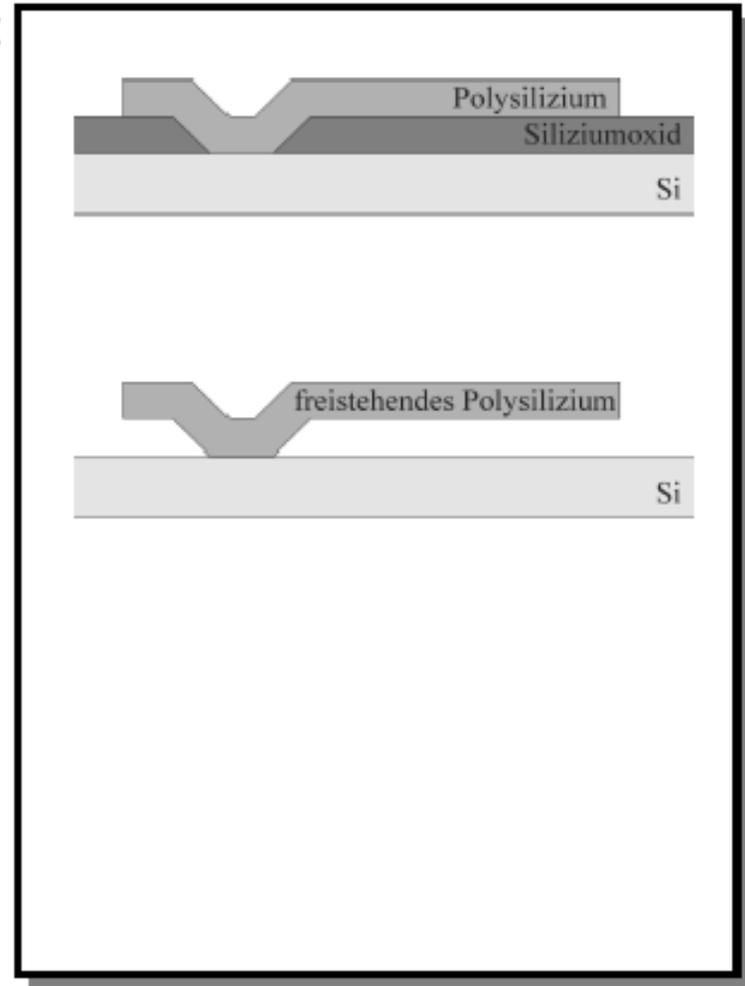
Prozessfolge bei Opferschichttechnologie

4. Strukturierung der Strukturschicht

- Prozess je nach
abgeschiedenen Material
- Ätzstopp an der Opferschicht

5. Entfernen der Opferschicht

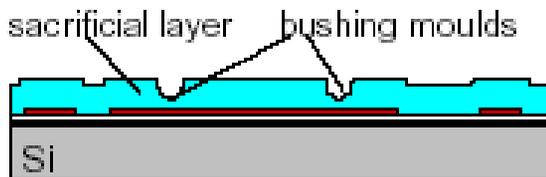
- Selektives & isotropes Ätzen der
Opferschicht
- Selektiv, damit Strukturschicht
nicht angegriffen wird
- Isotrop, damit die Opferschicht
auch unter der Strukturschicht
herausgeholt wird
- Typische Probleme:
 - Sticking
 - Innere Spannungen
 - Selektivität



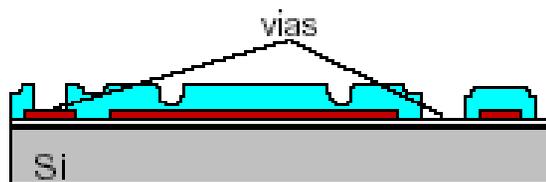
Beispiel: Mikromotor



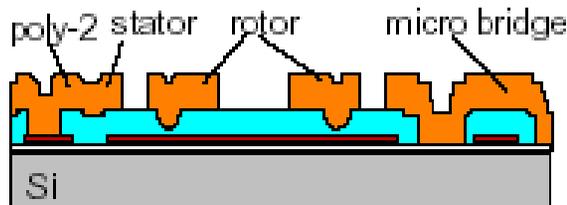
step 1: definition of phase lines by LPCVD-deposition and patterning of polysilicon on an isolating Si_3N_4 layer.



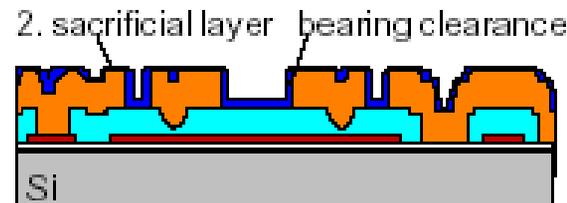
step 2: bushing moulds are patterned by deposition of the first sacrificial layer which is isotropically etched by HF.



step 3: vias are opened by anisotropical etch to contact the second poly layer with poly 1.

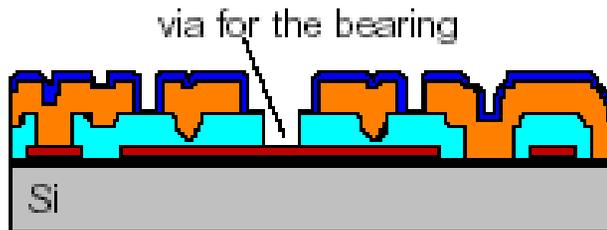


step 4: the rotor and stator are patterned by deposition of the second poly layer which is etched anisotropically in a SF_6 plasma.

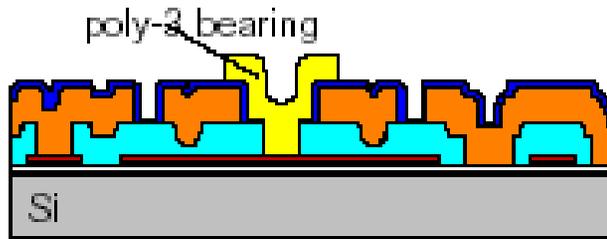


step 5: a thin sacrificial oxide layer is deposited to define the bearing clearance.

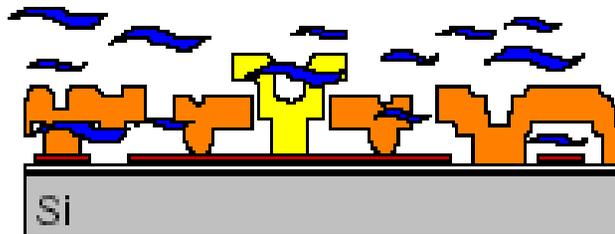
Beispiel: Mikromotor



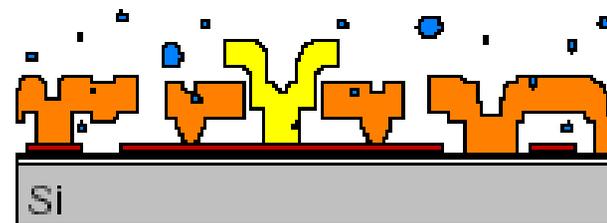
step 6: vias are etched down to poly 1 to connect poly 3 with the phase lines.



step 7: the bearing is realized by patterning a third polysilicon layer.



step 8: removing the sacrificial oxide in HF acid creates the bridges and releases the rotor.



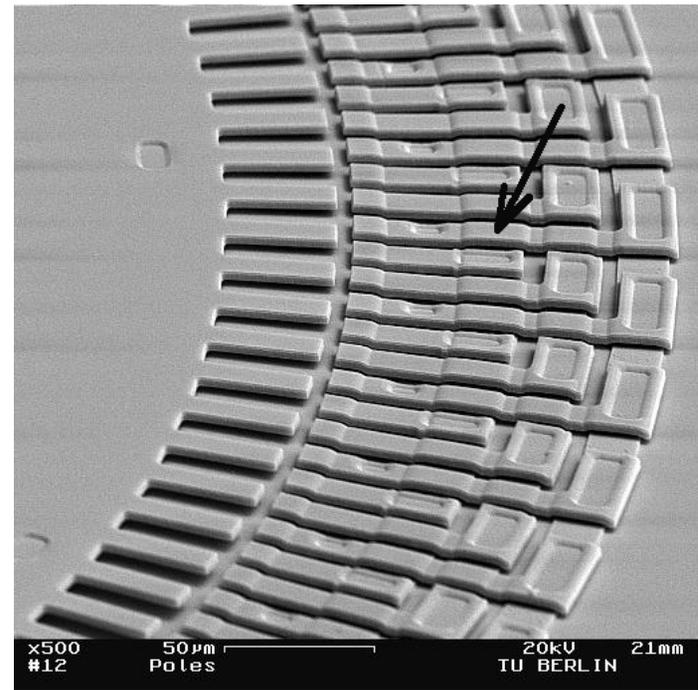
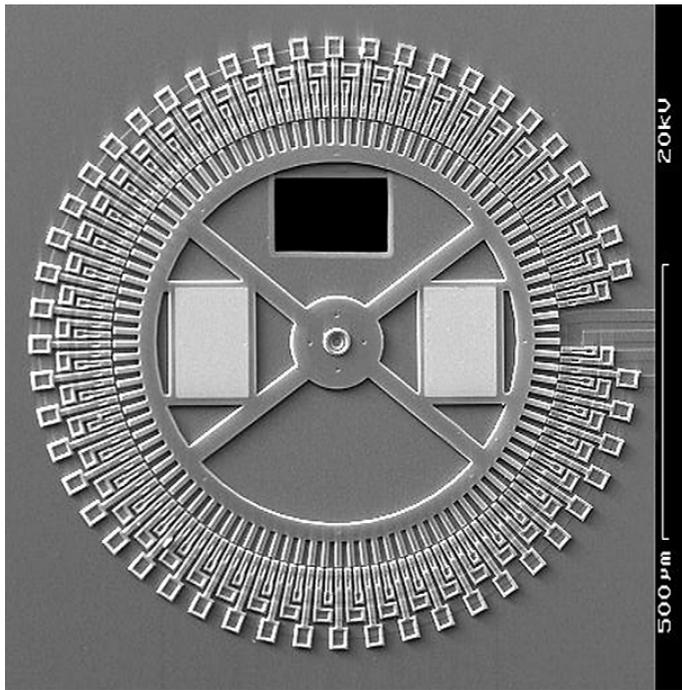
step 9: drying in a sublimation process prevents the micro-structures from sticking to the substrate.

