

WS/SS 19....- ....	Universität Hannover Institut für Elektrowärme	Name:	
	Elektrowärmelabor I	Dat.:	Gr.:
Versuch T5	Eigenschaften und Anwendungen von Infrarotdetektoren	Testat:	
Versuchsleiter:			

## Inhalt

1	Einleitung	Seite	2
2	Wichtige Kenngrößen	Seite	4
2.1	Empfindlichkeit	Seite	4
2.2	Nachweisgrenze	Seite	5
2.2.1	Die NEP (Noise Equivalent Power)	Seite	5
2.2.2	Detektivität	Seite	6
2.3	Spektrales Verhalten	Seite	7
2.4	Dynamische Eigenschaften	Seite	8
3	Detektorarten		
3.1	Halbleiter-Detektoren	Seite	9
3.2	Thermische Detektoren	Seite	12
4	Durchlässige und reflektierende Stoffe	Seite	14
5	Kühler	Seite	15
6	Aufbau und Meßbedingungen	Seite	15
7	Aufgabenstellung	Seite	18
8	Anhang	Seite	20

# 1 Einleitung

Obwohl schon im Jahre 1800 von Herschel entdeckt, wurde der infrarote Spektralbereich erst nach 1930 für technische Anwendungen interessant.

Dieser Bereich umfaßt die elektromagnetische Strahlung der Wellenlängen zwischen  $0,78 \mu\text{m}$  und  $1 \text{ mm}$  und ist unterteilt in:

- |  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| - nahes Infrarot ( $0,78 - 1,5 \mu\text{m}$ )        | nach DIN:                             |
| - mittleres Infrarot ( $1,5 - 6 \mu\text{m}$ )       | - IR - A ( $0,78 - 1,4 \mu\text{m}$ ) |
| - fernes Infrarot ( $6 - 40 \mu\text{m}$ )           | - IR - B ( $1,4 - 3,0 \mu\text{m}$ )  |
| - extrem fernes Infrarot ( $40 - 1000 \mu\text{m}$ ) | - IR - C ( $3,0 - 1000 \mu\text{m}$ ) |

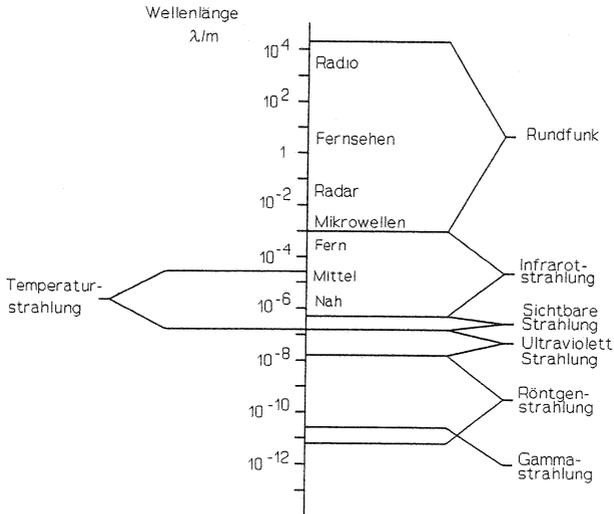


Abb. 1: Elektromagnetisches Strahlungsspektrum

Strahlungsdetektoren wandeln Strahlungsenergie in andere -meist elektrische oder thermische - Energie um und machen sie dadurch nutzbar. Die verschiedenen Detektortypen unterscheiden sich hauptsächlich im Wellenlängenbereich, in der Empfindlichkeit, im Nachweisvermögen und in der Zeitkonstante.

Im Folgenden werden die wichtigsten Anwendungsgebiete von Infrarot-Detektoren kurz charakterisiert:

- Nachrichtenübertragung

Bei Wellenlängen um 0,9 und 1,1  $\mu\text{m}$  wird die große Frequenzbandbreite der IR-Strahlung genutzt. Es stehen leistungsfähige Sender- und Empfängerbauelemente zur Verfügung, sowie Lichtleiter, die bei diesen Wellenlängen eine besonders geringe Dämpfung aufweisen. Lichtleiter-Übertragungsstrecken, IR-Fernsteuerungen und Optokoppler sind die häufigsten Anwendungsfälle.

- Temperaturmessung (Pyrometrie)

Jeder Körper sendet Strahlung im IR-Bereich aus, deren Intensität ein Maß für seine Temperatur ist. Breitbandige Detektoren ermöglichen deshalb eine berührungslose Temperaturmessung in einem großen Meßbereich.

- Thermographie (Temperaturverteilungsmessung)

Im fernen IR um 10  $\mu\text{m}$  liegt das Maximum der 300 K-Temperaturstrahlung infolge der Raum- oder Körpertemperatur. Dies wird z.B. zur Bestimmung der Wärmeverluste von Gebäuden oder zur Diagnose in der medizinischen Technik ausgenutzt.

- Überwachung

Infrarot-Strahlung ist unsichtbar (Alarmanlagen) bzw. wird von Stoffen absorbiert oder reflektiert (Rauchmelder).

- Umweltschutz

Im mittleren IR (3 - 8  $\mu\text{m}$ ) liegen die Absorptionslinien einiger luftverschmutzender Gase. Mittels spektral abstimmbarer Strahlungsquellen (Laser) kann anhand des Reflexionsgrades der Atmosphäre auf deren Schadstoffgehalt geschlossen werden.

- Astronomie

Zwischen 8  $\mu\text{m}$  und 14  $\mu\text{m}$  ist die Durchlässigkeit der Atmosphäre sehr hoch (atmosphärisches Fenster) und damit die Möglichkeit zu astronomischen Beobachtungen gegeben. Umgekehrt nutzen dies Satelliten zur Erdbeobachtung aus.

In diesem Versuch soll ein Überblick der im Infrarot-Bereich verwendeten Detektoren gegeben und eine typische Auswahl ausführlicher - auch an einigen Anwendungsbeispielen - untersucht werden.

