

Wandler-Prinzipien

Input: physikalische Grösse
Output: elektrisches Signal

Thermoelektrischer Effekt

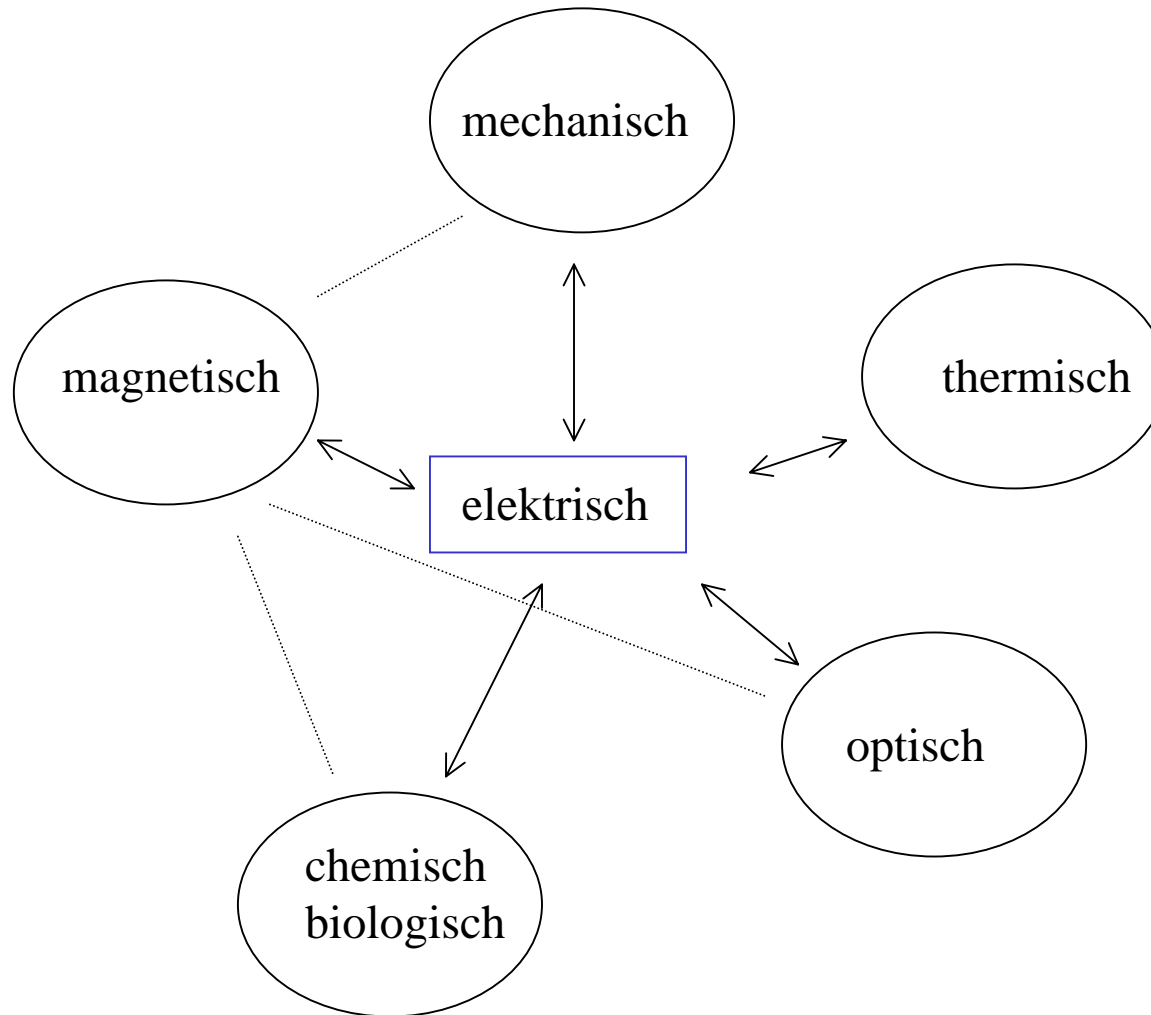
Photoelektrischer Effekt

Piezoelektrischer Effekt

Pockels-Effekt / Kerr-Effekt

Hall-Effekt / Gauss-Effekt

Wechselwirkungen



Ausgewählte Meßgrößen und Messprinzipien

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

Bereich	Typische Meßgrößen
elektrisch	Spannung, Strom, Widerstand, Kapazität, Induktivität, Frequenz, Pulsdauer, Ladung, elektr. Feldstärke, Polarisierung, ...
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, ...

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

Thermische Mikrosensoren

1. Halbleitersensoren

1.1. Thermistoren (T-abhängige halbleitende Widerstände aus Metalloxidpulvern)

Genauigkeit: 1 K, Grösse: 100 μm

herstellbar durch Dickschichttechnik, Pressen oder Sintern

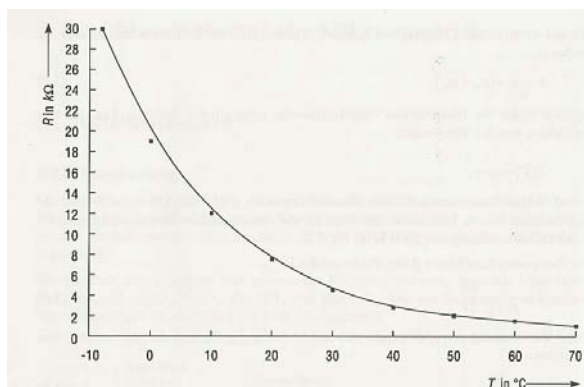
$$R(T) = A \exp(B/T)$$

A: Materialkonstante in Ω

B: Thermistorkonstante z.B. 3600 K

β : Temperaturkoeffizient bis -6%/K

$$\beta = -B/T^2$$



1.2. Silizium-Thermosensoren

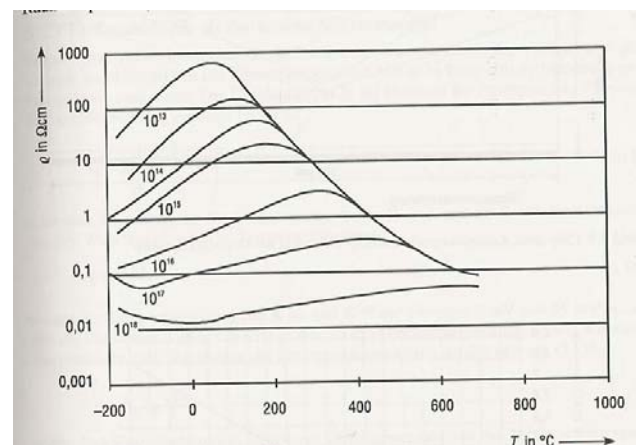
T-Abhängigkeit von n-dotiertem Silizium

Ausbreitungswiderstand (spreading resistance)

hängt von (kugelförmiger) Kontaktfläche ab

Temperaturabhängigkeit der Beweglichkeit der Elektronen

$$\rho = 7 \Omega\text{cm}(N_d=7 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}, 25^{\circ}\text{C})$$



Metall-Widerstandssensoren

Widerstand = $f(T)$

typischer positiver Temperaturkoeffizient: $\beta = 4 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

Platin

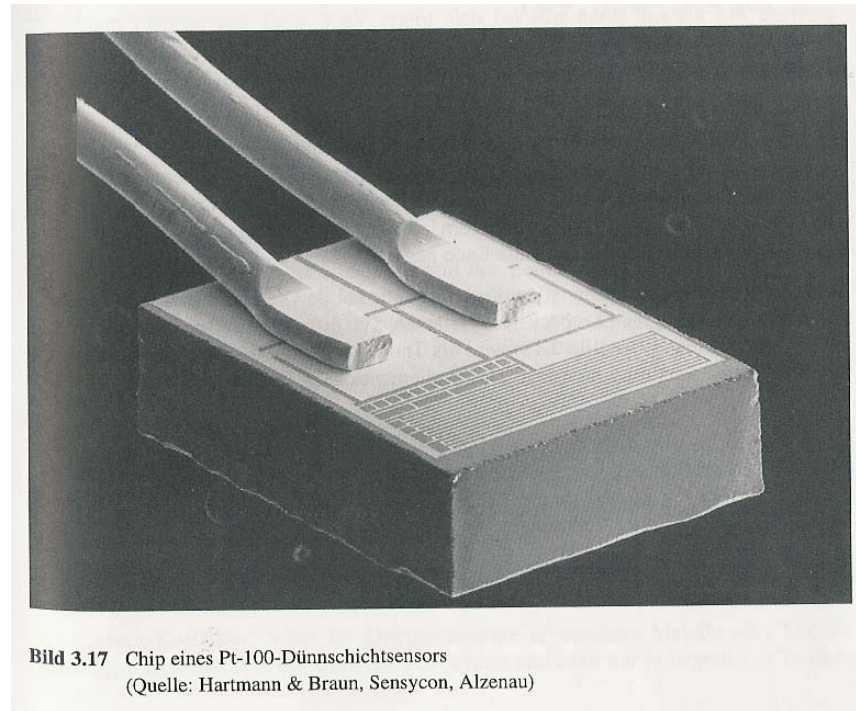
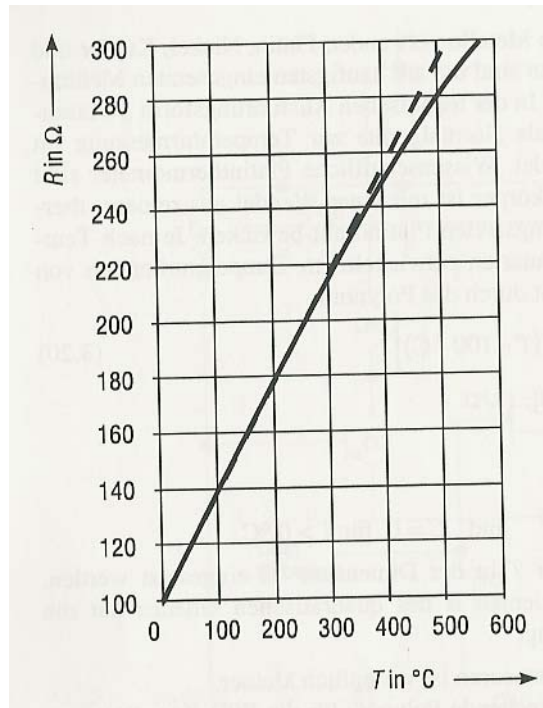


Bild 3.17 Chip eines Pt-100-Dünnschichtensors
(Quelle: Hartmann & Braun, Sensycon, Alzenau)

Aufdampfen/Sputtern einer $1 \mu\text{m}$ Pt-Schicht auf Keramiksubstrat
 $2 \times 2,3 \text{ mm}$ (100 Ohm)

Thermoelemente - Thermoelektrischer Effekt = Seebeck-Effekt

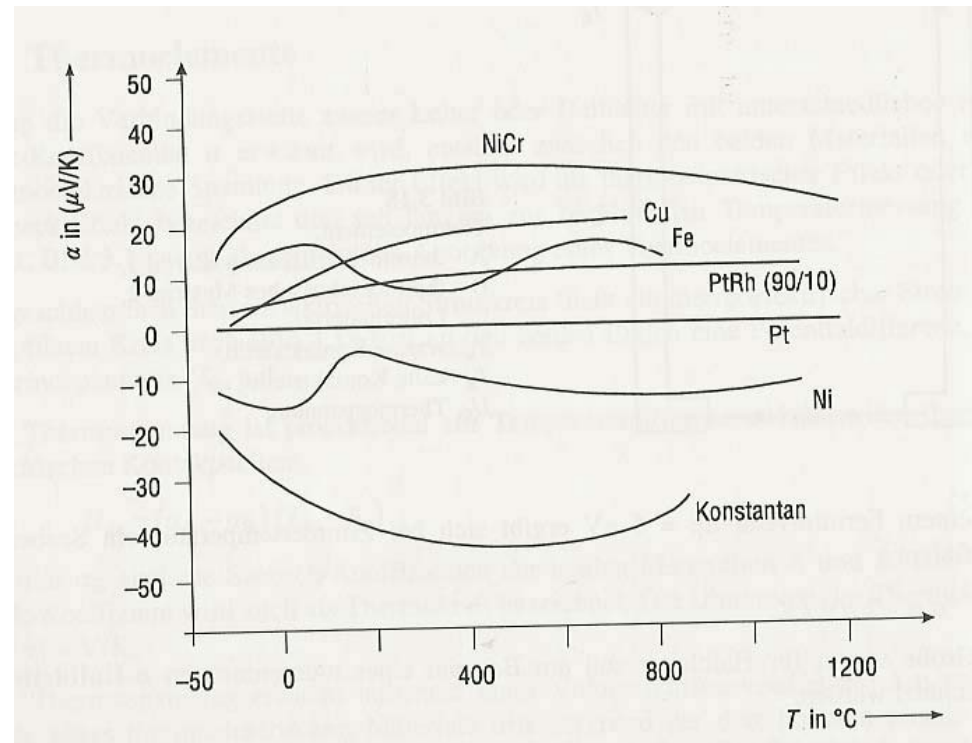
Thermoelektrische Spannung $U_{th} = (\alpha_a - \alpha_b) (T_w - T_k)$

Seebeck-Koeffizient (Thermokraft) α

~ -2 $\mu\text{V/K}$ (Metalle), ~ - 900 $\mu\text{V/K}$ (Halbleiter), Si (einkristallin: -450 $\mu\text{V/K}$, poly: -425 $\mu\text{V/K}$)

Makro: Metall-Thermoelemente, da technologisch nur Metall einfach zu löten/schweißen

Mikro: Si-Technologie



Thermische Strahlungssensoren

Berührungslose Messung der von der Körperoberfläche emittierten Wärmestrahlung

Spektrum = f(T)

