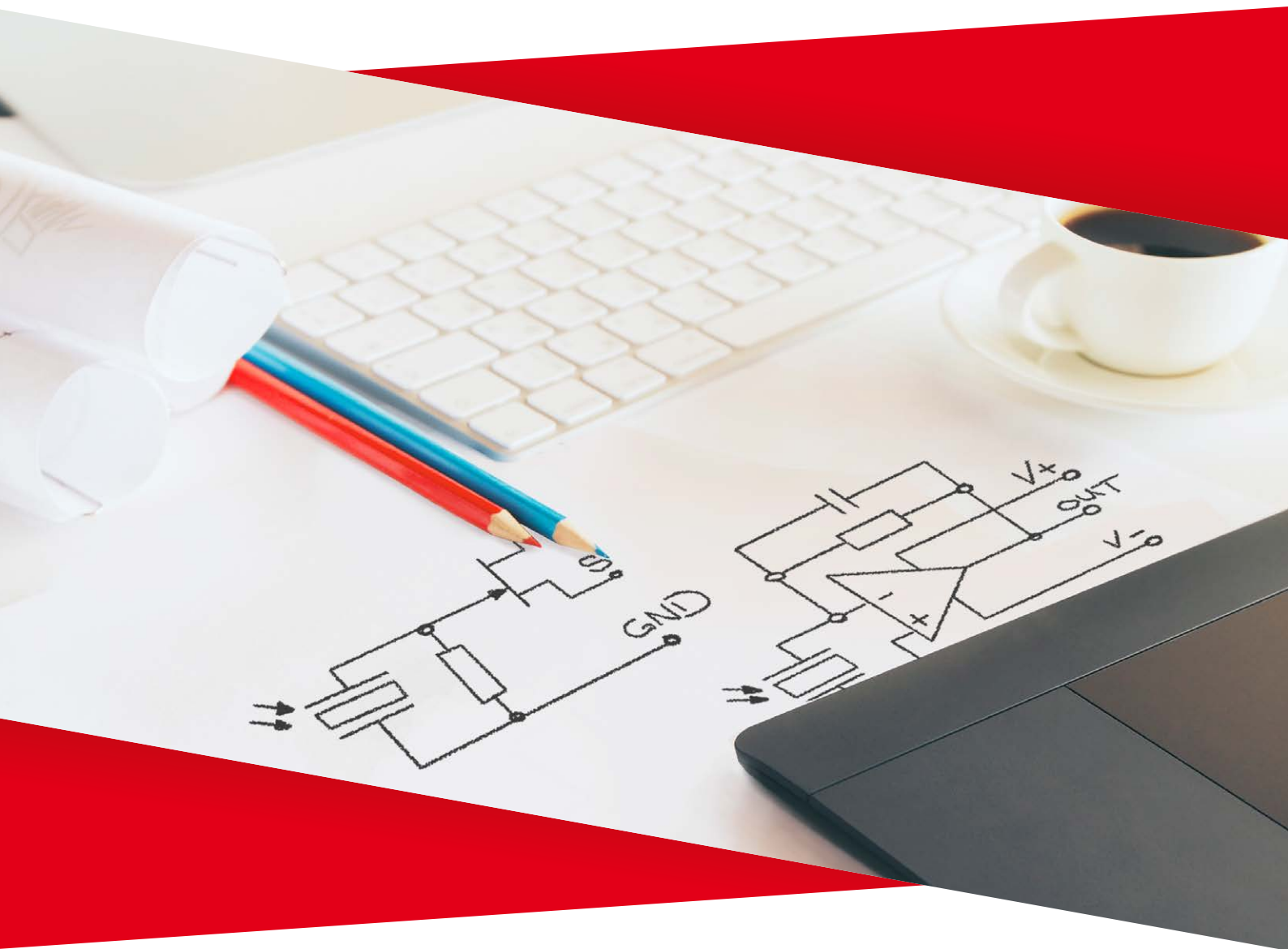


# Integrierte Verstärkung

Funktionsweise und Eigenschaften im Strom- und Spannungsbetrieb



# Integrierte Verstärkung

Die durch den pyroelektrischen Effekt erzeugte Ladung lässt sich als Strom erfassen. Aufgrund der hohen Ausgangsimpedanz des pyroelektrischen Wandlers ist es jedoch erforderlich, diesen in eine messtechnisch verwendbare Größe umzuwandeln. Das ist alternativ in zwei Betriebsarten möglich:

- Dem **Spannungsbetrieb**, bei dem der pyroelektrisch erzeugte Strom über einem RC-Glied in eine Spannung konvertiert und nachfolgend impedanzgewandelt wird (Abbildung 5 links zeigt die hierfür verwendete Grundsaltung).
- Dem **Strombetrieb**, bei dem der pyroelektrische Strom durch einen OPV permanent kompensiert wird. Der dafür benötigte Strom erzeugt einen Spannungsabfall über einem RC-Netzwerk im Rückkoppelzweig, welcher als Messsignal dient, wie Abbildung 5 rechts illustriert.

Spannungsbetrieb

Strombetrieb

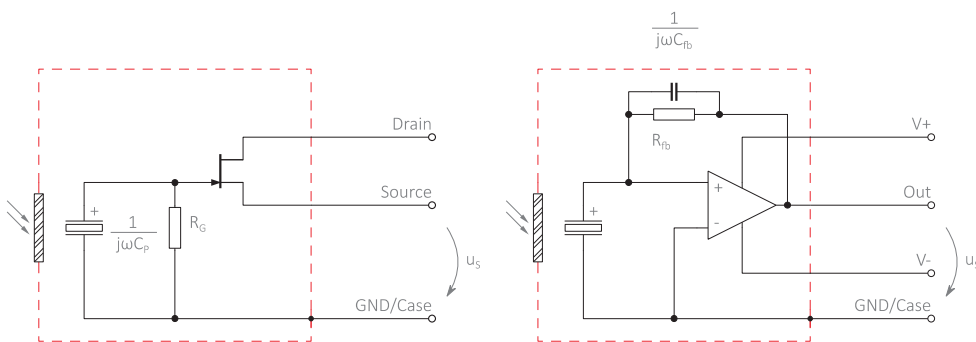


Abbildung 5: Vorverstärkergrundsaltungen im Spannungs- und im Strombetrieb

# Integrierte Verstärkung

## 2.1 Spannungsbetrieb

### 2.1.1 Grundlagen

Durch seine einfache Realisierbarkeit, seine preiswerten Komponenten und deren geringen Platzbedarf ist der Spannungsbetrieb seit Jahrzehnten für pyroelektrische Detektoren die am weitesten verbreitete Betriebsart.