## 2 Wichtige Kenngrößen

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Kenngrößen von IR-Detektoren erläutert. Die im Versuch verwendeten strahlungsphysikalischen Begriffe und Gesetze sind im Anhang erläutert.

### 2.1 Empfindlichkeit

Die spezifische Empfindlichkeit  $s$  ist das Verhältnis der elektrischen Ausgangsgröße (Strom, Spannung) zur Bestrahlungsstärke  $E$ . Wird sie auf spektral breitbandige Strahlung (z.B. einer Wolframbandlampe mit 2856 K Verteilungstemperatur) bezogen, spricht man von der absoluten spezifischen Empfindlichkeit  $s_U$  bzw.  $s_I$ .

$$s_U = \frac{U}{E} \left[ \frac{Vm^2}{W} \right], \quad s_I = \frac{I}{E} \left[ \frac{Am^2}{W} \right] \quad (1)$$

Wird sie auf eine bestimmte Wellenlänge bezogen, spricht man von der spezifischen spektralen Empfindlichkeit  $s_{U\lambda}$  bzw.  $s_{I\lambda}$

$$s_{U\lambda} = \frac{U}{E_\lambda}, \quad s_{I\lambda} = \frac{I}{E_\lambda} \quad (2)$$

In der Praxis wird die spezifische Empfindlichkeit auch auf die Detektorfläche  $A_d$  bezogen angegeben. Sie heißt dann Empfindlichkeit und beschreibt das Verhalten eines Detektortyps, unabhängig von der Bauform.

$$S_U = \frac{U}{E \cdot A_d} \left[ \frac{V}{W} \right], \quad S_I = \frac{I}{E \cdot A_d} \left[ \frac{A}{W} \right] \quad (3)$$

Das Verhältnis der spektralen Empfindlichkeit  $S_\lambda$  zur maximal auftretenden spektralen Empfindlichkeit  $S_{\lambda,max}$  nennt man relative spektrale Empfindlichkeit  $S_{\lambda,rel}$

$$S_{\lambda,rel} = \frac{S_\lambda}{S_{\lambda,max}} \quad (4)$$

Sie wird häufig zur Charakterisierung des spektralen Verhaltens benutzt.

## 2.2 Nachweisgrenze

Der Dunkelstrom begrenzt die kleinste meßbare Strahlungsleistung bei mit Gleichstrahlung betriebenen Fotodioden und Fototransistoren. Er entspricht dem Sperrstrom "normaler" Dioden bzw. Transistoren und ist stark temperaturabhängig.

Beim sonst üblichen Betrieb mit modulierter Strahlung wird die untere Nachweisgrenze vom Rauschen bestimmt.

Die Kenngröße für das Nachvermögen eines Detektors beim Betrieb mit Wechselstrahlung ist die NEP (Noise Equivalent Power).

### 2.2.1 Die NEP (Noise Equivalent Power)

Die äquivalente Rauschleistung entspricht dem Strahlungsfluß, der ein Ausgangssignal am Detektor hervorruft, das gleich dem auf eine Rauschbandbreite von 1 Hz bezogenen Detektorrauschen ist.

Ist das Ausgangssignal des Detektors z.B. eine Spannung, so ist die äquivalente Rauschleistung NEP

$$NEP = \frac{U_{Rausch, \Delta f=1Hz}}{U_{Signal}} \cdot A_d \cdot E_e \quad (5)$$

worin die auf 1 Hz Meßbandbreite normierte Rauschspannung wegen

$$\frac{U_{Rausch}^2}{R} = P_{Rausch} \sim \Delta f \quad (6)$$

(weißes Rauschen) als

$$U_{Rausch, \Delta f=1Hz} = \frac{U_{Rausch, \Delta f}}{\sqrt{\Delta f}} \quad (7)$$

gegeben ist.

Für beliebige Ausgangssignale (Strom, Spannung) läßt sich die NEP deshalb angeben als:

$$NEP = \frac{E \cdot A_d}{\sqrt{\Delta f}} \cdot \left( \frac{N}{S} \right) \left[ \frac{W}{\sqrt{Hz}} \right] \quad (8)$$

- E : Bestrahlungsstärke
- A<sub>d</sub> : Detektorfläche
- N : Rauschsignal (Noise)
- S : Meßsignal (Signal)
- Δf : Meßbandbreite der Auswerteschaltung

### 2.2.2 Detektivität

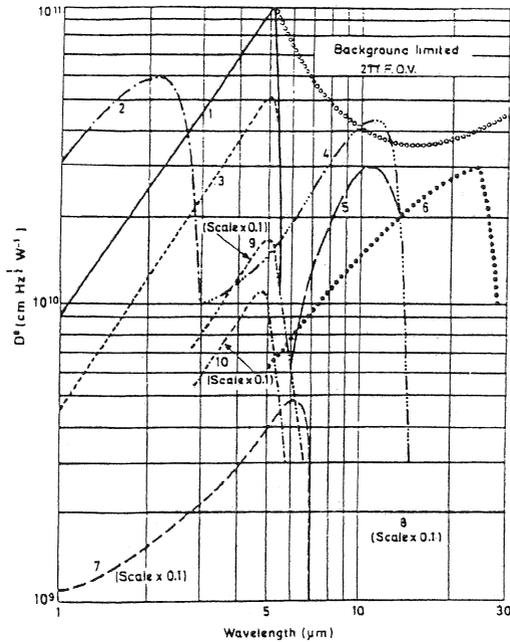
Den Kehrwert der äquivalenten Rauschleistung bezeichnet man als Detektivität D. Oftmals ist die Rauschleistung eines Empfängers (Detektors) proportional zu seiner Fläche A<sub>d</sub>. In diesen Fällen ist es sinnvoll, die Detektivität auf die Detektorfläche zu normieren. Die auf die Fläche bezogene Detektivität wird als spezifische Detektivität bezeichnet.

