

Pyroelektrische Infrarotsensoren

1. Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise

Bild 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines pyroelektrischen Infrarotsensors. Wesentliche Bestandteile sind das empfindliche Element und der Vorverstärker, dessen wesentliche Elemente im Sensor integriert sind. Das empfindliche Element besteht aus einem dünnen, mit Elektroden versehenen pyroelektrischen Chip. Zur Verbesserung der Absorptionseigenschaften kann eine zusätzliche Schwarzschrift vorhanden sein.

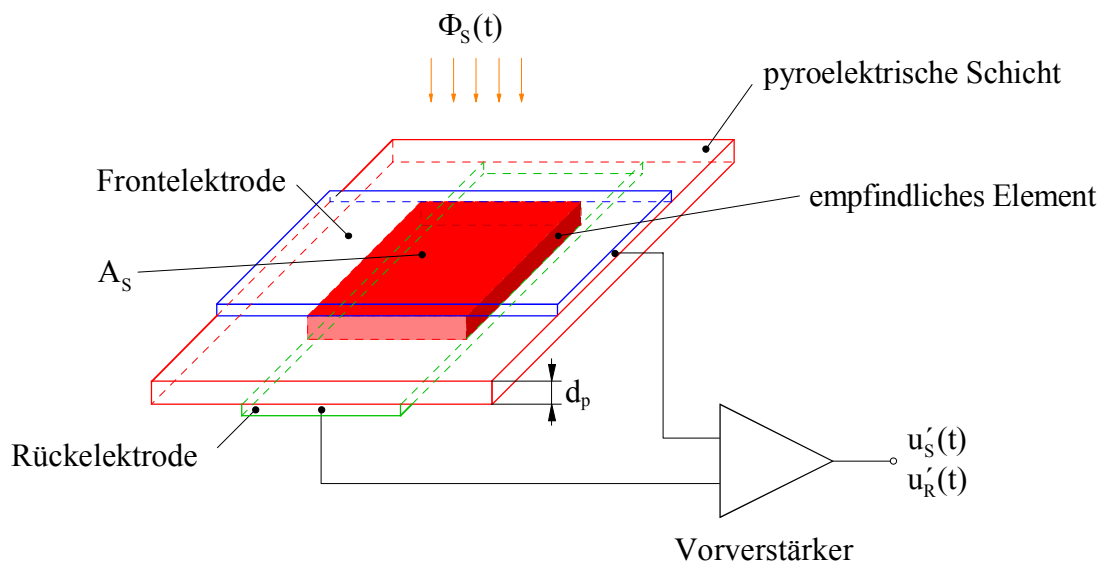


Bild 1: Prinzipieller Aufbau eines pyroelektrischen Infrarotsensors

Trifft der Strahlungsfluss $\Phi_S(t)$ auf die empfindliche Fläche A_S , wird er vom empfindlichen Element mit dem Absorptionsgrad α absorbiert. Dadurch entsteht im Pyroelektrikum eine Temperaturänderung $\Delta T(t)$, die zu einer Ladungsänderung $\Delta Q(t)$ auf den Elektroden führt. Diese Ladungsänderung wird mit Hilfe des Vorverstärkers in die Signalspannung $u'_S(t)$ umgewandelt.

Neben der Signalspannung ist am Ausgang des Vorverstärkers auch eine Rauschspannung $u'_R(t)$ vorhanden. Diese Rauschspannung hat ihre Ursache in den Rauschquellen sowohl des empfindlichen Elements als auch des Vorverstärkers. Sie bewirkt, dass kein beliebig geringer Strahlungsfluss vom Sensor nachgewiesen werden kann.

2. Sensorkenngrößen

Die wichtigsten Sensorkenngrößen sind die Empfindlichkeit S_V , die rauschäquivalente Strahlungsleistung NEP und die spezifische Detektivität D^* . Sie sind für sinusförmige Vorgänge im eingeschwungenen Zustand definiert und im allgemeinen von der Modulationsfrequenz f , der Wellenlänge λ und der Sensortemperatur T abhängig.