Endergebnis: Mikromotor

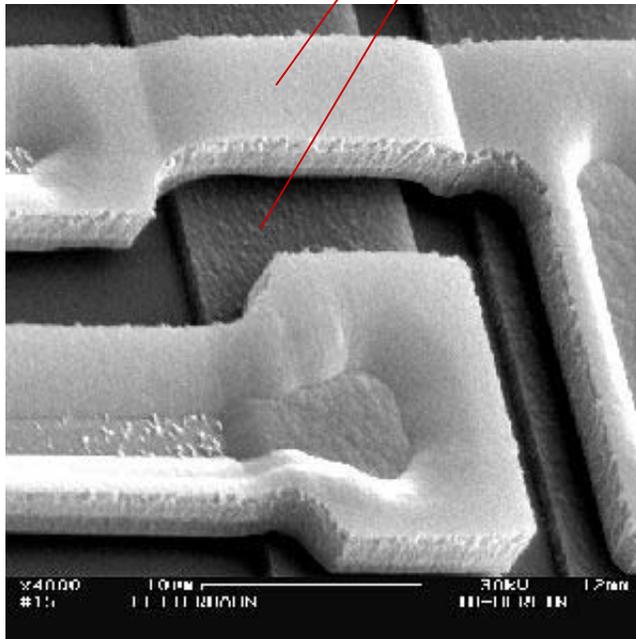
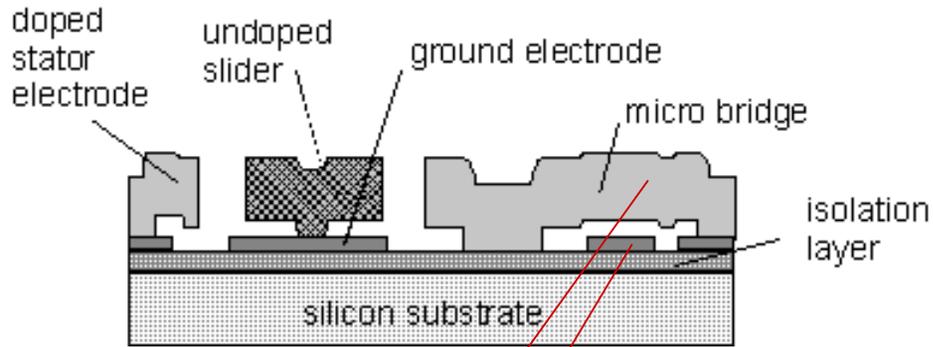
Motordurchmesser: ca. 1 mm

Max. Drehzahl: 200 U/min (bei U=35 Volt)

Dicke des Rotors: 2 μm



Brückenstrukturen beim Mikromotor



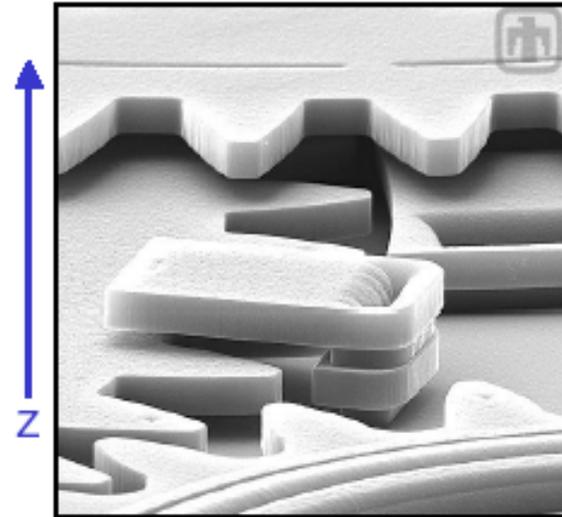
Probleme der OMM (1)

- Entfernung der Opferschicht nur bei kleinen, zusammenhängenden Flächen möglich:
 - Unterätzen erfolgt isotrop, d.h. das Material unter der Funktionsschicht muss durch starkes Unterätzen (entfernt werden)
 - Daraus resultieren lange Ätzzeiten
 - Gute Selektivität des Ätzmediums zur Funktionsschicht notwendig

 - Daraus resultierende Designregel
 - Nur schmale Strukturen verwenden
 - Große Flächen perforieren
 - Unterätzen beginnt auch von den Perforationsöffnungen aus
-

Probleme der OMM (2)

- Geringe Steifigkeit der Strukturen in z-Richtung
 - Ursache: Funktionsschichten nur wenige μm dick
 - Konsequenzen: Strukturen wie z.B. Getriebe weichen bei starker Belastung sehr leicht in z-Richtung aus
- Interne Spannungen
 - Häufig werden Strukturen mit hohem Aspektverhältnis verwendet
 - Z.B. kann Aspektverhältnis (Länge / Breite) bei OMM bis zu 1000 betragen (Biegezugungen 1000 μm lang, 1 μm breit, 4 μm hoch)
 - Strukturen müssen extrem geradlinig sein und parallel zum Substrat verlaufen, damit diese nicht den Boden berühren:



Druckspannung

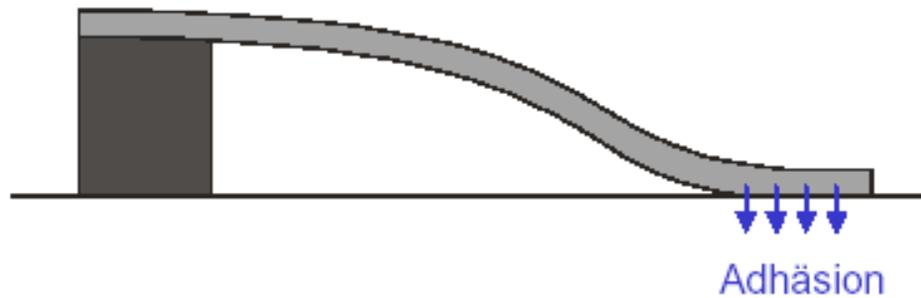


Zugspannung



Probleme der OMM (3)

- Sticking:
 - Berühren bewegliche Strukturen den Boden, bleiben sie teilweise aufgrund von Adhäsionskräften kleben
 - Daraus ergibt sich ein Herstellungsproblem beim nasschemischen Ätzen der Opferschicht → Beim Entfernen des flüssigen Mediums treten immer Kapillarkräfte auf, welche die Strukturen zum Boden ziehen
 - Lösung 1: Einsatz spezieller Trocknungsprozesse
 - Lösung 2: Spacer / Bumper: Prellbock / Puffer-Strukturen



Sticking (Kleben)

- Nach dem nasschemischen Ätzen muss das Substrat mit Wasser oder Isopropanol gespült werden, um die Flusssäure zu entfernen
- Anschließend muss das Substrat getrocknet werden
- Die offenen Bereiche trocknen zuerst und es bleiben Flüssigkeitstropfen im Raum zwischen der Struktur und dem Boden zurück

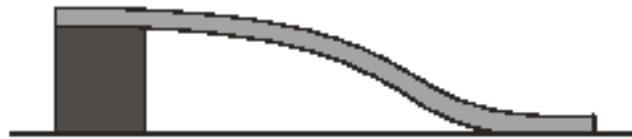


- Während des weiteren Trocknens wird der Tropfen immer kleiner:
→ Die Oberflächenspannung des Tropfens ist groß genug, um die zuvor freigelegten Mikrostrukturen zum Substrat hin zu biegen



Vermeiden des Sticking

- Schmale und lange Strukturen können so mit dem Boden in Kontakt treten
- Wenn Tropfen vollständig verdunstet ist, bleibt Mikrostruktur am Boden kleben (**Sticking**)



- Das Festkleben kann verhindert werden, wenn keine Flüssigkeit zwischen der Struktur und dem Boden verdampfen muss
 - Idee: Beim Trocknen den Phasenübergang von der flüssigen in die gasförmige Phase vermeiden -> **Sublimation**

Sublimation \Leftrightarrow Verdampfen

Verdampfen (Flüssigkeit)



Flüssigkeit benetzt die Probenoberfläche und füllt Spalt zw. Struktur und Boden.



Tropfen wird in 3D kleiner, Adhäsionskräfte ziehen Struktur zu Boden



Nach vollständigen Verdampfen des Lösungsmittels klebt Struktur am Boden

Sublimation (Feststoff)



Flüssigkeit ist erstarrt

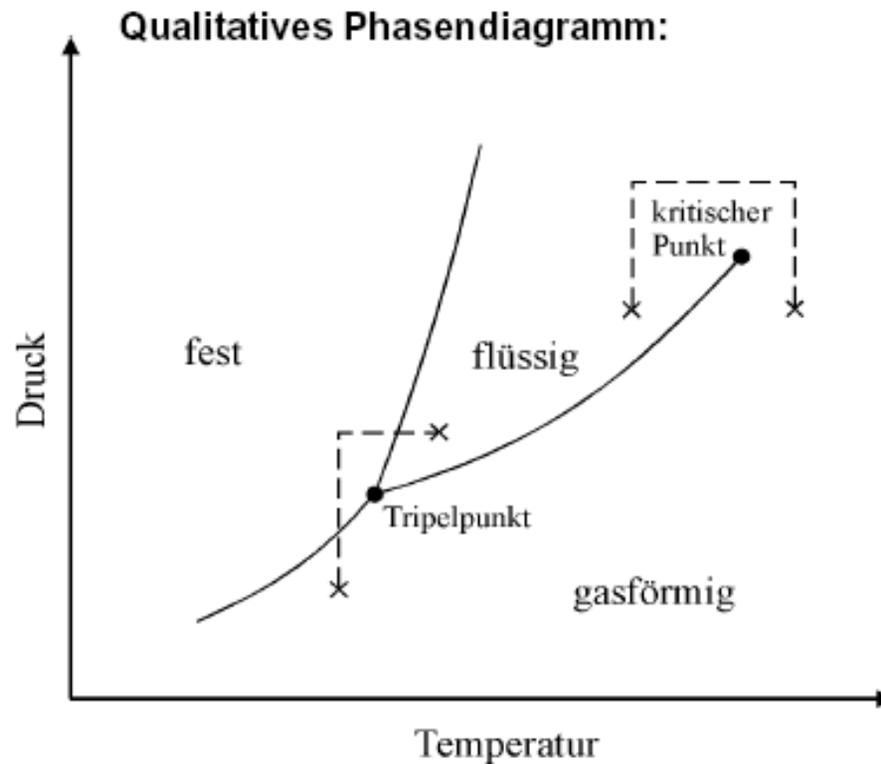


Isotherme Sublimation: Säule wird nur in 2D kleiner \rightarrow Form bleibt erhalten.