NIR:	0,7 - 1,5 μm
MIR:	1,5 - 6,0 μm
FIR:	6,0 - 40 μm
Ultrafernes IR:	> 60 μm

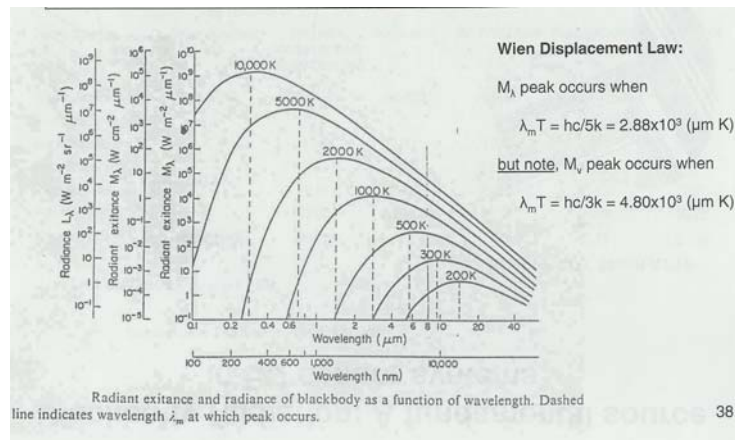
Plancksches Strahlungsgesetz

$$L = 2\pi hc^2 / \lambda^{-5} (1 / \exp(hc / (\lambda k T)) - 1)$$

Temperaturstrahler

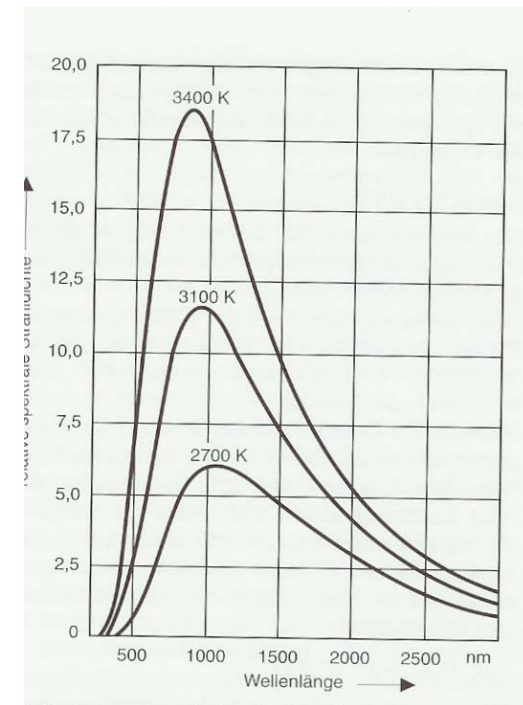
Sonne

"Glühlampe" (Wirkungsgrad Lichtproduktion <5%)



Blackbody-Strahler

(Wiensches Verschiebungsgesetz)



Strahlungsfluss $\Phi = dE/dt = \text{Strahlungsleistung}$

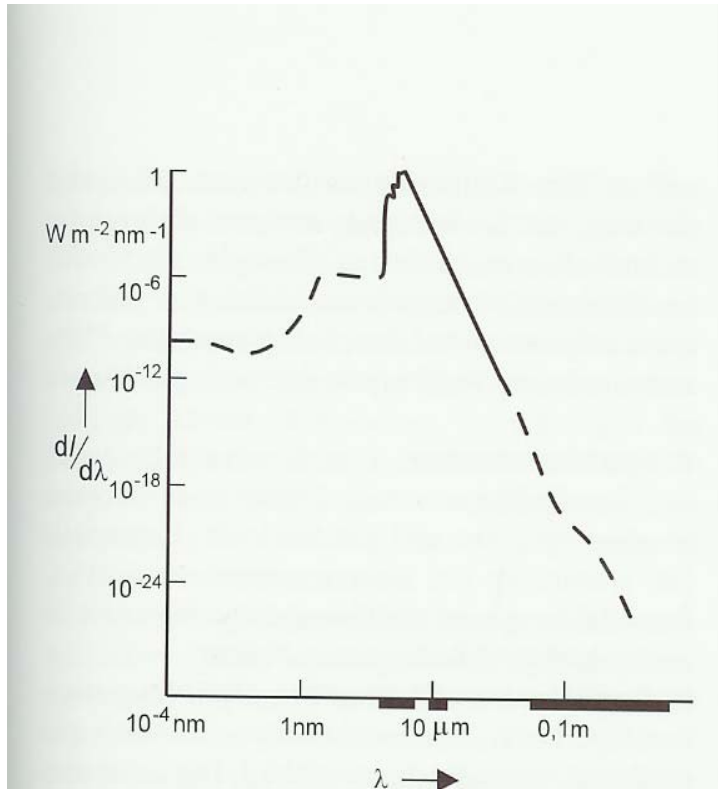
Spezifische Ausstrahlung $M = d\Phi/dA$ A: Flächenelement

Strahlaustrittsraumwinkel $d\Omega$ in sr

Strahlendichte L (Strahlungsfluss Φ auf "gesehene" Fläche $\cos\alpha dA$ und $d\Omega$) = $d^2\Phi / (\cos\alpha dA d\Omega)$

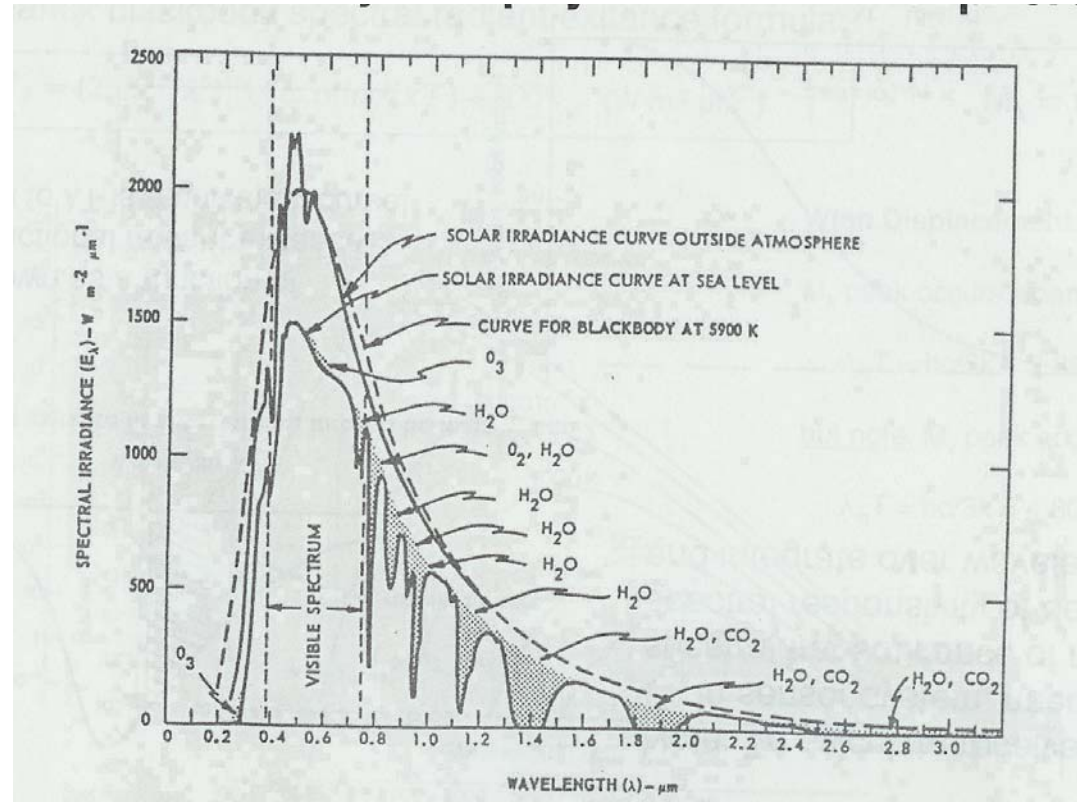
Sonnenspektrum

Sonne: wichtige Quelle in passiven Sensorsystemen



Extraterrestrisches Sonnenspektrum

— Terrestrische Anteile



bezogen auf Temperatur eines schwarzen Strahlers:

VIS: 6000 K (460 - 500 nm)

150 μm: 4400 K

UKW: 10⁶ K

Strahlungsthermoelement

Strahlung wird an "Schwarzschrift" absorbiert und induziert Temperaturanstieg an der "warmen"

Verbindungsstelle der beiden thermoelektrischen Materialien

geringer thermischer Leitwert zwischen kalten und warmen Kontakten gefordert

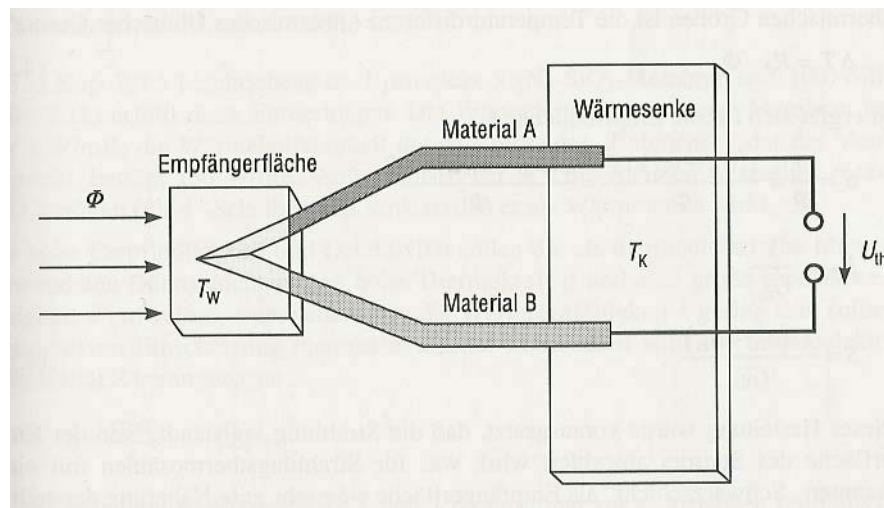
Realisierung z.B. als **Dünnschicht-Sensor**:

1 μm dicke $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ -Membran mit 475 μm dicken Silizium-Chip-Rahmen (Wärmesenke)

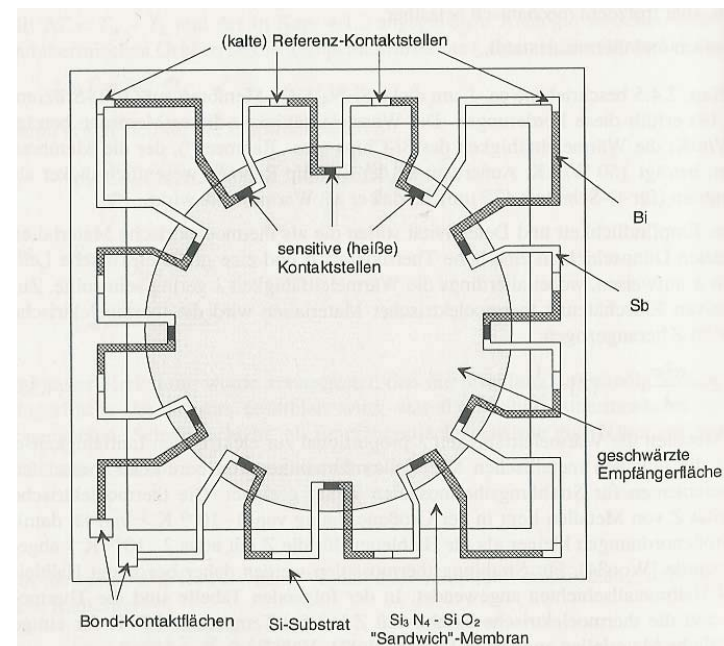
geringer thermischer Leitwert $\lambda = 2 \text{ W/mK}$ der Membran (150 W/mK : Si-Chip)

Absorberschicht: Rußschicht, durch Aufdampfen von Metallen

Herstellung durch fotolithographischen Ätzprozess



Elbel; Mikrosensorik



Güteparameter thermischer Strahlungssensoren

Empfindlichkeit S

$$S = U/\Phi \quad \Phi: \text{Strahlungsleistung in Watt}$$

Zeitkonstante τ

Sensoren verhalten sich wie Trägheitsglieder 1. Ordnung

$$\tau = R_{th} C_{th} \quad \begin{array}{l} R_{th}: \text{thermischer Widerstand in K/W} \\ C_{th}: \text{in Ws/K} \end{array}$$

$$\Delta T = R_{th} \Phi (1 - e^{-t/\tau})$$

τ : Zeit in der T auf 62% des Endwertes angestiegen ist

NEP (noise equivalent power, äquivalente Rauschleistung)

Strahlungsleistung in $\text{W/Hz}^{0,5}$, die Signalspannung = Sensorrauschspannung induziert

$$\text{Detektivität } D = 1/\text{NEP}$$

Pyroelektrischer Effekt

häufigste thermische Strahlungssensoren

Dielektrikum

Elektrisches Feld E bewirkt Ladungsverschiebung (Polarisation P)

$$P = \chi \epsilon E \quad (\chi: \text{dielektrische Suszeptibilität})$$

Ferroelektrika (polare Materialien)

Ladungsverschiebungen P_{sp} permanent (spontan) vorhanden

Polarisationsrichtung umkehrbar

$P_{sp} = f(T) = \text{pyroelektrischer Effekt} (= Q/A; = 0 \text{ für } T > T_{\text{curie}})$

pyroelektrischer Koeffizient $p = dP_{sp}/dT$

$$\text{LiNbO}_3: 6 \times 10^{-5} \text{ Cm}^{-2}\text{K}^{-1} \quad (T_{\text{curie}} = 1210^\circ\text{C})$$

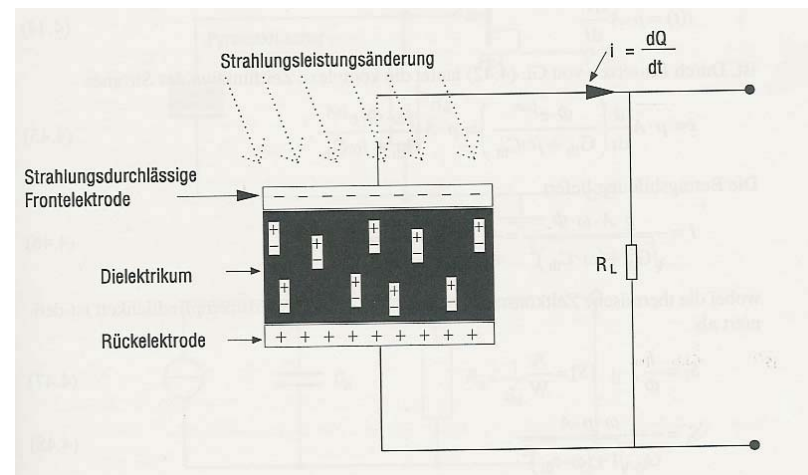
$$\text{BaTiO}_3: 4 \times 10^{-4} \text{ Cm}^{-2}\text{K}^{-1} \quad (T_{\text{curie}} = 120^\circ\text{C})$$

Pyroelektrischer Chip:

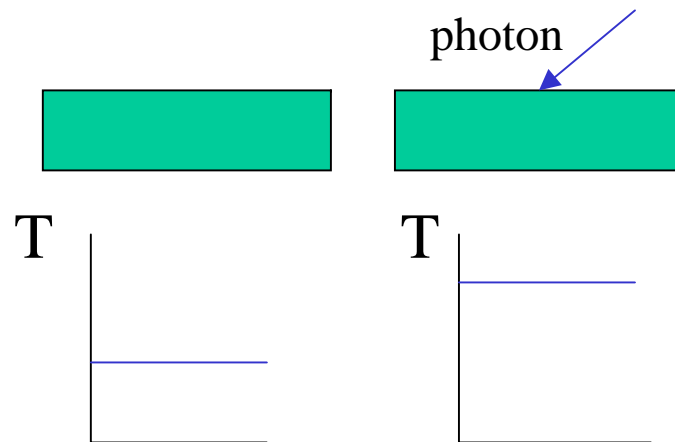
Pyroelektrisches Material als 2 - 50 μm
dicke Scheibe