a) Empfindlichkeit

Die Empfindlichkeit S_V ist der Quotient der Effektivwerte der sinusförmigen Signalspannung \tilde{u}'_S am Vorverstärkerausgang und des sinusförmig modulierten Strahlungsflusses $\tilde{\Phi}_S$, der auf die empfindliche Fläche A_S trifft:

$$S_V = \frac{\tilde{u}'_S}{\tilde{\Phi}_S} \quad [\text{V/W}] \quad (1)$$

b) Rauschäquivalente Strahlungsleistung

Die rauschäquivalente Strahlungsleistung NEP ist eine das Signal/Rausch-Verhältnis charakterisierende Größe:

$$NEP = \frac{\tilde{u}'_R}{S_V} \quad [\text{W}] \quad (2)$$

mit \tilde{u}'_R Effektivwert der Rauschspannung am Ausgang des Vorverstärkers

Durch Kombination der Gleichungen (1) und (2) ist ersichtlich, dass die rauschäquivalente Strahlungsleistung dem Effektivwert des auftretenden Strahlungsflusses bei einem Signal/Rausch-Verhältnis $\tilde{u}'_S / \tilde{u}'_R = 1$ entspricht.

c) Spezifische Detektivität:

Die spezifische Detektivität D^* ist eine weitere, das Signal/Rausch-Verhältnis kennzeichnende Größe:

$$D^* = \frac{\sqrt{A_S B}}{NEP} = \frac{\sqrt{A_S} S_V}{\tilde{u}'_{Rn}} \quad [\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}] \quad (3)$$

mit $\tilde{u}'_{Rn} = \tilde{u}'_R / \sqrt{B}$ [V/Hz^{1/2}] (4)

\tilde{u}'_{Rn} Effektivwert der auf eine Rauschbandbreite $B = 1$ Hz normierten Rauschspannung am Ausgang des Vorverstärkers

Die Definition der spezifischen Detektivität ermöglicht den einfachen Vergleich zwischen dem D^* -Wert des realen Sensors und dem theoretischen D^* -Limit. Dieses Limit ist nur von Naturkonstanten (Boltzmann-Konstante k , Stefan-Boltzmann-Konstante σ) und der Temperatur T abhängig:

$$D^*_{\text{max}} = 1 / \sqrt{16k\sigma T^5} \quad (5)$$

Für eine Temperatur von 300 K beträgt dieser Wert

$$D^*_{\text{max}} = 1,8 \cdot 10^{10} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W} .$$

3. Pyroelektrisches Material

Das Pyroelektrikum nimmt als eigentliches Wandlerelement im pyroelektrischen Strahlungssensor eine zentrale Stellung ein. Von den 32 existierenden Kristallklassen besitzen Kristalle mit der Punktgruppensymmetrie 1, m, 2, mm2, 3, 3m, 4, 4mm, 6 und 6mm eine sogenannte spontane Polarisierung, die das Auftreten des pyroelektrischen Effekts ermöglicht. Kristalle dieser Kristallklassen werden Pyroelektrika genannt. Technisch bedeutsam sind Pyroelektrika, bei denen die spontane Polarisierung nur in einer einzigen Richtung im Kristall auftreten kann (einachsige Pyroelektrika). Dazu gehören die Kristallklassen 2, mm2, 3, 3m, 4, 4mm, 6 und 6mm. Die Richtung der spontanen Polarisierung fällt mit der polaren Achse des Kristalls zusammen.

Für den Einsatz in pyroelektrischen Strahlungssensoren sind folgende Materialkenngrößen des Pyroelektrikums von Bedeutung:

p	pyroelektrischer Koeffizient
ϵ_r	Dielektrizitätszahl
tan δ	dielektrischer Verlust
c_p'	volumenspezifische Wärmekapazität

Für hohe Werte von Empfindlichkeit S_V und spezifischer Detektivität D^* sind ein großer pyroelektrischer Koeffizient p und geringe Werte für die Dielektrizitätszahl ϵ_r , den dielektrischen Verlust tan δ und die volumenspezifische Wärmekapazität c_p' erforderlich.

Seit vielen Jahren hat sich das Pyroelektrikum Lithiumtantalat (LiTaO_3) beim Einsatz in pyroelektrischen Sensoren bewährt. Es erfüllt nicht nur die eben genannten Forderungen an die Materialkenngrößen, sondern zeichnet sich auch durch eine ausgezeichnete Temperaturstabilität und sehr gute Reproduzierbarkeit der Sensoreigenschaften aus.

