

# Messwandler und Sensoren

Es werden die physikalischen Funktionsprinzipien und Konstruktionsprinzipien von Messwandlern für verschiedene physikalische Parameter betrachtet. Das Hauptaugenmerk wird auf Halbleitersensoren für Temperatur, mechanische Verformung und Magnetfelder gelegt. Bestimmte Fragen der Funktionsweise von Feuchtigkeitssensoren, Ionisationsgeräten, verschiedenen Phototransducern, Durchflussmessern, Füllständen, Druck usw. werden berücksichtigt.

Die Ergebnisse einer Studie über die Eigenschaften der betrachteten Sensoren und den Einfluss verschiedener äußerer Einflüsse auf sie werden vorgestellt. Für Ingenieure und Techniker, die mit der Entwicklung und dem Einsatz von Messwandlern und Sensoren befasst sind, für Forscher, Diplomanden und Studenten.

Nikolay Gorbachuk Außerordentlicher Professor der Abteilung für angewandte Physik und höhere Mathematik an der Kiewer Nationalen Universität für Technologie und Design, Ukraine.



Sensoren, Messwandler, Messungen

FOR AUTHOR USE



**Nikolay Gorbachuk**

# Messwandler und Sensoren

*Monographie*

Nikolay Gorbachuk

**Nikolay Gorbachuk**  
**Messwandler und Sensoren**

FOR AUTHOR USE ONLY

**Nikolay Gorbachuk**

# **Messwandler und Sensoren**

**Monographie**

FOR AUTHOR USE ONLY

**ScieniaScripts**

## **Imprint**

Any brand names and product names mentioned in this book are subject to trademark, brand or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their respective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, product descriptions etc. even without a particular marking in this work is in no way to be construed to mean that such names may be regarded as unrestricted in respect of trademark and brand protection legislation and could thus be used by anyone.

Cover image: [www.ingimage.com](http://www.ingimage.com)

This book is a translation from the original published under ISBN 978-620-7-47057-0.

Publisher:

Scientia Scripta

is a trademark of

Dodo Books Indian Ocean Ltd. and OmniScriptum S.R.L publishing group

120 High Road, East Finchley, London, N2 9ED, United Kingdom

Str. Armeneasca 28/1, office 1, Chisinau MD-2012, Republic of Moldova, Europe

Printed at: see last page

**ISBN: 978-620-7-37635-3**

Copyright © Nikolay Gorbachuk

Copyright © 2024 Dodo Books Indian Ocean Ltd. and OmniScriptum S.R.L publishing group

FOR AUTHOR USE ONLY

# INHALTSVERZEICHNIS

Einführung .....	2
Kapitel 1. Die Temperatur. Messumformer, Messung .....	3
Kapitel 2. Mechanische Größen. Messwandler, Sensoren, Messung.....	38
Kapitel 3. Magnetische Felder. Messwandler, Sensoren, Messung .....	97
Kapitel 4. Luftfeuchtigkeit, Gase. Methoden zur Messung der Luftfeuchtigkeit. Hygrometer .....	119
Kapitel 5. Licht. Messwandler, Fotozellen .....	123
Kapitel 6. Ionisationswandler. Sensoren .....	144
Anhang.....	155

FOR AUTHOR USE ONLY

## **Einführung**

Moderne Techniken und Technologien sind ohne die verschiedenen Arten von Messwandlern, Sensoren, Messwertaufnehmern und Messfühlern kaum vorstellbar. Viele Arbeiten sind der Entwicklung solcher Geräte gewidmet, die Prinzipien und Methoden der Messung, das Design von Messwandlern und Sensoren werden ständig verbessert.

Zu den Messumformern gehören Geräte, die eine Änderung einer Größe in eine Änderung einer anderen Größe umwandeln. In der Regel wandelt ein solcher Messumformer eine nichtelektrische physikalische Größe, die so genannte physikalische Messgröße, in ein elektrisches Signal um. Messwandler werden in elektronischen Systemen verwendet, die das Ergebnis von Messungen oder Beobachtungen anzeigen. Die primären Erzeuger von elektrischen Signalen über eine nichtelektrische physikalische Größe sind Sensoren (Wandler, empfindliche Elemente).

Die Monographie stellt die Ergebnisse der Entwicklung verschiedener Messwandler und Sensoren vor. Es werden sowohl die vom Autor entwickelten als auch andere in der Literatur bekannte Messmethoden und -mittel beschrieben. Besondere Aufmerksamkeit wird den Mitteln zur Temperaturmessung in einem breiten Temperaturbereich gewidmet - von der Tieftemperatur bis zur Raumtemperatur und den Schmelztemperaturen einiger fester Materialien. Es werden Methoden zur Messung mechanischer Parameter - Verformungen, Drücke, Verschiebungen, Strömungsgeschwindigkeiten usw., zur Messung von Magnetfeldern mit verschiedenen Mitteln, von Gasparametern - Feuchtigkeit usw., von Solarenergiekonvertern und Ionisationsgeräten betrachtet.