Nach vollständiger Sublimation des Feststoffes: freistehende Mikrostruktur, die nicht am Boden klebt.

Maßnahmen gegen Sticking



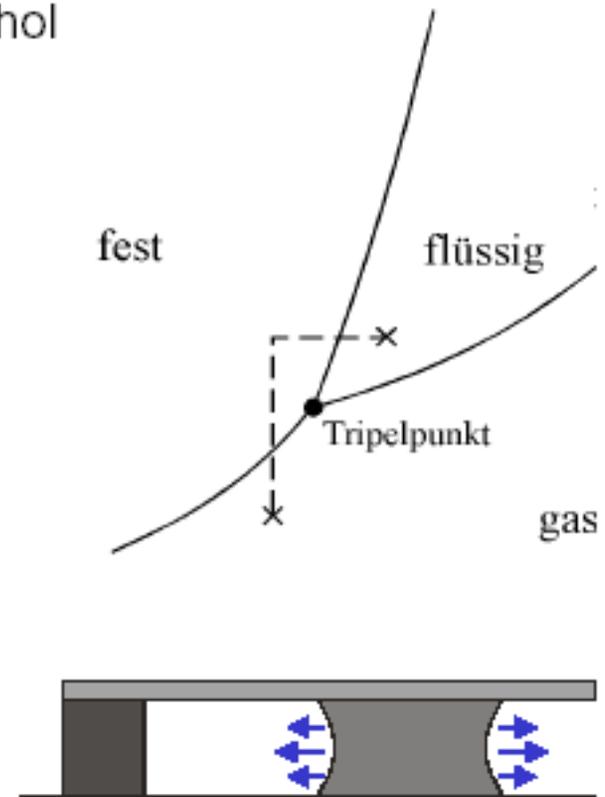
Möglichkeiten, den Übergang von der flüssigen zur gasförmigen Phase zu umgehen:

1. Dichlorbenzolprozess
2. Überkritisches Trocknen (supercritical drying).
3. Veraschen von Photolack im Sauerstoffplasma.

- Weg um den Tripelpunkt z.B. Dichlorbenzol
- Weg um den kritischen Punkt (Überkritisches Trocknen) z.B. CO_2

Dichlorbenzolprozess ($C_6H_4Cl_2$)

- Dichlorbenzol schmilzt bei $60^\circ C$ und ist in Alkohol löslich.
- Prozessablauf zum Entfernen der Flusssäure:
 - Spülen mit deionisiertem Wasser.
 - Spülen mit $70^\circ C$ warmem Isopropanol.
 - Spülen mit $70^\circ C$ warmem Dichlorbenzol.
 - Abkühlen auf Raumtemperatur: → Isobarer Abkühlvorgang überführt das Dichlorbenzol in festen Zustand.
 - Isothermische Sublimation des festen Dichlorbenzols im Vakuum.
- Beim Sublimieren des Festkörpers verkleinert sich eine Säule statt einem Tropfen
 - Tropfen wird in drei Dimensionen kleiner, die Säule jedoch nur in zwei
- Mit dieser Technik können dünne Strukturen von $1000\ \mu m$ Länge hergestellt werden, ohne dass das Problem des Stickings auftritt.



Weitere Sticking-Situationen

Sticking während des Betriebs der Mikrostruktur:

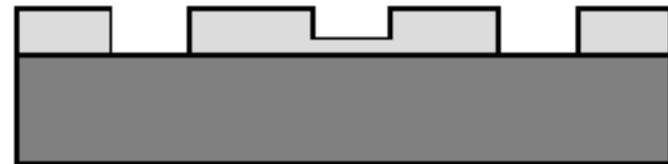
- Berührt eine fertiggestellte Mikrostruktur während des Betriebs aus Versehen den Boden, so kann sie kleben bleiben
 - z. B.: Beschleunigungssensor, der senkrecht zur Detektionsrichtung eine große Beschleunigung (Schlag) erfährt.
- **Abhilfe: Puffer, „Prellböcke“ (bumper)**
 - Ein großflächiger Kontakt zwischen bewegter und stehender Struktur wird vermieden.
 - Die Adhäsionskräfte, die nur in dem Bereich der kleinen Puffer wirken, sind zu klein, um die bewegte Struktur am Boden festzuhalten.

Puffer können sowohl auf der bewegten als auch auf der stehenden Struktur integriert werden

Pufferstrukturen gegen Sticking

Pufferstrukturen im Poly-Silizium (bewegte Struktur):

- Vor Abscheiden des Poly-Si werden in die Opferschicht aus SiO_2 kleine Vertiefungen geätzt
- Die Lage, die Größe und die Anzahl der Vertiefungen wird durch einen zusätzlichen Lithographieschritt festgelegt



Oberflächenmikromechanik + Wandlerprinzipien

- Oberflächenmikromechanik
 - Vergleich zwischen Bulk- und Oberflächenmikromechanik
 - Prozess
 - Opfer- und Funktionsschichten

- **Übersicht zu Wandlerprinzipien**
 - **Ladungsträger in Silizium, Dotierung**
 - Physikalische Bereiche und Meßgrößen
 - Übersicht zu Wandlerprinzipien

Oberflächenmikromechanik + Wandlerprinzipien

- Oberflächenmikromechanik
 - Vergleich zwischen Bulk- und Oberflächenmikromechanik
 - Prozess
 - Opfer- und Funktionsschichten

- **Übersicht zu Wandlerprinzipien**
 - Ladungsträger in Silizium, Dotierung
 - **Physikalische Bereiche und Meßgrößen**
 - **Übersicht zu Wandlerprinzipien**

Wechselwirkungen

Quelle: Tränkle, Obermeier: Sensortechnik

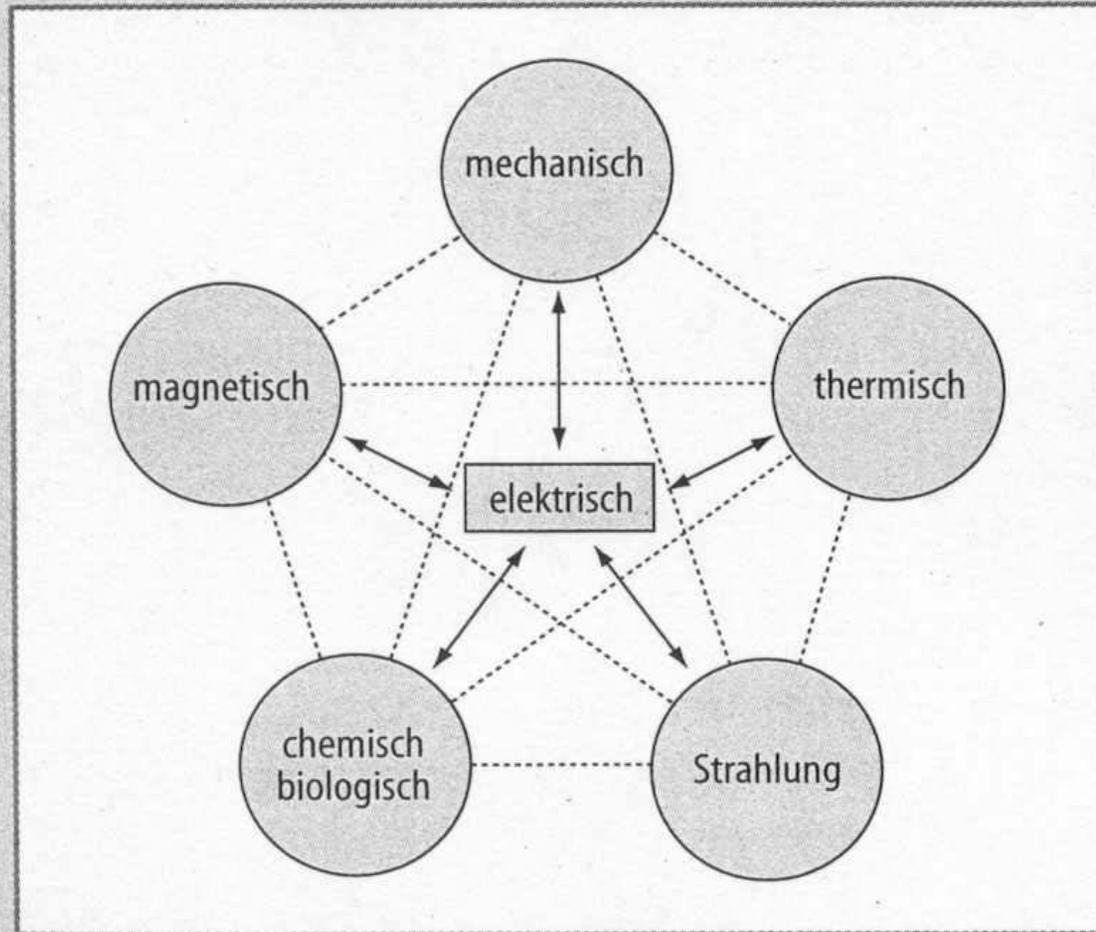


Abb. 3-1 Schematische Darstellung der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bereichen der am häufigsten auftretenden Meßgrößen

Physikalische Bereiche und ausgewählte Meßgrößen

Tabelle 3-1 Physikalische Bereiche und ausgewählte Meßgrößen [4]

Bereich	Typische Meßgrößen
elektrisch	Spannung, Strom, Widerstand, Kapazität, Induktivität, Frequenz, Pulsdauer, Ladung, elektr. Feldstärke, Polarisation, ...
mechanisch	Dehnung, Weg, Winkel, Kraft, Drehmoment, Beschleunigung, Druck, Füllstand, Geschwindigkeit, Drehzahl, Durchfluß, ...
magnetisch	magnetische Feldstärke, Induktion, Magnetisierung, Permeabilität, ...
thermisch	Temperatur, Wärmefluß, spez. Wärmekapazität, Entropie, ...
Strahlung	Temperaturstrahlung, Beleuchtungsstärke, Wellenlänge, Phase, Brechungsindex, Reflektions-, Transmissionskoeffizient, ...
chemisch & biologisch	Konzentration, pH-Wert, Reaktionsgeschwindigkeit, ...

