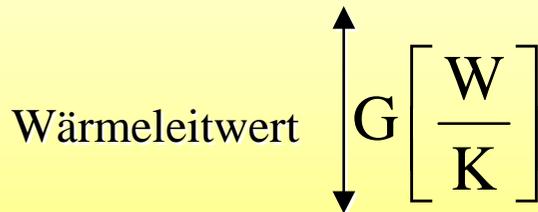
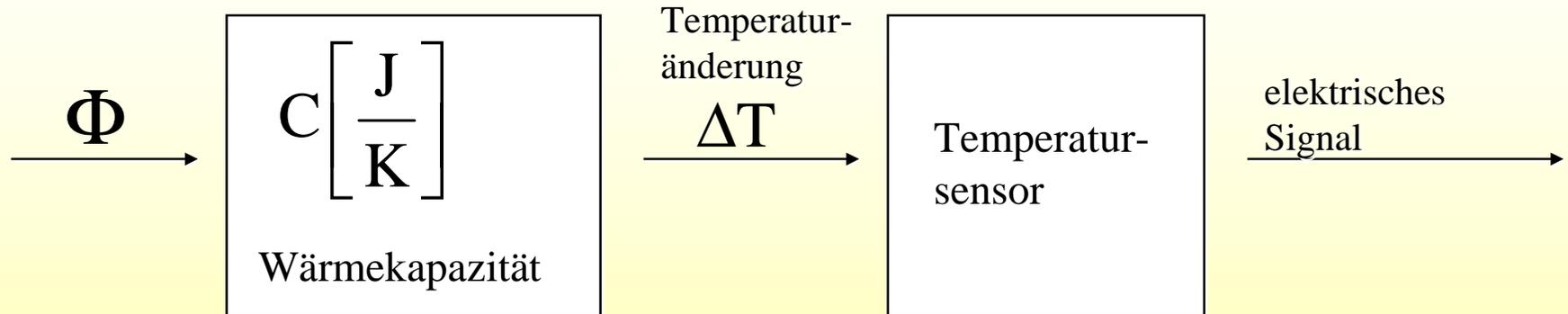


Thermische Empfänger - Hintergrundstrahlung

Thermische Empfänger – Bolometer, Strahlungsthermoelemente, Thermosäulen, pyroelektrische Detektoren, Golay-Zellen



Absorbierender
und emittierender
Hintergrund

minimal gleich G_R , wenn nur Strahlungsaustausch mit Umgebung; Wärmeleitung und Konvektion seien unterbunden.

Durch Temperaturänderung dT bewirkte Änderung der thermisch emittierten Strahlungsleistung der Fläche A bei der Temperatur T für Absorptionsgrad α nach Stefan-Boltzmann:

$$d\Phi = d(\alpha \cdot A \cdot \sigma_B T^4) = 4\alpha \cdot A \cdot \sigma_B T^3 dT \Rightarrow$$

$$G_R = 4\alpha \cdot A \cdot \sigma_B T^3$$

Nachweisgrenze thermischer Empfänger

$$\sqrt{\text{Var}(W_T)} = \sqrt{4kT^2G \cdot \Delta f}$$

$$G_{\min} = G_R \Rightarrow$$

$$\sqrt{\text{Var}(W_T)} = \alpha \cdot \text{NEP}$$

$$\text{NEP} = \sqrt{(16/\alpha)A\sigma_B kT^5 \Delta f}$$

$$\text{NEP}(290 \text{ K}) = 5,0 \cdot 10^{-11} \text{ W}$$

$$\text{NEP}(3 \text{ K}) = 5,5 \cdot 10^{-16} \text{ W}$$

RMS-Fluktuation der Wärmeleistung W_T , die im thermischen Gleichgewicht zwischen Wärmequelle und Wärmesenke ausgetauscht wird.

Thermischer Wärmeleitwert minimal für Austausch nur durch Strahlung.