Dem pyroelektrischen Element wird ein Widerstand parallel geschaltet. Über dem somit entstandenen RC-Glied fällt dann durch den pyroelektrischen Strom  $\tilde{i}_p$  (Gl. 10) eine Spannung ab. Da jedoch der Strom in der Größenordnung einiger Picoampere und die Spannung im Bereich weniger Millivolt liegt, ist eine direkte Messung nicht möglich. Aus diesem Grund wird die Spannung über dem Widerstand mittels eines JFET in Sourcefolgerschaltung in ein niederimpedantes und somit messtechnisch einfacher auswertbares Signal gewandelt. Die so erzielbare Spannungsverstärkung  $A_V$  ergibt sich aus der Steilheit  $g_{fs}$  des JFET und dem Sourcewiderstand  $R_S$  zu:

$$A_V = \frac{g_{fs} R_S}{1 + g_{fs} R_S} \leq 1. \quad (21)$$

Diese ist immer kleiner oder gleich eins, bei einem Sourcewiderstand von 47 k $\Omega$  typisch 0,8. Der Ausgangswiderstand ist jedoch deutlich geringer als der am Eingang. Der Hauptzweck des JFET ist also nicht die Spannungsverstärkung, sondern die Impedanzwandlung.

Detektoren im Spannungsbetrieb, wie in Abbildung 6 gezeigt, weisen folgende typische Eigenschaften auf:

- Ein  $\frac{1}{f}$  - Verhalten der Empfindlichkeit und des Rauschens im Frequenzbereich 1 ... 100 Hz mit der Folge eines konstanten Signal-Rausch-Verhältnis in diesem Frequenzbereich.
- Um eine hohe Performance des Detektors zu erreichen, ist es notwendig, Widerstandswerte von mindestens 10 G $\Omega$  zu verwenden.
- Ein größerer Widerstand wirkt sich oberhalb der thermischen Eckfrequenz ausschließlich in Form eines geringeren Rauschens, nicht jedoch auf das Signal des Detektors aus.
- Die für die Impedanzwandlung notwendigen Widerstände werden durch InfraTec mit in die verschweißten Metallgehäuse des Detektors integriert, um sie effektiv vor Umwelteinflüssen wie Verunreinigungen und Feuchte zu schützen.
- Das Ausgangssignal von Detektoren im Spannungsbetrieb entspricht dem Zeitintegral der einfallenden Infrarotstrahlung. Dieses integrierende Verhalten unterdrückt hochfrequente Fluktuationen der Strahlung effektiv.
- Durch das im Detektor vorhandene RC-Netzwerk, welches aus der Kapazität des pyroelektrischen Chips und dem Gatewiderstand gebildet wird, ist das Ausgangssignal zur Anregung im Allgemeinen um 90° phasenverschoben.

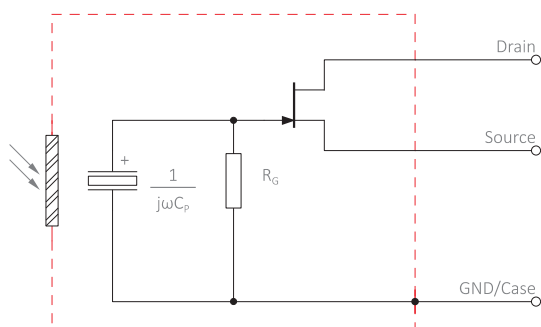


Abbildung 6: Innenbeschaltung eines typischen Detektors im Spannungsbetrieb, wie z. B. LME-302

---

## Integrierte Verstärkung

---

### 2.1.2 Empfindlichkeit

Wie bereits einleitend erwähnt, wird im Spannungsbetrieb der durch den pyroelektrischen Strom erzeugte Spannungsabfall an einem RC-Glied durch den integrierten JFET zu einer niedrigeren und damit messtechnisch besser nutzbaren Ausgangsimpedanz gewandelt. Das RC-Netzwerk besteht hierbei aus der Parallelschaltung des Gatewiderstandes  $R_G$  und der elektrischen Kapazität des pyroelektrischen Elementes  $C_P$ , die sich aus der Chipfläche  $A_P$ , der Dicke  $d_P$  und der Permittivität  $\epsilon_0 \epsilon_r$  des pyroelektrischen Materials zu

$$C_P = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A_P}{d_P} \quad (22)$$

ergibt. Fließt durch dieses Netzwerk der pyroelektrische Strom  $i_P$ , so lässt sich im Falle sinusoidaler Anregung der Effektivwert der Ausgangsspannung  $\tilde{u}_S$  mit

$$\tilde{u}_S = R_G \tilde{i}_P \frac{1}{\sqrt{1 + \omega R_G C_P}} \quad (23)$$

angeben. Zusammen mit (12), (23), (8) und der Definition der elektrischen Zeitkonstanten

$$\tau_{el} = R_G \cdot C_P \quad (24)$$

lässt sich die Spannungsempfindlichkeit eines Detektors im Spannungsbetrieb mit

$$R_V = \frac{\tilde{u}_S}{\tilde{\Phi}_P} = \frac{A_S T_F A_P p R_G}{G_P} \frac{\omega}{\sqrt{1 + (\omega \tau_{th})^2}} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega \tau_{el})^2}} \quad (25)$$

angeben. Da die elektrische Zeitkonstante im Spannungsbetrieb meist größer ist als die thermische und typische Modulationsfrequenzen stets oberhalb der thermischen Eckfrequenz liegen, also  $(\omega \tau_{th})^2 \gg 1$  und  $(\omega \tau_{el})^2 \gg 1$ , lässt sich (25) vereinfachen zu

$$R_V = \frac{A_S T_F A_P p}{G_P \tau_{th}} \cdot \frac{1}{\omega C_P} \quad (26)$$

Nach Einsetzen von (2) und (3) in (26) erhält man schließlich

$$R_V = \frac{A_S T_F}{A_P} \frac{p}{\epsilon_0 \epsilon_r c_p \rho_P} \frac{1}{\omega} \quad (27)$$

Die Empfindlichkeit im Spannungsbetrieb wird also nur von optischen, geometrischen und Materialparametern des Detektors bestimmt und nimmt bei steigender Modulationsfrequenz mit  $\frac{1}{f}$  ab.

# Integrierte Verstärkung

## 2.1.3 Typische Signalformen

Das durch die modulierte Strahlung hervorgerufene Wechsignal ist im Spannungsbetrieb der Arbeitspunktspannung des JFET überlagert, welche im Bereich 400 ... 1.500 mV liegt. Abbildung 7 zeigt das Ausgangssignal eines Detektors LME-302 bei typischen Anregungsfrequenzen von 0,5 Hz, 3 Hz und 10 Hz. Abhängig von der auftreffenden Strahlungsleistung liegen typische Signalamplituden im Spannungsbetrieb ohne IR-Schmalbandfilter im Bereich 1 ... 100 mV.