Wegen P<sub>Rausch</sub> ~ A<sub>d</sub> und U<sub>Rausch</sub> ~ √A<sub>d</sub> ist die Detektivität definiert als:

$$D^* = D \cdot \sqrt{A_d} = \frac{\sqrt{A_d}}{NEP} \left[ \frac{m \cdot \sqrt{Hz}}{W} \right] \quad (9)$$

Sie dient als Gütezahl zum Vergleich verschiedener Detektorarten.

Die Meßbedingungen von NEP und D\* werden in Klammern aufgeführt. Beispielsweise bedeutet "D\*(6,100,5)": spezifische Detektivität bei 6 μm Wellenlänge, 100 Hz Impulsfolgefrequenz, 5 Hz Bandbreite. Bei Halbleitern ist eine weitere wichtige Einflußgröße die Temperatur des Detektors.



- |                                  |   |
|----------------------------------|---|
| 1 : InSb, 77 K, 600 FOV          | 6 : Ge:Cu, 4,2 K, 600 FOV                 |
| 2 : PbS, 300 K, $2\pi$ FOV       | 7 : (Maßstab·0,1) InSb, 300 K, $2\pi$ FOV |
| 3 : InSb, 77 K, $2\pi$ FOV       | 8 : (Maßstab·0,1) TGS-Detektor            |
| 4 : CdHgTe, 77 K, $60^\circ$ FOV | 9 : (Maßstab·0,1) CdHgTe, 195 K           |
| 5 : Ge:Hg, 35 K, $60^\circ$ FOV  | 10 : (Maßstab·0,1) CdHgTe, 295 K          |

**Abb. 2:** Spezifische Detektivität verschiedener Detektortypen unter Angabe des Materials, der Betriebstemperatur und des Gesichtsfeldes (FOV: Field of View)

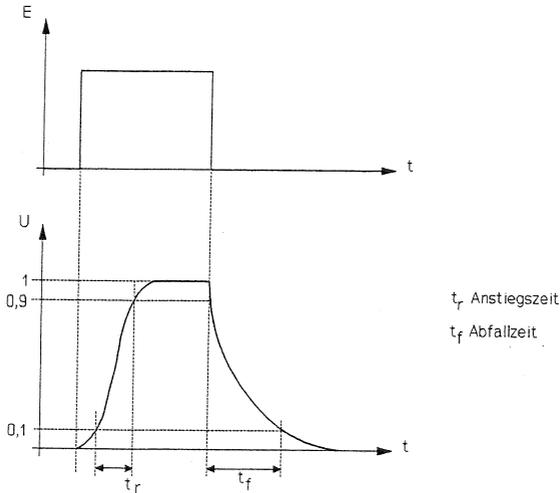
### 2.3 Spektrales Verhalten

Die Wellenlänge der maximalen spektralen Empfindlichkeit  $\lambda_{\max}$  ist die wichtigste Kenngröße zur Charakterisierung eines spektral abhängigen Detektors.

Weitere Kenngrößen sind die spektrale Empfindlichkeit  $S_\lambda$ , häufig auf die maximale spektrale Empfindlichkeit bezogen:  $S_{\lambda, \text{rel}}$ , bzw. die spektrale spezifische Detektivität  $D^*_\lambda$ . Sie beschreiben das Verhalten eines Detektors bei monochromatischer Strahlung der Wellenlänge  $\lambda$  und werden häufig in Form einer Kennlinie  $S_{\lambda, \text{rel}} = f(\lambda)$  bzw.  $D^*_\lambda = f(\lambda)$  dokumentiert.

## 2.4 Dynamische Eigenschaften

Abbildung 3 zeigt die wesentlichen dynamischen Kenngrößen am Beispiel der Signalantwort auf einen Rechteckimpuls.



**Abb. 3:** Definitionen dynamischer Kenngrößen

Grenzfrequenz  $f_g$  wird diejenige Frequenz genannt, bei der die auf den Empfänger fallende, modulierte Strahlung gegenüber der unmodulierten aber sonst gleichen Strahlung einen Empfindlichkeitsabfall um 3 dB hervorruft.

Für ein  $P_{T1}$ -System ergibt sich die Grenzfrequenz

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau} \quad (10)$$

Anstiegszeit und Abfallzeit können, insbesondere bei Fotoelement und Fototransistor, verschieden lang sein. Die dynamischen Daten hängen bei den Halbleiter-Detektoren stark von der äußeren Beschaltung ab. Speziell bei Sperrschicht-Fotoempfängern ist das RC-Glied aus Sperrschichtkapazität und Arbeitswiderstand frequenzbestimmend.

### 3 Detektorarten

#### 3.1 Halbleiter-Detektoren

Halbleiter-Strahlungsempfänger beruhen auf dem inneren Fotoeffekt. Ihre Empfindlichkeit ist deshalb wellenlängenabhängig und wird primär durch den Bandabstand bzw. den Abstand Bandkante - Störstellenniveau des Halbleiters bestimmt. Es ergibt sich eine maximale Wellenlänge für die Absorption von Strahlung durch einen Halbleiter infolge des inneren Fotoeffektes.

$$\frac{\lambda_{\max}}{\mu m} = 1,24 \cdot \frac{1}{\frac{\Delta W}{eV}} \quad (11)$$

Beispiel: Silizium ( $\Delta W = 1,1 \text{ eV}$ ),  $\lambda_{\max} = 1,13 \mu m$

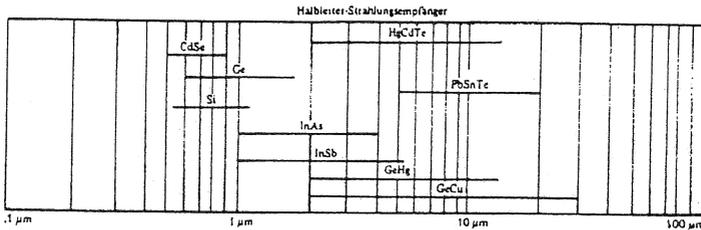


Abb. 4: Spektrale Bandbreite verschiedener Halbleitermaterialien

Beim Fotoelement generiert die Strahlung im Leerlaufbetrieb eine Spannung von einigen Zehntelvolt, die logarithmisch mit der Bestrahlungsstärke ansteigt und die unabhängig von der bestrahlten Fläche ist. Werden die Anschlüsse kurzgeschlossen, fließt ein Strom. Dieser ist in einem weiten Bereich der Bestrahlungsstärke und, bei gleichmäßiger Ausleuchtung, der bestrahlten Fläche proportional.