Empfindlichkeit S

z.B. 5kV/W bei 1 Hz (LiTaO_3)



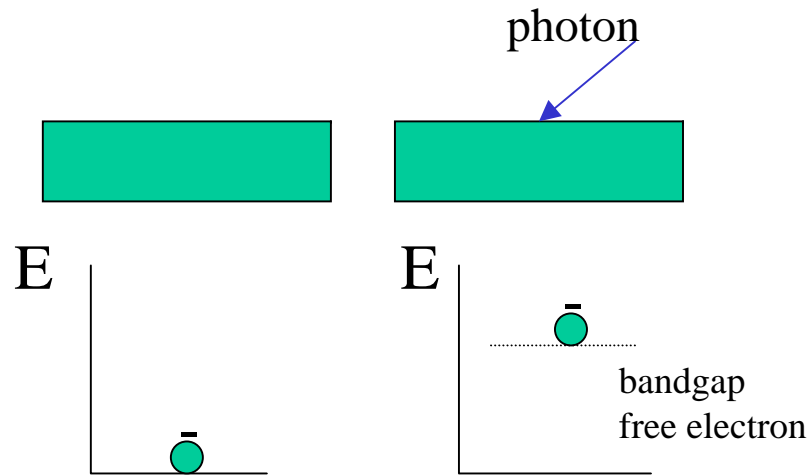
Thermische Detektoren



Pyroelektrischer Detektoren
Bolometer (Widerstandsthermometer)
Thermosäule (Thermoelement)
Kalorimeter

geringe Sensitivität (high NEP, Ausnahme: Supraleitender Bolometer)
spektral unabhängig
slow ms response, (Ausnahme: pyroel. Detektor)
oftmals Ein-Sensor-Element

Photonendetektoren



PMT / SEV
Si Photodioden
CCD Kamera
MCP

photoelektrischer Effekt

innerer: Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren (HL, Isolatoren)

äusserer: Erzeugung von freien Elektronen (Export) unter Aufwendung von Austrittsarbeit ($E_{\text{kin}} = h\nu - A$)

hohe Sensitivität (single photon counting, low NEP)

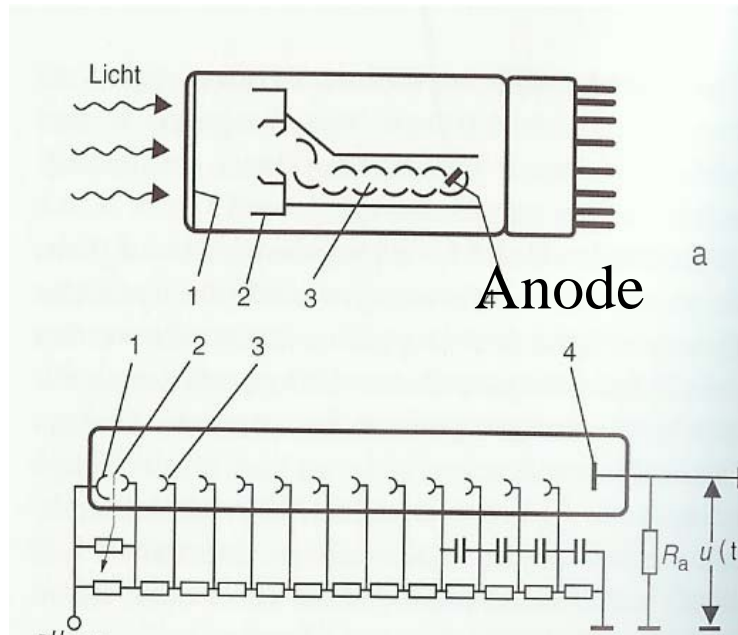
wellenlängenabhängig

fast response (Spezial-PMT: <100 ps)

FPA-Technologie (focal plane arrays)

PMT - SEV

photon - electron - electron amplification (internal gain) - current/voltage



- 1 Photokatode
- 2 Fokussierelektrode
- 3 Dynoden

Side on PMT
End on PMT
MCP

Vakuumphotoempfänger

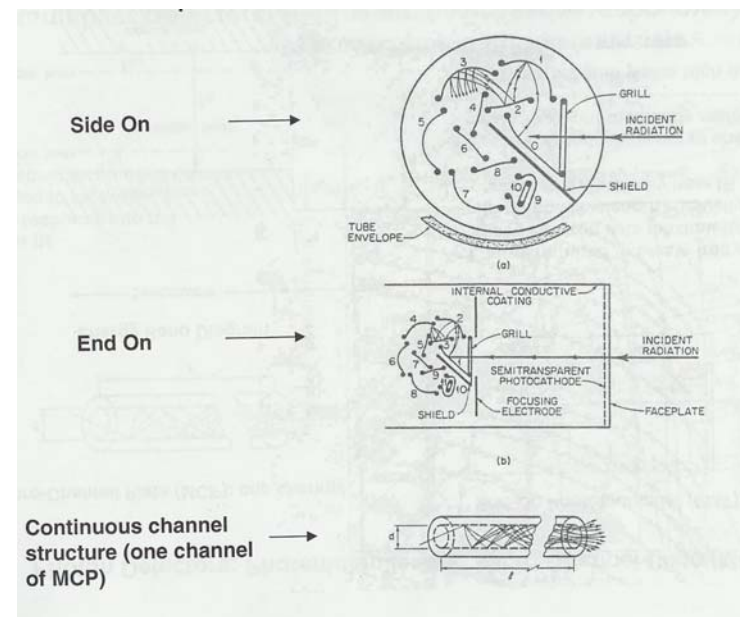
Photoelektrode (Auslösung 1-5 Photo-Elektronen)

Beschleunigung auf einige 100 eV

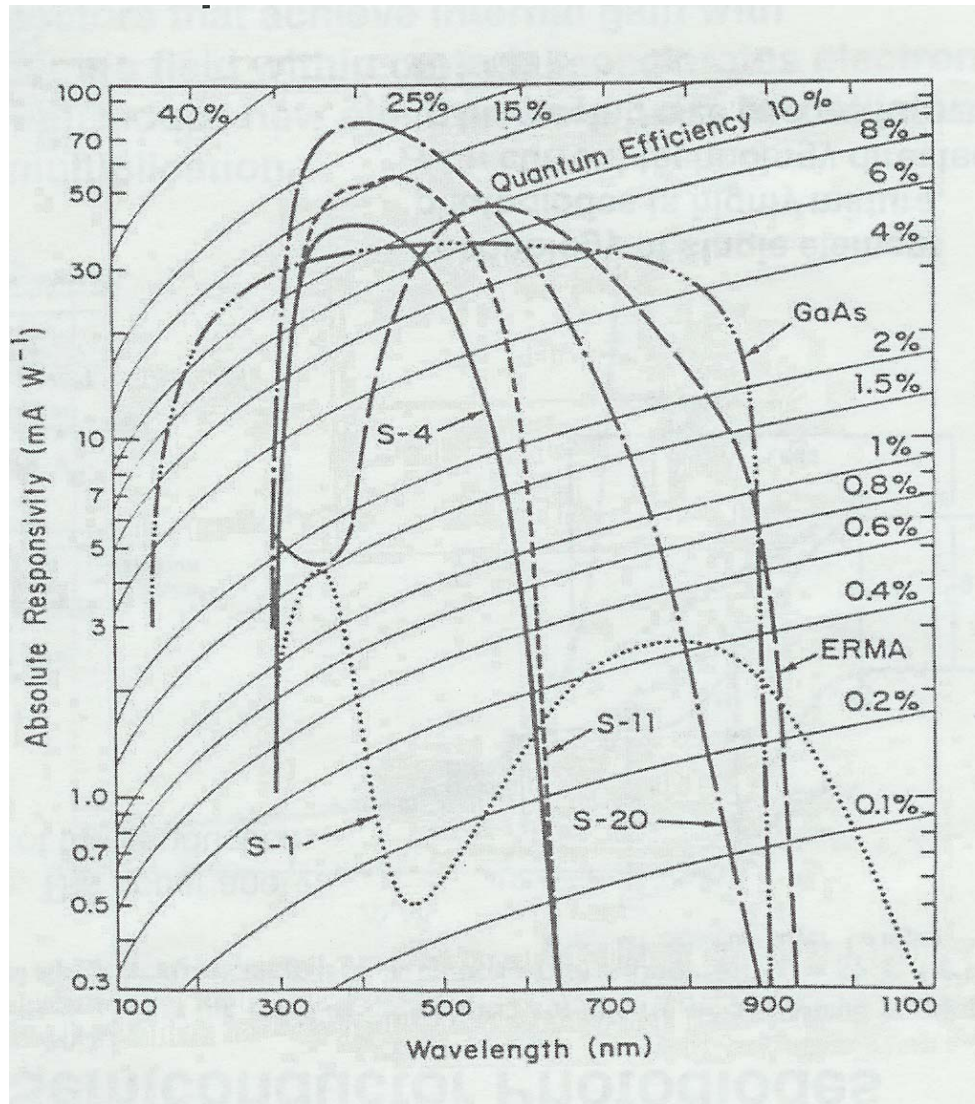
Herauslösen von Sekundärelektronen an Dynode
10- 16 Dynoden (Verstärkung 10^4 - 10^6)

1 kV Betriebsspannung

Zeitauflösung: durch Elektronen-Laufzeit bestimmt



Material der Photokatode bestimmt spektrale Empfindlichkeit



Time-resolved photon counting (TRSPC)



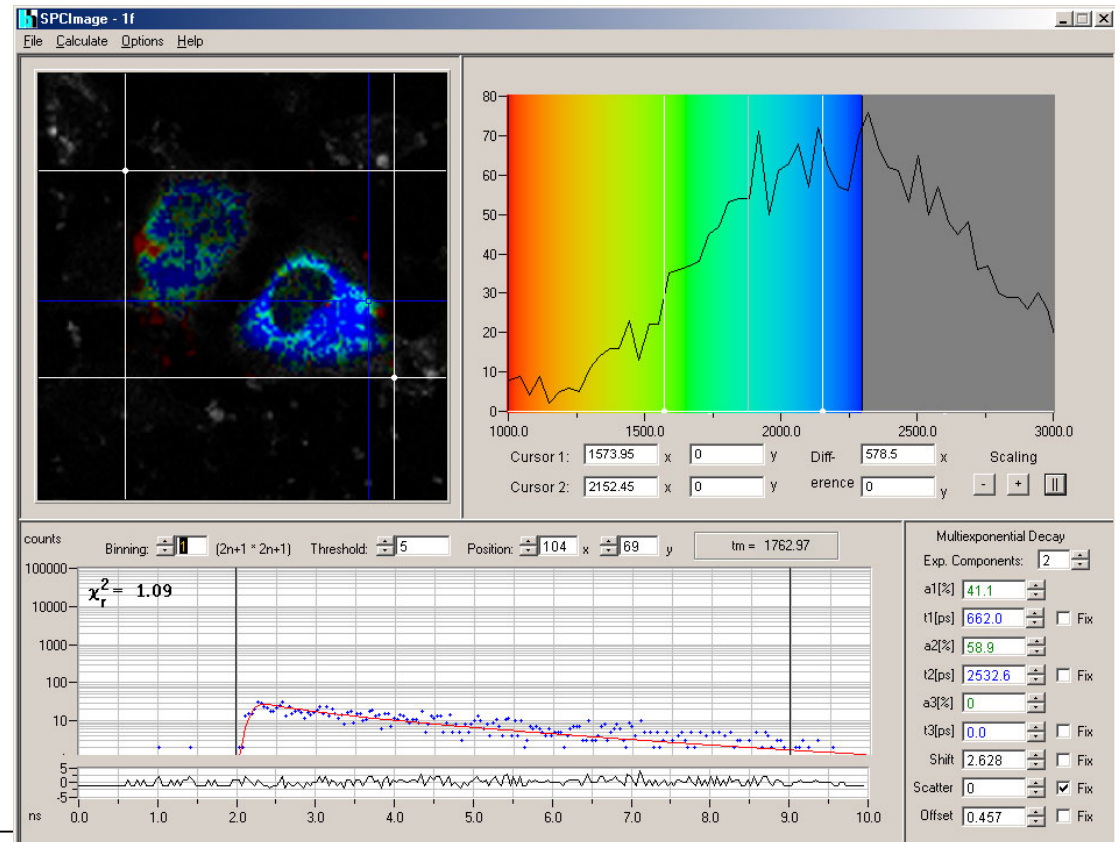
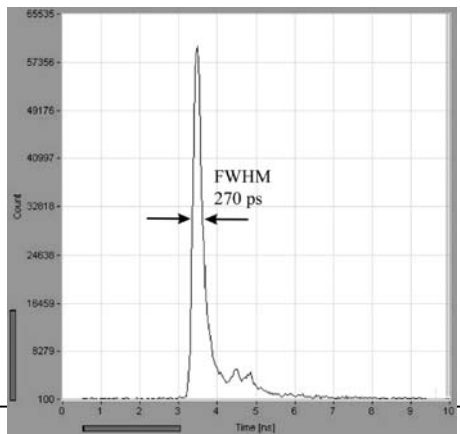
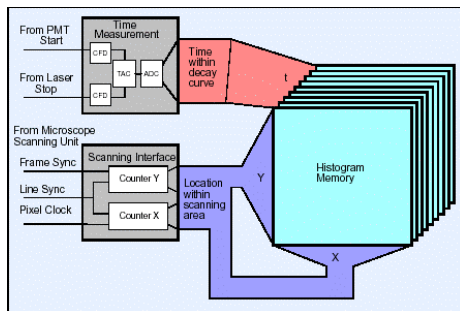
trigger diode / laser output:

frame sync, line sync, pixel clock

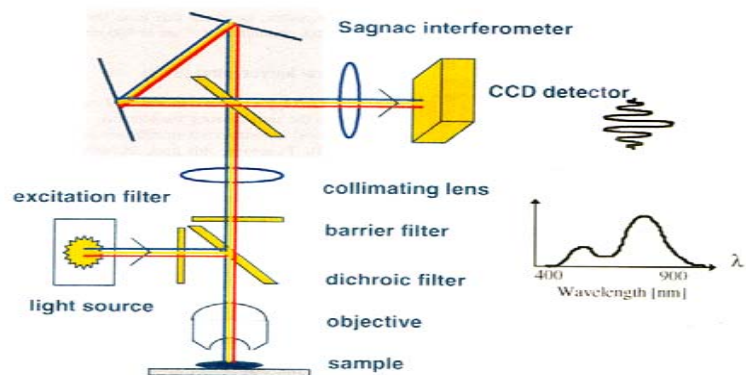
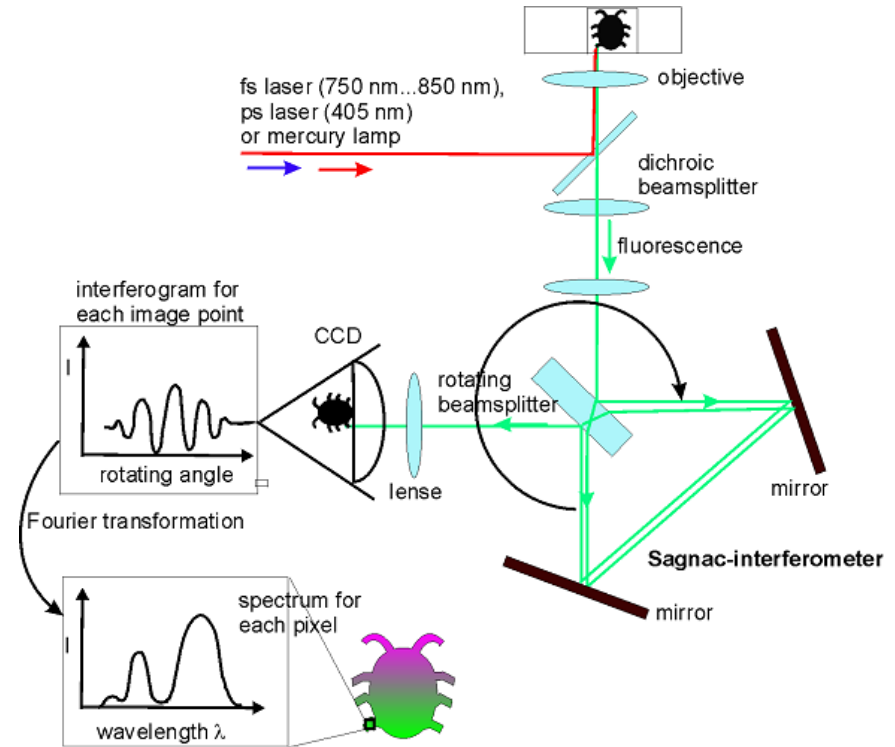
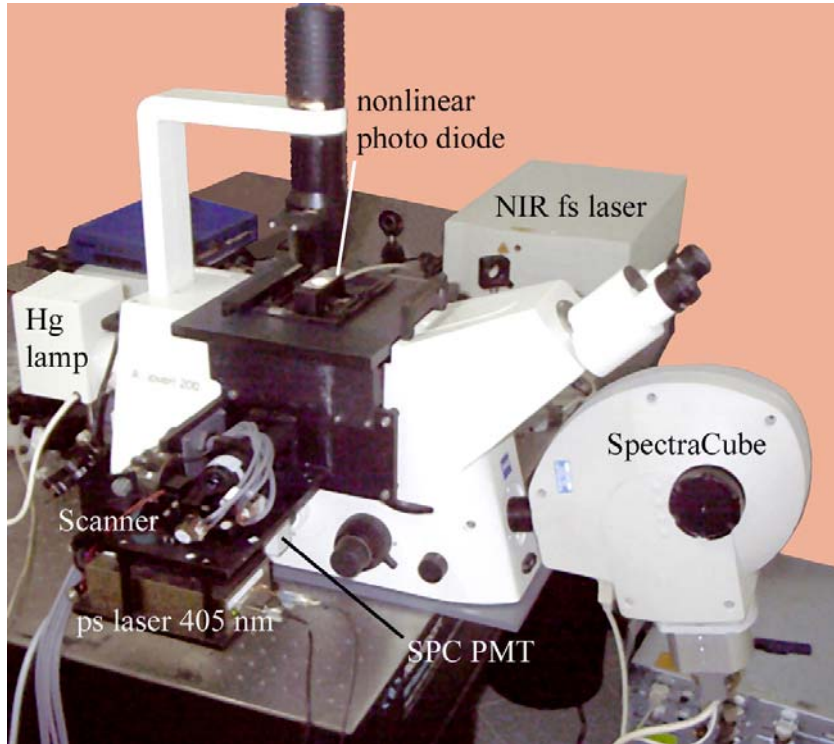
fast detector (PMT, MCP, rise time: 100 ps, low noise)

SPC 730/830 with TAC (time-amplitude-converter = Zägezahnpulvs)

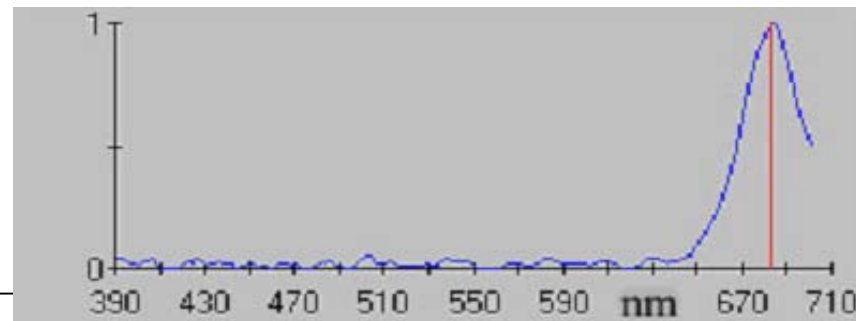
512 time channels, MHz count rate



spectral imaging



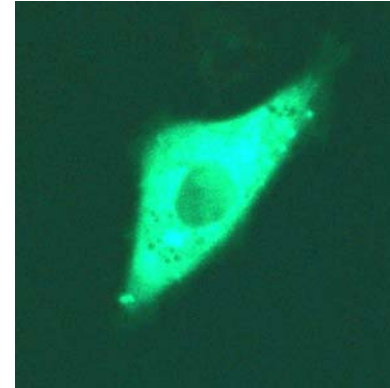
Spectrum per pixel



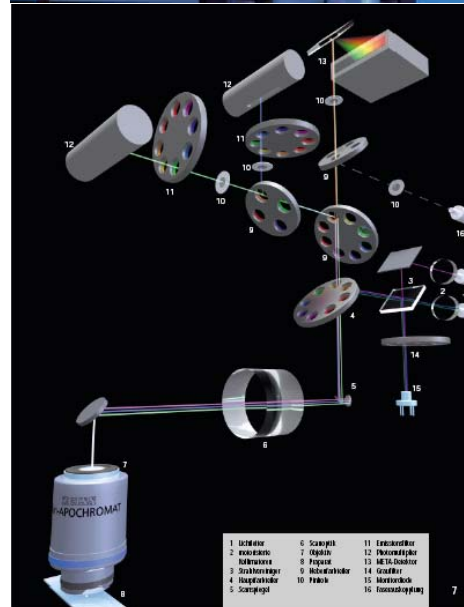
Spectral Imaging



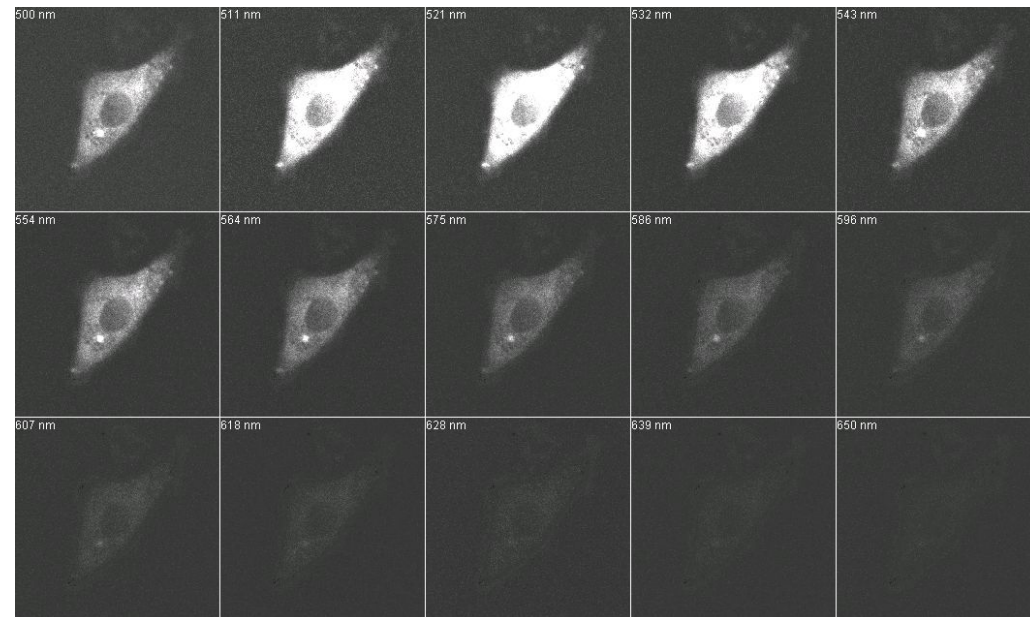
Meta-System
 PMT-Array
 (32 Detektoren)
 10,6 nm Auflösung
 Gitter



Colour-Coded
 (Echtfarbdarstellung)



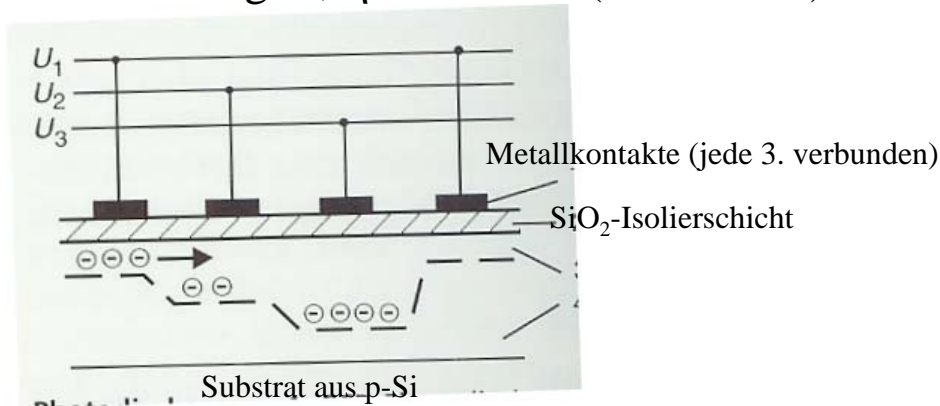
Einzelkanäle:



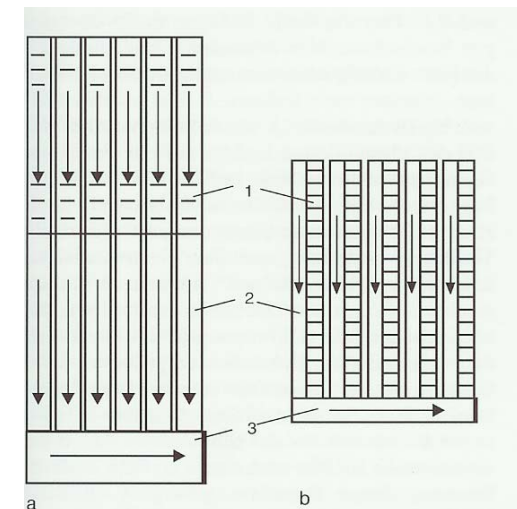
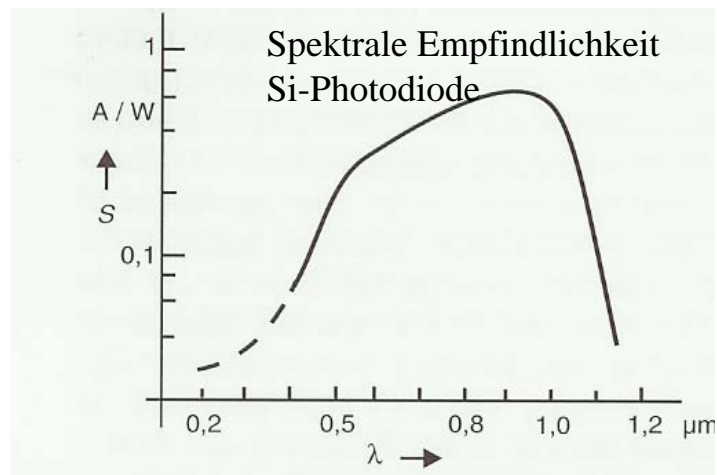
CCD: charge coupled device

CID: charge injection device

In Matrix (128x128 bis 4096x4096) angeordnete Sensorelemente ($6.5 \times 6.5 \mu\text{m}^2$ - $30 \times 30 \mu\text{m}^2$,
 Mittenabstand: 10 - 30 μm) auf vorwiegend Si-Basis (IR: HgCdTe, PbSnTe)
 Ladungsträger werden je nach Spannung paketweise verschoben (5 - 20 MHz)
 Innere Verstärkung: 1, $\eta = 50\text{-}80\%$ (Film: $<1\%$)



2-Megapixel-Sensor
 mit Autofokus
 für Mobiltelefon

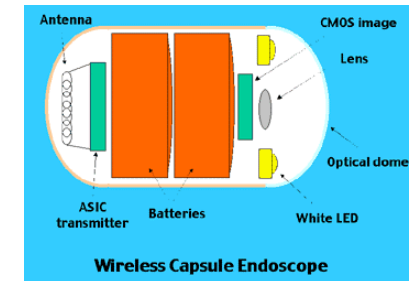
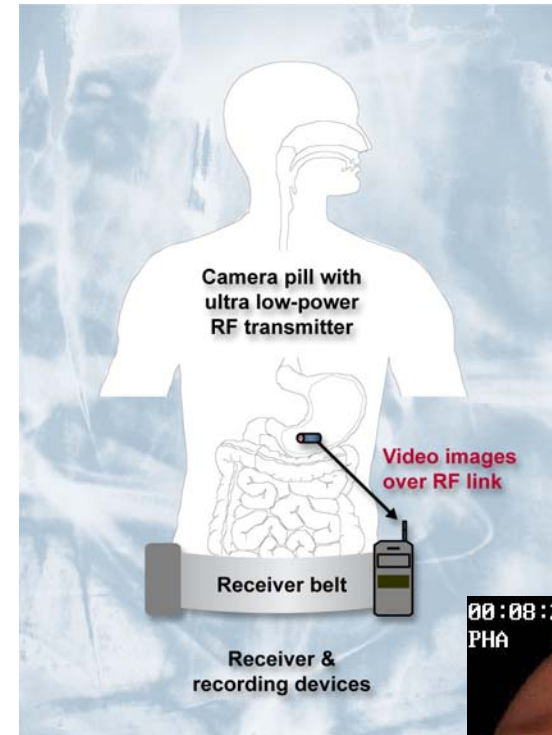


Photodiodenarray 2: Betrieb von CCD-Bildsensoren (Matrizen). a) Bildorganisierter Betrieb (frame transfer), b) Zwischenspaltenbetrieb (interline transfer). 1 Sensorteil, 2 Speicherteil, 3 Ausleseteil.