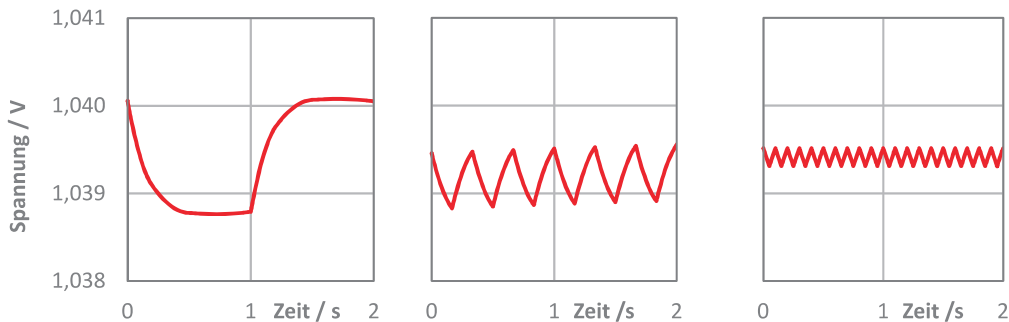


Abbildung 7: Typischer Zeitverlauf des Ausgangssignales eines Detektors LME-302 im Spannungsbetrieb bei 0,5 Hz, 3 Hz und 10 Hz (v.l.n.r.)

## 2.1.4 Rauschen

Im Spannungsbetrieb wird der Frequenzgang der Rauschquellen des pyroelektrischen Elementes durch das Übertragungsverhalten des Vorverstärkers überlagert. Zusätzlich kommen weitere Rauschquellen hinzu, welche durch die Rauscheigenschaften der verwendeten Komponenten und ihrer Verschaltung bedingt sind. So lässt sich der verwendete JFET durch sein Spannungs- und das Stromrauschen beschreiben. Auch der Gatewiderstand stellt eine Rauschquelle dar. Die Wirkungen der einzelnen Rauschquellen auf den Detektorausgang sind in Tabelle 2 dargestellt. Die resultierende Gesamttrauschkichte  $N$  lässt sich mit Gleichung (28) als Wurzel der Summe der Quadrate der genannten Rauschkichten der einzelnen Quellen berechnen.

$$N = \sqrt{N_T^2 + N_\delta^2 + N_{R_G}^2 + N_I^2 + N_V^2} \quad (28)$$

Rauschquelle	Rauschkichte
Thermisches Rauschen des Gatewiderstandes (Johnson-Rauschen)	$N_{R_G} = \sqrt{\frac{4k_B T}{R_G}} \frac{R_G}{\sqrt{1 + \omega\tau_{el}}} A_V \quad (29)$
Stromrauschen des JFET	$N_I = i_G \frac{R_G}{\sqrt{1 + \omega\tau_{el}}} A_V \quad (30)$
Spannungsrauschen des JFET	$N_V = e_N A_V \quad (31)$
$\tan(\delta)$ Rauschen	$N_\delta = \sqrt{4k_B T \omega C_P \tan(\delta)} \frac{R_G}{\sqrt{1 + \omega\tau_{el}}} A_V \quad (32)$
Temperaturrauschen am pyroelektrischen Chip	$N_T = \frac{R_V}{A_S} \sqrt{4k_B T^2 G_{th}} \quad (33)$

Tabelle 2: Fünf wesentliche Rauschquellen und ihre Wirkung auf das Ausgangsrauschen eines Detektors im Spannungsbetrieb ( $e_N$  ist die Rauschspannungsdichte und  $i_G$  der Gateleckstrom des JFET.)

## Integrierte Verstärkung

Abbildung 8 zeigt das Frequenzverhalten der einzelnen Rauschquellen eines Detektors im Spannungsbetrieb sowie die Gesamtrauschdichte am Detektorausgang bei Raumtemperatur. Bei typischen Modulationsfrequenzen im Bereich 1 ... 10 Hz ist das thermische Rauschen des Gatewiderstandes dominant. Durch den exponentiellen Anstieg des Gateleckstromes des JFET mit der Temperatur wird das thermische Rauschen je nach Detektorkonfiguration ab einer Temperatur von 40 ... 90 °C durch das Stromrauschen überdeckt, wodurch auch die Gesamtrauschdichte ansteigt.

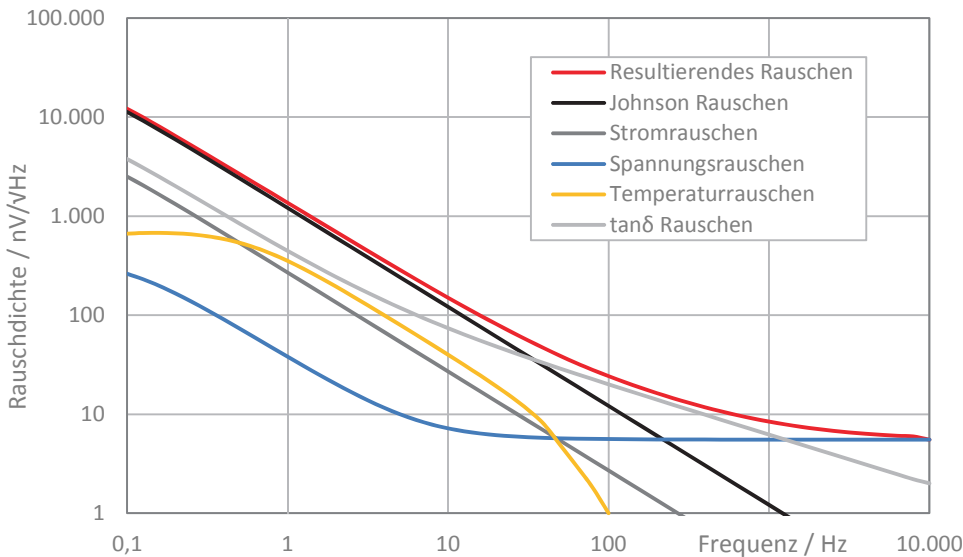


Abbildung 8: Rauschdichte-Frequenzgang und die Anteile der verschiedenen Rauschquellen eines Detektors im Spannungsbetrieb am Beispiel eines LME-302

### 2.1.5 Beschaltung

Durch die Wahl eines möglichst großen Sourcewiderstandes  $R_S$  nähert sich der Wert der Spannungsverstärkung (vgl. Gleichung (21)) dem Wert eins und wird somit unabhängig von Störeinflüssen, wie beispielsweise Temperaturabhängigkeiten und individuellen Schwankungen der Steilheit (forward transconductance)  $g_{fs}$  des JFET. Diese Forderung steht jedoch im Kontrast zu dem Wunsch nach einer geringen Ausgangsimpedanz und einem geringen Rauschen, weshalb der Drainstrom  $I_D$  nicht mehr als ein Zehntel des Sättigungsstroms  $I_{DSS}$  betragen sollte.

$$\frac{I_D}{I_{DSS}} \leq 0,1 \quad (34)$$

Der von InfraTec verwendete JFET besitzt einen typischen Sättigungsstrom von 1 mA, wodurch sich mit (34) Drainströme von 1 ... 100  $\mu$ A ergeben. Ein für Spannungsbetriebsdetektoren von InfraTec optimaler Wert liegt bei 20  $\mu$ A.