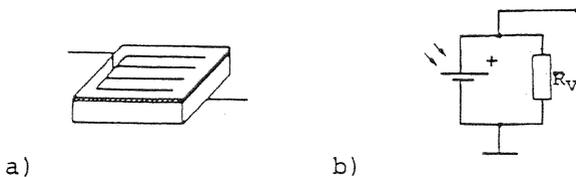


Abb. 5: Fotoelement, a) Schematischer Aufbau b) Grundsaltung

Die Fotodiode ist prinzipiell eine Gleichrichterdiode, deren Sperrschicht - durch die spezielle Bauform - einer Strahlung ausgesetzt werden kann. Im Unterschied zum Fotoelement wird hier der Strom infolge der Erzeugung freier Ladungsträger genutzt, welcher proportional der Bestrahlungsstärke ist und sich dem temperaturabhängigen Sperrstrom der Diode (Dunkelstrom) überlagert.

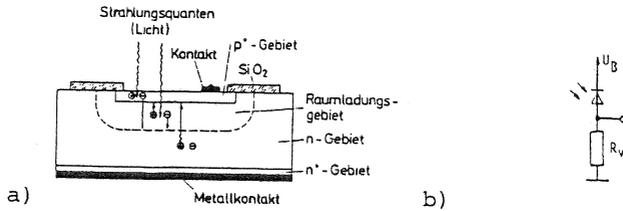
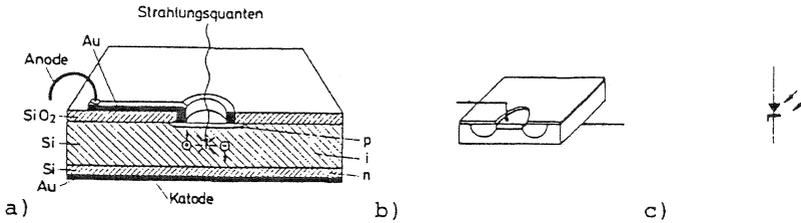


Abb. 6: Fotodiode, a) Schematischer Aufbau  
b) Grundsaltung

Physikalisch gesehen sind Fotodiode und Fotoelement gleich, sie unterscheiden sich in der Betriebsart und im Aufbau. Während Fotoelemente, durch andere Herstellungsverfahren, meist auf große Flächen und damit auf eine hohe Empfindlichkeit ausgelegt sind, jedoch im Fotodiodenbetrieb eine niedrige Durchbruchspannung, einen hohen Dunkelstrom und eine große Sperrschicht-Kapazität aufweisen, sind Fotodioden meist auf einen niedrigen Dunkelstrom und eine kleine Sperrschicht-Kapazität getrimmt. Fotoelemente und Fotodioden werden vorwiegend zur Strahlungsmessung verwendet. Besondere Bauformen von Fotodioden sind: PIN-Fotodioden mit großer Raumladungsweite, die sich durch eine besonders geringe Sperrschicht-Kapazität und deshalb kurze Schaltzeiten auszeichnen.

Sie finden hauptsächlich in der IR-Nachrichtenübertragung Verwendung. Außerdem gibt es Avalanche-Fotodioden, die mit einer hohen, sehr konstanten Sperrspannung betrieben werden und bei denen jedes durch Strahlung erzeugte Ladungsträgerpaar durch Stoßionisation eine Ladungsträgerlawine auslöst.

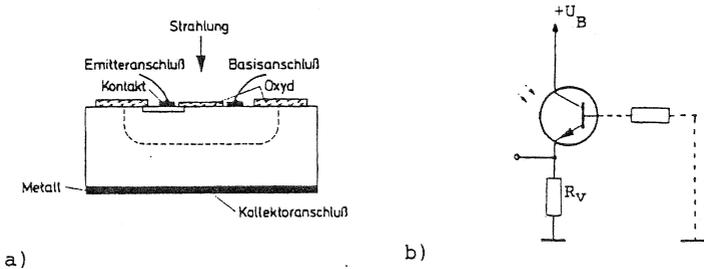
Avalanche-Fotodioden sind, trotz kleiner Detektorfläche, wegen ihrer inneren Verstärkung sehr empfindlich und können bis in den GHz-Bereich betrieben werden. Ihre Herstellung ist jedoch sehr aufwendig. Avalanche-Fotodioden sind hauptsächlich als Empfänger in Lichtleiter-Übertragungsstrecken und in optoelektronischen Entfernungsmeßgeräten im Einsatz.



**Abb. 7:** a) Schematischer Aufbau einer Foto-PIN-Diode  
 b) Schematischer Aufbau einer Avalanche-Fotodiode  
 c) Schaltsymbol einer Avalanche-Fotodiode

Fototransistor, Fotodarlingtontransistor, Foto-FET und Fotothyristor nutzen den inneren Fotostrom statt eines äußeren Steuerstromes. Es sind die bei den einzelnen Bauelementen für niedrige Signalpegel auch sonst auftretenden Parameter, wie Temperaturgang oder Grenzfrequenz, zu berücksichtigen.

Wegen ihrer nichtlinearen Kennlinie sind diese Bauelemente nur beschränkt für quantitative Messungen geeignet. Sie werden in der Impuls- und Regelungstechnik verwendet.



**Abb. 8:** Fototransistor, a) Schematischer Aufbau  
 b) Grundsaltung

Alle bisher genannten Halbleiterdetektoren werden in vielen Ausführungen und großen Stückzahlen aus Silizium hergestellt. Für Sonderanwendungen gibt es auch Germaniumtypen.