Ausgewählte Wandlerprinzipien und Effekte

Tabelle 3-2 Ausgewählte Effekte zur Umwandlung der nichtelektrischen Meßgröße in elektrische Signale

Bereich	Typische Effekte
mechanisch	piezoelektrischer Effekt, piezoresistiver Effekt, Widerstands- und Kapazitäts-Effekte
magnetisch	Hall-Effekt, Gauß-Effekt, magnetoresistiver Effekt, Wiegend-Effekt, Induktions-Effekte
thermisch	Thermowiderstands-Effekt, thermoelektrischer Effekt, pyroelektrischer Effekt, Temperatureffekte in Halbleitern
Strahlung	Photovoltaischer Effekt, Photowiderstands-Effekt, Photoeffekte in Halbleitern
chemisch & biologisch	gassensitiver Feldeffekt, Volta-Effekt, Leitfähigkeits-Effekte

Sensoreffekte zur Umwandlung mechanischer Größen

- **Piezoelektrischer Effekt**

- mech. Spannung, Dehnung, piezoelektr. Modul
- entspr. Tensoren

- **Piezoresistiver Effekt**

- relative Widerstandsänderungen
 - Querkontraktionszahl
 - K-Faktor (Gauge-Faktor)
 - E-Modul
 - piezoresistive Konstanten
-

Piezoelektrischer Effekt

Elastische Verformung des Kristallgitters → induzierte elektrische Polarisation
(direkter piezoelektrischer Effekt)

Umkehrung:

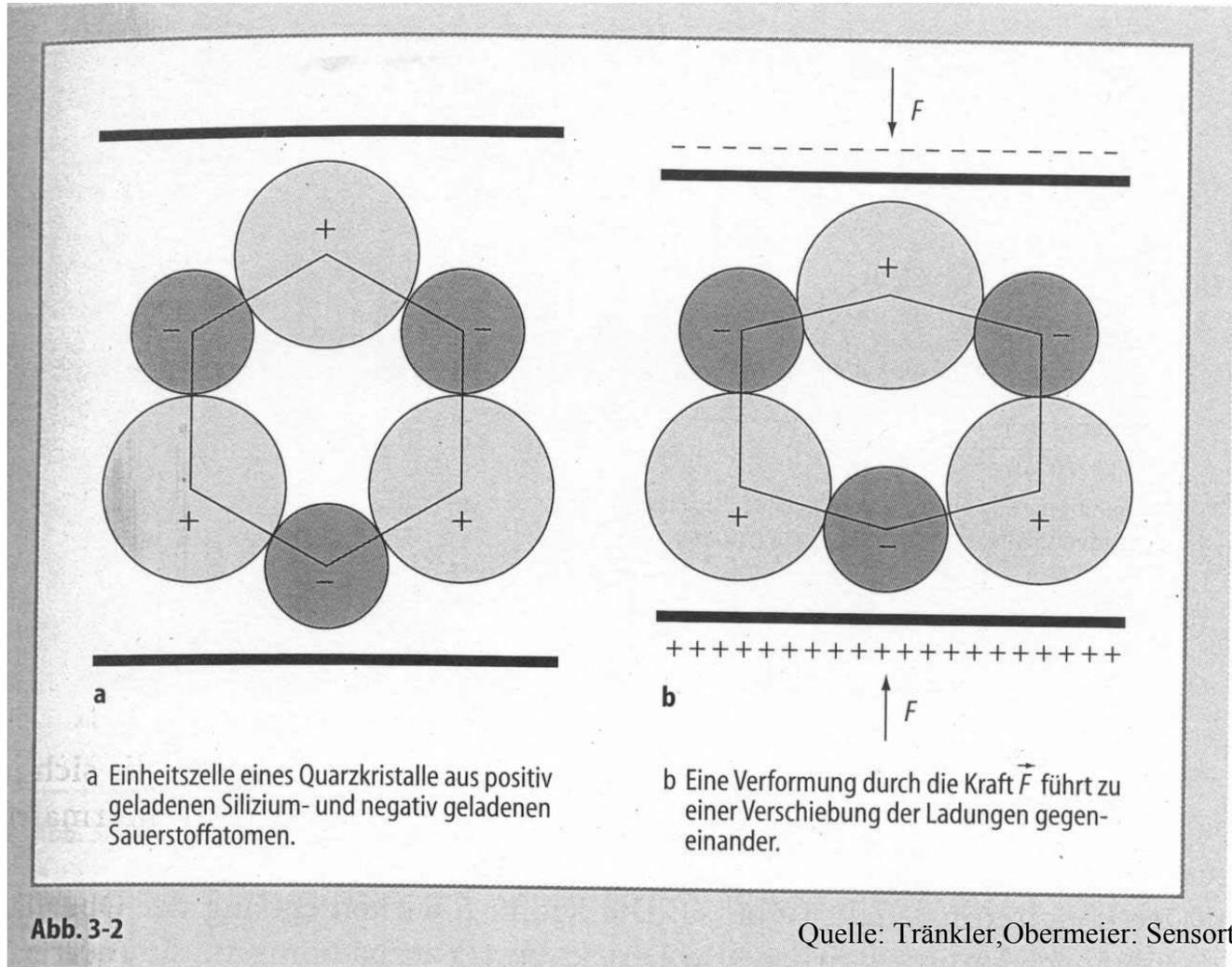
Anlegen eines el. Feldes → elastische mechanische Verformung
(reziproker piezoelektrischer Effekt)

Materialien:

z.B. Quarz, Lithiumniobat, Piezokeramik, ...

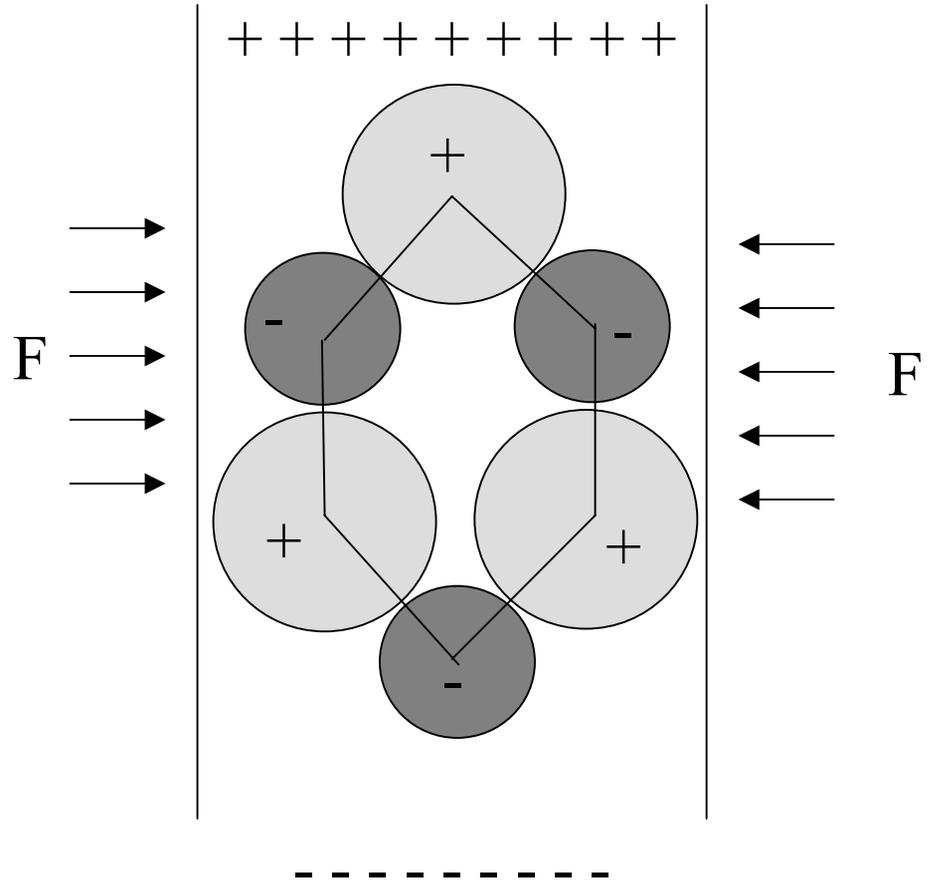
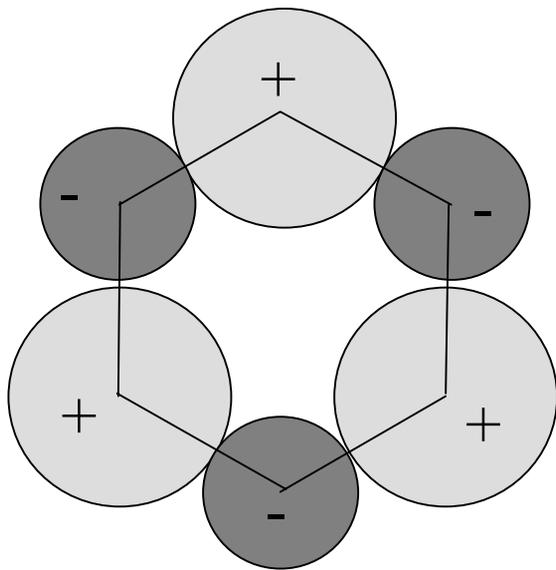
Einheitszelle eines Quarzkristalls