NEP – einfallende Strahlungsleistung, bei der das Signal-Rauschverhältnis am Ausgang des Detektors gleich 1 wird – hier sog. **Background Fluctuation Limit** durch rauschende Hintergrundstrahlung, die auf den Detektor trifft

wenn Absorptionsgrad $\alpha=1$ (schwarzer Receiver) und ferner gewählt wird: Übertragungsbandbreite $\Delta f = 1 \text{ Hz}$, $T=290 \text{ K}$, $A=1 \text{ cm}^2$. Diese Nachweisgrenze wird von den besten thermischen Sensoren nahezu erreicht.

im Weltraum bei nahezu verschwindender Einstrahlung

Seebeck-Effekt

Seebeck-Effekt:

Tritt über einem Leiter oder Halbleiter ein Temperaturgradient auf, so diffundieren mehr heiße Elektronen vom heißen zum kalten Ende als langsame Elektronen in umgekehrter Richtung. Die entstehende Potentialdifferenz erzeugt einen dem resultierenden Diffusionsstrom entgegengesetzten Feldstrom. Nur die Thermospannung über den Enden zweier einseitig kontaktierter Thermoschenkel aus verschiedenen Materialien ist messbar:

$$\Delta U = (\alpha_{S,1} - \alpha_{S,2})(T_2 - T_1) = \alpha_{S,12} \cdot \Delta T$$

Seebeck-Koeffizient α_S von Metall sind relativ klein – einige $\mu\text{V/K}$ – die von Halbleitern relativ groß – einige zehn $\mu\text{V/K}$. Sie addieren sich für n- und p-Halbleiter des gleichen Materials.

Verbreitet sind die Kombinationen Ag – Pd, Bi – Te, Sb – Bi sowie n- und p-Halbleiter aus BiTeO_3 .

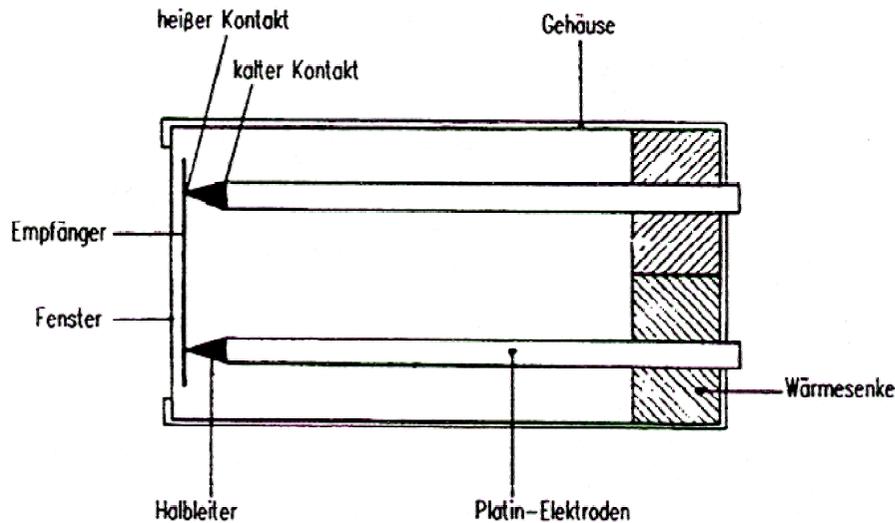
Strahlungsthermoelement, Thermosäule

Mit Metalloxiden (z.B. Black Paint von Xerox) geschwärzte Empfängerfläche ist für eine kleine Wärmekapazität als dünne Folie z.B. aus Gold ausgeführt.

Empfänger weitgehend **aselektiv**, Spektralbereich i.w. nur durch Transmission des Eintrittsfensters bestimmt.

Folie kontaktiert die beiden Thermoschenkel unterschiedlicher Thermokraft. Zur Verringerung der Wärmeableitung sind die Kontakte mit kleinem Querschnitt (spitz) ausgeführt.

Enden, verbunden mit elektrischen Anschlüssen (aus Kupfer), werden durch temperierte Wärmesenke auf derselben Temperatur gehalten Die Bezugstemperatur ist i.d.R. niedriger als die Kontakttemperatur.



Schematische Darstellung eines Hilger-Schwarz Strahlungsthermoelements

Optimierung von Thermosäulen

Optimierung:

1. großer Seebeck-Koeffizient α_s
2. große elektrische Leitfähigkeit σ zur Minimierung Joulescher Wärme
3. kleine thermische Leitfähigkeit κ zur Minimierung von Wärmeleitung vom heißen zum kalten Kontakt

Gütezah $\sigma \alpha_s^2 / \kappa$ relativ klein für Metalle, nicht nur wegen der kleinen Seebeck-Koeffizienten sondern auch wegen der fixen Vorgabe $\kappa/(\sigma T) = L_{\text{Lorenz}}$ (Wiedemann-Franz).

