

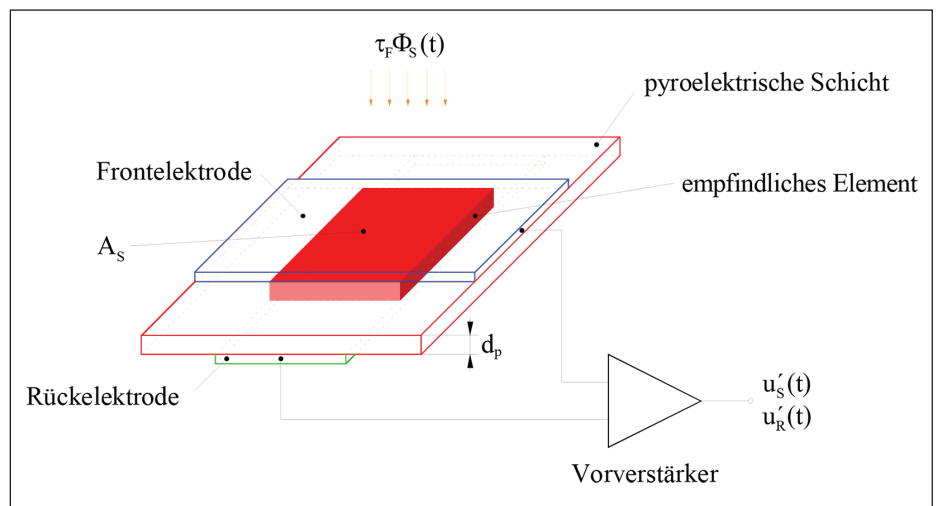
# Pyroelektrische Ein- und Mehrkanalsensoren für Messtechnik-Applikationen

Pyroelektrische Strahlungssensoren gehören zur Klasse der ungekühlten thermischen Infrarotsensoren, die sich zur Messung modulierter Infrarotstrahlung besonders im Wellenlängenbereich zwischen etwa  $1\ \mu\text{m}$  und  $14\ \mu\text{m}$  eignen. Sie zeichnen sich durch hohe Empfindlichkeiten und Signal/Rausch-Verhältnisse aus. Die hier beschriebenen pyroelektrischen Ein- und Mehrkanalsensoren basieren auf dem Pyroelektrikum Lithiumtantalat, das sehr langzeit- und temperaturstabile Sensorkenngrößen ermöglicht. Durch sehr dünne ionenstrahlgeätzte Sensorelemente (Dicke etwa  $5\ \mu\text{m}$ ) und eine rauscharme integrierte Sensorsignalverarbeitung werden besonders hohe Signal/Rausch-Verhältnisse realisiert. Eine zusätzliche dünne strukturierte Absorberschicht auf den Sensorelementen bewirkt eine hohe und spektral gleichmäßige Strahlungsabsorption. Die Sensoren beinhalten ein oder mehrere strahlungsempfindliche Elemente, die optional jeweils mit thermischen Kompensationselementen kombiniert sind. Anwendungsbeispiele dieser Infrarotsensoren sind in der Gasanalytik und berührungslosen Temperaturmesstechnik (Pyrometrie) zu finden.

## Grundaufbau und Sensorkenngrößen

Abb. 1 zeigt den Grundaufbau eines pyroelektrischen Infrarot(IR)-Sensors. Bestandteile sind das empfindliche Element und der Vorverstärker, dessen wesentliche Elemente direkt im Sensor integriert sind. Das empfindliche Element besteht aus einem dünnen pyroelektrischen Chip, das auf der Front- und Rückseite Elektroden besitzt und elektrisch einen Plattenkondensator darstellt. Zur Verbesserung der Absorptionseigenschaften kann eine zusätzliche Schwarzschrift oberhalb der Frontelektrode vorhanden sein.

Trifft der einfallende Strahlungsfluss  $\Phi_S(t)$  über ein IR-Fenster (Transmissionsgrad  $\tau_F$ ) auf die empfindliche Fläche  $A_S$ , wird er vom empfindlichen Element absorbiert. Dadurch entsteht im Pyroelektrikum eine Temperaturänderung, die aufgrund des pyroelektrischen Effekts eine Ladungsänderung auf den Elektroden hervorruft. Diese Ladungsänderung wird im Vorverstärker in die Signalspannung  $u_S'(t)$  umgewandelt. Neben der Signalspannung ist am Ausgang des Vorverstärkers immer eine Rauschspannung  $u_R'(t)$  vorhanden. Diese Rauschspannung hat ihre Ursache in den Rauschquellen sowohl des empfindlichen Elements als auch des Vorverstärkers. Sie begrenzt den Nachweis kleiner Strahlungsflüsse.