Alternativ zur Vorspannung mittels Widerstand, sind in Tabelle 3 weitere Möglichkeiten angegeben, den Drainstrom einzustellen. Hierbei wird das Ziel verfolgt, eine Stromquelle mit möglichst geringer Temperaturabhängigkeit sowie einem großen dynamischen Widerstand zu verwenden.

# Integrierte Verstärkung

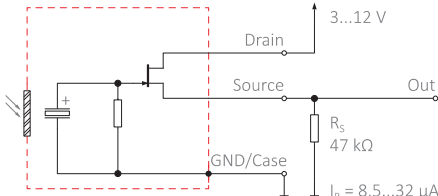
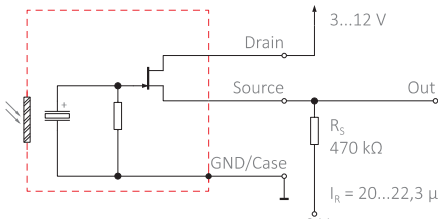
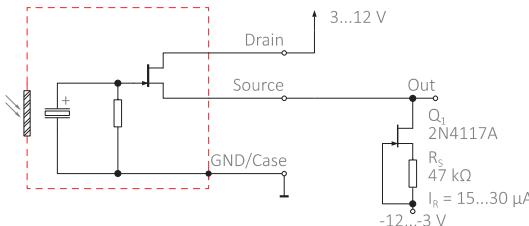
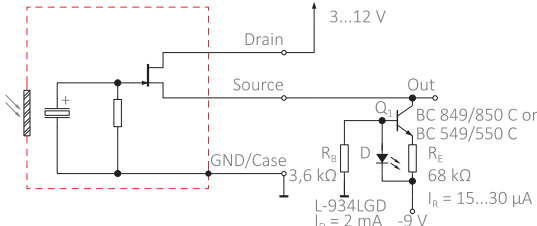
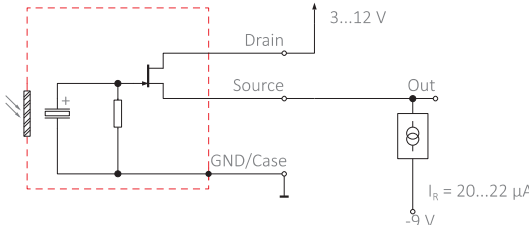
Schaltung	Anmerkungen
<p>(a)</p> 	<p>Einfachste Schaltung mit Eigenvorspannung (Self bias)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Starke Abhängigkeit von Drainstrom und Verstärkung vom Arbeitspunkt</li> <li>■ Unsymmetrisches Ausgangssignal</li> <li>■ Geringe Dynamik</li> </ul>
<p>(b)</p> 	<p>Eigenvorspannung mit negativer Versorgung und größerem Sourcewiderstand</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Geringere Abhängigkeit von Temperatur und Verstärkung</li> <li>■ Größerer Aussteuerbereich als bei (a)</li> <li>■ Symmetrisches Ausgangssignal möglich</li> </ul>
<p>(c)</p> 	<p>Stromquelle mit JFET</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Geringes Rauschen der Stromquelle</li> <li>■ Großer differentieller Ausgangswiderstand</li> <li>■ Größerer Aussteuerbereich als (a)</li> <li>■ Symmetrisches Ausgangssignal möglich</li> </ul>
<p>(d)</p> 	<p>Stromquelle mit Bipolartransistor und LED</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Großer differentieller Ausgangswiderstand</li> <li>■ Geringe Temperaturabhängigkeit</li> <li>■ Größerer Aussteuerbereich als (a)</li> <li>■ Symmetrisches Ausgangssignal möglich</li> <li>■ Hohe Anzahl zusätzlicher Komponenten</li> </ul>
<p>(e)</p> 	<p>Integrierte Stromquelle</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Temperaturstabil</li> <li>■ Nur eine zusätzliche Komponente</li> <li>■ Preisintensive Lösung</li> <li>■ Abhängig vom gewählten Bauelement teils hohes Eigenrauschen der Stromquelle</li> </ul>

Tabelle 3: Varianten rauscharmer Stromquellen zur Arbeitspunkteinstellung von Detektoren im Spannungsbetrieb

### 2.1.6 Layoutempfehlungen

Detektoren im Spannungsbetrieb liefern typischerweise Signalspannungen von einigen hundert Mikrovolt. Um diese effektiv vor Störeinflüssen zu schützen, wird folgendes empfohlen:

- Sourcebeschaltung nah am Detektor platzieren
- Leitungen vom Source des Detektors nachfolgenden Verstärkern möglichst kurz halten und durch Masseleitungen abschirmen
- Analoge und digitale Spannungsversorgung schaltungstechnisch und räumlich trennen und die Spannungsversorgung des Detektors durch einen Tiefpass von anderen Baugruppen entkoppeln
- Masseanbindung sternförmig ausführen und Masseschleifen vermeiden. Insbesondere sei darauf hingewiesen, dass bei vielen Detektortypen das Gehäuse des Detektors mit dessen Masseanschluss verbunden ist.



## 2.2 Strombetrieb

Die Verwendung von pyroelektrischen Detektoren im Strombetrieb hat aufgrund der vielen Vorteile dieser Betriebsart sowie der Verfügbarkeit geeigneter, integrierbarer Verstärker in den letzten Jahren stark zugenommen. InfraTec hat bereits langjährige Erfahrung mit Strombetriebsdetektoren und kann somit ein breites Spektrum von Detektoren zur Anwendung in der Gasanalyse oder der Flammenerkennung anbieten. Verglichen mit dem Spannungsbetrieb bietet der Strombetrieb zahlreiche Vorteile:

- Die elektrische Zeitkonstante ist deutlich geringer als im Spannungsbetrieb, wodurch sich der Einschwingvorgang und die Ansprechzeit der Detektoren deutlich verkürzen.
- Das Hinzufügen einer thermischen Kompensation führt, anders als im Spannungsbetrieb, nicht zu einer Verringerung der Empfindlichkeit. Dadurch können thermisch verursachte Drifteffekte des Arbeitspunktes fast ohne Performanceeinbuße ausgeglichen werden.
- Wird der pyroelektrische Chip nur teilweise ausgeleuchtet, so hat dies keine Verringerung der Empfindlichkeit zur Folge.
- Durch Strom-Spannungs-Wandlung mit Spannungsverstärkungen  $\gg 1$  sind die Ausgangsspannungen von Detektoren im Strombetrieb deutlich höher als im Spannungsbetrieb. Somit können Detektoren, die im Strombetrieb arbeiten, direkt an Analog-Digital-Wandlern betrieben werden.

Anders als beim Spannungsbetrieb lässt sich der Strombetrieb in unterschiedlichen Integrationsstufen realisieren. Tabelle 4 zeigt die unterschiedlichen Möglichkeiten sowie deren Vor- und Nachteile.