Longitudinaler piezoelektrischer Effekt



Einheitszelle eines Quarzkristalls

Transversaler piezoelektrischer Effekt



Piezoelektrische Effekte

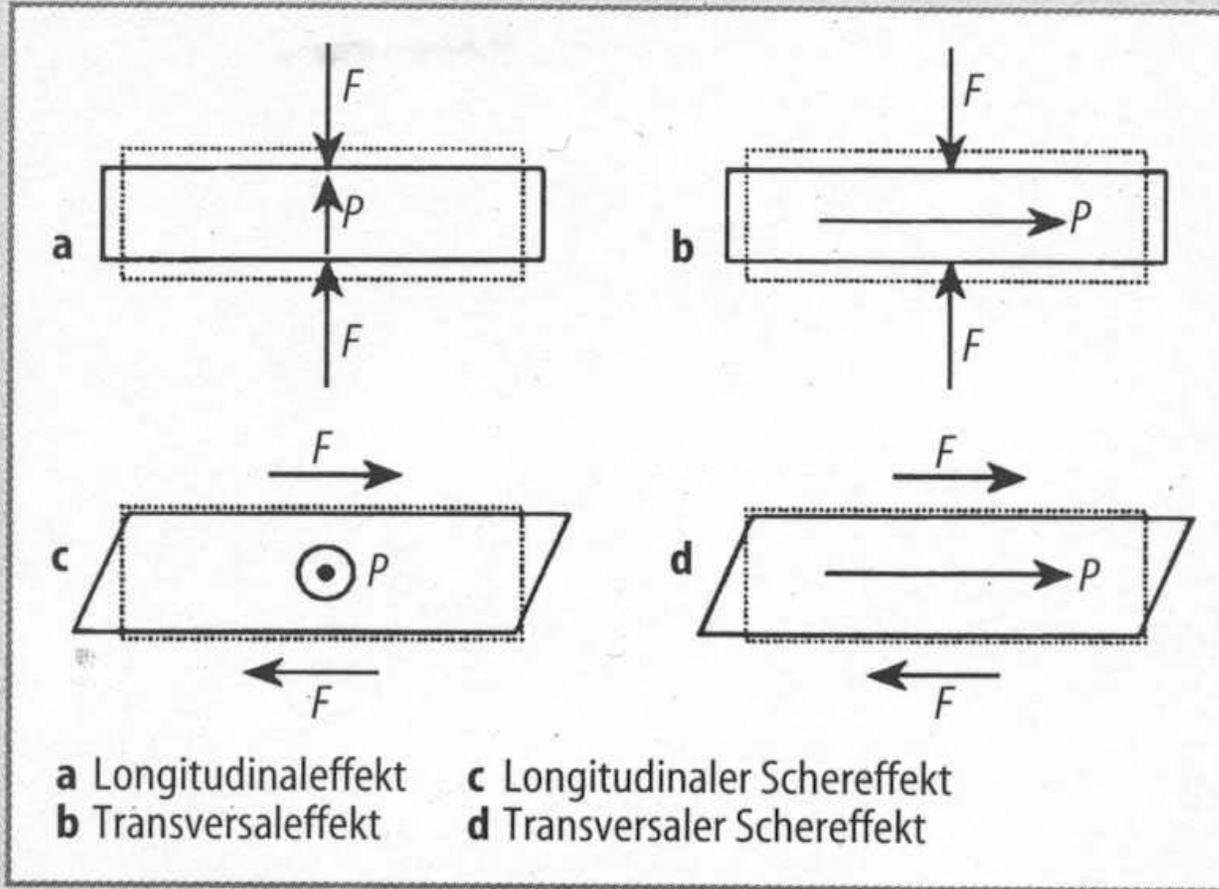
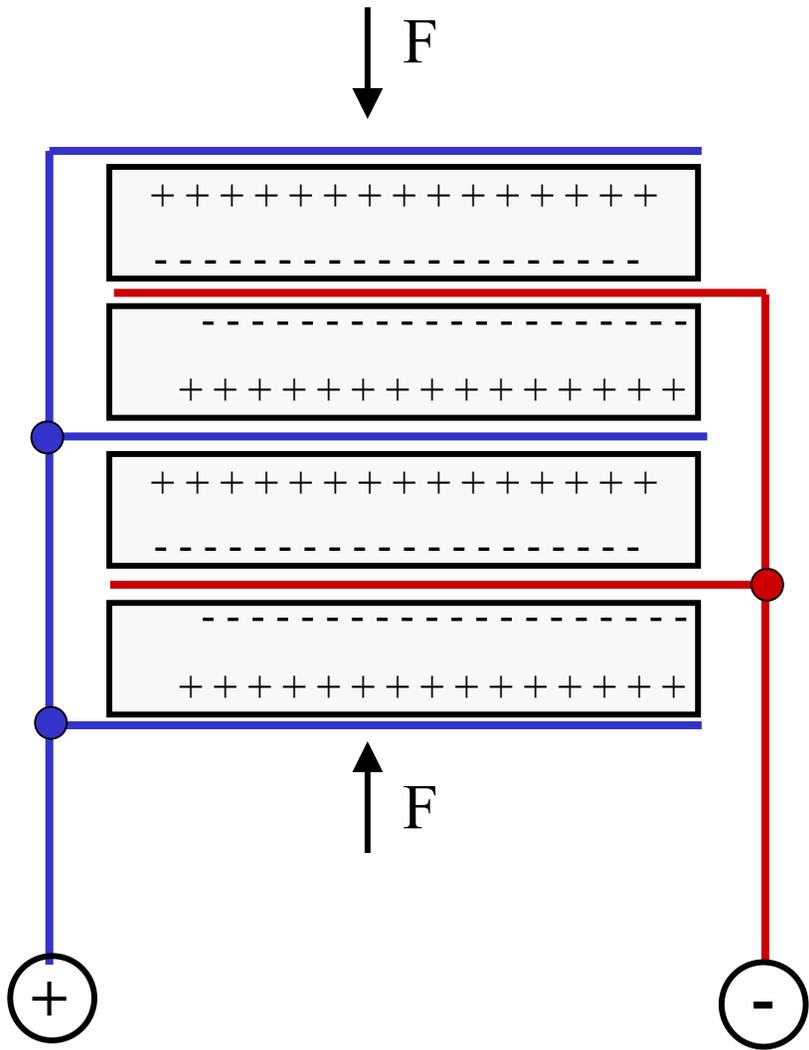


Abb. 3-3 Schematische Darstellung der unterschiedlichen piezoelektrischen Effekte

Typ. Aufbau von piezoelektrischen Kraftsensoren



Kraftänderung

- Änderung der induzierten Oberflächenladungen
- Spannung an angeschlossenen Metallelektroden

Geringste Ströme

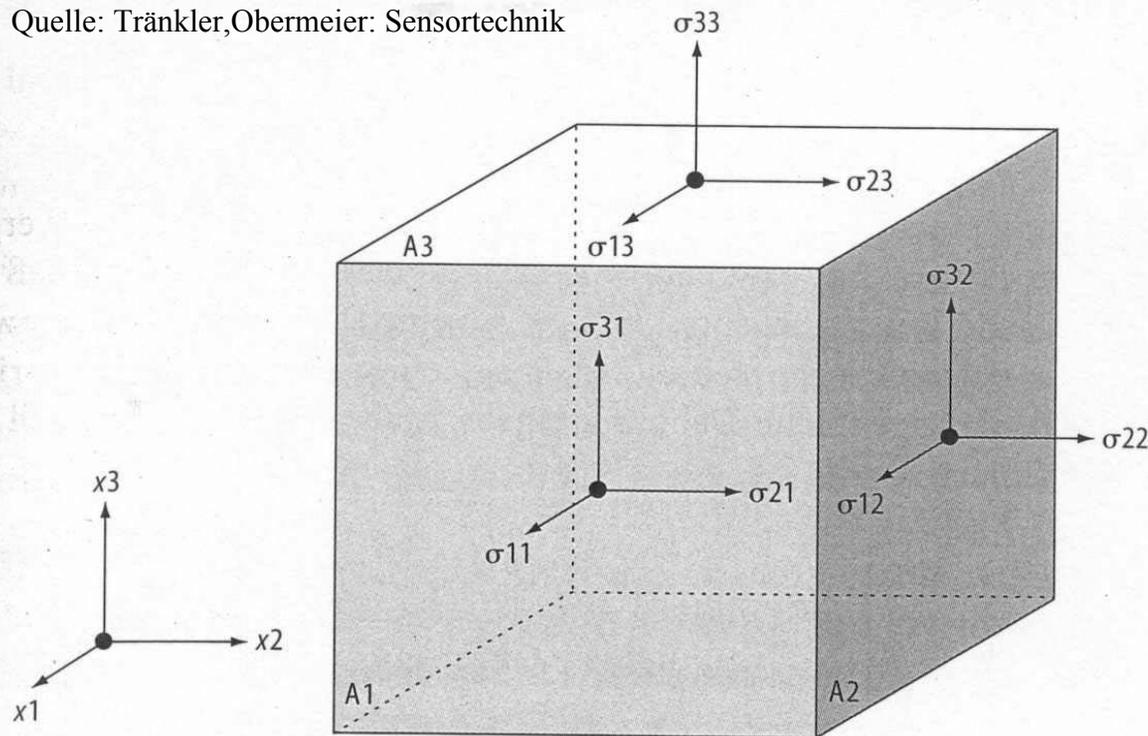
- Abbau der Spannung
- Hochohmige Isolation und Signalverstärkung

→ Vor allem für dynamische Messungen geeignet
(z.B. Änderungen von Kraft, Druck, Beschleunigung)

Mechanische Spannungen

Mech. Spannung = Kraft / Fläche

Quelle: Tränkler, Obermeier: Sensortechnik



Index 1: Krafrichtung

Index 2: Richtung der
Flächennormalen

Abb. 3-4 Mechanische Spannungen, die an einem Quader angreifen

Hooksches Gesetz

Für isotrope Materialien gilt:

• Stauchung/Dehnung: $\sigma = \varepsilon E$

• Querkontraktion: $\nu = \frac{\frac{-\Delta d}{d}}{\frac{\Delta l}{l}} = \frac{-\Delta d}{d} \frac{l}{\Delta l}$

• Scherung: $\tau = \frac{F}{A}$

$$\tau = G \alpha$$

E = Elastizitätsmodul

σ = mech. Spannung (Zug/Druck)

ε = rel. Längenänderung

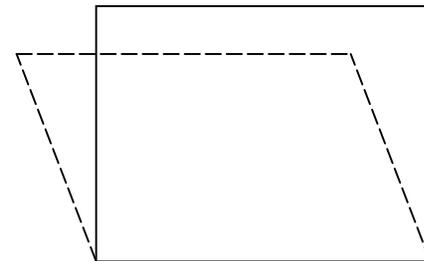
ν = Querkontraktionszahl

$-\Delta d$ = Durchmesserabnahme

τ = Schubspannung

α = Schubwinkel

G = Schubmodul



Hooksches Gesetz

Für anisotrope Materialien gilt: $\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl}$ mit $i, j, k, l = 1, 2, 3$

oder

$\varepsilon_{ij} = s_{ijkl} \sigma_{kl}$ mit $i, j, k, l = 1, 2, 3$

Summation über doppelt vorkommende Indizes !!!