Bestes thermoelektrisches Material – hoch dotierte Halbleiter, z.B. Bi_2Te_3 .

Thermosäule, Serien- und Parallelschaltung von Thermoelementen z.B. aus Sb und Bi,

besitzt höhere Empfindlichkeit und größere Empfängerfläche im Vergleich zum einzelnen Strahlungsthermoelement.

eingesetzt als Laserdetektor oder zur aselectiven Radiometrie

Eigenschaften von Thermosäulen

Herstellung meist mit Dünnschichttechnik:

Thermoelektrische Materialien aufgedampft auf einer sehr dünnen isolierenden **Membran** aus Al_2O_3 oder PTFE und betrieben unter Schutzgas (Ar)

Typisch 12 – 120 **Kontakte**, aktive **Fläche** von $0,2 \times 2 \text{ mm}^2$ bis etwa 28 mm^2

Zeitkonstante zwischen 10 ms und 300 ms

DC-Spannungsempfindlichkeit von 1 – 30 V/W

Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit von $-0,3 - 3\%/K$

NEP = $3 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-8} \text{ W}$ für $\Delta f = 1 \text{ Hz}$

Ausgangswiderstand von 1 – 40 k Ω

Messbereich von 1 nW bis 100 μW

Problematisch ist die Temperaturdrift durch Änderung der Umgebungstemperatur, gemindert durch Schalten von bestrahlten und unbestrahlten Thermoelementen in Differenz oder durch Chopping der Strahlung und Hochpassfilterung

Bolometer - Spannungsempfindlichkeit

Bolometer – Widerstandselement mit großem Temperaturkoeffizienten α_r

in Dünnschichttechnik aufgebracht auf isolierendem Al_2O_3 oder SiO_2

$\Delta U = I \cdot \Delta R = I \cdot \alpha_r \cdot R \cdot \Delta T$ bei eingprägtem Strom I durch Temperaturänderung ΔT erzeugte Spannungsänderung ΔU über Bolometer

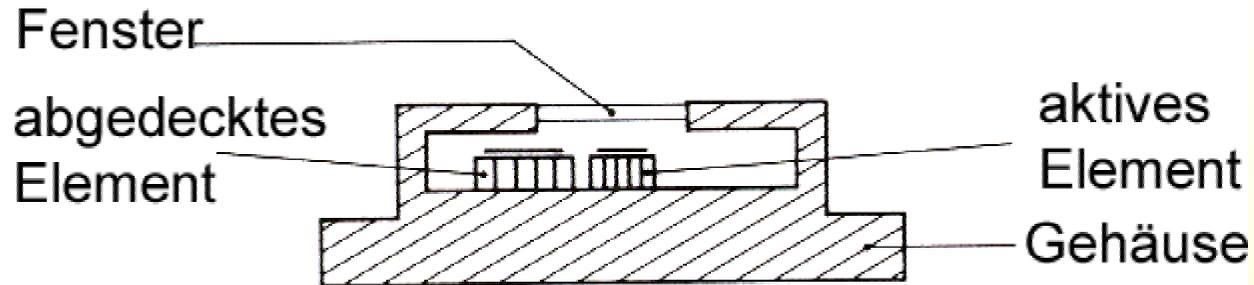
$$(\Delta T)_\omega = \frac{\alpha \cdot \Phi_\omega}{\sqrt{G^2 + \omega^2 C^2}}$$

$$s = \frac{\Delta U}{\Phi_\omega} = R \cdot I \frac{\alpha \cdot \alpha_r}{\sqrt{G^2 + \omega^2 C^2}} = \alpha_r \cdot R \cdot I / G \frac{\alpha}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_T^2}}$$

Für hohe Empfindlichkeit s nicht nur möglichst großer Temperaturkoeffizient α_r und Absorptionsgrad α sondern auch große Widerstands- und Stromwerte R und I .