### 2.2.1 Empfindlichkeit

Im Strombetrieb wird der durch den pyroelektrischen Effekt erzeugte Strom mittels eines Transimpedanzverstärkers (TIA) kompensiert. Dadurch ist der am Ausgang des Operationsverstärkers fließende Strom gleich dem Kurzschlussstrom des pyroelektrischen Elementes, was zu einem Spannungsabfall über dem Rückkoppelzweig führt. Diese Spannung liegt am Detektorausgang an und kann gemessen werden. Um ein Aufschwingen des Operationsverstärkers (engl.: gain peaking) zu verhindern, ist eine zusätzliche Kapazität im Rückkoppelzweig notwendig, deren minimaler Wert hauptsächlich von den Eigenschaften des im Detektor verwendeten Operationsverstärkers abhängt. Die elektrische Zeitkonstante ist im Strombetrieb daher unabhängig von der Kapazität des pyroelektrischen Chips und lässt sich deutlich kleiner gestalten als im Spannungsbetrieb. Typische Werte der elektrischen Zeitkonstanten im Strombetrieb liegen im Bereich einiger Millisekunden, weshalb der Detektor deutlich mehr Signal bei größeren Modulationsfrequenzen erzeugt und eine kürzere Ansprechzeit bei schnellen Änderungen der einfallenden Strahlungsleistung aufweist.

Die Signalspannung eines Strombetriebsdetektors berechnet sich analog zum Spannungsbetrieb (vgl. Gleichung (23)).

$$\tilde{u}_s = R_{fb} \tilde{i}_p \frac{1}{\sqrt{1 + \omega\tau_{el}}} \quad (35)$$

Hierbei wird die elektrische Zeitkonstante  $\tau_{el}$  jedoch nur durch die Komponenten des Rückkoppelzweiges gebildet,

$$\tau_{el} = R_{fb} \cdot C_{fb} \quad (36)$$

wodurch die Empfindlichkeit unabhängig von der Kapazität des pyroelektrischen Elementes wird.

$$R_V = \frac{\tilde{u}_s}{\tilde{\Phi}_p} = \frac{A_S T_F A_P p R_{fb}}{G_P} \frac{\omega}{\sqrt{1 + (\omega\tau_{th})^2}} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_{el})^2}} \quad (37)$$

---

## Integrierte Verstärkung

---

Für zwei Grenzfälle lässt sich diese Gleichung weiter vereinfachen:

**Fall 1: Die Messfrequenz liegt zwischen der thermischen und der elektrischen Eckfrequenz.**

$(\omega\tau_{th})^2 \gg 1$  und  $(\omega\tau_{el})^2 \ll 1$ , für typische Detektoren bei 3 ... 30 Hz

$$R_V = A_S T_F \frac{p}{c_p \rho_P d_P} R_{fb} \quad (38)$$

In diesem Frequenzbereich ist die Empfindlichkeit unabhängig von der Modulationsfrequenz und proportional zum Rückkopplungswiderstand.

**Fall 2: Die Messfrequenz liegt höher als beide Eckfrequenzen.**

$(\omega\tau_{th})^2 \gg 1$  und  $(\omega\tau_{el})^2 \gg 1$ , für typische Detektoren größer als 100 Hz

$$R_V = A_S T_F \frac{p}{c_p \rho_P d_P} \frac{1}{\omega C_{fb}} \quad (39)$$

Die Empfindlichkeit fällt also mit  $\frac{1}{f}$  und ist umgekehrt proportional zur Kapazität des Rückkoppelzweiges.

# Integrierte Verstärkung

Beschreibung	Innenbeschaltung	Anmerkung
<p>Detektor besteht ausschließlich aus IR-Filter und pyroelektrischem Element</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Störbeeinflussung der hochimpedanten Signale durch kapazitive Kopplung möglich</li> <li>■ Vor Umgebungseinflüssen ungeschützte (da externe) Hochohmwiderstände nur bis ca. 1 GΩ verwendbar</li> </ul>
<p>Zusätzlich zum IR-Filter und dem pyroelektrischen Element sind ein JFET und ein Rückkoppelpfad bestehend aus einem Höchstohmwiderstand und einem Kondensator im Detektorgehäuse integriert</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Kondensator schützt den externen Operationsverstärker vor ungewollten Schwingungen</li> <li>■ Permanente Offsetspannung durch Abschnürspannung des verwendeten JFET</li> <li>■ Gateleckstrom des JFET beeinflusst die Temperaturabhängigkeit des Stromrauschens und das Stromrauschen des Detektors</li> </ul>
<p>Detektor mit IR-Filter, pyroelektrischem Element und integriertem Transimpedanzverstärker</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Sehr geringe statische Offsetspannung max. ±5 mV</li> <li>■ Operationsverstärker und Rückkoppelzweig sind geschützt im Detektorgehäuse montiert</li> </ul>
<p>Detektor mit IR-Filter, pyroelektrischem Element, integriertem Transimpedanzverstärker und Mittenspannungserzeugung für den Betrieb an nur einer Versorgungsspannung</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Offsetspannung mittig zur Versorgungsspannung, z. B. bei 3 V: 1500 mV ± 10 %</li> <li>■ Operationsverstärker und Rückkoppelzweig sind geschützt im Detektorgehäuse montiert</li> </ul>

Tabelle 4: Beschaltungsvarianten von pyroelektrischen Detektoren im Strombetrieb

## 2.2.2 Typische Signalformen

Abhängig von der internen Beschaltung des jeweiligen Detektors (vgl. Tabelle 4) kann dem Ausgangssignal im Strombetrieb eine Offsetspannung überlagert sein. Bedingt durch die geringere elektrische Zeitkonstante sind die Anstiegsgeschwindigkeiten des Signals im Strombetrieb größer als im Spannungsbetrieb. Auch die Amplituden der Signale von Detektoren im Strombetrieb mit vergleichbaren Widerstandswerten sind deutlich größer. Ohne IR-Schmalbandfilter können sie je nach Rückkoppelwiderstand und auftreffender Strahlungsleistung im Bereich 100 mV ... 1 V liegen. Es ist zu beachten, dass der Rückkoppelwiderstand (detektorabhängig 5 ... 100 GΩ) eine Spannungsabhängigkeit des Widerstandswertes der Größenordnung -2 %/V aufweist. Um aussteuerungsabhängige Nichtlinearitäten zu minimieren, sollte der Betrag des Ausgangssignales daher Spitzenwerte von 1 V nicht überschreiten. Abbildung 9 zeigt das Ausgangssignal eines Detektors LME-335 bei ausgewählten Anregungsfrequenzen.