s = Elastizitätskoeffizienten

c = Elastizitätsmoduln

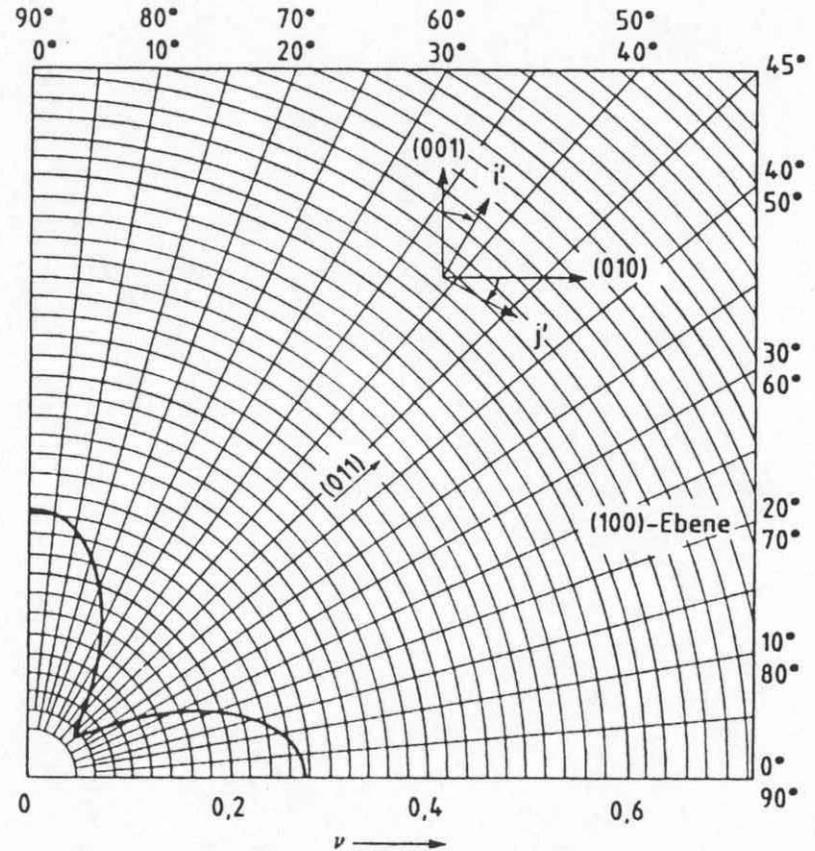
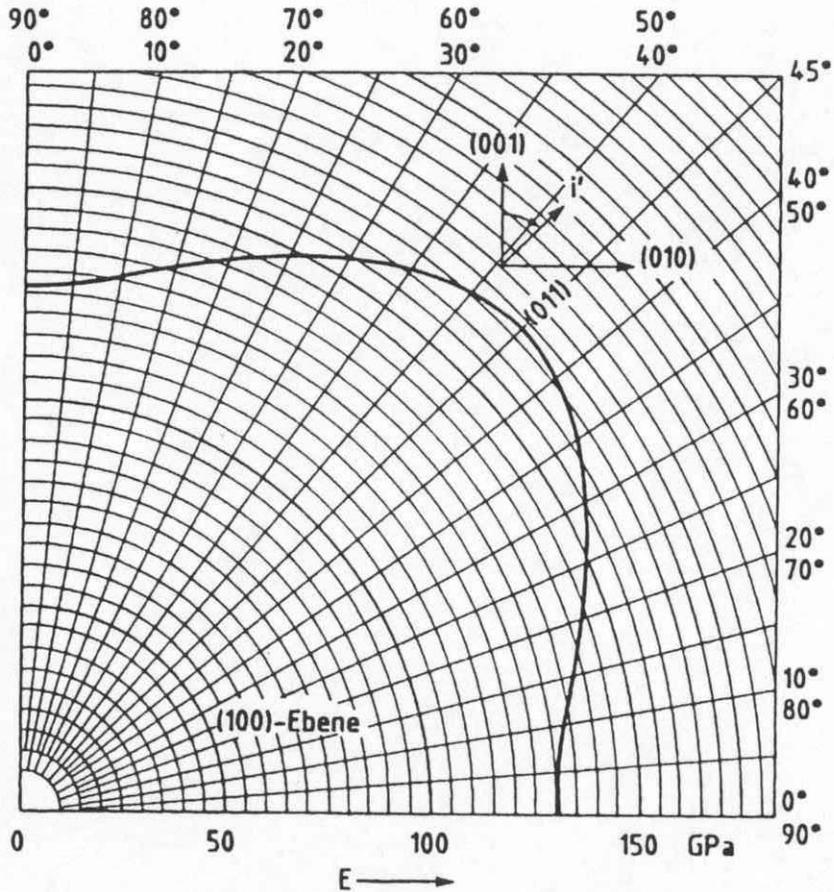
ε, σ = Tensoren 2. Stufe

c, s = Tensoren vierter Stufe

c, s hängen vom gewählten Koordinatensystem ab !!!!

→ Werden meistens für kristalleigenes Koordinatensystem angegeben und müssen dann ins sensoreigene Koordinatensystem transformiert werden

Richtungsabhängigkeit E-Modul und Poissonscher Querkontraktionszahl bezogen auf (100) Ebene



Sensoreffekte zur Umwandlung mechanischer Größen

- **Piezoelektrischer Effekt**
 - mech. Spannung, Dehnung, piezoelektr. Modul
 - entspr. Tensoren

 - **Piezoresistiver Effekt**
 - relative Widerstandsänderungen
 - Querkontraktionszahl
 - K-Faktor (Gauge-Faktor)
 - E-Modul
 - piezoresistive Konstanten
-

Dehnungsmessstreifen

- **Effekt:** Stauchen oder Strecken des Widerstands führt zu Widerstandsänderung
 - Geeignet für mechanische Sensoren mit Verformungskörper (Dehnung oder Stauchung)
 - Folien-DMS werden auf Verformungskörper aufgeklebt
 - Rel. Widerstandsänderung meist $< 10^{-3}$
bei Streckung $< 0,1\%$ (elastischer Bereich)
 - Metall hat geringen spez. Widerstand \rightarrow Widerstände oft als Mäander zur Erhöhung des Widerstands (z.B. Standardwert 350 Ohm)
 - Herstellung in Dünnschicht (Sputtern) oder Dickschicht (Siebdruck)
 - Auswertung der Widerstandsänderung in Wheatstonscher Brückenschaltung
-

Herleitung des K-Faktors

$$R = \rho \cdot \frac{l}{b \cdot d}$$

$$dR = \frac{\rho}{bd} dl - \frac{\rho l}{b^2 d} db - \frac{\rho l}{bd^2} dd + \frac{l}{bd} d\rho$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{db}{b} - \frac{dd}{d} + \frac{d\rho}{\rho}$$

$$V = l \cdot b \cdot d$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} + \frac{db}{b} + \frac{dd}{d} = \varepsilon + \frac{db}{b} + \frac{dd}{d} \longrightarrow \varepsilon - \frac{dV}{V} = \frac{-db}{b} - \frac{dd}{d}$$

$\varepsilon =$ relative Längenänderung

Herleitung des K-Faktors

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon + \varepsilon - \frac{dV}{V} + \frac{d\rho}{\rho} = \frac{d\rho}{\rho} + 2\varepsilon - \frac{dV}{V}$$

$$\rho = \frac{1}{n \cdot q \cdot \mu} = \frac{V}{N \cdot q \cdot \mu}$$

n = Ladungsträgerdichte
N = Zahl der Ladungsträger
q = Ladung des Ladungsträgers
μ = Beweglichkeit

$$d\rho = \frac{-V}{N^2 q \mu} dN - \frac{V}{N q^2 \mu} dq - \frac{V}{N q \mu^2} d\mu + \frac{dV}{N q \mu}$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dN}{N} - \frac{d\mu}{\mu} + \frac{dV}{V}$$

Herleitung des K-Faktors

$$\begin{aligned}\frac{dR}{R} &= -\frac{dN}{N} - \frac{d\mu}{\mu} + \frac{dV}{V} + 2\varepsilon - \frac{dV}{V} = 2\varepsilon - \frac{dN}{N} - \frac{d\mu}{\mu} \\ &= \varepsilon \cdot \left[2 - \frac{dN}{\varepsilon N} - \frac{d\mu}{\varepsilon \mu} \right] =: K \cdot \varepsilon\end{aligned}$$

Metallische DMS → Geometrie-Effekt ist entscheidend ($K \approx 2$)

Silizium-DMS → Änderung der Leitfähigkeit ist bestimmend ($K \gg 2$)

Piezoresistiver Effekt bei Silizium

Ohmsches Gesetz für Kristalle:

$$\vec{E} = \bar{\rho} * \vec{j}$$

d.h.

$$E_l = \rho_{lk} j_k \quad (k, l = 1, 2, 3)$$

- ohne mech. Spannungen gilt im kubischen Kristall (isotrop):

$$\bar{\rho}_0 = \begin{pmatrix} \rho_0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_0 \end{pmatrix}$$

- wirkt mech. Spannung so gilt:

$$\bar{\rho} = \bar{\rho}_0 + \overline{\Delta\rho} \quad (\text{anisotropes Verhalten})$$

Dabei gilt:

$$\frac{\Delta\rho_{ij}}{\rho_0} = \pi_{ijkl} \sigma_{kl} \quad \text{mit } i, j, k, l = 1, 2, 3$$

Piezoresistiver Effekt bei Silizium

Im kristalleigenen System hat π bei einem kubischen Kristall nur noch 3 unabhängige Komponenten, $\Delta\rho$ und σ nur noch je 6.