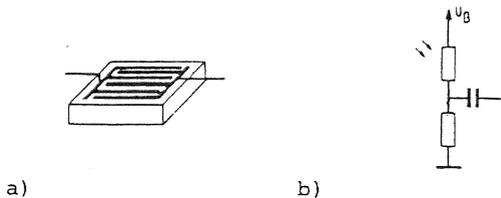
Beide Materialien sind im nahen Infrarot empfindlich. Halbleiter aus Mischkristallen bilden die Fotoelemente (PV: photovoltaic detectors) für größere Wellenlängen. Ge-

bräuchliche Materialien für das mittlere IR sind Indiumarsenid (InAs) für  $0,5 - 3,5 \mu\text{m}$  und Indiumantimonid (InSb) für  $2 - 5,6 \mu\text{m}$ . Durch ein variables Mischungsverhältnis kann die Wellenlänge der maximalen Empfindlichkeit von Verbindungshalbleitern in weiten Grenzen eingestellt werden. Für Fotoelemente kommen vorwiegend Bleizinn-tellurid ( $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$ ) und Quecksilbercadmiumtellurid ( $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ) in Frage (üblich ist  $x = 0,2$  mit  $\lambda_{\text{max}} = 12 \mu\text{m}$ ).

Fotoleiter (PC: photoconductive detectors) sind passive Bauelemente, deren Widerstand sich unter dem Einfluß von Strahlung verringert. Sie sind langsamer als Fotoelemente; außerdem wird ihr Widerstand auch von der vorangegangenen Bestrahlung bestimmt, sie sind also von ihrer "Vorgeschichte" abhängig.

Für das mittlere IR stehen Eigenhalbleiter (intrinsic) -Detektoren aus Bleisulfid (PbS) für  $0,5 - 3,5 \mu\text{m}$  und Indiumantimonid (InSb) für  $0,5 - 5,6 \mu\text{m}$  zur Verfügung. Störstellenhalbleiter (extrinsic) -Detektoren sind dotierte Halbleiter, meist auf Germaniumbasis, mit einer maximalen Wellenlänge zwischen  $11$  und  $37 \mu\text{m}$ , je nach Art der Dotierung. Extrinsic-Detektoren werden bei extrem niedrigen Temperaturen ( $4,2 \text{ K}$ ) betrieben.

Fotoleiter aus Mischkristallen wie  $\text{PbSnTe}$ ,  $\text{PbSnSe}$  und  $\text{HgCdTe}$  werden vorwiegend im mittleren und fernen IR mit Schwerpunkt um  $10 \mu\text{m}$  eingesetzt.



**Abb. 9:** Fotowiderstand, a) Schematischer Aufbau  
b) Grundschialtung

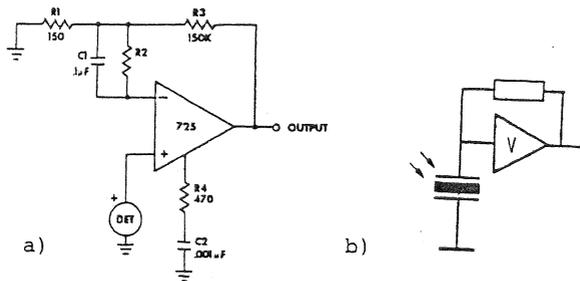
### 3.2 Thermische Detektoren

Bei diesen Detektoren wird die Erwärmung eines kleinen, nahezu schwarzen Körpers infolge absorbierter Strahlung zur Messung der Bestrahlungsstärke genutzt.

Die Kristallgitterschwingungen der absorbierenden Substanz (Phononen) bewirken, entsprechend der Temperaturerhöhung des Empfängers, beim Bolometer eine Änderung seines elektrischen Widerstandes, beim pneumatischen Golay-Detektor eine

Änderung des Produktes (Druck x Volumen) einer abgeschlossenen Gasmenge und beim Strahlungsthermoelement eine Änderung des Kontaktpotentials. Moderne Dünnschicht-Strahlungsthermoelemente aus Halbleitermaterialien haben besonders hohe Kontaktspannungen und werden häufig in Form von Thermosäulen hergestellt.

Die Funktion des pyroelektrischen Detektors beruht auf dem Phänomen, daß die Dipolmomente der Ladungen in einem pyroelektrischen Kristall, beispielsweise Triglyzinsulfat (TGS), abhängig von der Temperatur unterschiedlich ausgerichtet sind. Bei Temperaturänderung entsteht deshalb kurzzeitig ein Ladungsungleichgewicht und damit eine Spannung an äußeren Anschlüssen. Diese Spannung kann über einen hochohmigen Verstärker gemessen werden. Bei modulierter Strahlung (Chopper) entsteht ein Wechselspannungssignal, das der Bestrahlungsstärke proportional ist in einem sehr weiten, in der Praxis nur vom Fenstermaterial abhängigen, Spektralbereich nicht von der Wellenlänge abhängt.



**Abb. 10:** a) Schaltung für Strahlungsthermoelement  
b) Schaltung für pyroelektrischen Detektor

Allgemein ist die Empfindlichkeit thermischer Detektoren erheblich geringer als die von Halbleitertypen. Sie werden überall dort eingesetzt, wo spektral breitbandige Detektoren gebraucht werden. Das ist beispielsweise bei berührungslosen Thermometern der Fall.

## 4 Durchlässige und reflektierende Stoffe

Fenster schützen den Detektor vor mechanischen oder chemischen Einflüssen. In dieser Funktion wird an ein ideales Fenstermaterial die Forderung nach größtmöglicher Durchlässigkeit - unabhängig von der Wellenlänge - gestellt. Daneben gibt es Anwendungen, bei denen nur ein bestimmter Spektralbereich interessant ist. Hier werden Fenster mit Filterfunktion eingesetzt.

Bei der Gasanalyse wird die Eigenschaft von Gasen, Strahlung bestimmter Wellenlängen zu absorbieren, genutzt. So kann beispielsweise der Grad der Luftverschmutzung ermittelt werden.

Thermographiegeräte nutzen die 300 K - Strahlung der Umgebung und die Durchlässigkeit der Atmosphäre im Bereich von 8 - 14  $\mu\text{m}$ .