▲ Abb. 1: Grundaufbau eines pyroelektrischen Infrarotsensors.

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 von der Modulations- bzw. Chopperfrequenz, der Wellenlänge und der Sensortemperatur abhängig. Die Empfindlichkeit  $S_V$  ist der Quotient der Effektivwerte der sinusförmigen Signalspannung am Vorverstärkerausgang und des auf die empfindliche Fläche  $A_S$  einfallenden sinusförmig modulierten Strahlungsflusses:

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

Die rauschäquivalente Strahlungsleistung

mit dem Effektivwert der Rauschspannung am Ausgang des Vorverstärkers  $\tilde{u}'_R$ . Die rauschäquivalente Strahlungsleistung entspricht dem Effektivwert des auftreffenden Strahlungsflusses bei einem Signal/Rausch-Verhältnis  $\tilde{u}'_S/\tilde{u}'_R = 1$ . Eine weitere, das Signal/Rausch-Verhältnis kennzeichnende Größe ist die spezifische Detektivität  $D^*$ :

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

mit dem Effektivwert der Rauschspannung am Ausgang des Vorverstärkers  $\tilde{u}'_R$ . Die rauschäquivalente Strahlungsleistung entspricht dem Effektivwert des auftreffenden Strahlungsflusses bei einem Signal/Rausch-Verhältnis  $\tilde{u}'_S/\tilde{u}'_R = 1$ . Eine weitere, das Signal/Rausch-Verhältnis kennzeichnende Größe ist die spezifische Detektivität  $D^*$ :

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

mit dem Effektivwert der auf eine

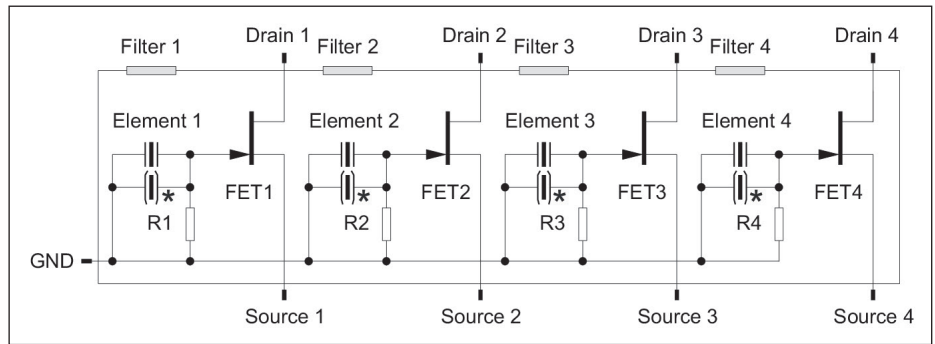
Rauschbandbreite  $B = 1$  Hz normierten Rauschspannung am Ausgang des Vorverstärkers

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

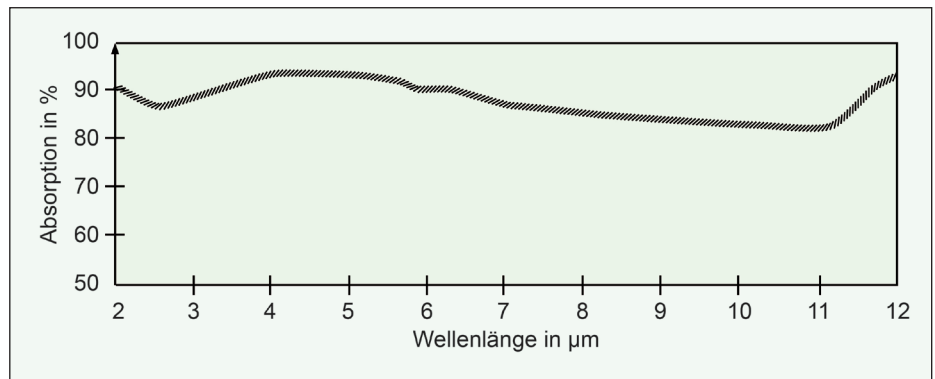
Die Definition der spezifischen Detektivität ermöglicht den einfachen Vergleich zwischen dem  $D^*$ -Wert eines realen Sensors und dem theoretischen  $D^*$ -Limit. Für Temperaturen im Raumtemperaturbereich ( $T = 300$  K) beträgt dieser Wert  $D^*_{max} = 1,8 \times 10^{10}$   $\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ .

### Sensorkonstruktion und Eigenschaften

Bei Einkanalsensoren befinden sich im Sensorgehäuse ein empfindliches Element und für das Signal/Rausch-Verhältnis wichtige Komponenten des Vorverstärkers. Letztere sind im häufigsten Fall ein rauscharmer Sperrschicht-Feldeffekttransistor und ein Hochohmigeingangswiderstand. Der Transistor wird meist als Sourcefolger (Drainschaltung) betrieben, sodass das pyroelektrische Element im sogenannten Spannungsbetrieb arbeitet. Die Integration eines kompletten rauscharmen Operationsverstärkers mit Gegenkopplung ist ebenfalls möglich und für ausgewählte Anwendun-



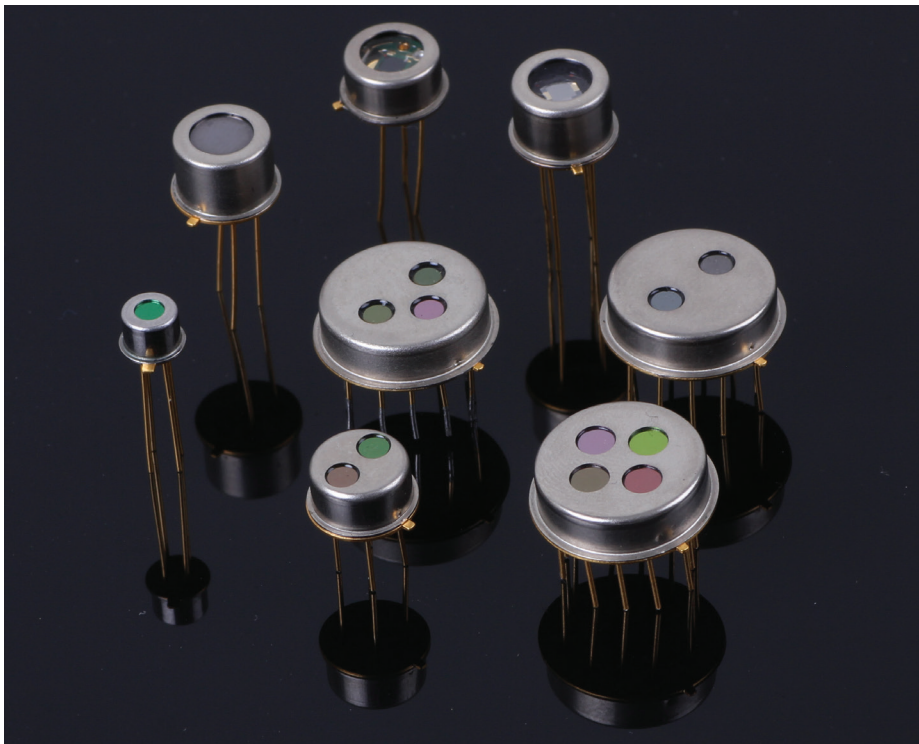
▲ Abb. 2: Pyroelektrischer 4-Kanal-Sensor im Spannungsbetrieb mit thermischen Kompensationselementen (\*).



▲ Abb. 3: Wellenlängenabhängigkeit der spektralen Absorption einer nanostrukturierter NiCr-Schicht [2]

gen sinnvoll. Hier arbeitet das pyroelektrische Element im Strombetrieb. Das pyroelektrische empfindliche Element erzeugt nicht nur elektrische Ladungen beim Einfall modulierter Infrarotstrahlung.

Auch bei Umgebungstemperaturänderungen entstehen elektrische Ladungen, die die Signalverarbeitung erheblich stören können. Das kann wesentlich reduziert werden, indem ein sogenanntes thermisches Kompensa-



▲ Abb. 4: Pyroelektrische Sensoren mit 1, 2, 3 und 4 Kanälen in TO46, TO39 und TO8-Hermetikgehäusen.  
Bild: DIAS Infrared GmbH

tionselement verwendet wird. Das Kompensationselement entspricht konstruktiv dem strahlungsempfindlichen Element, ist aber von der einfallenden Strahlung abgeschirmt. Wird dieses Kompensationselement parallel zum aktiven Element mit umgekehrter Polarität angeordnet, erfolgt eine weitgehende Kompensation von Umgebungstemperaturänderungen, die auf beide Elemente gleichzeitig einwirken.