## Kapitel 1. Die Temperatur. Messumformer, Messung

Es gibt eine große Vielfalt an Methoden und Mitteln zur Temperaturmessung. Zur Herstellung eines Temperatursensors (Thermometers) können alle Eigenschaften fester, flüssiger oder gasförmiger Stoffe verwendet werden, die von der Temperatur abhängen. Zum Beispiel physikalische und chemische Zustände, Abmessungen, elektrische Eigenschaften usw. Gleichzeitig haben Thermometer (Sensoren), die eine recht begrenzte Anzahl von elektrophysikalischen Materialeigenschaften und Messverfahren nutzen, eine breite praktische Anwendung gefunden.

### 1.1. Mechanische Kontaktthermometer

Solche Thermometer beruhen auf der Wärmeausdehnung von Substanzen. Sie zeichnen sich durch geringe Kosten und zufriedenstellende Genauigkeit aus. Sie sind hauptsächlich für den täglichen praktischen Gebrauch und für Laborarbeiten bestimmt.

Bei einem Kontaktthermometer kann das Messelement ein Metallstab sein, dessen Dehnung von der Temperatur abhängt (dilatometrische Thermometer):

$$l = l_0 (1 + \alpha t), \quad (1.1)$$

wobei  $l_0$  - Länge bei  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  - Wärmeausdehnungskoeffizient,  $t$  - Temperatur  $^\circ\text{C}$ .

Noch häufiger wird der Unterschied in der Wärmeausdehnung von zwei unterschiedlichen Metallen genutzt - Bimetallthermometer. Solche Thermometer können in kleinen Größen, einfach zu fertigen, niedrige Kosten gemacht werden.

Flüssigkeits-Thermometer aus Glas sind weit verbreitet. Der größte Teil der Flüssigkeit ist in einem volumetrischen Behälter konzentriert, der praktisch ein Sensor (Fühlerelement) ist. Als Füllung kann jede beliebige Flüssigkeit verwendet werden, je nach den Betriebsbedingungen. Am häufigsten werden Quecksilber und Alkohol verwendet. Solche Thermometer sind nicht sehr genau, aber sie sind in Haushalten und Labors am weitesten verbreitet. In der Industrie werden sie allmählich durch Thermometer ersetzt, mit denen sich die Produktion automatisieren lässt.

Mechanische Kontaktthermometer haben einen großen Nachteil: Ihre Informationen (Signale) können nicht über eine Entfernung zur Verarbeitung

übertragen werden. Daher werden in der Industrie Thermometer verwendet, die die elektrische Veränderung der Eigenschaften einer Substanz bei einer Temperaturänderung ausnutzen.

## 1.2. Thermometer auf der Grundlage des thermoresistiven Effekts

Der elektrische Widerstand der meisten Stoffe ändert sich erheblich mit der Temperatur. Diese Abhängigkeit wird zur Herstellung von Thermometern - Thermowiderständen - genutzt. Ein Thermistor ist ein Gerät, das aus einem Stromleiter besteht, dessen elektrischer Widerstand von der Temperatur abhängt und an den elektrische Leitungen angeschlossen sind.

Die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands von Metallen wird durch die Abhängigkeit von der Beweglichkeit der Stromträger (Elektronen) verursacht, bei Halbleitern spielt die Temperaturabhängigkeit der Konzentration der Stromträger die Hauptrolle.

Der Messbereich von Thermometern wird hauptsächlich durch hohe Temperaturen begrenzt, die die Linearität der Sensorkennlinie beeinflussen, sowie durch die mechanischen Eigenschaften des Materials des Sensorelements und des Gehäuses.

Die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes von Metallen kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$R = R_0 (1 + \gamma t) \quad (1.2),$$

wobei  $R_0$  - Widerstand bei  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\gamma$  - Temperaturkoeffizient des Widerstands,  $t$  - Temperatur in  $^\circ\text{C}$ .

Als Materialien für das empfindliche Element des Thermistor-Thermometers werden verwendet: Platin, Nickel, Kupfer und andere. Thermometermessfühler auf Metallbasis sind sehr dünne Drähte, die auf einen Rahmen oder einen auf einem isolierenden Substrat aufgetragenen Film gewickelt sind.