## Integrierte Verstärkung

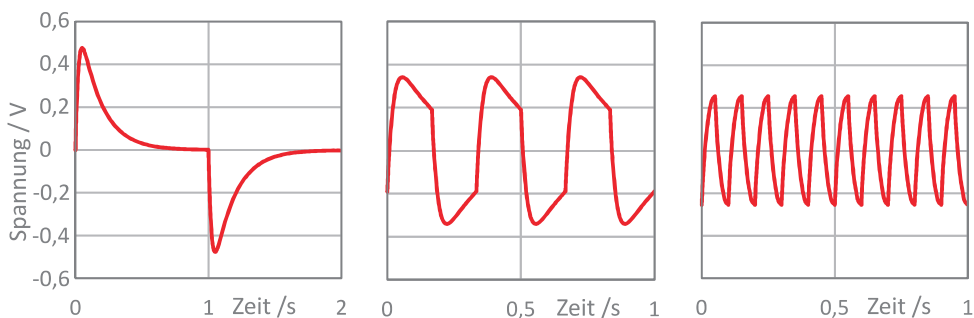


Abbildung 9: Typische Signalformen eines Strombetriebsdetektors am Beispiel eines LME-335 bei 0,5 Hz, 3 Hz und 10 Hz (v.l.n.r.)

### 2.2.3 Rauschen

Um die Rauschdichte eines Detektors im Strombetrieb anzugeben, werden die Rauschquellen des pyroelektrischen Elementes (vgl. Abschnitt 1.3) mit der Übertragungsfunktion des Verstärkers überlagert. Die Rauschquellen des verwendeten Operationsverstärkers lassen sich ähnlich wie die eines JFET (Abschnitt 2.1.4) darstellen. Die in den unterschiedlichen Frequenzbereichen dominanten Rauschquellen sind das thermische Rauschen des Rückkoppelnetzwerkes, das Rauschen aufgrund des Eingangsleckstromes sowie das Spannungsrauschen des Operationsverstärkers.

Abbildung 10 zeigt die Komponenten der Rauschspannungsdichte und deren Überlagerung über der Frequenz beispielhaft für den Detektortyp LME-335.

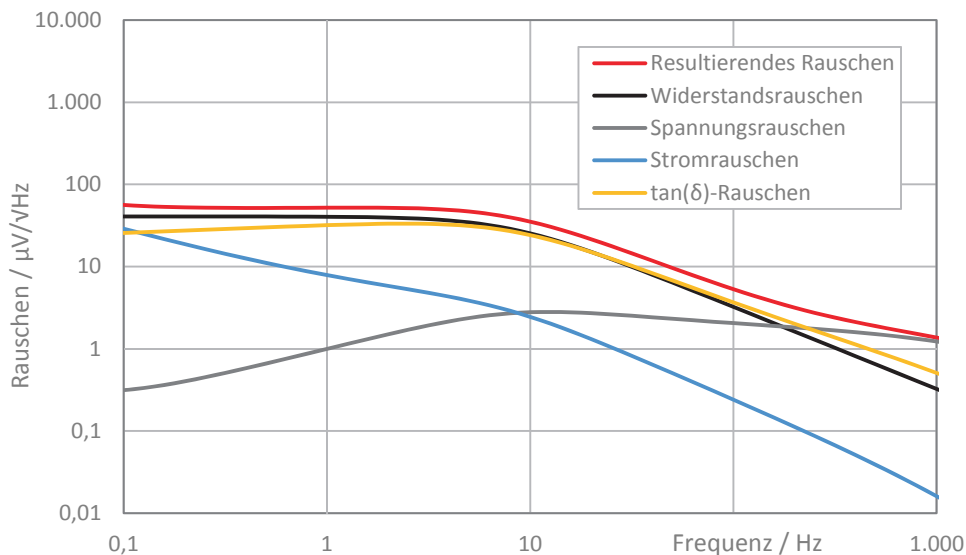


Abbildung 10: Frequenzgang der Gesamtrauschdichte und ihrer Anteile für einen Strombetriebsdetektors am Beispiel des LME-335

Verglichen mit Detektoren im Spannungsbetrieb ist im Strombetrieb die typische Rauschdichte im anwendungsrelevanten Frequenzbereich 10 ... 100 Hz um den Faktor 100 höher.

### 2.2.4 Beschaltung

Um eine hohe differentielle Verstärkung des internen OPV gewährleisten zu können, sollte der Lastwiderstand einen Wert von 100 k $\Omega$  nicht unterschreiten. Da invertierende Verstärker oft geringer Eingangsimpedanzen aufweisen, ist die Verwendung nichtinvertierender Verstärker zur Signalaufbereitung in diesem Fall vorteilhaft. Als praktisch sinnvollen Wertebereich des Lastwiderstandes für unsere Strombetriebsdetektoren empfehlen wir 100 k $\Omega$  ... 1 M $\Omega$ .

### 2.2.5 Layoutempfehlungen

Bei den Detektoren ohne internen OPV (siehe Tabelle 4) werden Signale hochimpedanter Quellen aus dem Detektor herausgeführt. Hierbei ist ein besonderes Augenmerk auf die Leitungsverlegung und Abschirmung zu legen.

- Die Leiterzüge sind so kurz wie möglich zu gestalten und von Störquellen abzuschirmen.
- Lötstellen, Leiterzüge und externe Komponenten sind unbedingt vor Verschmutzung und Feuchte zu schützen.

Das Ausgangssignal von Detektoren mit integriertem OPV ist deutlich größer und niederimpedanter, weshalb diese Detektoren auch gegenüber Störeinkopplungen deutlich unempfindlicher sind. Diese Detektoren können unter Beachtung der für analoge Schaltungen allgemeingültigen Hinweise verwendet werden.

- Die Versorgungsspannungen und Massepotentiale sind von denen digitaler Baugruppen zu entkoppeln.
- Masseleitungen der einzelnen Analogbaugruppen sind bevorzugt sternförmig auszuführen und an genau einer Stelle in der Nähe des Analog-Digital-Wandlers mit der Masse der digitalen Schaltungsteile zusammenzuführen.

## 2.3 Zusammenfassung und Vergleich

Aufgrund der Fortschritte im Design integrierter analoger siliziumbasierter Schaltkreise bietet InfraTec bereits seit 2003 zusätzlich zu den klassischen Detektoren im Spannungsbetrieb auch solche mit integriertem Operationsverstärker an. Das dadurch erweiterte Produktspektrum an Ein- und Mehrkanaldetektoren im Spannungs- und auch im Strombetrieb ermöglicht es Ihnen daher, für jede Anwendung einen geeigneten Detektor auswählen zu können.

Der grundlegende Unterschied beider Betriebsarten ist die Größenordnung der elektrischen Zeitkonstanten. Im Spannungsbetrieb ergeben sich diese als Produkt des Gatewiderstandes  $R_G$  und der elektrischen Kapazität des pyroelektrischen Chips  $C_p$ . Mit typischen Werten von ca. 2 s ist die elektrische Zeitkonstante im Spannungsbetrieb daher größer als die thermische.

Im Strombetrieb wird der pyroelektrische Strom mittels eines Strom-Spannungs-Verstärkers in eine messbare Spannung umgewandelt. Seine Verstärkung ist durch den Tiefpass im Rückkoppelzweig frequenzabhängig und besitzt typische Werte von 10 ... 200 V/pA. Die elektrische Zeitkonstante des Detektors ergibt sich aus den Elementen des Rückkoppelzweiges und kann daher unabhängig von der Kapazität des pyroelektrischen Chips gewählt werden. Typische Werte der elektrischen Zeitkonstanten im Strombetrieb liegen der Größenordnung von 20 ms und sind somit kleiner als die thermische Zeitkonstante.