Für Lichtleiterübertragungsstrecken ist eine große Durchlässigkeit des Leitermaterials von grundsätzlicher Bedeutung. Sender- und Empfängerbauelemente werden in ihren spektralen Eigenschaften deshalb auf die Wellenlänge der maximalen Durchlässigkeit ausgerichtet. Metalloberflächen haben im IR-Bereich besonders gute Reflexionseigenschaften. Deshalb werden hier Spiegeloptiken eingesetzt, zumal Linsen, wegen der Dispersion des Linsenmaterials, problematisch sind.

Leider reflektieren auch die Detektoroberflächen einen Teil der Strahlung. Deshalb werden in manchen Fällen dünne Anti-Reflexionsschichten aufgedampft.

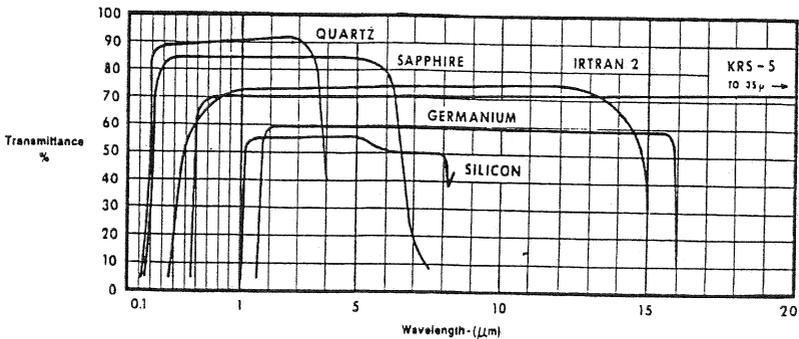


Abb. 11: Fenstermaterialien

## 5 Kühler

Die Kühlung von Halbleiter-IR-Detektoren ist zur Erhöhung der Empfindlichkeit und der spezifischen Detektivität vor allem im mittleren und fernen Infrarot sinnvoll. Störstellenfotohalbleiter müssen wegen des geringen Bandabstandes stets gekühlt betrieben werden. Bei Detektoren für das nahe IR sind thermoelektrische Kühler (Peltier-Effekt) einsetzbar.

Für den stationären Betrieb werden häufig Verdampfungskühler, das sind offene Dewar-Gefäße, in die der Detektor eingeschmolzen ist, verwendet. Übliche Kühlmittel sind Kohlendioxid (195 K), Stickstoff (77 K) oder Helium (4,2 K).

Außerdem gibt es Kleinkompressor-Kühler (Joule-Thompson-Effekt), die im geschlossenen Kreislauf 77 K erreichen.

## 6 Aufbau und Meßbedingungen

Untersucht werden folgende IR-Detektoren:

- Si-Fotodiode (1 mm<sup>2</sup>)
- Si-Fotoelement (150 mm<sup>2</sup> >
- Si-Fototransistor (0,65 mm<sup>2</sup> >
- PbS-Fotowiderstand (1 mm<sup>2</sup> >
- Pyroelektrischer Detektor (Ge-Fenster; 3,14 mm<sup>2</sup>)
- Halbleiter-Thermosäule (KRS 5-Fenster; 4 mm<sup>2</sup>)

In Klammern ist jeweils die Detektorfläche und ggf. das Fenstermaterial angegeben.

Die Anwendungsschaltungen sind:

- Infrarot-Fernsteuerung
- Bewegungsmelder
- Belichtungsmesser

Zwischen den Detektor und das Anzeigeeinstrument bzw. das Oszilloskop ist ein Anpasser geschaltet.

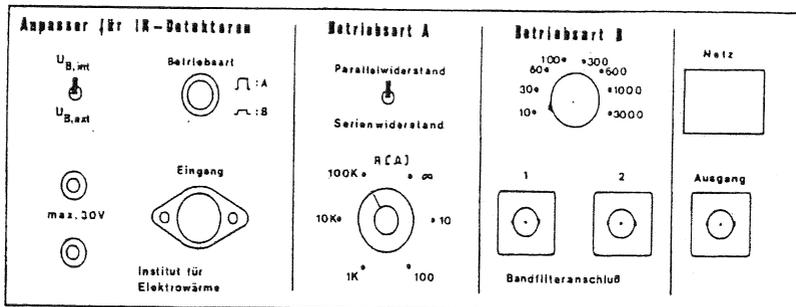


Abb. 12: Anpasser, Frontansicht

In Betriebsart A kann ein Widerstand  $R$ , parallel oder in Serie zum Detektor geschaltet werden. Sie wird bei den Si-Detektoren benutzt. Die übrigen Detektoren arbeiten in Betriebsart B.

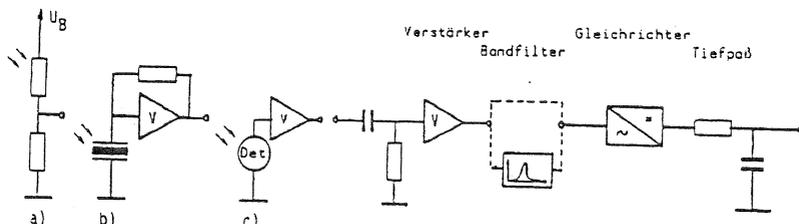
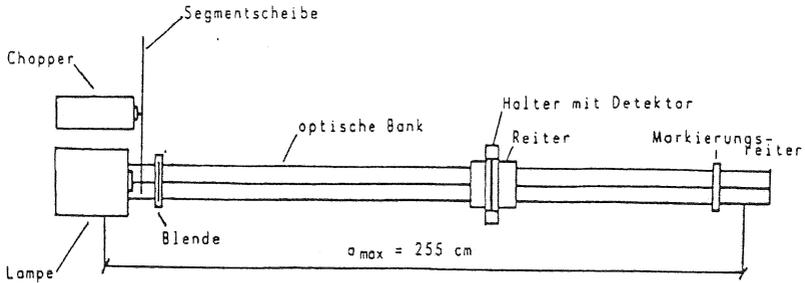