Allerdings: R und I zu begrenzen wegen Joulescher Wärmeentwicklung und insbesondere R in Verbindung mit der Verstärkereingangskapazität wegen größerer el. Zeitkonstante

Bolometer – Materialien, Eigenschaften



Materialien:

Metallfilme: Au, Bi, Pt

Metalloxide: Ni-, Mn-, Mg-, Co-Oxid

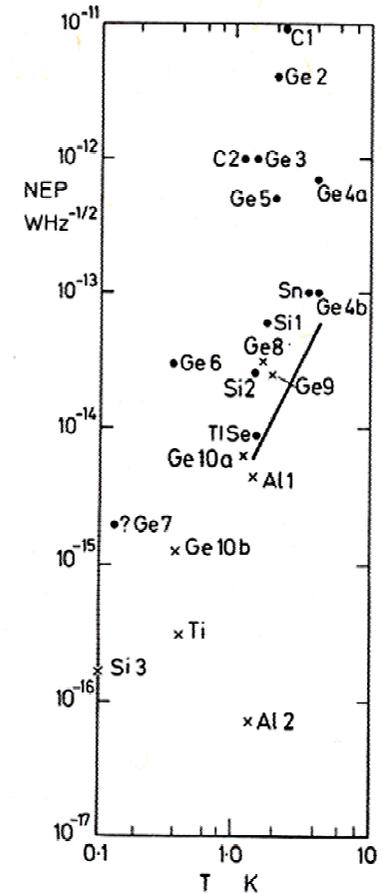
Halbleiter: Ge, Si

Supraleiter: Sn, Al, Ti bei Temperaturen des fl. Heliums

Bei sehr niedrigen Temperaturen sind die rel. Widerstandsänderungen viel größer und die spezif. Wärmekapazität viel kleiner.

Zeitkonstante von $10^{-2} - 10^{-4}$ s

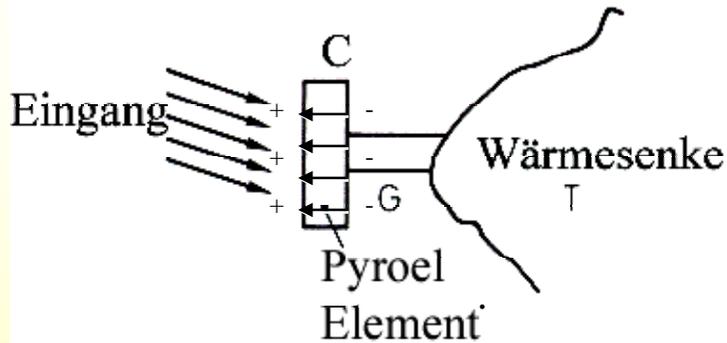
Zur Driftkompensation in Wheatstone-Brücke paarweise betrieben V/W (Sn) – $3 \cdot 10^7$ V/W (Ge)



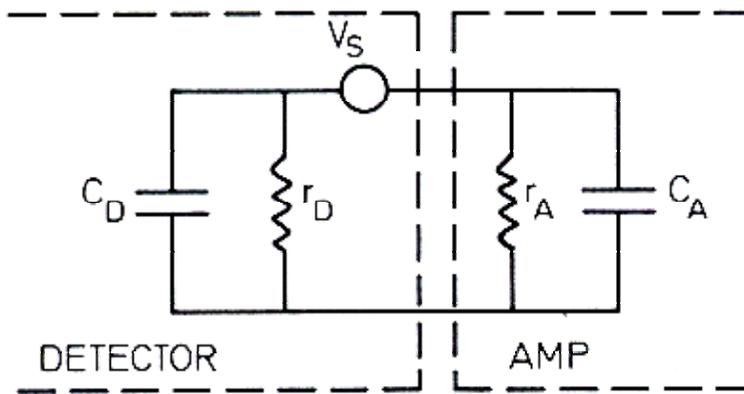
NEP kryogener Bolometer,
Empfindlichkeit $1,4 \cdot 10^3$

V/W (Sn) – $3 \cdot 10^7$ V/W (Ge)

Pyroelektrische Detektoren



Signal nur mit Wechsellicht!



Pyroelektrisches Material besitzt niedrige kristalline Symmetrie und eine spontane elektrische Polarisation.

Stationär ist das innere el. Feld gleich ausgerichteter elektrischer Dipole kompensiert durch das Feld von Ladungen auf der Materialoberfläche.

Durch Temperaturerhöhung erniedrigt sich die spontane Polarisation und damit das Dipolfeld.

Da das Material ein recht guter Isolator ist, verbleibt auf der Oberfläche für den Moment der Temperaturänderung die nun nicht mehr kompensierte äußere Ladung.