The Phantastic Journey, 1965

Camera Pill



ca. 150,000 Patienten

Kamera: \$450, Verfahren \$1200

Verweildauer: 8 h, 57 000 Bilder (2/s)

Flash-Diode, Mikrochip-Kamera, Antenne, 1,5 V Batterie
 transmittiert (auf 403 MHz) 2700 kBits/s über 1 m Distanz



European Competence Center for Biomedical Microdevices
 Koordinator: A. Schmidt (IBMT)

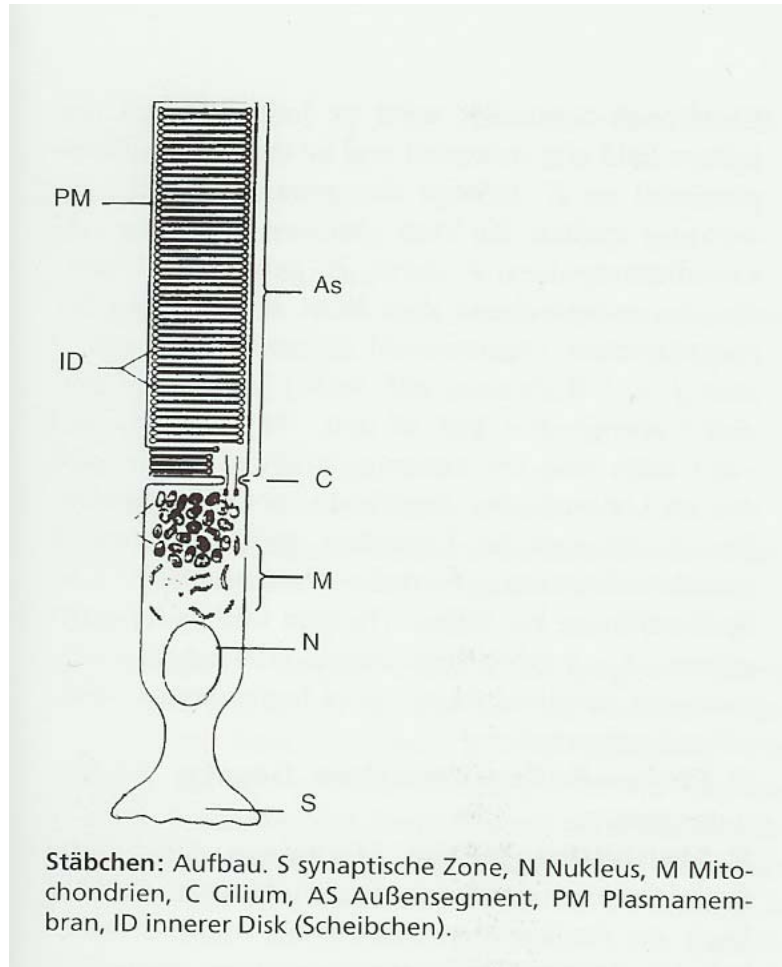


Optisches Sensorsystem: Lichtquelle, Detektor, Signalverarbeitung

Optischer Sensor: Transformation von Licht(Photonen) in elektrische Signale

Photosensoren

Stäbchen



120 Mio/Retina
160.000/mm² im Gebiet maximaler Konzentration (Foveola: 0)
ID enthält Rhodopsin, Photoaktivierung induziert elektr. Signal

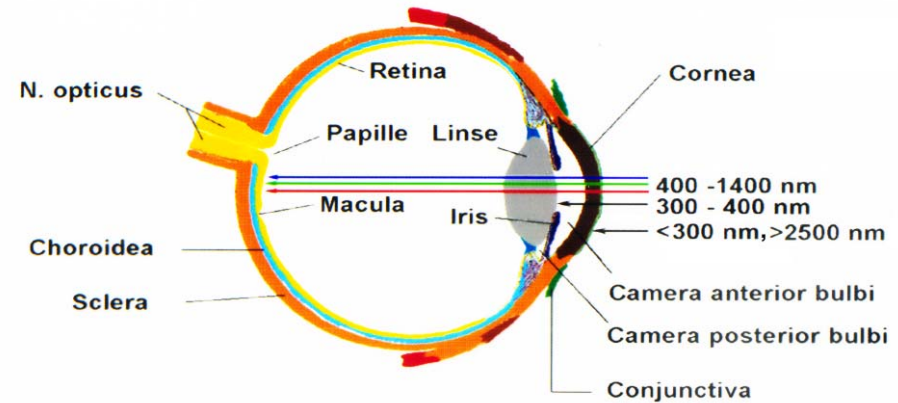
Zapfen

ca. 5 Mio/Retina (200.000/mm² maximal, Foveola)

RGB Bild:

S-Zapfen: 440 nm Absorptionsmaximum

M-Zapfen: 535 nm, L-Zapfen: 565 nm



f=16.7 mm

Detektorparameter

Parameter	Symbol	Definition	Einheit
Quanteneffizienz	η	n_{el}/n_{abs}	-
Spektrale Empfindlichkeit (spectral responsivity)	$R(\lambda)$	$i_{\lambda}/\Phi_{\lambda}$	A/W
Totale Empfindlichkeit (total responsivity)	R	i/Φ	A/W
Signal-Rausch-Verhältnis (signal-to-noise ratio)	SNR	$i_s/(i_n^2)^{0.5}$	-
Noise equivalent power	NEP(λ)	P(SNR=1)	W
Detektivität	D(λ)	1/NEP(λ)	1/W
Normalisierte Detektivität	D*(λ)	$(AB)^{0.5}/NEP$	cmHz ^{0.5} /W

A: aktive Detektorfläche
B: noise bandwidth

Noise:

background photons, dark current, thermal (Johnson), amplifier, 1/f, readout, ...

Piezelektrischer Effekt

Transformation mechanischer Energie in elektrische Energie

Elastische Verformung des Kristallgitters → induzierte elektrische Polarisation

(direkter piezelektrischer Effekt)

Anlegen eines elektrischen Feldes → elastische mechanische Verformung

(reziproker piezelektrischer Effekt)

Materialien:

Kristalle mit ionischen Bindungsanteilen und ein oder mehreren polaren Achsen, jedoch fehlender Punktsymmetrie

20 von 30 Kristallklassen erlauben piezelektrischen Effekt (10 davon auch pyroelektrisch)

z.B. Quarz (Siliziumdioxid), Turmalin, Seignettesalz, Rohrzucker, Lithiumniobat, Piezokeramik, ...

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad P = (\varepsilon_r - 1) \varepsilon_0 E \quad D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E$$

D: dielektrische Verschiebung, E: elektrische Feldstärke, P: Polarisation

Permittivitätstensor ε_{ij} (3x3 Matrix) anstelle $\varepsilon_0 \varepsilon_r$

Piezoelektrischer Effekt

1880 durch Curie Brüder entdeckt (am Kristall Tourmalin):

Verwendung in Sensoren (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Ultraschall) und Aktoren (Nanopositionierung)

Externe Kräfte F induzieren Ladungsverschiebung

$$U = Fd/C$$

U : Spannung, d : piezoelektrisches Modul, C : Kapazität

Piezostack: $C = n \epsilon_{33} A / d_s$

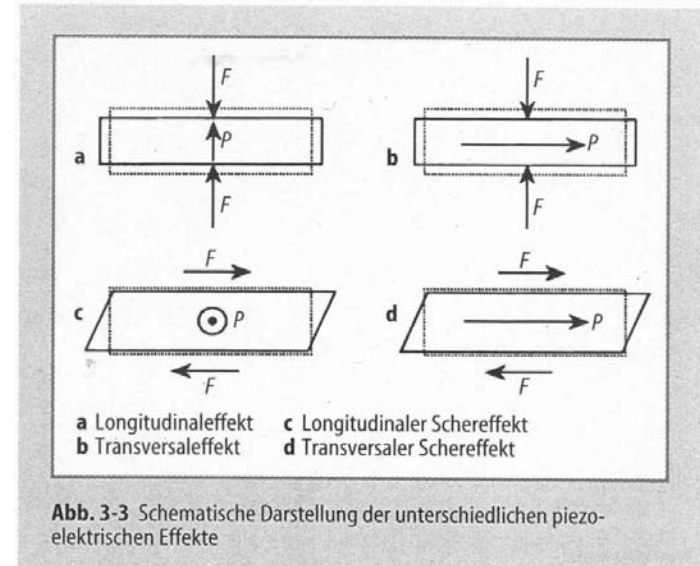
n : Anzahl der Keramikscheiben, ϵ_{33} : dielektr. Konstante ($\epsilon_0 \epsilon_r$), d_s : Scheibendicke

$C = 1,8 \mu F$ (16 mm Stack, 25 mm², 144 Platten a 110 μm , $\epsilon_r = 5400$)

Inverser piezoelektrischer Effekt:

vorausgesagt von Lippmann, gezeigt von Curie

Spannung induziert Längenänderung und Bewegung



Effekt führte zur Entwicklung von polarisierten Spezialkeramiken (Dipolausrichtung)

(PZT: Blei-Zirkonium-Titanat, PMN: Blei-Magnesium-Niobat)

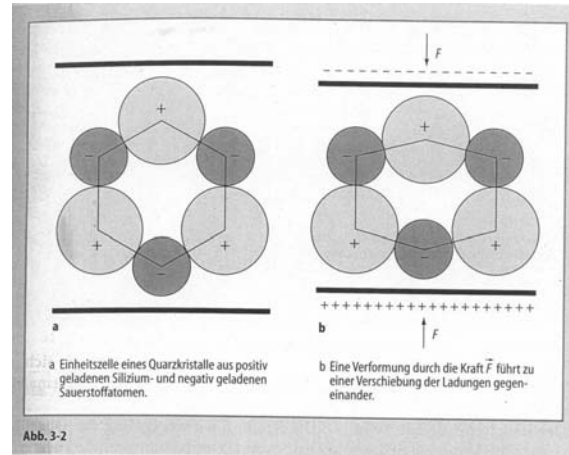
Anlegen von elektrischen Feldern führt zu Expansion in Feldrichtung (**Longitudinaleffekt**) und

Kontraktion senkrecht zum Feld (**Transversaleffekt**)

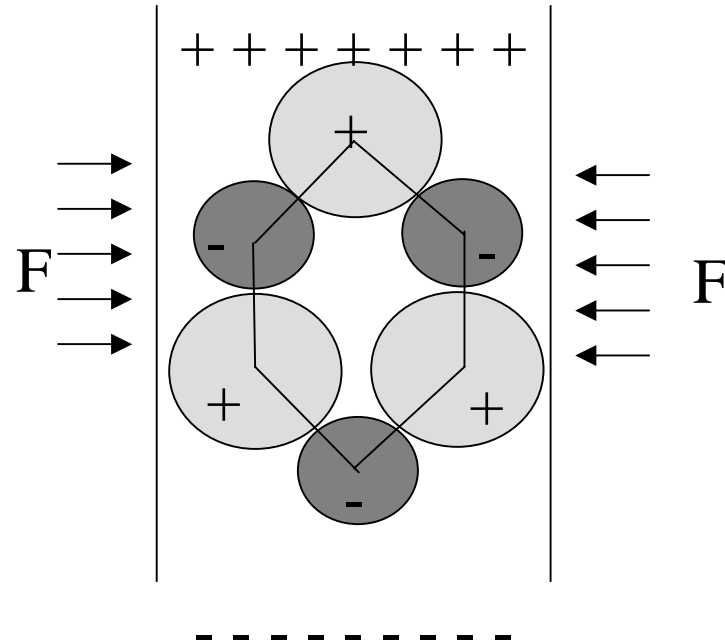
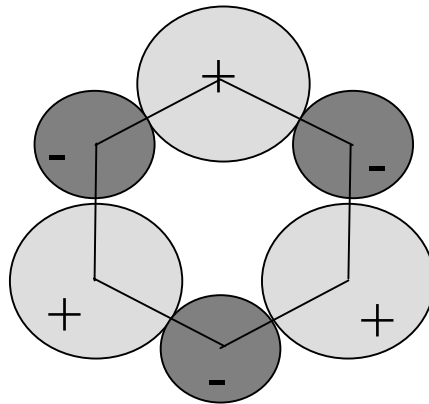
Bei Temperaturen oberhalb der Curietemperatur (150°C): Verlust der piezoelektrischen Eigenschaften

Einheitszelle eines Quarzkristalls

Longitudinaler piezoelektrischer Effekt



Transversaler Effekt

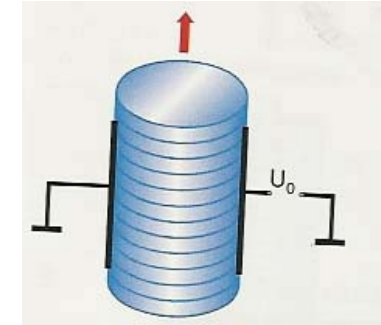


Piezoelektrischer Effekt

Piezostack : Piezoelektrische Aktuatoren (Translatoren)

bestehend aus Anzahl kontaktierter keramischer Scheiben

(z.B. < 100 Scheiben a 100 μm = 10 mm Länge, 10 μm Längenänderung bei 150 V)



Piezotube: monolithische Bauweise: keramische Folie wird mit Elektrodenmaterial laminiert (innen: positiv)

z.B. 20 mm Länge, 10 mm Durchmesser, 1 mm Wand, 1000 V:

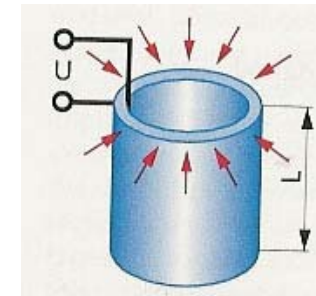
transversaler piezoelektrischer Effekt induziert 0,05% axiale Kontraktion = 10 μm ,
zudem verringert sich Umfang um 15 μm = 4,7 μm radiale Kontraktion)

Limitation: Breakdown Voltage der Keramik ($E = 2 \text{ kV/mm}$)

rel. Längenänderung $S = dE = 0,10\% - 0,13\%$

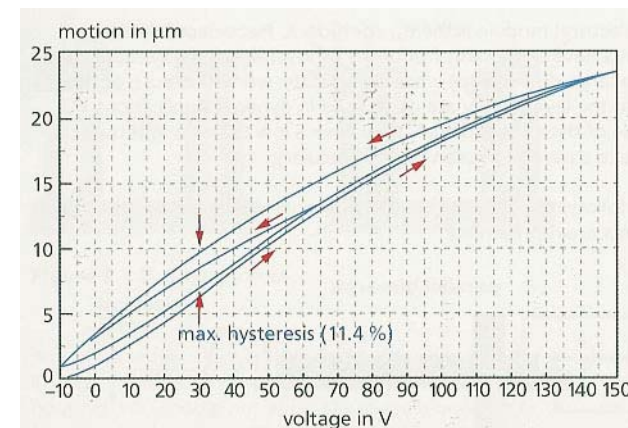
jedoch nicht exakt linear, da Hysterese

close loop: Sensor überprüft Position und korrigiert



Bimorphe Elemente

Hybrid-Piezokeramik: z.B. für 300 μm x,y,z Motion



Piezoelektrischer Effekt

Auflösung

1/100 nm Motion detektierbar (Laserinterferometer)

z.B. 150V-Spannungsgenerator hat 0,3 mV voltage noise = 2×10^{-6}

Piezoelement mit 20 μm Längenänderung wird 0,04 nm Oszillationen (mechanical noise) aufweisen