Abb. 13: Schaltschema zu Betriebsart B mit

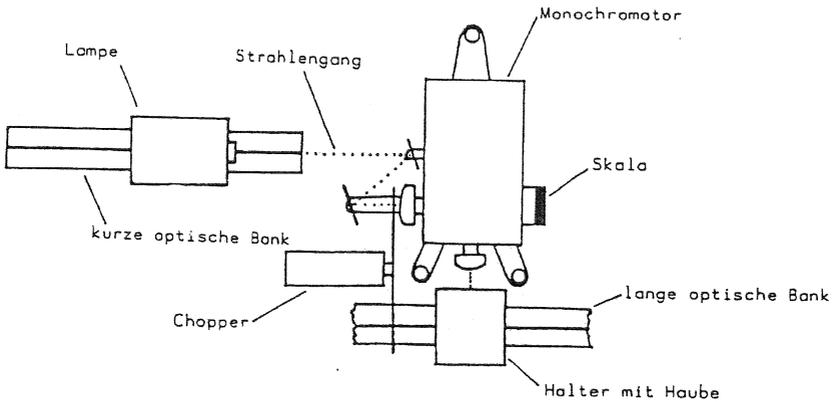
- a) Fotowiderstand
- b) Pyroel. Detektor
- c) Thermosäule

Das interne Bandfilter hat eine Mittenfrequenz von 10 Hz bei einer Bandbreite von  $\Delta f = 10$  Hz.

Die in Betriebsart B notwendige modulierte Strahlung wird durch eine elektrisch angetriebene Segmentscheibe (Chopper) vor der als Strahlungsquelle dienenden Wolframbandlampe hergestellt. Die Lampe wird mit einem konstanten Strom  $I_L = 10$  A betrieben. In den Abbildungen 14 und 15 sind die Versuchsaufbauten schematisch dargestellt.



**Abb. 14:** Versuchsaufbau für statische Kennlinie, absolute Empfindlichkeit, Nachweisgrenze



**Abb. 15:** Versuchsaufbau für spektrales Verhalten

Bei den dynamischen Messungen wird ein IR-Impuls sender mit Lumineszenzdiode ( $\lambda_{max} = 0,95 \mu\text{m}$ ) eingesetzt.

Bei der Untersuchung des spektralen Verhaltens werden Korrekturfaktoren angegeben, welche die spektrale Strahlstärkeverteilung des Systems Lampe - Monochromator eliminieren (siehe Anhang 1). In Tabelle 1 sind weitere Meßbedingungen zusammengestellt.

Versuch	Detektor					
	Foto-				Pyroel.	Thermo-
	diode	element	trans.	widerst.	Detektor	säule
Stat. Kennlinie $U_B$	20 V	-	5 V	30 V	int	int
Nachweisgrenze $U_B$	20 V	-	25 V	30 V	int	int
Dyn. Eigenschaften $U_B$	20 V	-	5 V	30 V	int	int
$R_V$	1 K	100	1 K	-	-	-
Spektr. Verh. $U_B$	20 V	-	-	30 V	int	int
Betriebsart	A s	A p	A s	B	B	B

Bemerkungen: s: Serienwiderstand; p: Parallelwiderstand

**Tabelle 1:** Versuchsdurchführung, Meßbedingungen

Zur IR-Fernsteuerung gehören ein Handsender, ein Vorverstärker mit Empfängerdiode, ein Decoder und eine Anzeigeeinheit.

Der Bewegungsmelder besteht aus dem pyroelektrischen Detektor mit Verstärker (im Anpasser) und Schaltstufe. Diese löst bei Überschreitung einer bestimmten Spannungsamplitude ein Tonsignal aus. Per Tastendruck wird die Stufe zurückgesetzt. Als Belichtungsmesser dient ein integrierter Fotosensor, dessen spektrale Empfindlichkeit der des Auges angepaßt ist.

## 7 Aufgabenstellung

### 1. Statische Kennlinie und absolute Empfindlichkeit

Ermitteln Sie qualitativ den Verlauf der Kennlinie  $U = f(E)$  bzw.  $I = f(E)$  für die einzelnen Detektortypen.

Gegeben ist die Bestrahlungsstärke in 115 cm Abstand von der Lampe. Sie beträgt  $0,13 \text{ mW/cm}^2$ . Bestimmen Sie die absolute Empfindlichkeit für diesen Wert.

## 2. Nachweisgrenze

Messen Sie den Dunkelstrom bei Fotodiode und Fototransistor. Bestimmen Sie bei den übrigen Detektoren das Nutz- und Rauschsignal in einer Entfernung von 255 cm von der Strahlungsquelle und errechnen Sie bei gegebener Bestrahlungsstärke ( $E_{255\text{cm}} = 0,03 \text{ mW/cm}^2$ ) die äquivalente Rauschleistung (NEP). Vergleichen Sie die unterschiedlichen Detektortypen miteinander, unter Berücksichtigung der Detektorfläche.

## 3. Dynamische Eigenschaften

Zur Messung der dynamischen Eigenschaften werden die verschiedenen Detektoren mit IR-Rechteckimpulsen bestrahlt. Stellen Sie die Zeitkonstante fest und berechnen Sie die Grenzfrequenz. Beachten Sie die Anstiegszeit der Senderdiode von 1  $\mu\text{s}$ . Warum reagiert der pyroelektrische Detektor nur schwach auf die IR-Impulse, sodaß hier der Chopper zur Impulserzeugung verwendet wird?

## 4. Spektrales Verhalten

Zur Untersuchung der spektralen Empfindlichkeit wird die Strahlung der Wolframbandlampe im Monochromator in spektral schmale Abschnitte zerlegt (Prisma). Ermitteln Sie unter Berücksichtigung der Korrekturfaktoren (Anhang 1) die relative spektrale Empfindlichkeit von Fotodiode, PbS-Fotowiderstand und pyroelektrischem Detektor im Bereich von 0,78 - 3  $\mu\text{m}$ .