Ausgeführt als Kondensator mit einseitig transparenter Elektrode und mit dem pyroelektrischem Material als Dielektrikum fließt bei geschlossenem Außenkreis durch den Detektor ein Verschiebungsstrom. Ersatzschaltung: **Spannungsquelle in Serie mit Kondensator!**

Empfindlichkeit des pyroelektrischen Detektors

$$\Delta U = \frac{\omega \cdot p \cdot A \cdot r_D}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_E^2}} (\Delta T)_\omega$$

$$\tau_E = r_D \cdot C_D \quad \text{elektrische Zeitkonstante}$$

$$C_D = \epsilon_0 \epsilon_r A / d \quad \text{Detektorkapazität}$$

$$s = \frac{\Delta U}{\Phi_\omega} = \frac{\alpha \cdot \omega \cdot p \cdot A \cdot r_D / G}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_E^2} \sqrt{1 + \omega^2 \tau_T^2}}$$

$$\tau_T = C / G \quad \text{thermische Zeitkonstante}$$

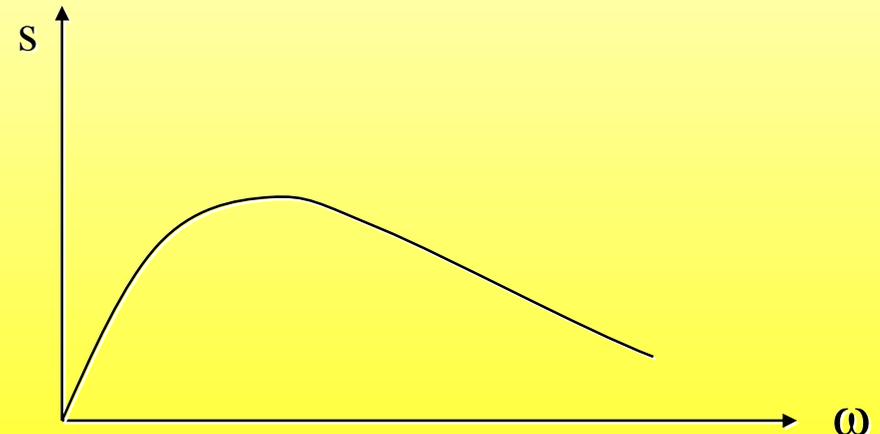
$$C = c_p \cdot A \cdot d \quad \text{Wärmekapazität}$$

Durch periodische Temperaturänderung mit der Amplitude $(\Delta T)_\omega$ und Frequenz ω erzeugte pyroelektrische Spannung ΔU

A Empfängerfläche, normal zur polaren Achse

$p = 10^{-9} - 10^{-8} \text{ As}/(\text{cm}^2\text{K})$ pyroelektrischer Koeffizient

Empfindlichkeit s



Güte pyroelektrischer Empfänger, Materialien

$$s \approx \alpha \cdot \omega \cdot p \cdot A \cdot r_D / G \text{ für } \omega \ll 1/\tau_E, 1/\tau_T$$

s verschwindet für $\omega \rightarrow 0$

$$s \approx \text{const für mittlere Frequenzen}$$

$$\tau_E \neq \tau_T, \tau_E, \tau_T \approx 10^{-2} - 10 \text{ s}$$

$$s = \frac{\alpha \cdot p \cdot A}{\omega \cdot C \cdot C_D} = \frac{\alpha}{\omega \cdot A \cdot \epsilon_0} \frac{p}{\epsilon_r \cdot c_p} \text{ für } \omega \gg 1/\tau_E, 1/\tau_T$$

Hochfrequenznäherung,
meist anwendbar!