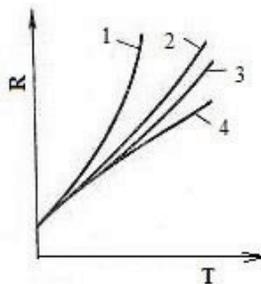


Abb. 1.1. Charakteristische Abhängigkeiten des Widerstands  $R$  von einigen Metallen von der Temperatur  $T$ : 1 - Nickel, 2 - Wolfram, 3 - Kupfer, 4 - Platin

Typische Abhängigkeiten des Widerstands einiger Metalle von der Temperatur sind in Abb. 1.1 dargestellt. Sie weisen auf die Möglichkeit hin, einen hohen Grad an Linearität der Beziehung zwischen Widerstand und Temperatur zu erreichen.

### 1.3. Halbleiter-Widerstandsthermometer

Sie sind Temperatursensoren (Thermistoren), die die Abhängigkeit des elektrischen Widerstands eines Halbleiters von der Temperatur nutzen. Diese Abhängigkeit kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$R = R_o \cdot e^{B/T} \quad (1.3),$$

wobei  $R_o$  der Widerstand bei einer gegen unendlich tendierenden Temperatur  $T$  und  $B$  der Koeffizient ist, der die Empfindlichkeit  $t_o$  Temperatur bestimmt.

Die Exponentialabhängigkeit zeigt eine starke Nichtlinearität der Kennlinie eines solchen Thermometers, und dies ist einer der Hauptnachteile eines solchen Sensors. Andererseits reagieren solche Thermometer am empfindlichsten auf Temperaturänderungen. Bei Temperaturen von flüssigem Helium kann ihre Empfindlichkeit 100-200 %/K erreichen. Darüber hinaus erlaubt der hohe Widerstand (bis zu 1 Megohm) die Vernachlässigung von Störungen an den Anschlusspunkten der Drähte des Stromkreises. Halbleiter wie Silizium, Germanium, Galliumarsenid usw. sowie Metalloxide werden zur Herstellung solcher Thermometer verwendet.

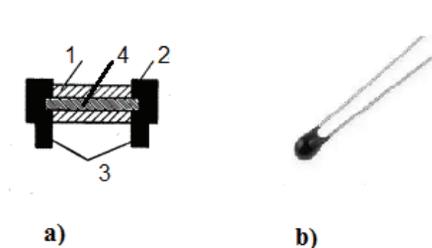


Abb. 1.2. a) - eine der typischen Ausführungen eines Halbleiterthermometers - Thermistor. 1 - Glas, 2 - Stahl, 3 - Silber, 4 - Sensorelement, b) - Muster eines Halbleiter-Miniaturthermistors

Es gibt verschiedene Arten von Halbleiterthermometern. Mit Hilfe der Mikroelektronik kann das Fühlerelement des Thermistors mikroklein gemacht werden. Abbildung 1.2 zeigt einige Ausführungen von Halbleiterthermometern.

Halbleiter-Thermistoren sind weit verbreitet. Ein Halbleiter in Form eines Films auf einem isolierenden Substrat oder in Bulk-Bauweise dient als Leiter des elektrischen Stroms. Die Gesamtgröße von Thermistoren kann weniger als 1 mm<sup>3</sup> betragen, der elektrische Widerstand von einigen Ohm bis 100 kOhm, die Versorgungsströme in der Regel 10 - 100 μA, die Empfindlichkeit von 3 %/K im Bereich der Raumtemperatur bis 100 %/K im Bereich der kryogenen Temperaturen, die Trägheit kann einige zehn Millisekunden und weniger erreichen.

Halbleiter-Thermistoren werden zur Messung und Regelung der Temperatur in einem weiten Bereich eingesetzt, in der Regel jedoch nicht über 200 °C, da bei hohen Temperaturen die Eigenleitfähigkeit und die Temperaturabhängigkeit des Widerstands stark abnimmt, nicht monoton wird und nicht stabil ist. In einem weiten Temperaturbereich hat die Temperaturabhängigkeit des Halbleiterwiderstands  $R(T)$  einen komplexen Charakter und hängt von der Art der Dotierungsverunreinigung und dem Dotierungsgrad ab. Daher ist es unmöglich, die Abhängigkeit von  $R(T)$  durch eine einfache Formel auszudrücken, die eine Kalibrierung mit hoher Genauigkeit ermöglichen würde. In der Regel wird das gesamte Temperaturintervall in einzelne Abschnitte unterteilt, in denen die Abhängigkeit  $R(T)$  durch eine Interpolationsformel beschrieben wird.

Die Gruppe der temperaturempfindlichen Halbleiterwandler, die in Thermometern verwendet werden, wird oft als Thermistoren bezeichnet. Sie haben eine stark nichtlineare Charakteristik, können aber in Systemen zur Temperaturmessung wirksam eingesetzt werden.