→ Übergang zu Matrixschreibweise:

$$\frac{\Delta\rho_i}{\rho_0} = \pi_{ij} \sigma_j \quad , (i, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$$

Bei σ und $\Delta\rho$ ändert sich dabei die Indizierung wie folgt:

11	22	33	23	13	12
↓	↓	↓	↓	↓	↓
1	2	3	4	5	6

Piezoresistiver Effekt bei Silizium

Für das *kristalleigene Koordinatensystem* hat die Matrix π' die Form:

$$\pi' = \begin{pmatrix} \pi'_{11} & \pi'_{12} & \pi'_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi'_{12} & \pi'_{11} & \pi'_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi'_{12} & \pi'_{12} & \pi'_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi'_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi'_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi'_{44} \end{pmatrix}$$
$$\pi'_{11} = 66 \mu\text{m}^2/\text{N}$$
$$\pi'_{12} = -11 \mu\text{m}^2/\text{N}$$
$$\pi'_{44} = 1381 \mu\text{m}^2/\text{N}$$

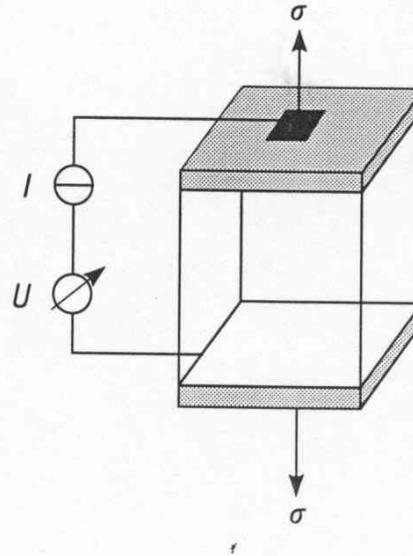
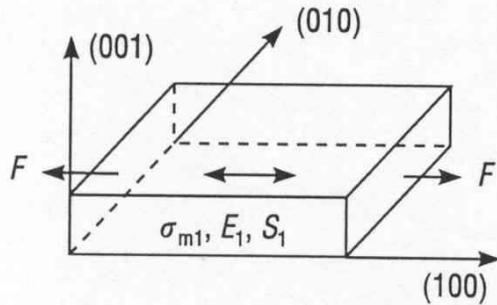
Die Komponenten haben keine direkte physikalische Bedeutung mehr.
Dies ist nur bei der Tensordarstellung der Fall !!!

Piezoresistiver Effekt bei Silizium

Bei Verwendung des Sensoreigenen Koordinatensystems müssen die piezoresistiven Komponenten **in der Tensorschreibweise** ins neue Koordinatensystem transformiert werden (nicht die Matrixschreibweise verwenden). Erst **nach** der Koordinatentransformation darf wieder zur Matrixschreibweise übergegangen werden.

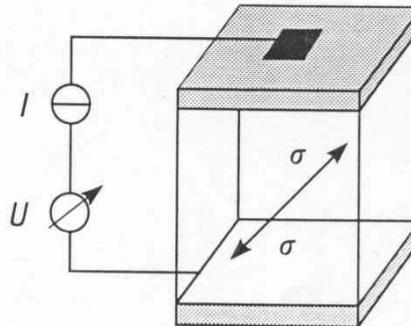
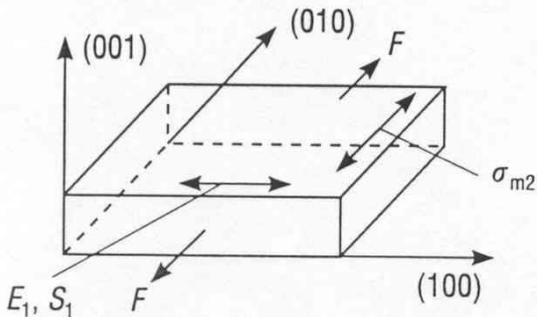
Piezowiderstandseffekt entlang Normalen & Meßanordnung

Longitudinaleffekt: Strom und mech. Normalspannung parallel



$$\pi_{11} = \pi_{\text{long}}$$

Transversaleffekt: Strom und mech. Normalspannung senkrecht zueinander



$$\pi_{12} = \pi_{\text{trans}}$$

Piezoresistive Koeffizienten und Dotierung

	Störstellenkonzentration (cm^{-3})	spezifischer Widerstand ($\Omega \text{ cm}$)	piezoresistive Koeffizienten ($10^{-11} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$)		
			Π_{11}	Π_{12}	Π_{44}
p-Silizium	$1,8 \cdot 10^{14}$	7,8	6,6	-1,1	138,1
n-Silizium	$6 \cdot 10^{14}$	11,7	-102,2	53,4	-13,6

(Eller, Mikroelektronik)

Gilt für ein Koordinatensystem, welches durch die drei Einheitsvektoren des Kristalls aufgespannt ist

Piezowiderstandskoeffizienten unterschiedlicher Materialien

Tabelle 3-3 Piezowiderstandskoeffizienten unterschiedlicher Materialien [10]

Material	ρ (Ωcm)	π_{11} ($10^{-7}\text{cm}^2/\text{N}$)	π_{12} ($10^{-7}\text{cm}^2/\text{N}$)	π_{14} ($10^{-7}\text{cm}^2/\text{N}$)
<i>n</i> -Si	11	-102,2	53,4	-13,6
<i>p</i> -Si	8	6,6	-1,1	138,1
<i>n</i> -Ge	1,5	-2,3	-3,2	-138
<i>p</i> -Ge	1,1	-3,7	3,2	96,7
<i>n</i> -GaAs	0,005	-3,2	-5,4	-2,5
<i>p</i> -GaAs	0,004	-12	-0,6	46
<i>n</i> -InSb	0,002	-81,6	-114,2	33

Piezoresistive Koeffizienten

n-Si

Oberfläche	$\pi_L [10^{-11} \text{ Pa}^{-1}]$	$\pi_T [10^{-11} \text{ Pa}^{-1}]$	k_L	k_T
(100)	-31.2	-17.6	-52.7	-29.7
(110)	-102.2	53.4	-132.9	90.2
(110)	-7.5	6.06	-14.1	10.4
(111)	-31.2	29.7	-52.7	50.19

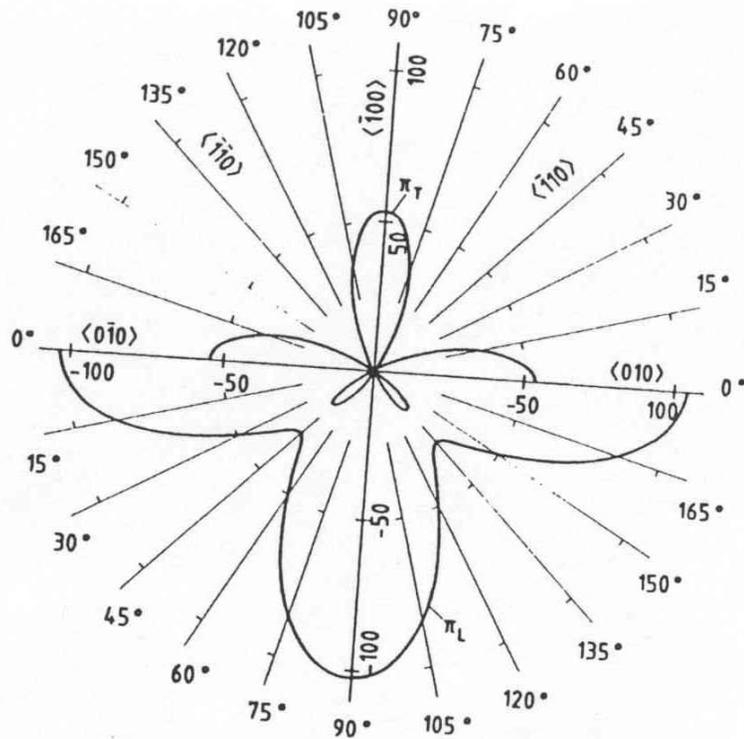
p-Si

Oberfläche	$\pi_L [10^{-11} \text{ Pa}^{-1}]$	$\pi_T [10^{-11} \text{ Pa}^{-1}]$	k_L	k_T
(100)	71.8	-66.3	121.3	-112.1
(110)	6.6	-1.1	8.58	-1.9
(110)	93.5	-44.6	175.8	-75.8
(111)	71.8	22.8	121.3	38.5

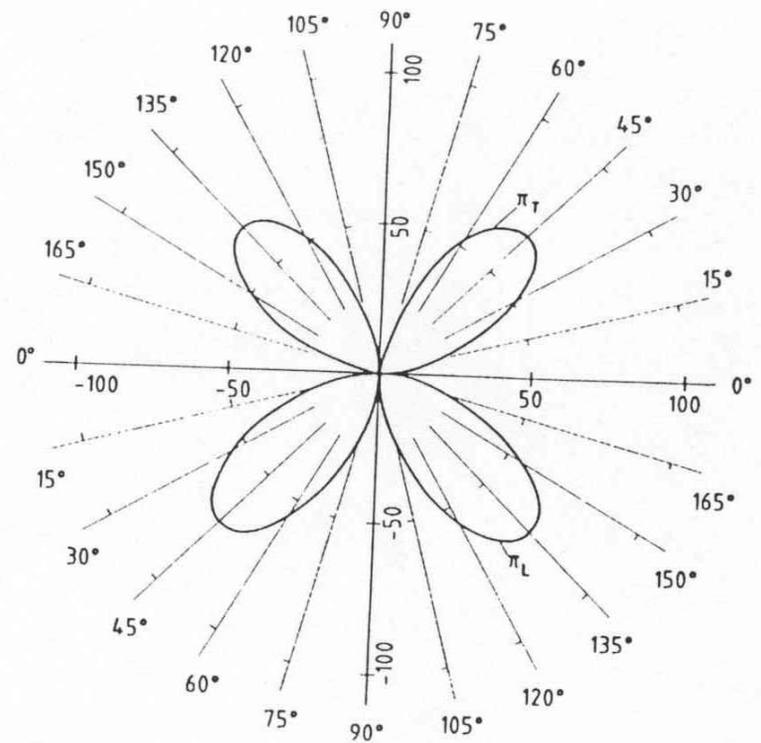
Stromrichtung in [110]