Typische Materialkenngrößen von LiTaO_3 bei Raumtemperatur sind:

$$\begin{aligned} p &= 1,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ccm}^{-2}\text{K}^{-1} \\ \epsilon_r &= 43 \\ \text{tan}\delta &= 0,001 \\ c_p' &= 3,2 \text{ Jcm}^{-3}\text{K}^{-1} \end{aligned}$$

4. Ersatzschaltbilder des empfindlichen Elements und des Vorverstärkers

Die Absorption des Strahlungsflusses Φ_S ruft im Pyroelektrikum eine Temperaturänderung ΔT hervor, die im allgemeinen vom Ort im Pyroelektrikum abhängt. Diese Ortsabhängigkeit kann oft in guter Näherung vernachlässigt werden, so dass das thermische Verhalten des empfindlichen Elements in diesen Fällen durch ein einfaches analoges elektrisches Ersatzschaltbild (Bild 2) mit der Wärmekapazität

$$H_p = c_p' d_p A_s \tag{6}$$

mit d_p Dicke des empfindlichen Elements

und dem thermischen Leitwert G zwischen empfindlichen Element und seiner Umgebung dargestellt werden kann. Auf Grund des statistischen Charakters des Wärmeaustausches zwischen empfindlichem Element und Umgebung entsteht ein sogenanntes Temperaturnauschen. Deshalb ist im Bild 2 zusätzlich eine entsprechende Rauschquelle mit

$$\tilde{p}_{RnT} = \sqrt{4kT^2G} \quad (7)$$

enthalten.

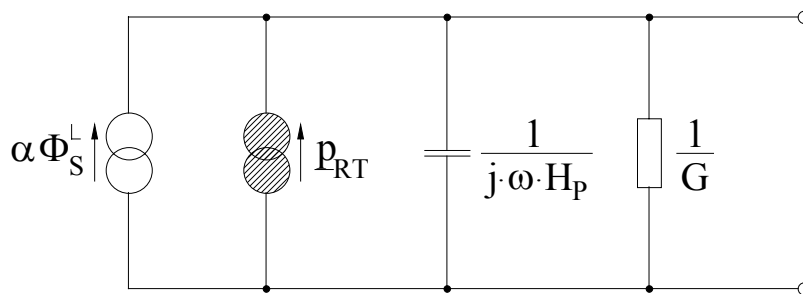


Bild 2: Analoges elektrisches Ersatzschaltbild des empfindlichen Elements bei vereinfachten thermischen Verhältnissen

Die Temperaturänderung ΔT führt zu einem pyroelektrischen Strom, der bei Kurzschluss der Elektroden des empfindlichen Elementes fließt. Unter Berücksichtigung der Definition des pyroelektrischen Koeffizienten und der thermischen Verhältnisse nach Bild 2 ergibt sich dieser pyroelektrische Strom zu

$$\hat{i}_P^{\angle} = \frac{\alpha p \Phi_S}{c'_P d_P} T_R \quad (8)$$

mit
$$T_R = \frac{j\omega\tau_T}{1 + j\omega\tau_T} \quad (9)$$

$$\tau_T = H / G \quad (10)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (11)$$

Die dimensionslose Funktion T_R wird komplexe normierte Stromempfindlichkeit genannt. Für ein ideal thermisch isoliertes empfindliches Element ($G = 0$) erreicht die komplexe normierte Stromempfindlichkeit den Wert 1. Für praktisch interessante Modulationsfrequenzen $f = 1 \dots 1000$ Hz kann bei den meisten Sensor Konstruktionen näherungsweise auch mit diesem Wert 1 gearbeitet werden, weil die thermische Zeitkonstante τ_T entsprechende Werte erreicht. Wird die einfallende Strahlung nicht moduliert ($f = 0$), wird kein pyroelektrischer Strom erzeugt. Der pyroelektrische Sensor ist also nicht gleichlichtempfindlich. Er benötigt immer eine zeitliche Modulation des einfallenden Strahlungsflusses, z.B. durch Chopperung.

Bild 3 zeigt das elektrische Ersatzschaltbild des empfindlichen Elements. Eingangsgröße ist der pyroelektrische Strom nach Gleichung (8). Ersatzelemente sind die elektrische Kapazität

$$C_p = \frac{\epsilon_o \epsilon_r A_s}{d_p} \quad , \quad (12)$$

der frequenzabhängige Widerstand

$$r_p = 1/(\omega C_p \tan \delta) \quad (13)$$

und die sogenannte $\tan\delta$ -Rauschquelle

$$\tilde{i}_{RnD} = \sqrt{4kT\omega C_p \tan \delta} \quad , \quad (14)$$

die das thermische Rauschen des Elementwiderstandes r_p beschreibt.