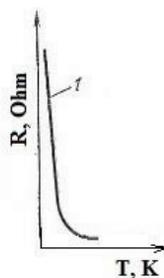


Abb. 1.3. Temperaturabhängigkeit des Widerstands eines typischen Thermistors.

Eine typische Kennlinie eines Thermistors ist in Abb. 1.3 dargestellt. Vergleicht man die Eigenschaften von metallischen Widerstandswandlern mit denen eines Thermistors, so kann man zu dem Schluss kommen, dass letzterer:

- 1) sind steiler, d. h. ihr Temperaturkoeffizient des Widerstands ist deutlich größer als der von Metallen, zumindest im Hauptteil der Kurve;
- 2) fallen mit steigender Temperatur, d. h. ihr Temperaturkoeffizient des Widerstands ist negativ.

Thermistoren mit einem negativen Temperaturkoeffizienten des Widerstands sind besser bekannt als NTC-Thermistoren. Es sei darauf hingewiesen, dass es auch Thermistoren mit einem positiven Widerstandskoeffizienten gibt, die als PTC-Thermistoren bezeichnet werden. Letztere werden häufiger nicht zur Temperaturmessung, sondern z. B. zum Schutz vor Überhitzung eingesetzt.

Thermistoren sind wesentlich kleiner als metallische Widerstandswandler und reagieren daher schneller auf Temperaturänderungen. Andererseits bedeutet die geringe Größe von Thermistoren, dass ein kleiner Strom für die Selbsterhitzung erforderlich ist. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass der Strom die Genauigkeit der Messung beeinträchtigt.

Die Methodik zur Kalibrierung eines Halbleiterthermistors kann anhand des folgenden Beispiels untersucht werden. Im Bereich der Raumtemperatur kann die Abhängigkeit von  $R(T)$  für Halbleiter-Thermistoren durch die Formel (1.3) ausgedrückt werden.

Für die Kalibrierung von Thermistoren (Erstellung von Tabellen zur Abhängigkeit des elektrischen Widerstands von der Temperatur) wird die Formel (1.3) umgewandelt:

$$\ln R = \ln R_0 + B(1/T) \quad (1.4),$$

Der erhaltene Ausdruck (1.4) ist die Gleichung einer Geraden in den Koordinaten  $1/T$  und  $\ln R$ .  $\ln R_0$  ist der Wert des Logarithmus des Widerstands, wenn  $T$  gegen unendlich tendiert. Der Koeffizient  $B$  ist gleich dem Tangens des Winkels  $\alpha$  der Steigung der Geraden an der Achse  $1/T$ . Wenn man bei zwei festen Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  die Widerstände des Thermistors  $R_1$  bzw.  $R_2$  misst, kann man die Abhängigkeit von  $\ln R(1/T)$  von den beiden Punkten darstellen:

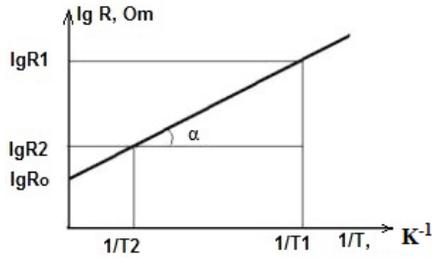


Abb. 1.4 Temperaturabhängigkeit des Widerstands  $R$  eines Halbleiterthermistors

Mit Hilfe der Formel (1.4) und des erhaltenen Diagramms ist es möglich, für jeden beliebigen Wert von  $R$  aus dem Intervall von  $R_1$  bis  $R_2$  den entsprechenden Temperaturwert zu finden - um Kalibrierungstabellen zu erstellen.

Für genaue Temperaturmessungen werden Thermistorkalibrierungen in spezialisierten Labors unter Verwendung geeigneter hochpräziser Messungen und Näherungsformeln für den erforderlichen Temperaturbereich, Computerdatenverarbeitung usw. durchgeführt. In einem weiten Temperaturbereich hat die Temperaturabhängigkeit des Widerstands von Halbleiter-Thermistoren einen recht komplexen Charakter.

Widerstandsthermometer werden in Geräten zur Temperaturmessung, -kontrolle und -regelung eingesetzt. Sie enthalten neben dem Messfühler eine Stromquelle und einen Messkreis. Der Messkreis einer symmetrischen Gleichstrombrücke ist beispielsweise in Abb. 1.5 dargestellt.