Bei Mehrkanalsensoren befinden sich mehrere empfindliche Elemente einschließlich zugehöriger elektronischer Komponenten und gegebenenfalls auch thermischen Kompensationselementen in einem Sensorgehäuse. Die Abb. 2 zeigt beispielhaft die elektrischen Schaltungen eines pyroelektrischen 4-Kanal-Sensors im Spannungsbetrieb mit thermischen Kompensationselementen. Für messtechnische Anwendungen, die hohe  $D^*$ -Werte und eine sehr gute Stabilität der Sensorkenngrößen erfordern, wird als pyroelektrisches Material bevorzugt Lithiumtantalat ( $\text{LiTaO}_3$ ) verwendet. Für eine hohe Empfindlichkeit und spezi-

fische Detektivität sind sehr geringe Elementdicken  $d_p$  sowie eine sehr gute thermische Isolation des empfindlichen Elements notwendig. Die spezifische Detektivität steigt je dünner das empfindliche Element ist <sup>[1]</sup>. Üblicherweise werden in pyroelektrischen  $\text{LiTaO}_3$ -Sensoren Elementdicken um  $25 \mu\text{m}$  verwendet. Durch eine Ionenstrahlätztechnologie wurde die Elementdicke der hier beschriebenen pyroelektrischen Sensoren auf Werte von etwa  $5 \mu\text{m}$  reduziert <sup>[2][3]</sup>. Das führt zu einer signifikanten Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses. Für Applikationen in der Messtechnik sind ein möglichst hoher und spektral gleichförmiger Absorptionsgrad der empfindlichen Elemente von Bedeutung. Neben Polymerabsorbieren sowie im Grobvakuum hergestellten Silber-Schwarzsichten werden aktuell auch nanostrukturierte Absorberschichten auf der Basis von NiCr verwendet <sup>[2][4]</sup>. Die Wärmekapazität ist sehr gering. Die Schicht lässt sich fotolithografisch strukturieren. Die Absorption im interessierenden Wellenlängenbereich ist in Abb. 3 dargestellt. Abb. 4 zeigt bei-

spielhaft verschiedene pyroelektrische Ein- und Mehrkanalsensoren. Ionenstrahlgeätzte Sensoren mit Absorberschicht und einer empfindlichen Fläche von  $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  erreichen um  $10 \text{ Hz}$  Modulations- bzw. Chopperfrequenz  $D^*$ -Werte bis  $10^9 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$  (Fenstertransmission  $100\%$ , Strahlertemperatur  $500 \text{ K}$ ). Das sind die höchsten kommerziell verfügbaren Werte für pyroelektrische  $\text{LiTaO}_3$ -Sensoren. Anwendungsbeispiele für die beschriebenen 2- bis 4-Kanalsensoren finden sich in der NDIR-Spektroskopie (nondispersive infrared spectroscopy) zur Gaskonzentrationsmessung. Hier werden sehr schmalbandige Strahlungseintrittsfilter verwendet, beispielsweise um  $4,26 \mu\text{m}$  ( $\text{CO}_2$ -Messung) oder  $4,64 \mu\text{m}$  ( $\text{CO}$ -Messung). In der Pyrometrie werden die dargestellten Einkanalsensoren insbesondere wegen ihrer sehr hohen spezifischen Detektivität und der ausgezeichneten Stabilität der Sensorkenngrößen beispielsweise in Transfer-Strahlungsthermometern der Serie PYROSPOT DY 10 L/G/F cal (DIAS Infrared GmbH) eingesetzt.

## Literatur

- <sup>[1]</sup> G. Hofmann, R. Köhler, Grundlagen pyroelektrischer Infrarotsensoren, [www.dias-infrared.de/produkte/infrarotsensoren/pyroelektrische-ein-und-mehrkanalsensoren-pyrosens](http://www.dias-infrared.de/produkte/infrarotsensoren/pyroelektrische-ein-und-mehrkanalsensoren-pyrosens).
- <sup>[2]</sup> R. Köhler, D. Wassilew, V. Norkus, M. Schossig, G. Hofmann, Enhanced pyroelectric linear arrays for infrared spectroscopy, AMA Conferences 2017, SENSOR 20 IRS<sup>2</sup> 2017, 754-759.
- <sup>[3]</sup> R. Köhler, Hochsensitive pyroelektrische lineare Arrays für spektroskopische Anwendungen, SENSOR MAGAZIN 3/2018, 9-11.
- <sup>[4]</sup> M. Schossig, V. Norkus, G. Gerlach, Broadband nickel-chromium thin-film absorber for thermal sensors, Eurosensors XXII, Dresden, Germany, 7-10 September 2008. Proceedings. Düsseldorf: VDI 2008. 873-876. (on CD-ROM ISBN 978-3-00-025217-4).

## ► INFO

Autor:  
Dr.-Ing. Reinhard Köhler  
Geschäftsbereichsleiter Infrarot-Sensoren  
DIAS Infrared GmbH  
Pforzheimer Str. 21  
01189 Dresden  
Tel.: 0351 896 74-0  
E-Mail: [r.koehler@dias-infrared.de](mailto:r.koehler@dias-infrared.de)  
[www.dias-infrared.de](http://www.dias-infrared.de)