## 5. Anwendungsschaltungen

Bestimmen Sie die Reichweite der IR-Fernsteuerung und ihre Störemfindlichkeit gegenüber Umlicht (Glühlampe, Raumbeleuchtung), elektromagnetischen Impulsen (Netzstörungen) und 40 kHz-IR-Impulsen. Untersuchen Sie die Leistungsfähigkeit des Bewegungsmelders bei verschiedenen Abständen der bewegten Objekte (Menschen, Gegenstände) vom Detektor und unterschiedlichen Empfindlichkeiten. Warum spricht die Anordnung nicht auf das Einschalten der Raumbeleuchtung an? Ermitteln Sie die maximale spektrale Empfindlichkeit des Belichtungsmessers (Meßbereich 0,7 - 1  $\mu\text{m}$ ), und untersuchen Sie mit seiner Hilfe die Beleuchtungsverhältnisse im Meßraum (Raumbeleuchtung, Schreibtischlampe, Wolframbandlampe). Welche Meßwerte liefert - zum Vergleich - die Fotodiode?

**Anhang 1: Wertetabelle zum spektralen Verhalten**

Messung Nr.	$\lambda$ [nm]	Skt.	Faktor	Fotodiode		Fotowiderstand		Pyroel. Detektor	
				$U_D$ [mV]	$U_{D,k}$ [mV]	$U_D$ [mV]	$U_{D,k}$ [mV]	$U_D$ [mV]	$U_{D,k}$ [mV]
1	700	784	23,3						
2	725	788,5	22,9						
3	750	793	21,3						
4	775	797	20,6						
5	800	801	19,5						
6	825	804,5	18,5						
7	850	808	16,5						
8	875	811	12,7						
9	900	814	9,17						
10	925	816	7,08						
11	950	818	5,60						
12	975	820	4,57						
13	1000	822	3,75						
14	1025	824	3,13						
15	1050	825,5	2,66						
16	1075	827	2,39						
17	1100	828	2,20						
18	1125	829	2,09						
19	1150	830	1,90						
20	1175	831	1,79						
21	1200	832	1,69						
22	1225	833	1,60						
23	1250	834	1,53						
24	1275	835	1,45						
25	1300	836	1,38						
26	1325	837	1,31						
27	1350	838	1,25						
28	1375	838,8	1,21						
29	1400	839,5	1,18						
30	1425	840	1,14						
31	1500	842	1,08						
32	1600	844,5	1,01						
33	1700	846,5	1,00						
34	1800	848,5	1,02						
35	1900	850,5	1,05						
36	2000	852,3	1,11						
37	2100	854	1,20						
38	2200	855,5	1,35						
39	2300	856,8	1,45						
40	2400	858	1,65						
41	2500	859	1,93						
42	2600	860	2,27						
43	2700	861	2,63						
44	2800	862	3,01						
45	2900	863	3,29						
46	3000	864	3,42						
47	3100	865	3,57						

Lampenstrom: 10 A

Eintrittsspalt: 0,4 mm      Austrittsspalt: 0,5 mm

$U_D$ : Meßwert

$U_{D,k}$ : korrigierter Meßwert ( $U_D$ -Faktor)

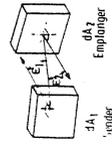
Strahlungsphysikalische Größen			
Größe	Formelzeichen	Beziehung	Vereinfachte Erklärung
1		$I_e = \frac{d\phi_e}{d\Omega_1}$	Die Strahlungsleistung ist die gesamte in Form von Strahlung auftretende Leistung
Senderseitige Größen			
2		$L_e = \frac{d^2\phi_e}{dA_1 \cdot d\Omega_1}$	Strahlstärke ist Strahlungsleistung pro Raumwinkel
3		$E_e = \frac{d\phi_e}{dA_2}$	Strahlstärke ist Strahlungsleistung pro Fläche und Raumwinkel.
Empfängerseitige Größen			
4			Bestrahlungsstärke ist einfallende Strahlungsleistung pro (Empfänger-) Fläche.

Bei den Formelzeichen dürfen die Indizes „e“ (=energetisch) und „v“ (=visuell) weggelassen werden, wenn keine Verwechslungsgefahr besteht.

DIN 1301, DIN 1304, DIN 5031, DIN 5496

Internationales Wörterbuch der Lichttechnik, 3. Auflage, herausgegeben von CIE und IEC

Spektrale strahlungsphysikalische Größen			
Größe	Formelzeichen	Praktische Einheit	Praktische Einheit
Spektrale Strahlungsflußverteilung	$\phi_{e,\lambda}$	$\frac{W}{nm}$	lm Lumen
Spektrale Strahlstärkeverteilung	$I_{e,\lambda}$	$\frac{W}{sr \cdot nm}$	lm sr = cd Candela
Spektrale Strahllichtverteilung	$L_{e,\lambda}$	$\frac{W}{cm^2 \cdot sr \cdot nm}$	lm cd cm <sup>2</sup> = sb Stilb
Spektrale Bestrahlungsverteilung	$E_{e,\lambda}$	$\frac{W}{m^2 \cdot nm}$	lm m <sup>2</sup> = lx Lux



Photometrisches Grundgesetz

$$d^2\phi = I \frac{dA_1 \cdot \cos \epsilon_1 \cdot dA_2 \cdot \cos \epsilon_2}{r^2} \Omega_0$$

Photometrisches Entfernungsgesetz

$$E = \frac{I}{R^2} \cos \epsilon_2 \Omega_0$$

(R sollte das Zehnfache der maximalen Ausdehnung von Sender und Empfänger betragen, um den Fehler unter 1% zu halten).

$dA_1$  = Flächenelement des Senders  
 $dA_2$  = Flächenelement des Empfängers  
 $\epsilon_1$  = Ausstrahlungswinkel  
 $\epsilon_2$  = Einstrahlungswinkel  
 $R$  = Abstand Sender-Empfänger  
 $\Omega_0$  = sr