Temperatureffekte

Therm. Ausdehnungskoeffizient, Edelstahl: $12 \mu\text{K}^{-1}$

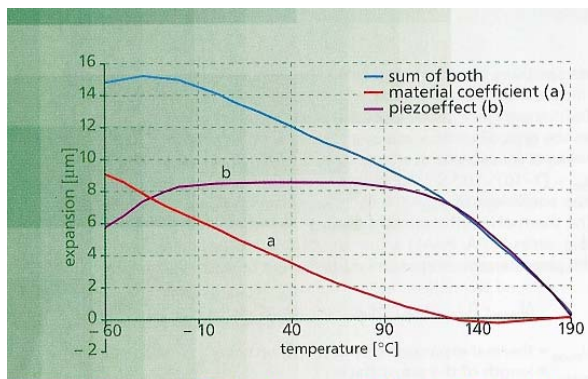
1K Variation induziert in $10 \times 10 \times 10 \text{mm}^3$ Würfel 100 nm Variation in Kantenlänge

Piezostack: $\alpha = 7 - 10 \mu\text{K}^{-1}$ (positiver Temperaturkoeffizient)

Multi-Layer-Stack: $\alpha = -6 \mu\text{K}^{-1}$ (negativer Wert)

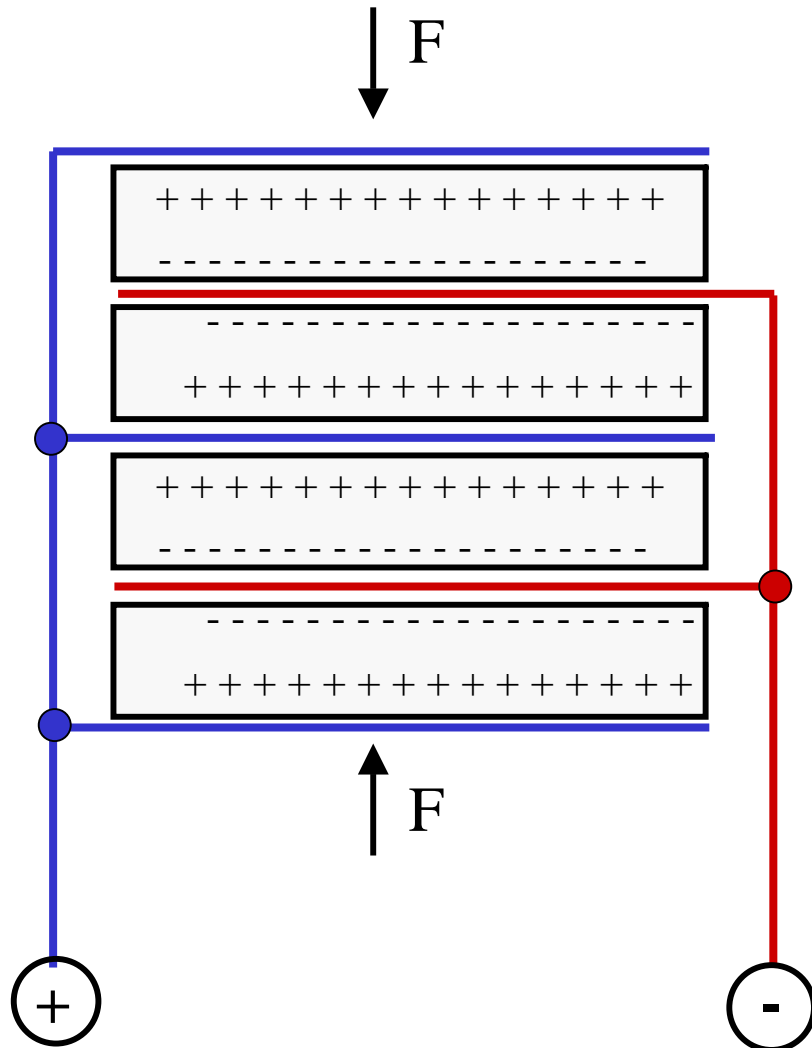
Piezoeffekt: $\alpha = 4 \text{mK}^{-1}$ ($< 260 \text{K}$)

Piezostack mit Metallgehäuse: $\Delta l = \Delta l_{\text{steel}} + \Delta l_{\text{stack}} + \Delta l_{\text{piezo}}$
 $= 0,78 \mu\text{m}$ (16mm Stahl, 19 mm Stack, $20^\circ\text{C} \gg 30^\circ\text{C}$)



piezosystem jena

Typ. Aufbau von piezoelektrischen Kraftsensoren



Kraftänderung

→ Änderung der induzierten Oberflächenladungen

→ Spannung an angeschlossenen Metallelektroden

Geringste Ströme

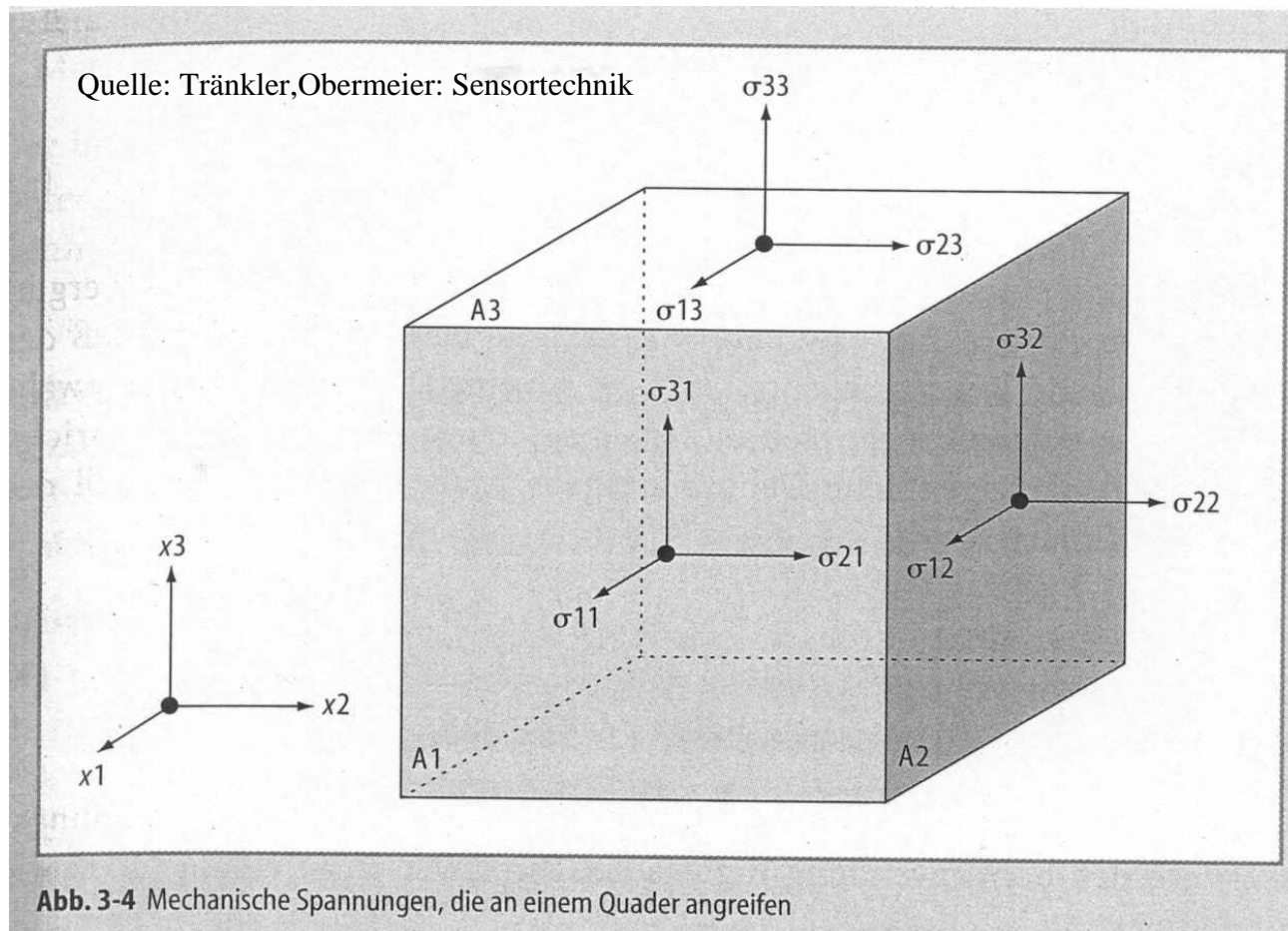
→ Abbau der Spannung

→ Hochohmige Isolation und Signalverstärkung

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

Mechanische Spannungen

Mech. Spannung = Kraft / Fläche



Index 1: Krafrichtung

Index 2: Richtung der
Flächennormalen

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

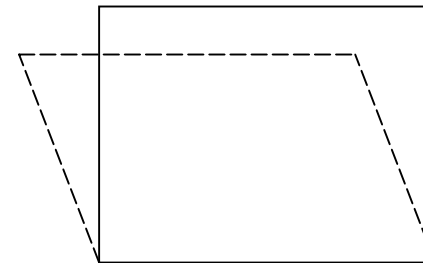
ν = Querkontraktionszahl

$-\Delta d$ = Durchmesserabnahme

τ = Schubspannung

α = Schubwinkel

G = Schubmodul



piezoelektrische Koeffizienten

$$P_i = \sum d_{ij} T_j$$

T: mechanische Spannung
symmetrischer Spannungssensor

$$d_{ij} = \begin{matrix} d_{11} d_{12} d_{13} d_{14} d_{15} d_{16} \\ d_{21} d_{22} d_{32} \dots \\ d_{31} \dots \end{matrix}$$

i = 1,2,3 Raumrichtungen

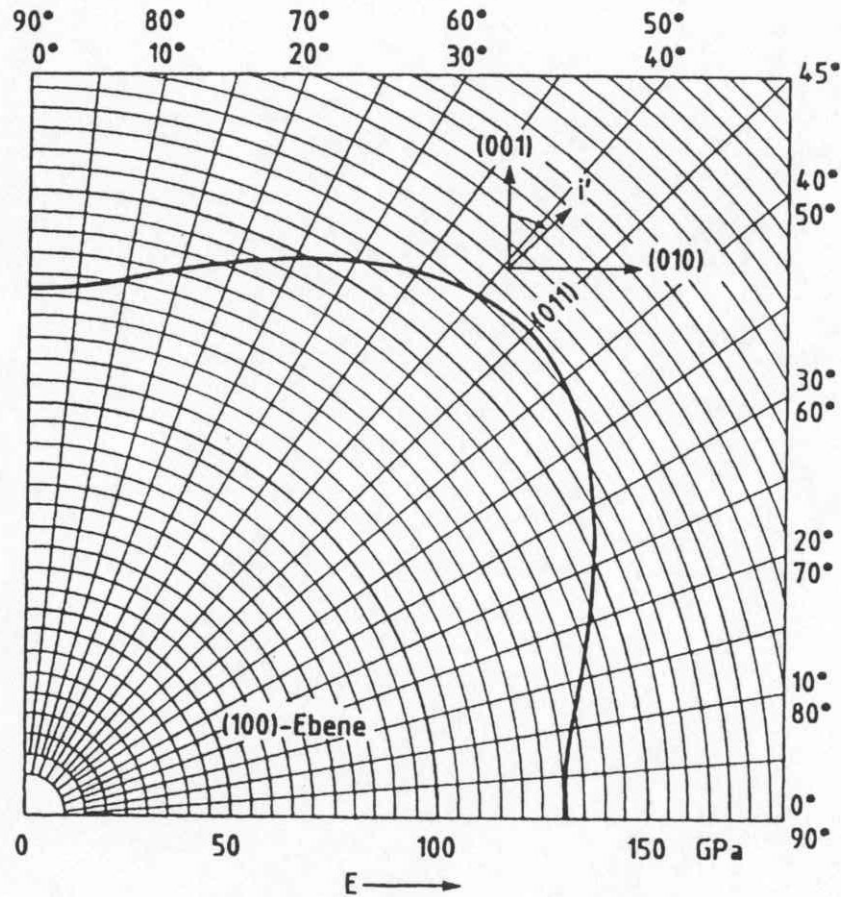
j = 1 - 6 Komponenten der Normal- und Schubspannung

$$d_{11}(\text{Quarz}) = 2,25 \times 10^{-12} \text{ m/V}$$

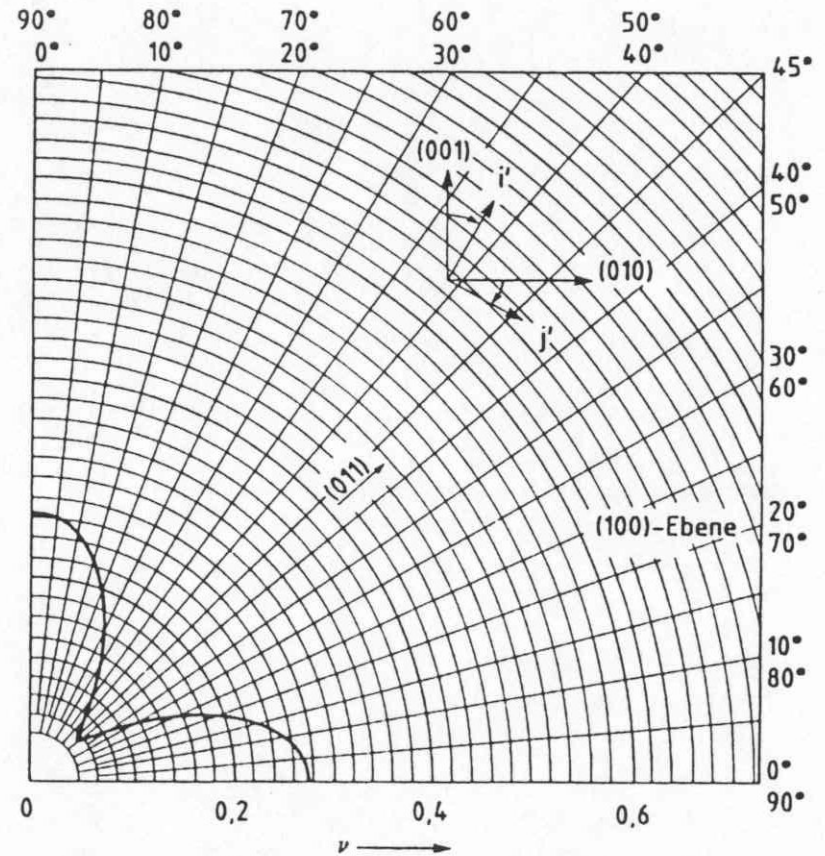
$$d_{14}(\text{Quarz}) = 0,85 \times 10^{-12} \text{ m/V}$$

$$d_{14}(\text{Rochelle-Salz}) = 2,30 \times 10^{-9} \text{ m/V}$$

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



Spannung/Dehnung



Querkontraktion/Längsdehnung

Wandlungs-Prinzipien im Bereich Optik

Elektro-optischer Effekt
Magneto-optischer Effekt
Thermo-optischer Effekt
Photoakustischer Effekt
Nichtlineare optische Effekte