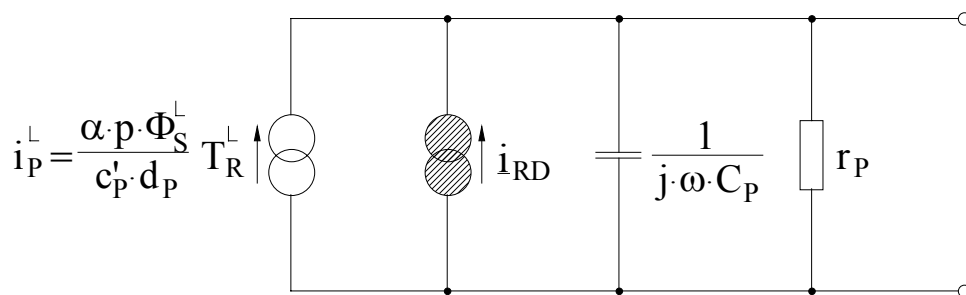


Bild 3: Elektrisches Ersatzschaltbild des empfindlichen Elements

In den Bildern 4 und 5 sind die elektrischen Ersatzschaltbilder der zwei grundsätzlichen Vorverstärkerausführungen (Vorverstärker im Spannungs- oder Strombetrieb) dargestellt. Ersatzelemente sind in beiden Fällen Eingangswiderstand r_{eV} und Eingangskapazität C_{eV} sowie Strom- und Spannungsrauschen \tilde{i}_{RnV} bzw. \tilde{u}_{RnV} des Vorverstärkers. Das thermische Rauschen des Eingangswiderstandes beschreibt die Rauschquelle

$$\tilde{i}_{RnR} = \sqrt{\frac{4kT}{r_{eV}}} \quad . \quad (15)$$

Beim Vorverstärker im Spannungsbetrieb wird zusätzlich die Verstärkung v_V berücksichtigt. Der Vorverstärker im Strombetrieb enthält einen gegengekoppelten Operationsverstärker (Verstärkung $\rightarrow \infty$) mit dem Gegenkopplungswiderstand R_{GK} , dessen Kapazität C_{GK} und dessen thermischem Rauschen