$$\frac{p}{\epsilon_r \cdot c_p}$$

Gütekennzahl für pyroelektrisches Material relativ groß für

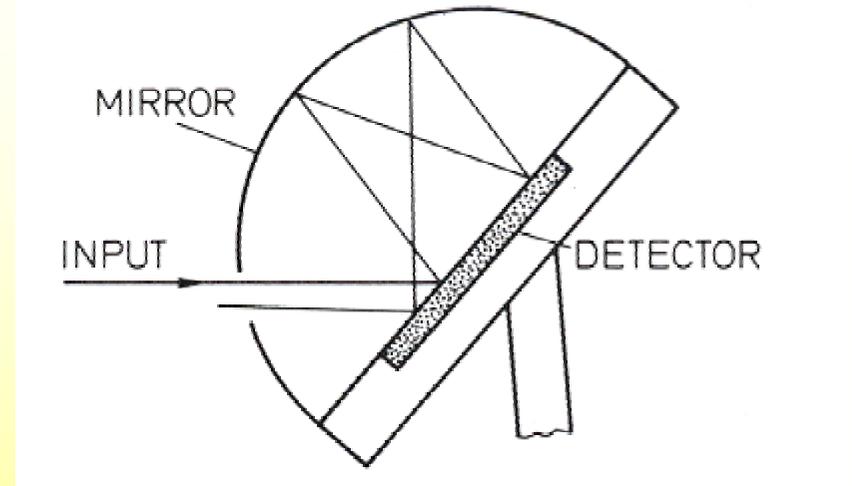
Lithiumtantalat, - niobat, Strontium-Barium-Niobat (SBN), Triglyzinsulfat (TGS), Polymerfilme von Polyvinylfluorid (PVT) und Polyvinylidenfluorid (PVF₂), Lanthan dotiertes Bleizirkonattitanat (PZT)

$$s = 10^2 - 10^5 \text{ V/W}$$

$$\text{NEP} \geq 10^{-10} \text{ W für } \Delta f = 1 \text{ Hz}$$

Einsatz und Betrieb pyroelektrischer Empfänger

Schaffung eines breitbandigen Radiometer-Messkopfes mit nahezu aselektiver spektr. Empfindlichkeit durch Strahlungsfalle (Kavität) über dem Detektor und kleiner „total absorbierender“ Öffnung – **absoluter Empfänger**

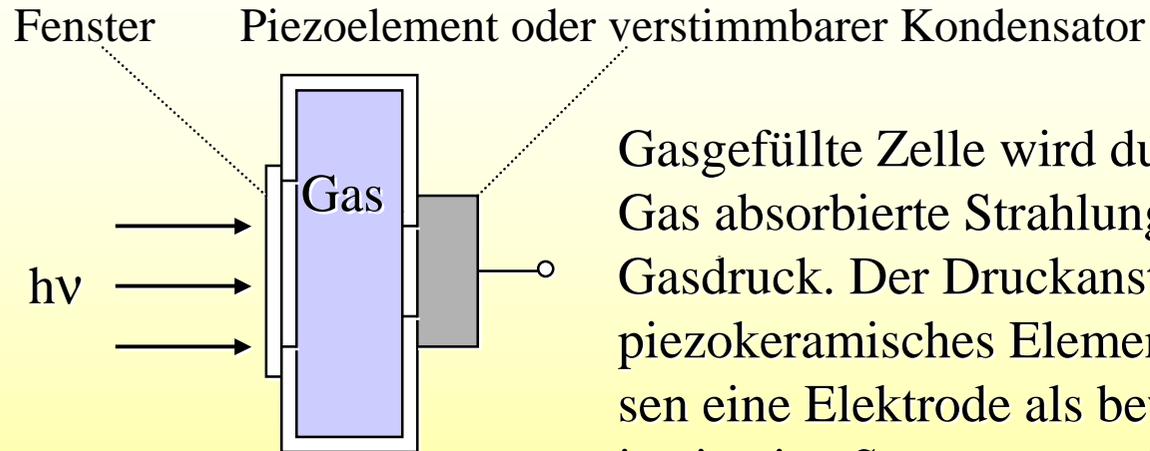


Elektrischer Betrieb mit großem Lastwiderstand von $10^5 - 10^{11} \Omega$ und nachgeschaltetem FET-Sourcefolger (Impedanzwandler)

Anwendung in Bewegungsmeldern (Alarmanlagen), Taudetektoren, Infrarot-Bildtechnik, IR-Spektroskopie

Golay-Zelle

Schematische Darstellung einer Golayzelle (pneumatischer Detektor)



Gasgefüllte Zelle wird durch Fenster bestrahlt. Die vom Gas absorbierte Strahlung heizt dieses auf und erhöht den Gasdruck. Der Druckanstieg wird entweder durch ein piezokeramisches Element oder einen Kondensator, dessen eine Elektrode als bewegliche Membran ausgeführt ist, in eine Spannungsänderung umgesetzt.