Ziel: Modulation

Realisierung: durch Änderung der Brechzahl
durch Änderung des Absorptionsverhaltens/Reflexionsverhaltens

Pockels-Effekt (linearer elektrooptischer Effekt)

elektrisches Feld beeinflusst Brechzahl eines dielektrischen Materials ohne Inversionszentrum
z.B. 8,4 KV-Spannung induziert 90° Polarisationsdrehung des Lichtes in KDP

Entstehung/Änderung von Doppelbrechung

linearer Effekt (Kerr-Effekt: quadratischer Effekt, in allen Materialien möglich)

$$\Delta(1/n^2) = rE + pE^2$$

r: linearer elektro-optischer Koeffizient

p: quadratischer elektro-optischer Koeffizient

Hall-Effekt

galvomagnetischer Effekt:

Generation von elektrischen Feldern in stromführenden Leitern durch externe Magnetfelder

Ursache: Lorentzkraft $F_L = QvB$

$$E_H = A_H H \times j$$

j :	Strom der Dichte j
A_H :	Hall-Koeffizient (<0: Elektronen, >0: Defektelektronen)
H :	Magnetfeldstärke

z.B. Magnetfeldsonde (Halbleiter InAs, InSb als dünne Membranen)

Gauss - Effekt

Magnetoresistiver Effekt, Magnetowiderstandseffekt
Widerstand = $f(\text{Magnetfeld})$

galvanomagnetischer Effekt wie konkurrierender Hall-Effekt
Lorentz-Kraft führt zu Ablenkung und Verlängerung der stromdurchflossenen Distanz
= Erhöhung des Widerstandes

Feldplatten

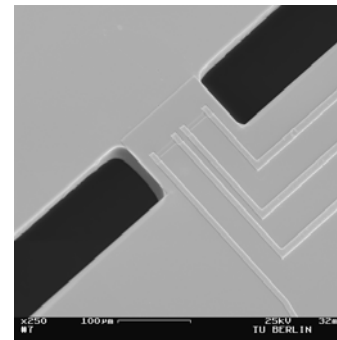
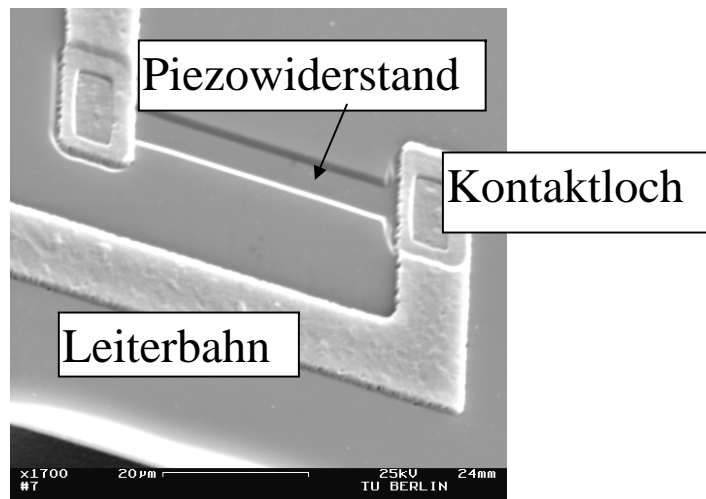
Sensoren auf Basis von Halbleiterscheiben
z.B. 25 μm dicke mäanderförmig strukturierte InSb-NiSb-Plättchen auf Eisensubstrat
Gauss-Effekt = $F(\text{Geometrie, Dotierung})$

Piezoresistiver Effekt

Änderung des spezifischen Widerstandes bei Einwirkung mechanischer Spannungen

Dehnungsmessstreifen

- **Effekt:** Stauchen oder Strecken des Widerstands führt zu Widerstandsänderung
- Geeignet für mechanische Sensoren mit Verformungskörper mit aufgeklebter Folien-DMS
- 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



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):

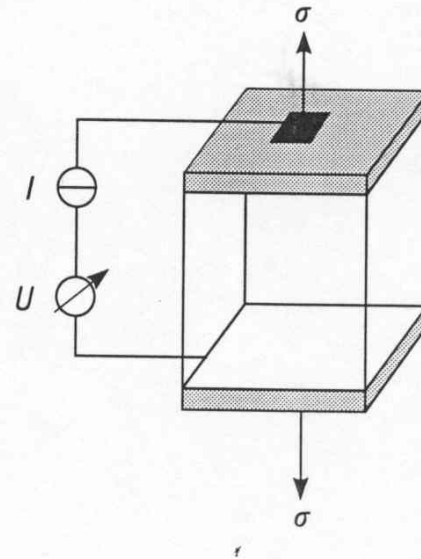
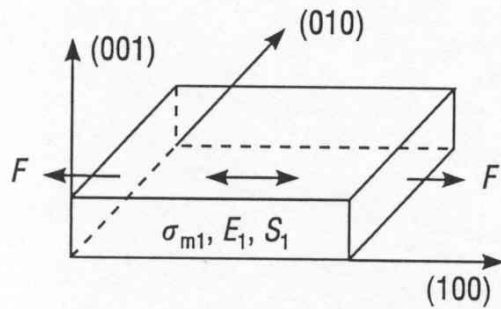
$$\bar{\rho}_0 = \begin{pmatrix} \rho_0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho_0 \end{pmatrix}$$

- wirkt mech. Spannung so gilt: $\bar{\rho} = \bar{\rho}_0 + \overline{\Delta\rho}$ (anisotropes Verhalten)

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

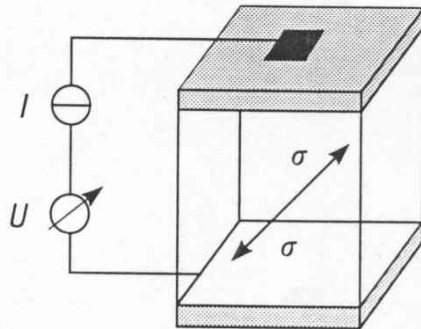
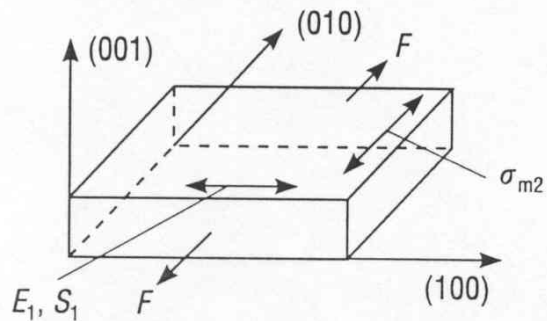
Piezowiderstandseffekt entlang Normalen & Meßanordnung

Longitudinaleffekt:



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

Transversaleffekt:



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

Piezoresistive Koeffizienten

	Störstellenkonzentration (cm ⁻³)	spezifischer Widerstand (Ω cm)	piezoresistive Koeffizienten (10 ⁻¹¹ m ² N ⁻¹)		
			Π_{11}	Π_{12}	Π_{44}
p-Silizium	1,8 · 10 ¹⁴	7,8	6,6	-1,1	138,1
n-Silizium	6 · 10 ¹⁴	11,7	-102,2	53,4	-13,6

(Elektronensensoren)

n-Si

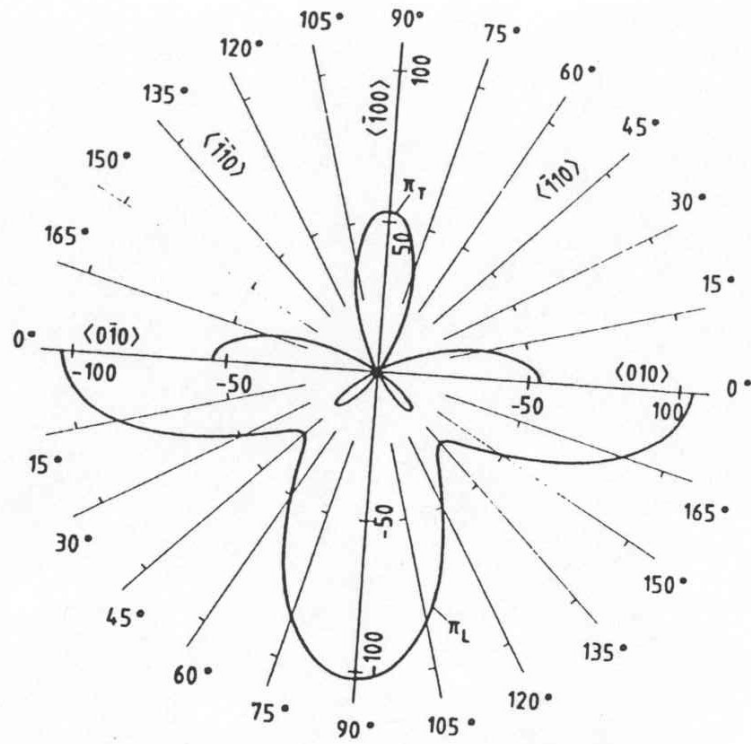
Oberfläche	$\pi_L [10^{-11} \text{ Pa}^{-1}]$	$\pi_T [10^{-11} \text{ Pa}^{-1}]$	k_L	k_T
(100)	-31.2	-17.6	-52.7	-29.7
(110)	-102.2	53.4	-132.9	90.2
(110)	-7.5	6.06	-14.1	10.4
(111)	-31.2	29.7	-52.7	50.19

p-Si

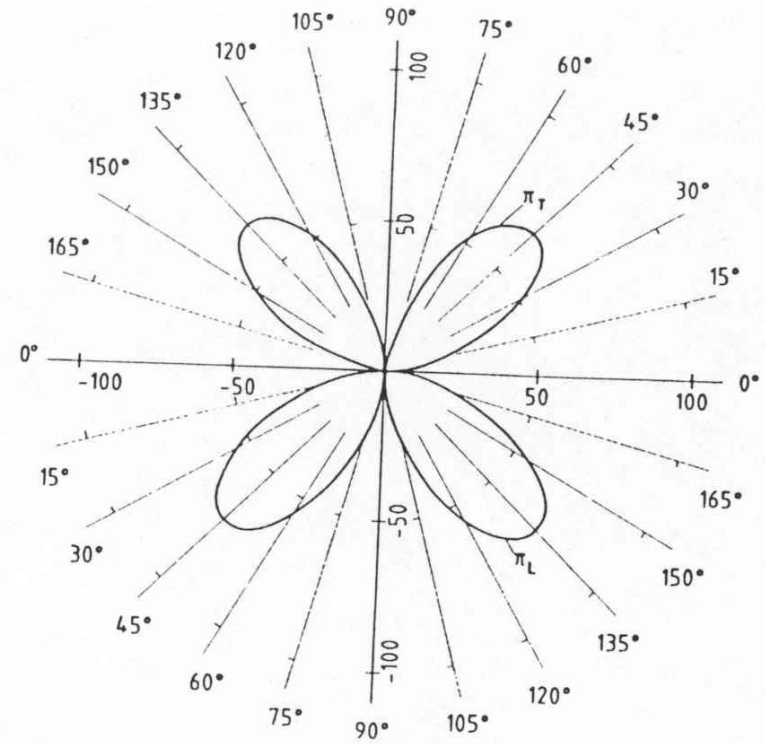
Oberfläche	$\pi_L [10^{-11} \text{ Pa}^{-1}]$	$\pi_T [10^{-11} \text{ Pa}^{-1}]$	k_L	k_T
(100)	71.8	-66.3	121.3	-112.1
(110)	6.6	-1.1	8.58	-1.9
(110)	93.5	-44.6	175.8	-75.8
(111)	71.8	22.8	121.3	38.5