$$\tilde{i}_{RnGK} = \sqrt{\frac{4kT}{R_{GK}}} \quad . \quad (16)$$

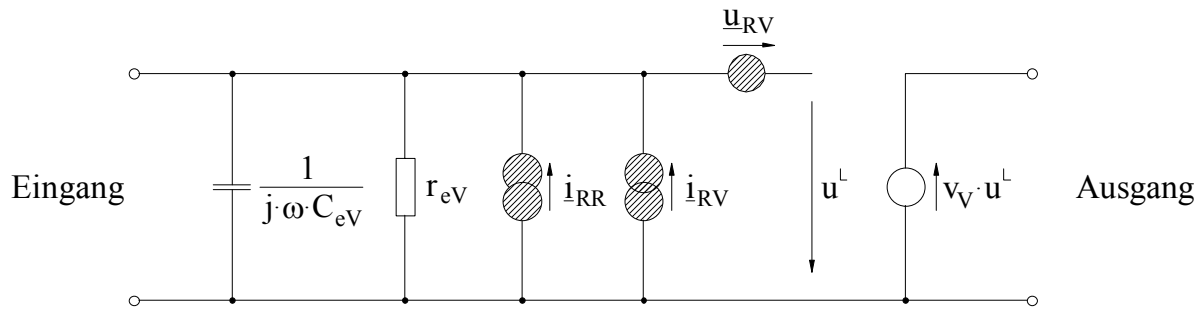


Bild 4: Elektrisches Ersatzschaltbild eines Vorverstärkers im Spannungsbetrieb

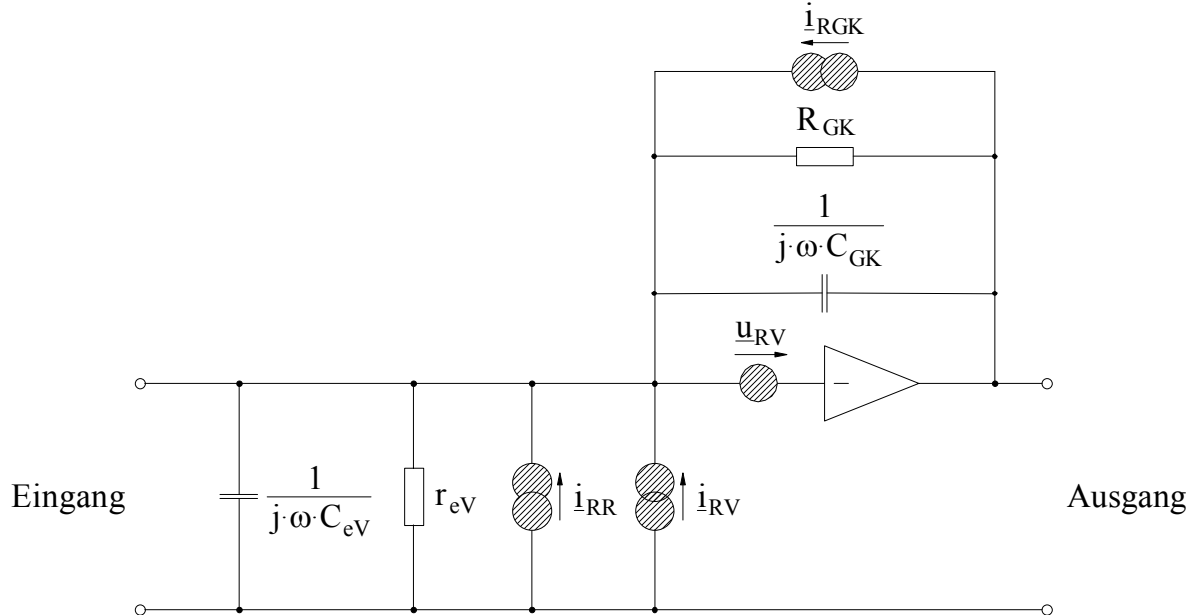


Bild 5: Elektrisches Ersatzschaltbild eines Vorverstärkers im Strombetrieb

5. Empfindlichkeit

Aus der Definitionsgleichung (1) der Empfindlichkeit und den im vorhergehenden Abschnitt erläuterten Zusammenhängen folgt unmittelbar die für den Spannungsbetrieb des Vorverstärkers gültige Gleichung der Empfindlichkeit:

$$S_V = \alpha \frac{p}{c'_p} \frac{|T_R|}{d_p} \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}} v_V \quad (17)$$

mit $R = r_p // r_{eV}$ (18)

$C = C_p + C_{eV}$ (19)

Die elektrische Zeitkonstante ergibt sich zu

$$\tau_E = CR \quad (20)$$

Oft gelten neben $|T_R| \approx 1$ auch $(\omega CR)^2 \gg 1$ und $C_p \gg C_{eV}$. Dann vereinfacht sich Gleichung (17) erheblich:

$$S_V = \alpha \frac{p}{c'_p \varepsilon_r} \frac{v_V}{\varepsilon_o \omega A_S} \quad (21)$$

In diesem Fall ist die Empfindlichkeit indirekt proportional zur Modulationsfrequenz.

Für die Empfindlichkeit im Strombetrieb ergibt sich die Gleichung

$$S_V = \alpha \frac{p}{c'_p} \frac{|T_R|}{d_p} \frac{R_{GK}}{\sqrt{1 + (\omega C_{GK} R_{GK})^2}} \quad (22)$$

Wenn hier ebenfalls $|T_R| \approx 1$ und zusätzlich $(\omega C_{GK} R_{GK})^2 \ll 1$ gelten, erhält man eine von der Modulationsfrequenz unabhängige Empfindlichkeit:

$$S_V = \alpha \frac{p}{c'_p} \frac{R_{GK}}{d_p} \quad (23)$$

Für $(\omega C_{GK} R_{GK})^2 \gg 1$ gilt

$$S_V = \alpha \frac{p}{c'_p} \frac{1}{d_p \omega C_{GK}} \quad (24)$$

6. Normierte Rauschspannung

Die im Abschnitt 4. angegebenen, nicht miteinander korrelierenden Rauschquellen rufen am Ausgang des Vorverstärkers Rauschspannungsanteile

\tilde{u}'_{RnT}	Rauschspannungsanteil, hervorgerufen durch die Temperaturrauschquelle \tilde{p}_{RnT} des empfindlichen Elements
\tilde{u}'_{RnD}	Rauschspannungsanteil, hervorgerufen durch die $\tan\delta$ -Rauschquelle \tilde{i}_{RnD} des empfindlichen Elements
\tilde{u}'_{RnR}	Rauschspannungsanteil, hervorgerufen durch das thermische Rauschen \tilde{i}_{RnR} des Vorverstärkereingangswiderstandes r_{eV}
\tilde{u}'_{RnI}	Rauschspannungsanteil, hervorgerufen durch das Stromrauschen \tilde{i}_{RnI} des Vorverstärkers
\tilde{u}'_{RnU}	Rauschspannungsanteil, hervorgerufen durch das Spannungsrauschen \tilde{u}_{RnU} des Vorverstärkers
\tilde{u}'_{RnGK}	Rauschspannungsanteil, hervorgerufen durch das thermische Rauschen \tilde{i}_{RnGK} des Vorverstärkergegenkopplungswiderstandes R_{GK} (nur im Strombetrieb des Vorverstärkers)

hervor. Die normierte Rauschspannung am Vorverstärkerausgang ergibt sich aus der quadratischen Addition der einzelnen Rauschspannungsanteile:

Vorverstärker im Spannungsbetrieb:

$$\tilde{u}'_{Rn}{}^2 = \tilde{u}'_{RnT}{}^2 + \tilde{u}'_{RnD}{}^2 + \tilde{u}'_{RnR}{}^2 + \tilde{u}'_{RnI}{}^2 + \tilde{u}'_{RnU}{}^2 \quad (25)$$

Vorverstärker im Strombetrieb:

$$\tilde{u}'_{Rn}{}^2 = \tilde{u}'_{RnT}{}^2 + \tilde{u}'_{RnD}{}^2 + \tilde{u}'_{RnR}{}^2 + \tilde{u}'_{RnI}{}^2 + \tilde{u}'_{RnU}{}^2 + \tilde{u}'_{RnGK}{}^2 \quad (26)$$

Die Gleichungen für die einzelnen Rauschspannungsanteile sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Effektivwerte der Anteile der am Vorverstärkerausgang auftretenden normierten Rauschspannung

X	\tilde{u}'_{RnX}	
	Spannungsbetrieb: $R = r_p // r_{eV}, C = C_p + C_{eV}$	Strombetrieb: $R' = r_p // r_{eV} // R_{GK}, C' = C_p + C_{eV} + C_{GK}$
T	$\frac{S_V}{\alpha} \sqrt{4kT^2 G} \quad (27)$	
D	$\sqrt{4kT \omega C_p \tan \delta} \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}} v_V \quad (28)$	$\sqrt{4kT \omega C_p \tan \delta} \frac{R_{GK}}{\sqrt{1 + (\omega C_{GK} R_{GK})^2}} \quad (29)$
R	$\sqrt{\frac{4kT}{r_{eV}}} \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}} v_V \quad (30)$	$\sqrt{\frac{4kT}{r_{eV}}} \frac{R_{GK}}{\sqrt{1 + (\omega C_{GK} R_{GK})^2}} \quad (31)$
I	$\tilde{i}_{RnV} \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}} v_V \quad (32)$	$\tilde{i}_{RnV} \frac{R_{GK}}{\sqrt{1 + (\omega C_{GK} R_{GK})^2}} \quad (33)$
U	$\tilde{u}_{RnV} v_V \quad (34)$	$\tilde{u}_{RnV} \frac{R_{GK}}{R'} \frac{\sqrt{1 + (\omega C' R')^2}}{\sqrt{1 + (\omega C_{GK} R_{GK})^2}} \quad (35)$
GK	-	$\sqrt{\frac{4kT}{R_{GK}}} \frac{R_{GK}}{\sqrt{1 + (\omega C_{GK} R_{GK})^2}} \quad (36)$

7. Spezifische Detektivität

Aus der Definitionsgleichung (3) der spezifischen Detektivität sowie den Grundgleichungen der Empfindlichkeit (Abschnitt 5.) und normierten Rauschspannung (Abschnitt 6.) folgen die von den einzelnen Rauschspannungsanteilen hervorgerufenen Anteile der spezifischen Detektivität

D_T^*	Anteil der spezifischen Detektivität, hervorgerufen durch die Temperaturrauschquelle \tilde{p}_{RnT} des empfindlichen Elements
D_D^*	Anteil der spezifischen Detektivität, hervorgerufen durch die $\tan\delta$ -Rauschquelle \tilde{i}_{RnD} des empfindlichen Elements
D_R^*	Anteil der spezifischen Detektivität, hervorgerufen durch das thermische Rauschen \tilde{i}_{RnR} des Vorverstärkereingangswiderstandes r_{eV}
D_I^*	Anteil der spezifischen Detektivität, hervorgerufen durch das Stromrauschen \tilde{i}_{RnV} des Vorverstärkers
D_U^*	Anteil der spezifischen Detektivität, hervorgerufen durch das Spannungsrauschen \tilde{u}_{RnV} des Vorverstärkers
D_{GK}^*	Anteil der spezifischen Detektivität, hervorgerufen durch das thermische Rauschen \tilde{i}_{RnGK} des Vorverstärkergegenkopplungswiderstandes R_{GK} (nur im Strombetrieb des Vorverstärkers)

Für die gesamte spezifische Detektivität gilt dann:

Vorverstärker im Spannungsbetrieb:

$$\left(\frac{1}{D^*}\right)^2 = \left(\frac{1}{D_T^*}\right)^2 + \left(\frac{1}{D_D^*}\right)^2 + \left(\frac{1}{D_R^*}\right)^2 + \left(\frac{1}{D_I^*}\right)^2 + \left(\frac{1}{D_U^*}\right)^2 \quad (37)$$