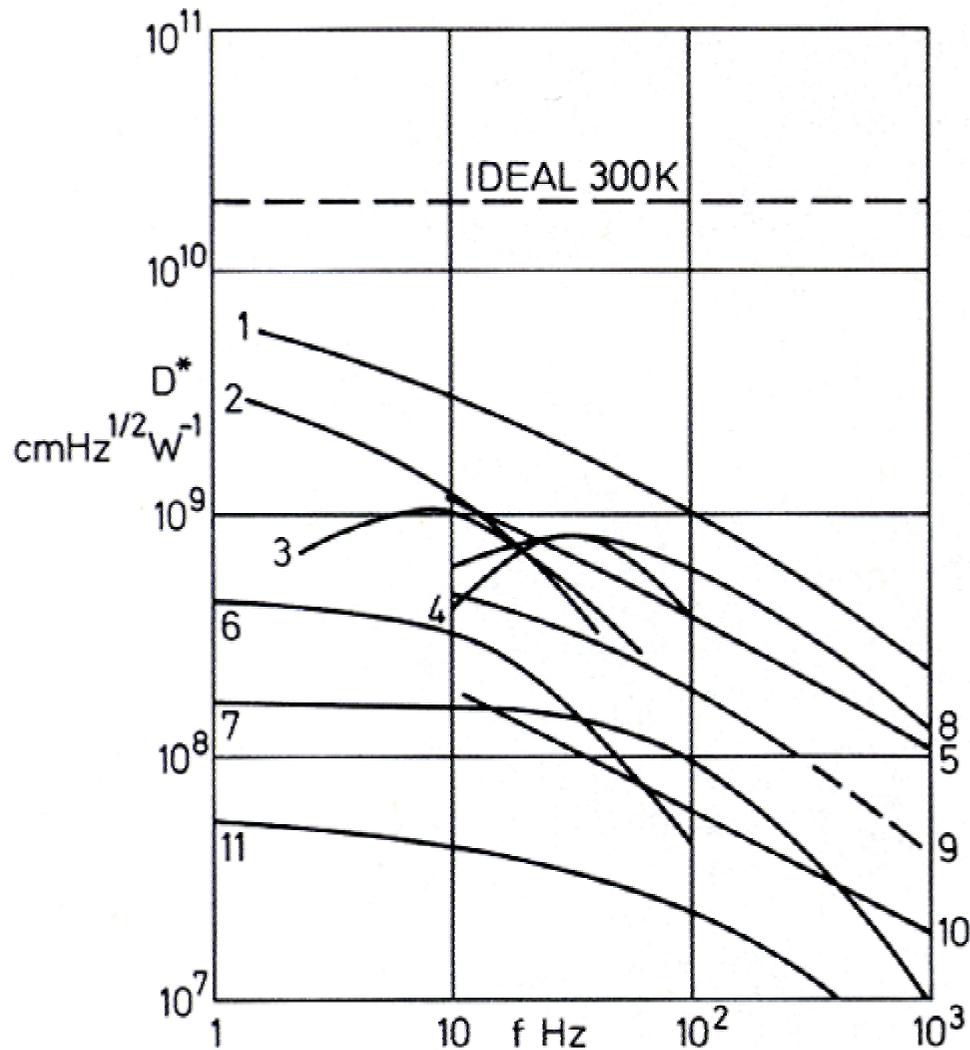
Besonders geeignet für die Gasanalyse, wenn die Wellenlänge der Strahlung auf eine starke Absorptionsbande – meist im IR -, eines Molekül-gases abgestimmt wird.

Zeitkonstante – ca. 10 ms

Spektralbereich – VIS bis Millimeterwellen

NEP – etwa 10^{-10} W für $\Delta f = 1$ Hz

Vergleich thermischer Strahlungsempfänger - Detektivität



1: Pyroel. Detektor: TGS, 10 μm dick
 $A=2,25 \text{ mm}^2$

2: Spektros. Thermosäule, $A=0,4 \text{ mm}^2$

3: Golay-Zelle

4: TRIAS-Zelle

5: TGS-Detektor, $A=0,25 \text{ mm}^2$

6: aufgedampfte Film-Thermosäule

7: getauchter Thermistor, $A=0,01 \text{ mm}^2$

8: LiTaO₃-pyroel. Detektor

9: SBN-pyroel. Empfänger

10: keramischer pyroel. Detektor

11: Dünnschicht-Bolometer