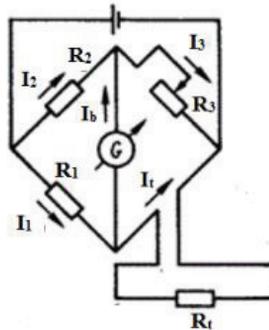


Abb. 1.5. Schematische Darstellung der symmetrischen Gleichstrombrücke

Durch Verschieben des Schiebereglers des Rheostats  $R_3$  bringt man die Brücke in den Gleichgewichtszustand, bei dem das Galvanometer  $G$  die Stromlosigkeit in der Diagonale der Brücke feststellt ( $I_t = 0$ ). Der Wert von  $R_3$  ist also proportional zum gemessenen Widerstand  $R_t$ , der von der Temperatur abhängt. Der Abgleich der Brücke kann automatisch durchgeführt werden. Zu diesem Zweck ändert sich zum Beispiel der Widerstand des Widerstands unter dem Einfluss des Nullpfeils des Galvanometers  $G$ .

Neben symmetrischen Messbrücken werden auch unsymmetrische Messbrücken verwendet, die sich durch eine höhere Zuverlässigkeit, aber eine geringere Genauigkeit aufgrund des Einflusses von Quellenspannungsschwankungen auszeichnen.

#### **1.4. Beispiele für einige industrielle Thermistoren**

Als Beispiel können wir die bekannten industriellen Thermistoren der Serien MMT und KMT nennen. Die Thermistortypen MMT-1 und KMT-1 bestehen aus einem Halbleiterstab, der mit Emaillefarbe überzogen ist, mit Kontaktkappen und Leitungen. Diese Thermistorkabel können nur in trockenen Räumen verwendet werden. Die Thermistoren der Typen MMT-4 und KMT-4 sind in einem Metallgehäuse montiert und versiegelt. Sie können bei jeder Luftfeuchtigkeit und in jeder Umgebung eingesetzt werden, die nicht aggressiv auf das Gehäuse wirkt. Die Versiegelung erfolgt durch Glas und Zinn. Der Kern des Thermistors vom Typ MMT-4 ist mit Metallfolie umwickelt. Die Stromsenke besteht aus Nickeldraht. Diese Thermistoren werden für Nennwiderstandswerte von 1 bis 200 kOhm (bei 20°C) hergestellt und können für den Betrieb im Temperaturbereich von -100 bis 129°C eingesetzt werden.

Auch reine Metalle werden als Material für Widerstandsthermometer verwendet: zum Beispiel Platin in Form von dünnem Draht mit einem Durchmesser von 0,05-0,07 mm zur Messung von Temperaturen bis zu 630°C. Kupfer, Nickel oder Eisen zur Messung von Temperaturen von 100-150°C. Sie werden in Form von Drähten mit einem Durchmesser von 0,1 mm oder in Form von Folien aus den jeweiligen Materialien verwendet.

Es gibt die folgenden Möglichkeiten, das Material von Widerstandsthermometern aufzuwickeln:

- auf einer Glasplatte
- auf einem Glasrohr

- auf einem Kreuz aus Glimmer oder Porzellan.

Die am häufigsten verwendeten Metallelemente bei der Herstellung von Thermistoren sind Platin, Nickel und Kupfer.

### **1.5. Platin-Widerstandsthermometer**

Diese Messwertgeber nutzen die Widerstandsänderung eines Platindrahtes oder -films zur Bestimmung der Temperatur. Sie werden auch als resistive Temperaturdetektoren bezeichnet. Daraus folgt nicht, dass nicht auch andere Metalle zur Temperaturmessung verwendet werden können, aber am häufigsten werden in solchen Messwertgebern Platin-Messfühler eingesetzt.

Die Empfindlichkeit solcher resistiven Temperaturdetektoren ist recht gering und die dynamische Reaktion ist recht langsam (aufgrund der Bauweise des Geräts). Außerdem sind sie recht anfällig für die Zerstörung durch Vibrationen und Stöße.

Es gibt zwei Grundtypen von Platin-Draht-Widerstandstransducern: die Tauchsonde und das oberflächenmontierte Sensorelement. Die Drahtelemente sind in der Regel mit minimaler Spannung auf einem Keramiksockel montiert und in der Regel mit einem Schutzmaterial beschichtet, um sie vor Umwelteinflüssen zu schützen.

Der Aufbau eines typischen Platin-Drahtfühlers ist in Abb. 1.6(a) dargestellt, der eines oberflächenmontierten Temperaturfühlers in Abb. 1.6(b). Messwertgeber mit Folienmessfühlern (Abb. 1.6, c), bei denen eine Metallfolie auf einem isolierenden Substrat verwendet wird, sind nicht so weit verbreitet wie Drahtmessfühler, obwohl ihre Verwendung aufgrund ihrer geringen Größe, ihres verbesserten dynamischen Ansprechverhaltens, ihrer höheren Empfindlichkeit und ihrer relativ geringen Kosten ständig zunimmt.