Vorverstärker im Strombetrieb:

$$\left(\frac{1}{D^*}\right)^2 = \left(\frac{1}{D_T^*}\right)^2 + \left(\frac{1}{D_D^*}\right)^2 + \left(\frac{1}{D_R^*}\right)^2 + \left(\frac{1}{D_I^*}\right)^2 + \left(\frac{1}{D_U^*}\right)^2 + \left(\frac{1}{D_{GK}^*}\right)^2 \quad (38)$$

Die Gleichungen für die einzelnen Anteile der spezifischen Detektivität enthält Tabelle 2.

Tabelle 2: Anteile der spezifischen Detektivität

X	D_X^*	Bemerkungen
T	$\alpha \sqrt{\frac{A_S}{4kT^2 G}} \quad (39)$	
D	$\alpha \frac{p}{c'_P \sqrt{\epsilon_r \tan \delta}} \frac{1}{\sqrt{4kT \epsilon_o \omega d_P}} T_R \quad (40)$	
R	$\alpha \frac{p}{c'_P} \sqrt{\frac{r_{eV}}{4kT}} \frac{\sqrt{A_S}}{d_P} T_R \quad (41)$	
I	$\alpha \frac{p}{c'_P} \frac{\sqrt{A_S}}{\tilde{i}_{RnV} d_P} T_R \quad (42)$	
U	$\alpha \frac{p}{c'_P} \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega CR)^2}} \frac{\sqrt{A_S}}{\tilde{u}_{RnV} d_P} T_R \quad (43)$	Spannungsbetrieb: R = r _p // r _{eV} C = C _p + C _{eV}
	$\alpha \frac{p}{c'_P} \frac{R'}{\sqrt{1 + (\omega C'R')^2}} \frac{\sqrt{A_S}}{\tilde{u}_{RnV} d_P} T_R \quad (44)$	Strombetrieb: R' = r _p // r _{eV} // R _{GK} C' = C _p + C _{eV} + C _{GK}
	$\alpha \frac{p}{c'_P \epsilon_r} \frac{1}{\epsilon_o \tilde{u}_{RnV} \omega \sqrt{A_S}} T_R \quad (45)$	Spannungsbetrieb: (ωCR) ² >> 1, C _p >> C _{eV} Strombetrieb: ($\omega C'R'$) ² >> 1, C _p >> C _{eV} + C _{GK}
GK	$\alpha \frac{p}{c'_P} \sqrt{\frac{R_{GK}}{4kT}} \frac{\sqrt{A_S}}{d_P} T_R \quad (46)$	nur bei Strombetrieb

8. Beispiele

Für folgende Beispielsensoren werden in den Bildern 6 bis 11 die Frequenzgänge der Empfindlichkeit, der normierten Rauschspannung und der spezifischen Detektivität am Ausgang des Vorverstärkers dargestellt.

Beispielsensor	im Spannungsbetrieb	im Strombetrieb
Empfindliches Element:		
Pyroelektrikum	LiTaO ₃	LiTaO ₃
Empfindliche Fläche A _S	2 x 2 mm ²	2 x 2 mm ²
Dicke d _p	5 μm	5 μm

Absorptionsgrad α	1	1
Normierte Stromempfindlichkeit $ T_R $	1	
Vorverstärker:		
Eingangswiderstand r_{eV}	$10^{11} \Omega$	$10^{11} \Omega$
Eingangskapazität C_{eV}	2 pF	2 pF
Verstärkung v_V	1	-
Gegenkopplungswiderstand R_{GK}	-	$10^{10} \Omega$
Gegenkopplungskapazität C_{GK}	-	0,2 pF
Stromrauschen \tilde{i}_{RnV} (10 Hz)	$5 \cdot 10^{-16} \text{ A/Hz}^{1/2}$	$5 \cdot 10^{-16} \text{ A/Hz}^{1/2}$
Spannungsrauschen \tilde{u}_{RnV} (1 kHz)	$6 \text{ nV/Hz}^{1/2}$	$6 \text{ nV/Hz}^{1/2}$