Die thermische Zeitkonstante selbst ist ein Maß für die thermische Kapazität des pyroelektrischen Chips und dessen thermische Ankopplung an seine Umgebung. Sie ist unabhängig von der Betriebsart und liegt typisch bei 150 ms.

Abbildung 11 zeigt die unterschiedlichen Verläufe der Empfindlichkeit von Spannungs- und Strombetriebsdetektoren über der Modulationsfrequenz. Dies ist dadurch begründet, dass im Spannungsbetrieb die thermische Zeitkonstante kleiner ist, als die elektrische wohingegen im Strombetrieb die elektrische Zeitkonstante kleiner ist als die thermische.

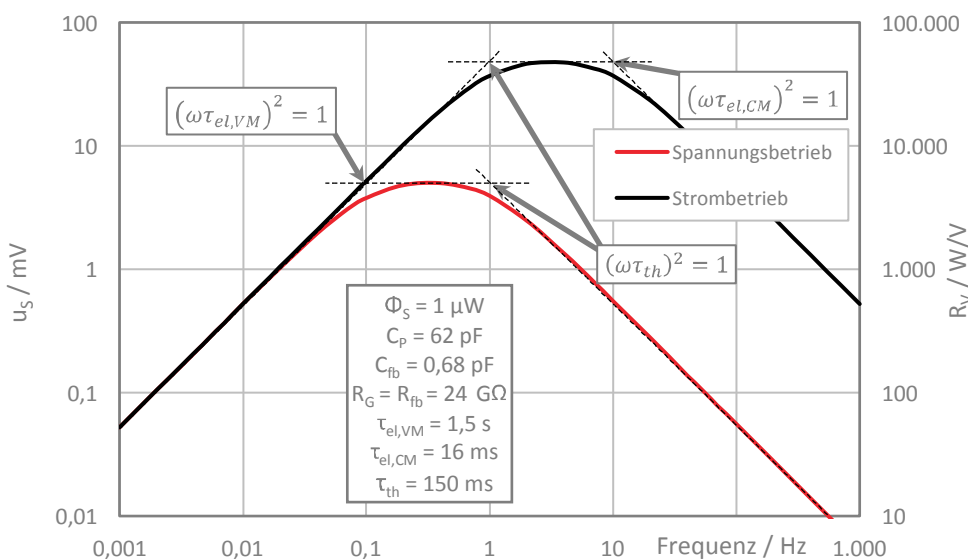


Abbildung 11: Vergleich der Empfindlichkeit und des Signals von Spannungs- und Strombetriebsdetektoren über der Frequenz

## Integrierte Verstärkung

Spannungsbetriebsdetektoren werden typischerweise bei Frequenzen betrieben, die größer sind als die jeweiligen Eckfrequenzen – sowohl aufgrund der elektrischen als auch der thermischen Zeitkonstanten. Das Signal nimmt dann umgekehrt proportional zur anregenden Frequenz ab. Langsame Störungen tragen deutlich zum Ausgangssignal bei. Die Frequenzen solcher Störungen können – zum Beispiel hervorgerufen durch Schwankungen der Umgebungstemperatur – im Bereich einiger Millihertz liegen. Bedingt durch die große elektrische Zeitkonstante beträgt die Einschwingzeit eines Spannungsbetriebsdetektors nach einer sprungartigen Anregung typisch etwa 20 s.

Im Strombetrieb wird der Detektor meist zwischen beiden Eckfrequenzen betrieben. Hier ist das Signal maximal und hängt nur geringfügig von der Frequenz ab. Der Einfluss niederfrequenter Störungen auf das Ausgangssignal, zum Beispiel durch Temperaturänderungen, ist etwa zehnmal geringer als im Spannungsbetrieb. Bedingt durch seine sehr geringe elektrische Zeitkonstante ist auch die Einschwingzeit eines Detektors im Strombetrieb fast ausschließlich durch die thermische Zeitkonstante bestimmt und hat typische Werte von etwa einer Sekunde.

Um einen Detektor hinsichtlich seines Signals, Rauschens und seiner Stömpfindlichkeit gegenüber Umgebungseinflüssen an die Erfordernisse einer spezifischen Anwendung anzupassen, wird üblicherweise der Wert des Widerstandes (Gatewiderstand im Spannungsbetrieb bzw. Rückkoppelwiderstand im Strombetrieb) bei sonst unverändertem Detektordesign variiert. Die folgenden Ausführungen diskutieren die Auswirkungen einer derartigen Variation.

Im Spannungsbetrieb bleibt im Normalfall die elektrische Zeitkonstante trotz Änderung des Widerstandswertes immer größer als die thermische Zeitkonstante. Somit bleibt auch das Ausgangssignal für Frequenzen oberhalb der thermischen Eckfrequenz von der Änderung des Widerstandswertes unbeeinflusst, wie Abbildung 12 (links) zeigt. Da die Rauschdichte im Frequenzbereich 1 ... 10 Hz vom Widerstandsrauschen dominiert wird und gemäß (29) indirekt proportional zur Wurzel des Widerstandswertes ist, lässt sich durch die Wahl eines größeren Widerstandswertes eine geringere Rauschdichte erreichen.

Bei einer Erhöhung des Widerstandswertes bleibt also das Signal gleich und die Rauschdichte sinkt. Somit steigt mit steigendem Widerstand auch die spezifische Detektivität eines Detektors im Spannungsbetrieb, wie in Abbildung 12 (rechts) zu sehen ist.

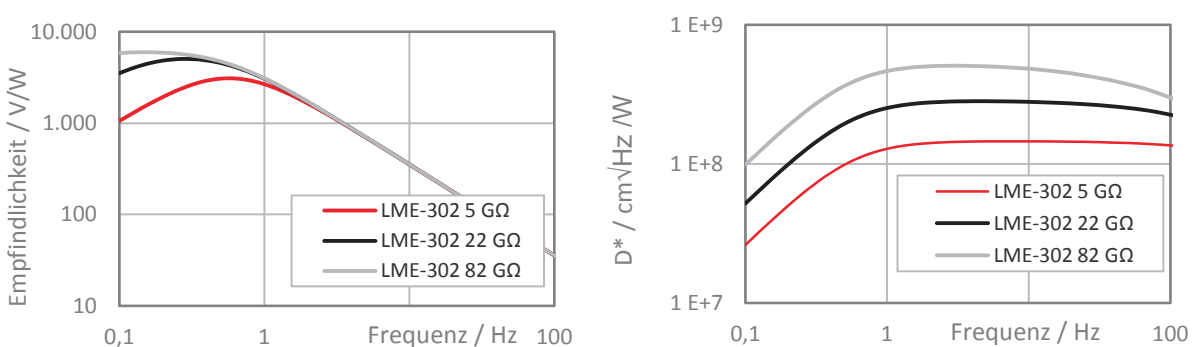


Abbildung 12: Frequenzgang der Empfindlichkeit (links) und der spezifischen Detektivität (rechts) in Abhängigkeit des Gatewiderstandes am Beispiel eines LME-302

Eine Verringerung des Widerstandes wiederum führt durch die resultierende kleinere elektrische Zeitkonstante zu einem schnelleren Einschwingen des Detektors und zu einer geringeren Abhängigkeit der Offsetspannung von der Temperatur. Daher ist bei Widerstandswerten  $< 10 \text{ G}\Omega$  üblicherweise keine thermische Kompensation notwendig.