Platin-Widerstandswandler werden in der Regel in einen der Arme einer Wheatstone-Brücke eingebaut, wodurch eine hohe Messgenauigkeit gewährleistet wird. Der niedrige Widerstand des Geräts (etwa 100 Ohm) führt natürlich zu Problemen beim Schalten mit Messgeräten, da der Widerstand der Leitungen, die den Wandler mit dem Messkreis verbinden, dem Widerstand des Wandlers entsprechen kann.

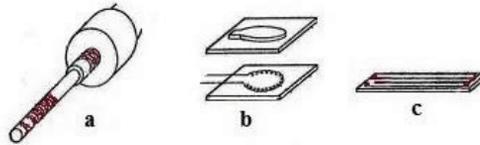


Abb. 1.6. Ausführungen von Platin-Draht-Widerstandswandlern: a - Drahtsonde, b - auf der Oberfläche des Sensorelements montierter Draht-Wandler, c - auf der Oberfläche des Sensorelements montierter Dünnschicht-Wandler.

### 1.6. Eigene Beheizung von Widerstandsthermometern

Unter der Eigenerwärmung von Widerstandsfühlern versteht man einen Temperaturanstieg  $\Delta T$  über die gemessene Umgebungstemperatur hinaus, der auf die Abgabe von Joulescher Wärme in ihnen während des Durchgangs des Messstroms zurückzuführen ist. Dieser Temperaturüberschuss ist ein zusätzlicher Messfehler, der nicht nur vom Strom, sondern vor allem von der Wärmemenge abhängt, die an die Umgebung abgegeben werden kann.

Der Wärmeübergang wird durch den Werkstoff und die Abmessungen der Messzelle sowie durch die Beschaffenheit und die thermodynamischen Eigenschaften der Umgebung bestimmt. Die Hersteller von Thermometermesszellen geben in der Regel für jede Art von Messzelle den maximal zulässigen Strom- und Spannungsabfall über der Messzelle in Form eines Diagramms an, z. B. (Abb. 1.7). Die Messzelle darf nur im linken aufsteigenden Zweig der Kennlinie eingesetzt werden, damit unter bestimmten Randbedingungen keine Störung durch ihre Erwärmung durch den Messstrom auftritt. So erwärmt sich z.B. eine Platinmesszelle (Pt 100) auf einem Keramikrahmen in einem Metallrohr in ruhigem Wasser um ca. 0,01-0,02 K und in ruhender Luft um 0,1 K, wenn ein Strom von 3 mA durch sie fließt. Der maximale Strom sollte 10 mA nicht überschreiten. Bei kleinen NTC-Thermistoren kann der maximal zulässige Strom nur einige Mikroampere betragen.

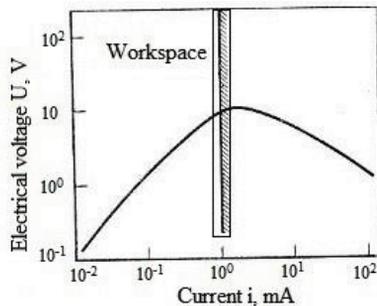


Abb. 1.7. Beispieldiagramm der zulässigen Werte des durch den Thermistor fließenden Stroms und des Spannungsabfalls an ihm

### 1.7. Tieftemperatur-Widerstandsthermometer (kryogen) - Thermistoren. Temperaturmessung im kryogenen Bereich

Zur Temperaturmessung im kryogenen Bereich werden Halbleiter- und Metallsensoren - Widerstandsthermometer (Thermistoren) und Thermoelemente mit geeigneten Eigenschaften - eingesetzt.

Sehr oft müssen Messungen bei niedrigen Temperaturen in Anwesenheit von ziemlich starken Magnetfeldern durchgeführt werden. Daher sollten Tieftemperaturthermometer (Sensoren) neben einer guten Temperaturempfindlichkeit und Stabilität der Eigenschaften auch eine geringe Empfindlichkeit gegenüber dem Einfluss von Magnetfeldern aufweisen. Namhafte Organisationen wie VNIIFTRI (Russland), LakeShore (USA), Institut für Halbleiterphysik (Ukraine) usw. befassen sich mit der Entwicklung, Erforschung und Herstellung kryogener Thermistoren (sowie anderer Sensoren für den kryogenen Bereich).

Unter den bekannten metallischen Widerstandsthermometern sind Platin-Thermistoren zu nennen, die sich durch hohe messtechnische Eigenschaften auszeichnen. Allerdings verursacht beispielsweise das Magnetfeld  $B=2$  Tesla bei einer Temperatur von 12 K eine Widerstandszunahme, die 5 K entspricht. Es wird davon ausgegangen, dass der Einfluss des Magnetfelds nur bei Temperaturen berücksichtigt werden kann, die höher sind als die von flüssigem Stickstoff (77 K).