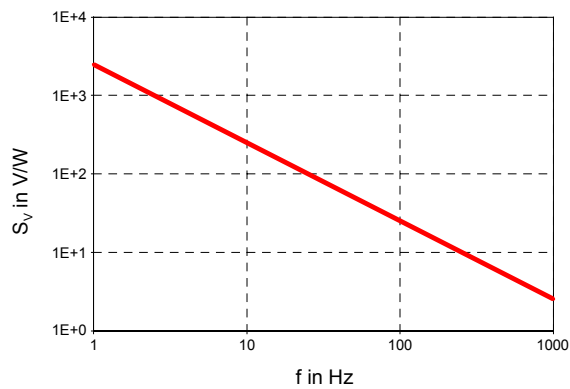


Bild 6: Frequenzgang der Empfindlichkeit im Spannungsbetrieb

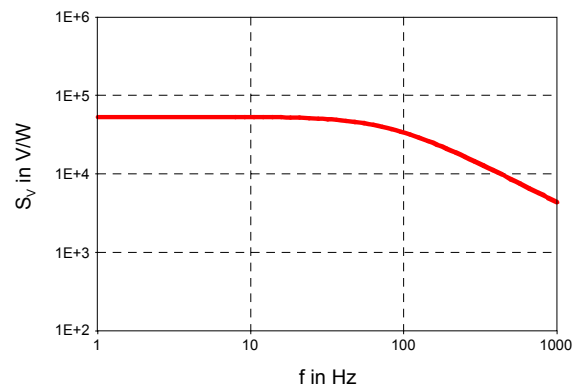


Bild 7: Frequenzgang der Empfindlichkeit im Strombetrieb

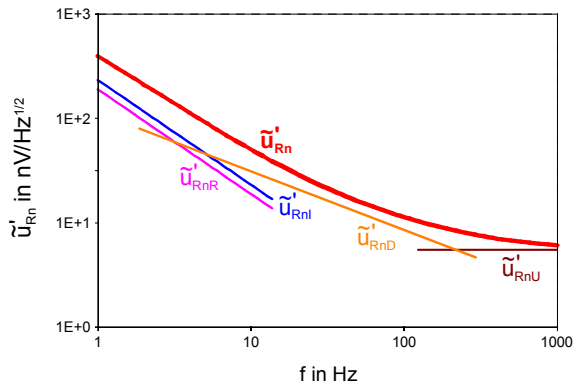


Bild 8: Frequenzgang der normierten Rauschspannung im Spannungsbetrieb

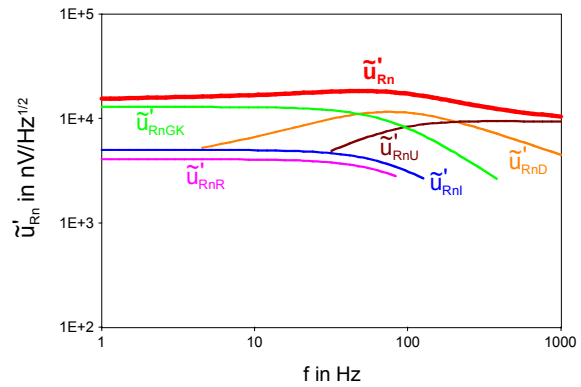


Bild 9: Frequenzgang der normierten Rauschspannung im Strombetrieb

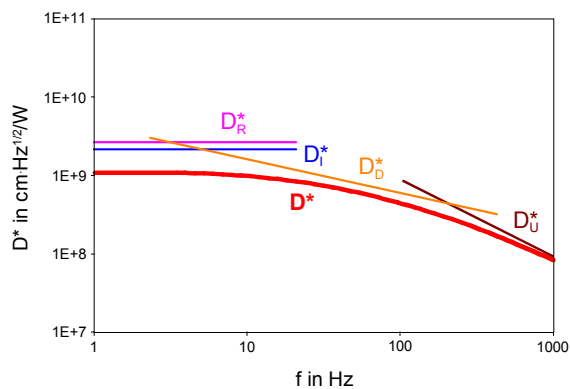


Bild 10: Frequenzgang der spezifischen Detektivität im Spannungsbetrieb

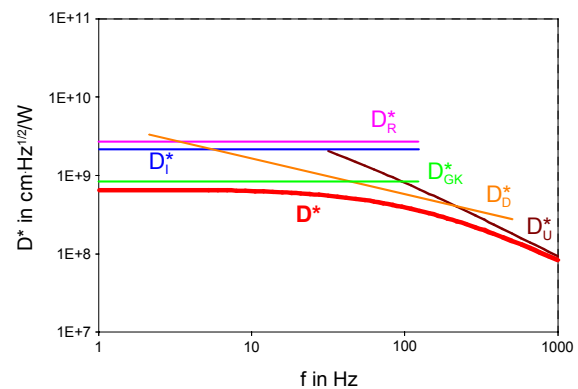


Bild 11: Frequenzgang der spezifischen Detektivität im Strombetrieb