→ p-Silizium in (100)-Silizium gut geeignet für Wheatstone Brücke

Piezoresistive Koeffizienten in der (001) Ebene

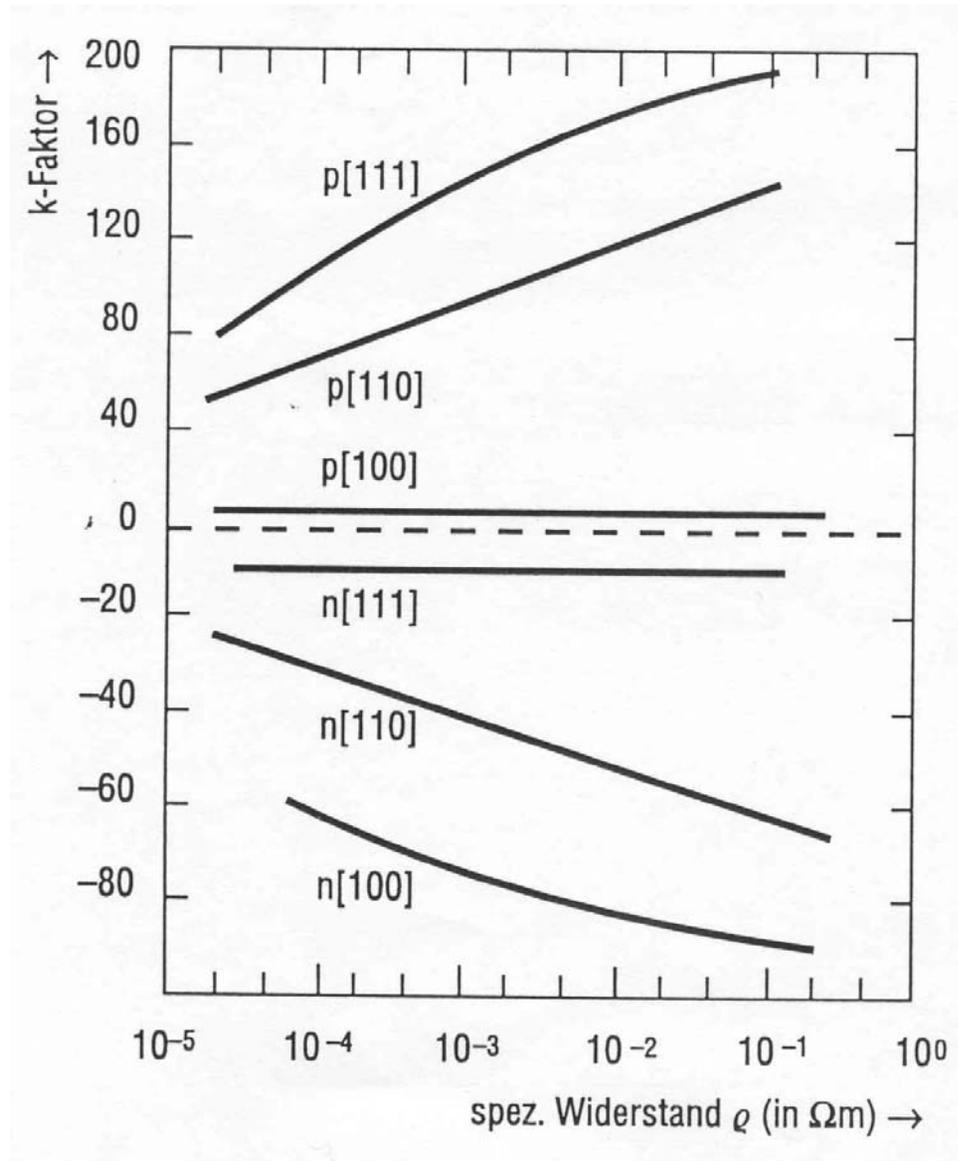


n-Si

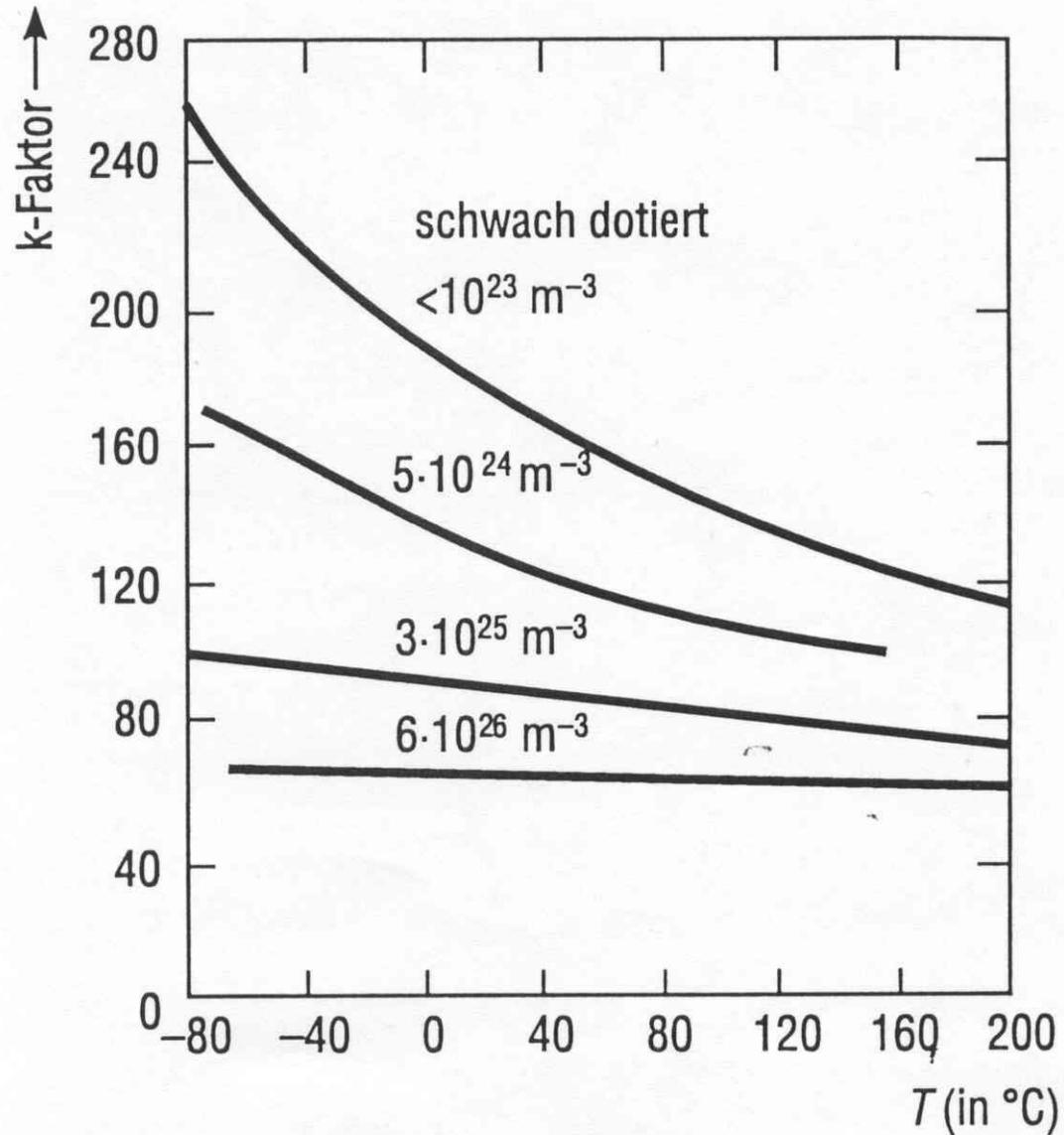


p-Si

K-Faktor und spezifischer Widerstand



K-Faktor und Temperatur



Temperaturabhängigkeit der piezoresistiven Koeffizienten

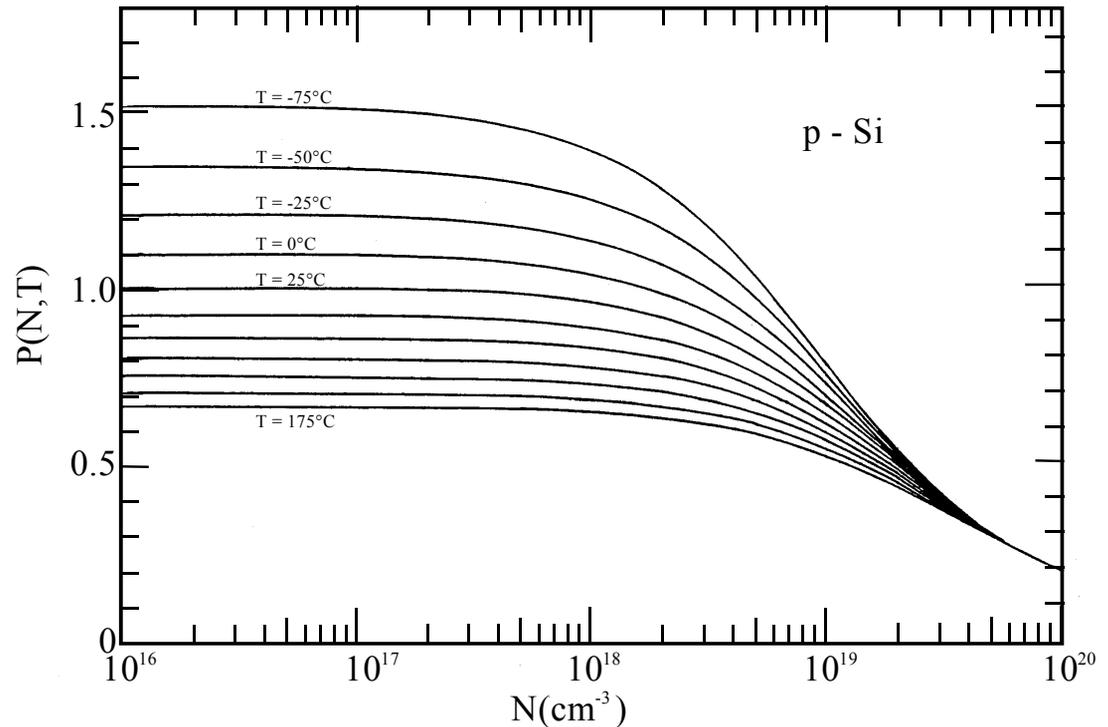
Für p-Silizium mit einem spezifischen Widerstand von $\rho_0 = 7,8 \Omega\text{cm}$, bei einer Temperatur von $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$, gilt:

$$\begin{array}{ll} \pi_{11} = 718 & \mu\text{m}^2/\text{N}, \\ \pi_{12} = -663 & \mu\text{m}^2/\text{N}, \\ \pi_{13} = -11 & \mu\text{m}^2/\text{N}, \end{array}$$

Obige

Piezoresistive
Koeffizienten

multiplizieren mit $P(\text{N},\text{T})$



Ende