Rhodium-Eisen-Thermistoren sind weniger empfindlich gegenüber Magnetfeldern. Bei einer Temperatur von 4,2 K führt ein Feld von 3 Tesla zu einer Erhöhung des Widerstands um 3 % (entspricht etwa 0,5 K)

Von den Halbleiter-Thermistoren sind Germanium-Thermistoren am weitesten verbreitet. Sie haben eine gute Langzeitstabilität, eine hohe Empfindlichkeit ( $\cong 100 \text{ \%}/\text{K}$  bei 4,2 K) und eine Genauigkeit von etwa 0,01 K. Germanium-Widerstandsthermometer werden aus massivem Germanium, dispergiertem Germanium und Germaniumfilmen auf isolierenden Substraten hergestellt. Es sind Germanium-Thermistoren bekannt, die aufgrund ihres geringen Magnetowiderstandes in Magnetfeldern bis zu 6 Tesla eine Genauigkeit von 0,01 K bieten.

Neben Germanium werden auch andere Halbleitermaterialien, wie Galliumarsenid, für kryogene Thermistoren verwendet. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die messtechnischen Eigenschaften solcher Thermometer in der Regel schlechter sind als die von Germanium-Thermometern.

Es gibt auch Kohlenstoffsensoren - Widerstandsthermometer, die häufig zur Messung von Temperaturen im kryogenen Bereich in Gegenwart von Magnetfeldern verwendet werden. Es handelt sich um Thermometer von Allen-Bradley, Spear, Mitsushita, TSU (Hersteller VNIIFTRI) sowie TVO. In der Literatur wird darauf hingewiesen, dass z. B. TCU-Thermometer eine Reproduzierbarkeit von  $\Delta T/T$  mit einem Fehler von höchstens 0,0002 bieten. In einem 6-Tesla-Magnetfeld bei einer Temperatur von 4,2 K beträgt ihr Fehler 0,35 K. TBO-Thermometer bieten im 6-Tesla-Feld eine Genauigkeit von nicht mehr als 0,12 K.

### **1.8. Kryogene Thermistoren auf der Basis von dispergiertem Germanium**

Zur Verbesserung der technischen Merkmale von mikroelektronischen Halbleiterbauelementen und zur Entwicklung ihrer Varianten werden sowohl neue Designlösungen unter Verwendung bekannter Materialien als auch neue Technologien zur Gewinnung von Materialien mit vielversprechenden elektrophysikalischen Eigenschaften eingesetzt. Bei der Entwicklung von Thermometern, deren Funktionsweise auf dem thermoresistiven Effekt beruht, sind die Stabilität der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands des verwendeten Materials und die Konstruktion des thermischen Wandlers, eine ausreichende Empfindlichkeit und ein minimaler Fehler durch äußere Einflüsse von entscheidender Bedeutung. Die Instabilität der bekannten Halbleiter-Thermistoren tritt vor allem bei kryogenen Temperaturen auf.

Bei Temperaturen unter 20 K sind viele Widerstandsthermometer wegen ihrer mangelnden Wiederholbarkeit für Präzisionsmessungen ungeeignet. Die Praxis zeigt, dass diese Nachteile bei Germaniumthermometern weniger ausgeprägt sind. Reines Germanium wird jedoch in der Thermometrie nicht verwendet, da es bei niedrigen Temperaturen einen sehr hohen Widerstand und eine geringe Empfindlichkeit aufweist. Häufig müssen die Messungen unter verschiedenen äußeren Einflüssen (Vorhandensein von Magnetfeldern usw.) durchgeführt werden, die sich auf den Widerstand von reinem Germanium auswirken und zu erheblichen Fehlern führen können. Um geeignete elektrophysikalische Eigenschaften von Massengermanium zu erhalten, werden derzeit verschiedene recht teure und arbeitsintensive Dotierungsverfahren eingesetzt. Sie verwenden auch Germanium in Form von Folien. In einigen Arbeiten wurden kryogene Thermistoren auf der Grundlage von Germaniumfilmen auf halbisolierendem Galliumarsenid untersucht. Bei 4,2 K können sie eine Empfindlichkeit von etwa 20 %/K aufweisen, einige sind resistent gegen Neutronenbestrahlung bei 77 K mit Dosen in der Größenordnung von  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$ .