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

Piezoresistive Koeffizienten in der (001) Ebene



n-Si

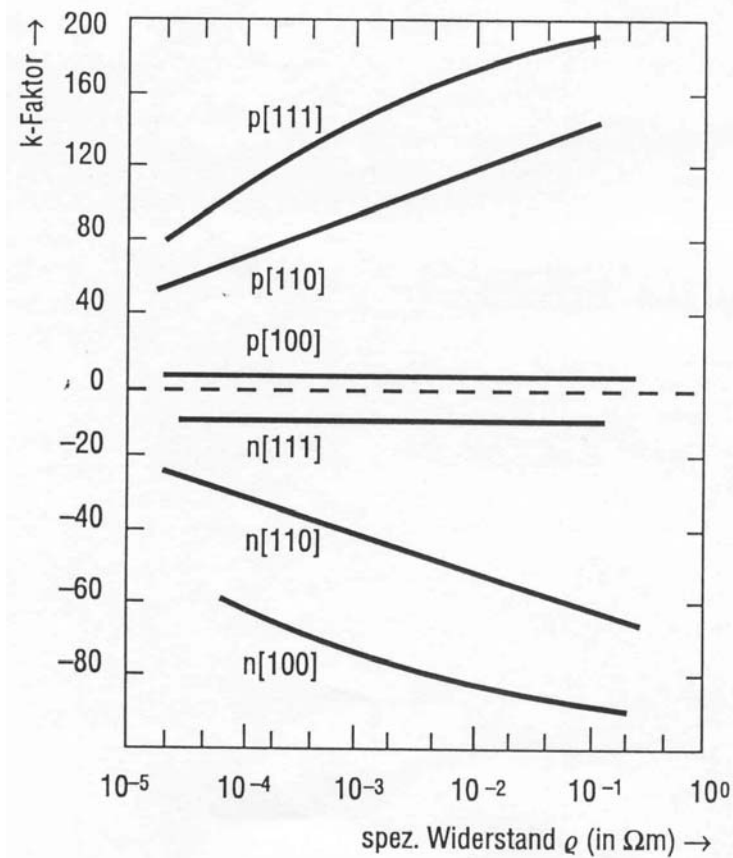


p-Si

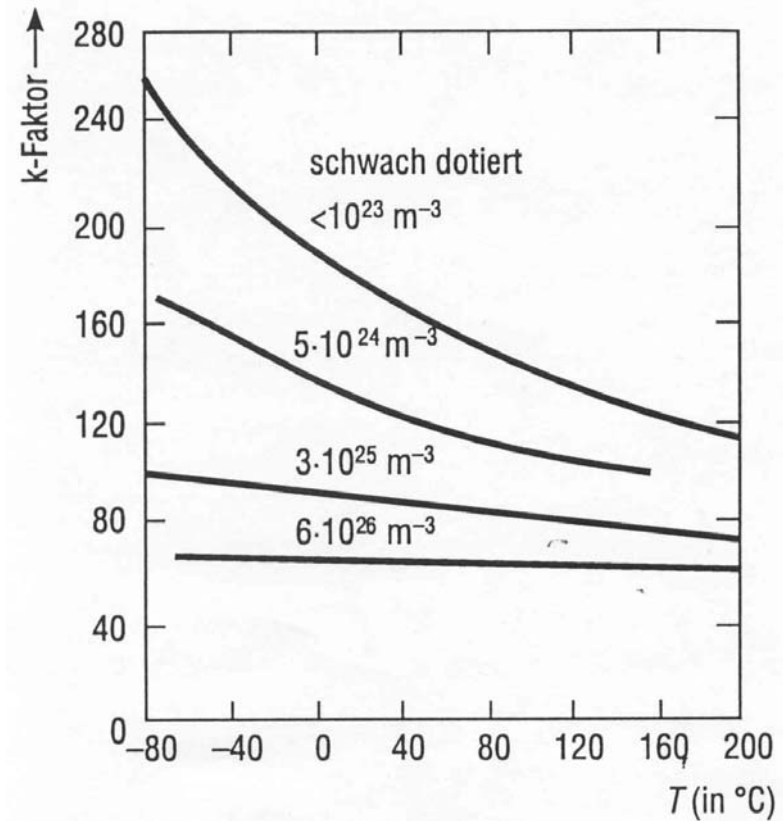
K-Faktor und spezifischer Widerstand

$$d\rho/\rho_0 = Kdl/l$$

beschreibt relative Widerstandsänderung
durch relative Längenänderung



Abhängigkeit von der Temperatur



Piezoresistiver Effekt bei Silizium

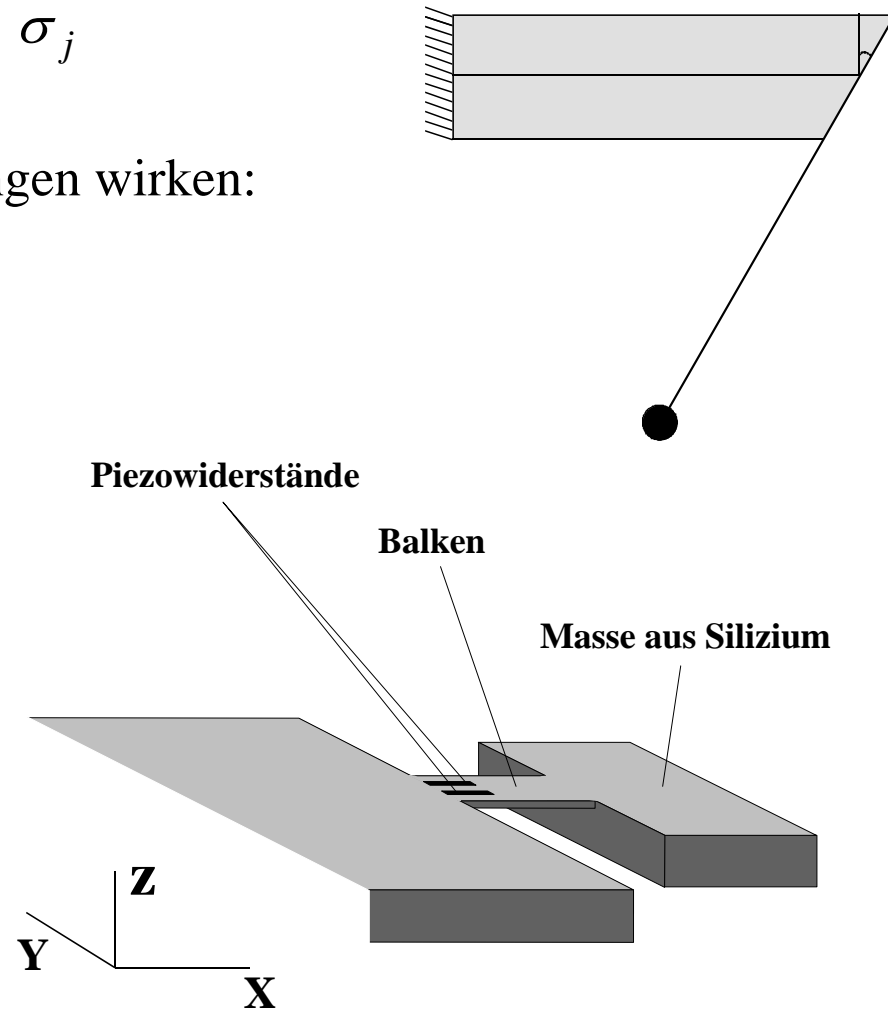
$$\frac{\Delta\rho_i}{\rho_0} = \pi_{ij} \sigma_j$$

für den Fall, dass keine Scherspannungen wirken:

$$\frac{\Delta R_1}{R} = \pi_{11} \sigma_1 + \pi_{12} \sigma_2 + \pi_{13} \sigma_3$$

$$\frac{\Delta R_2}{R} = \pi_{12} \sigma_1 + \pi_{11} \sigma_2 + \pi_{12} \sigma_3$$

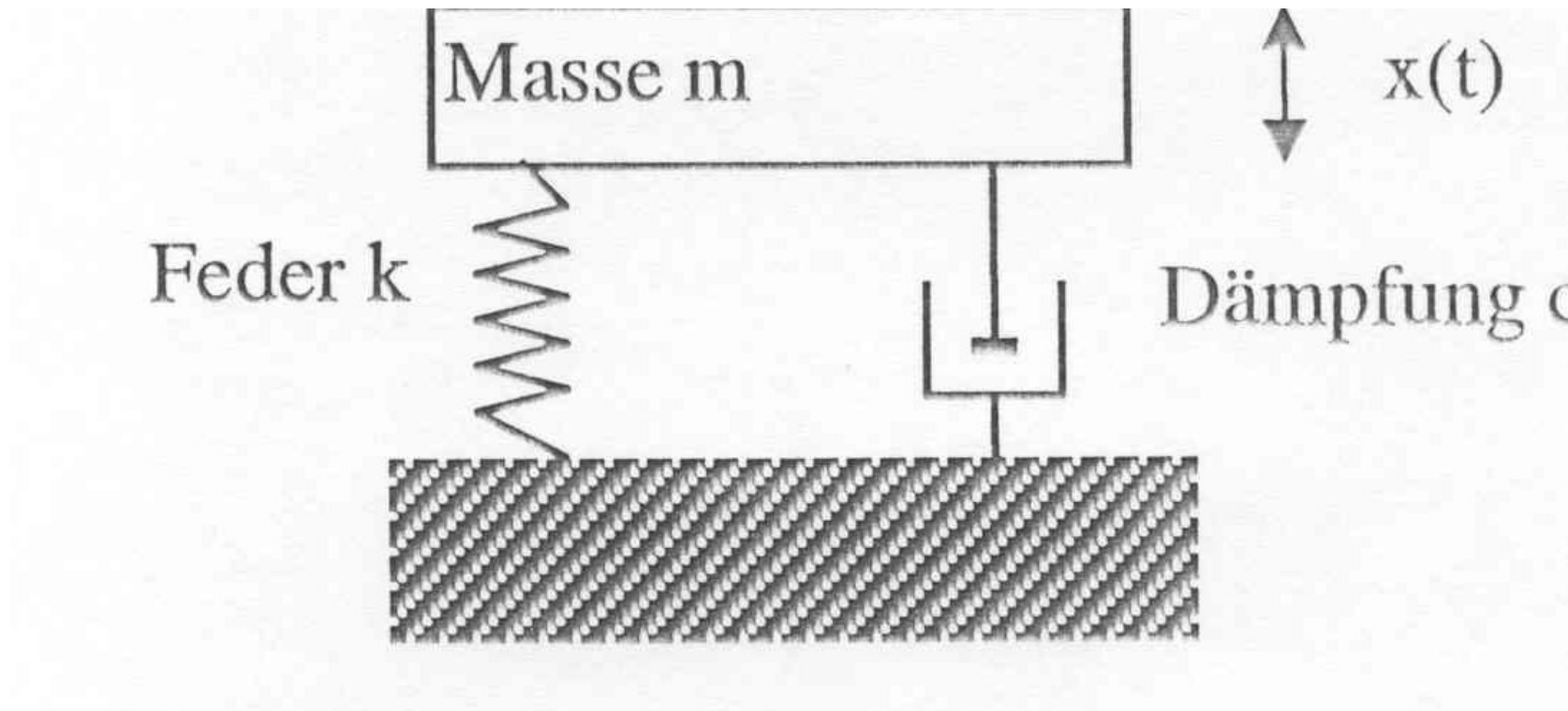
$$\frac{\Delta R_3}{R} = \pi_{12} \sigma_1 + \pi_{12} \sigma_2 + \pi_{12} \sigma_3$$



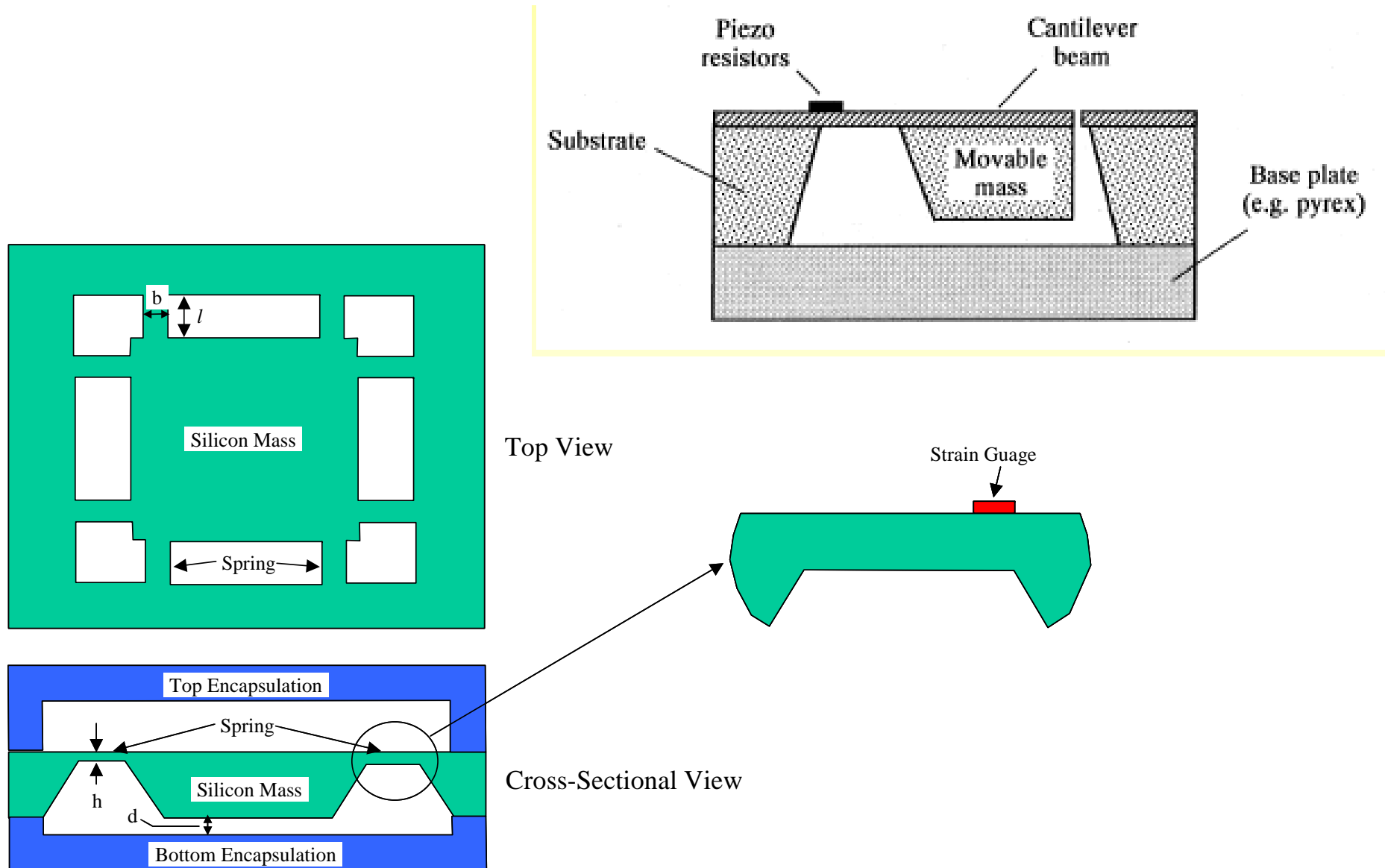
Beschleunigungssensor: Masse-Feder Prinzip



$$F = m \cdot a$$



Typisches Sensordesign (piezoresistiv)



Signalauswertung

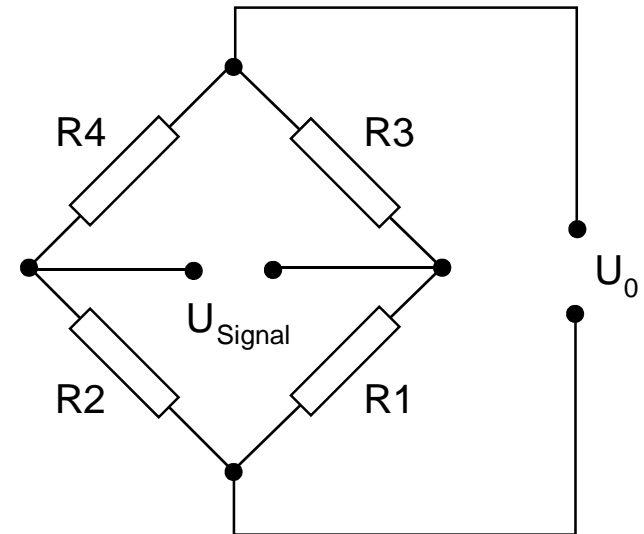
Wheatstonesche Brückenschaltung:

$$U_{Signal} = U_0 \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_4)}$$

Für $R_1 = R_4 = R + \Delta R$ und $R_2 = R_3 = R - \Delta R$

gilt: $U_{Signal} = U_0 \frac{\Delta R}{R}$

Sensorsignal ist proportional zu $\frac{\Delta R}{R}$



Sensorentwicklung: 2D-Sensor für Handgebärdenerkennung

Festlegung der Spezifikation

- ❑● Geringe Masse (< 1 Gramm) und kleine Baugröße (< 1 x 1 x 0.5 cm³),
- ❑● Messung von zwei Beschleunigungskomponenten,
- ❑● Erfassung dynamischer und statischer Beschleunigungen.
- ❑● Meßbereich: -5g ... +5g
- ❑● Meßauflösung: einige mg (1g = 9.81 m/s²)
- ❑● Nutzbarer Frequenzbereich: ≥ 300 Hz
- ❑● Überlastbereich: ≥ 1000g