Anders als im Spannungsbetrieb führt eine Erhöhung des Rückkoppelwiderstandes im Strombetrieb auch zu einer Vergrößerung der Empfindlichkeit, wie die Gegenüberstellung in Abbildung 13 (links) zeigt. Da sich damit auch die elektrische Zeitkonstante in Richtung der thermischen Zeitkonstanten hin verschiebt, wird der Frequenzbereich, in dem die Empfindlichkeit konstant ist, mit steigendem Widerstand kleiner.

## Integrierte Verstärkung

Auch das Rauschen des Detektors wird durch den Wert des Rückkoppelwiderstandes maßgeblich beeinflusst. Die Rauschdichte steigt mit der Wurzel des Widerstands an.

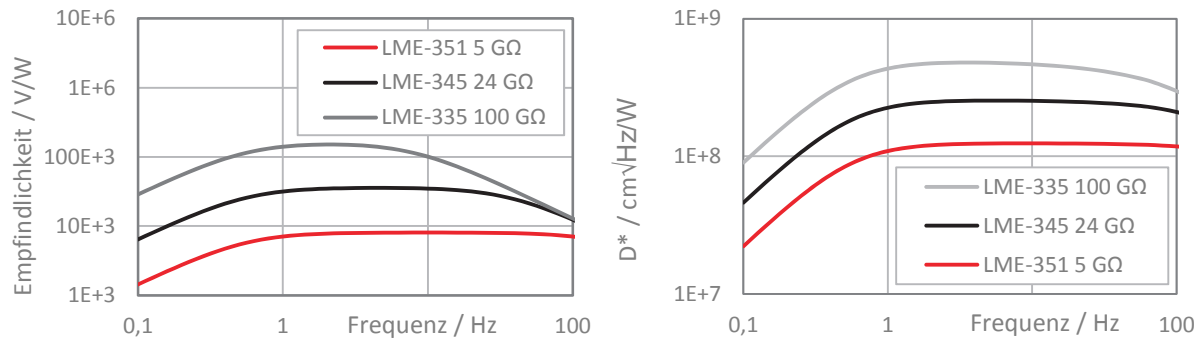


Abbildung 13: Frequenzgang der Empfindlichkeit (links) und der spezifischen Detektivität (rechts) von Detektoren im Strombetrieb mit unterschiedlichen Rückkoppelwiderständen

Da die Empfindlichkeit stärker steigt als die Rauschdichte, nimmt mit zunehmendem Widerstandswert auch die spezifische Detektivität zu, wie Abbildung 13 (rechts) illustriert. Das einsetzende  $1/f$ -Verhalten der Empfindlichkeit wird ähnlich wie auch im Spannungsbetrieb durch das  $1/f$ -Verhalten der Rauschdichte weitgehend ausgeglichen.

Wird im Strombetrieb nur ein Teil des pyroelektrischen Elementes bestrahlt, so bleibt dadurch das Frequenzverhalten von Signal und Rauschen nahezu unverändert. Selbiges gilt auch für den Fall, dass ein zusätzliches pyroelektrisches Element zur thermischen Kompensation dem aktiven Element parallel geschaltet wird (siehe auch Kapitel 3).

Im Spannungsbetrieb hingegen verringert sich durch das Hinzufügen der thermischen Kompensation die spezifische Detektivität. Dies geschieht im Falle der Parallelkompensation durch eine Verringerung des Ausgangssignales und im Falle der seriellen Kompensation durch eine Zunahme der Rauschdichte.



## Integrierte Verstärkung

Eigenschaften und typische Parameter von Strom- und Spannungsbetriebsdetektoren sind in Tabelle 5 gegenübergestellt.

	Spannungsbetrieb	Strombetrieb
Thermische Zeitkonstante	150 ms	150 ms
Elektrische Zeitkonstante	2 s	20 ms
Empfindlichkeit bei 10 Hz	100 ... 1.000 V/W	5.000 ... 85.000 V/W
Rauschen bei 10 Hz	100 ... 500 nV/√Hz	10.000 ... 60.000 nV/√Hz
Einschwingzeit	20 s	1 s
Verringerung von D* durch thermische Kompensation	30 %	< 10 %
Veränderung des Signals durch geänderten Widerstand	keine	$\propto R_{fb}$
Veränderung des Rauschens durch geänderten Widerstand	$\propto \frac{1}{\sqrt{R_G}}$	$\propto \sqrt{R_{fb}}$
Einfluss niederfrequenter Störungen	hoch	gering

Tabelle 5: Vergleich typischer Parameter von Spannungs- und Strombetriebsdetektoren

Durch eine große Vielfalt an Detektoren unterschiedlicher Performance im Spannungs- und im Strombetrieb ermöglicht Ihnen InfraTec den für Ihre Anwendung am besten geeigneten Detektor auswählen zu können.

Headquarters

**InfraTec GmbH**

**Infrarotsensorik und Messtechnik**

Gostritzer Str. 61 – 63

01217 Dresden / GERMANY

Phone +49 351 871-8625

Fax +49 351 871-8727

E-mail [sensor@InfraTec.de](mailto:sensor@InfraTec.de)

Internet [www.InfraTec.de](http://www.InfraTec.de)

USA office

**InfraTec infrared LLC**

Plano, TX / USA

Phone +1 877 797 6748

Fax +1 877 389 2668

E-mail [sensor@InfraTec-infrared.com](mailto:sensor@InfraTec-infrared.com)

Internet [www.InfraTec-infrared.com](http://www.InfraTec-infrared.com)

Chesterfield

Headquarters  
Dresden

Shanghai

China office

**InfraTec Representative**

**Greater China**

c/o German Industry & Commerce

Greater China

Shanghai / PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA

Phone +8621 68758536 ext 1633

E-mail [sensors@InfraTec.cn](mailto:sensors@InfraTec.cn)

Internet [www.InfraTec.cn](http://www.InfraTec.cn)

UK office

**InfraTec infrared Ltd.**

Chesterfield / UK

Phone +44 1246 267562

Fax +44 1246 269381

E-mail [sensor@InfraTec.co.uk](mailto:sensor@InfraTec.co.uk)

Internet [www.InfraTec.co.uk](http://www.InfraTec.co.uk)



Latest information on the internet.

Bildnachweise

fotolia: © photoworld, © Andrey Popov, © VRD, © shamtor, © ff-fotodesign, © sabdesign85

istockphoto: © TonyTaylorStock, © Peshkova