Es sind Studien über Versuchsproben von Thermistoren auf der Basis von dispergiertem Germanium bekannt, die durch mechanisches Pressen von fein dispergiertem Pulver aus einkristallinem Germanium bei unterschiedlichen Temperaturen und Drücken hergestellt wurden. Ziel der Studie war es, Thermistoren für den Temperaturbereich von 4,2-300 K herzustellen, die gegen äußere Einflüsse resistent sind. Untersucht wurden die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands im genannten Temperaturbereich, der Magnetowiderstand bei  $T=4,2 \text{ K}$  und die Wirkung von Neutronenbestrahlung auf den elektrischen Widerstand bei Raumtemperatur.

Dispergiertes Germanium wurde aus einkristallinem Germaniumpulver mit p-Leitfähigkeit und einem spezifischen Widerstand von  $15 \text{ Ohm.cm}$  gewonnen. Die Proben wurden durch Einwirkung von hohem Druck und hohen Temperaturen hergestellt. Es wurde festgestellt, dass der Druck und die Temperatur, bei denen das Pulver gepresst wurde, die elektrophysikalischen Eigenschaften des erhaltenen dispergierten Germaniums bestimmen. Für die Herstellung von Thermowiderständen für kryogene Temperaturen wurden die am besten geeigneten Proben verwendet. Das erhaltene dispergierte Germanium hatte eine p-Typ-

Leitfähigkeit, der spezifische Widerstand bei Raumtemperatur  $\rho = (1-4)$  Ohm.cm. Es kann angenommen werden, dass die Akzeptorniveaus auf die Besonderheiten der Kristallstruktur des erhaltenen Materials zurückzuführen sind. Es ist bekannt, dass die Art der Leitfähigkeit durch verschiedene Arten von Strukturdefekten bestimmt werden kann. Die Besonderheiten der Struktur von dispergiertem (pulverförmigem) Germanium können auch den erhöhten Strahlungswiderstand eines solchen Materials erklären. Die Versuchsproben der Thermistoren hatten ein empfindliches Element mit Abmessungen von etwa  $1 \text{ mm}^3$  (Abb. 1.8).

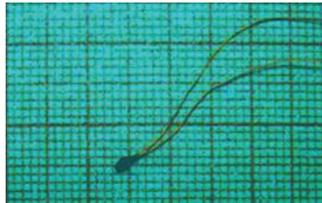


Abb. 1.8. Experimentelles Muster eines Thermistors auf der Basis von dispergiertem Germanium

Die Ergebnisse der Messungen der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands sind in Abb. 1.9 dargestellt. Hier ist die Temperaturabhängigkeit des Widerstands von einkristallinem Germanium vom p-Typ (Kurve 1) und experimentellen Thermistoren aus dispergiertem Germanium (Kurven 2, 3) dargestellt.

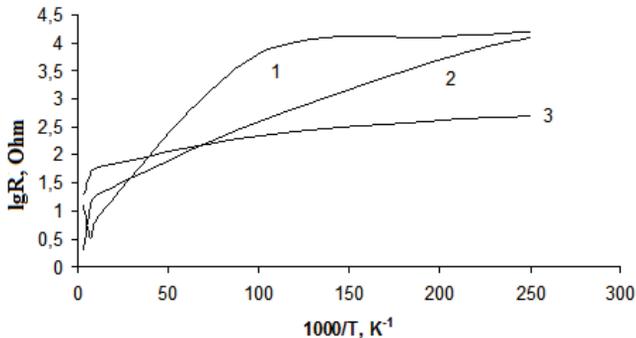


Abb. 1.9. Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands: 1 - einkristallines Ausgangsgermanium, 2 - Thermistor auf der Basis von dispergiertem Germanium Typ A, 3 - Thermistor auf der Basis von dispergiertem Germanium Typ B. Typ A und B unterscheiden sich hauptsächlich durch die

Temperatur und den Druckwert bei der Herstellung von dispergiertem Germanium.

Die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands von Thermistoren aus dispergiertem (Pulver-)Germanium des Typs A (Kurve 2) ist bei niedrigen Temperaturen steiler als die Abhängigkeit von einkristallinem Ausgangsgermanium und hat im gesamten Temperaturbereich einen eher monotonen Charakter. Der glatte Charakter der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands erlaubt es, ihn mit mathematischen Formeln recht einfach und mit guter Genauigkeit zu approximieren. Für eine Probe des Typs A zum Beispiel, auch für den Temperaturbereich 77-300 K, mit einem Polynom der Form:

$$\ln R = \sum_{i=0}^n A_i (\ln T) \quad (1.5),$$

(wobei  $A_i$  - konstante Koeffizienten, bestimmt durch die Methode der kleinsten Quadrate,  $n$  - bestimmt durch die Bedingung des kleinsten Approximationsfehlers) bereits für  $n=3$  die Abhängigkeit erhalten:

$$\ln R = 15,1077031 + 1,6552736 * \ln T - 1,7901811 * (\ln T)^2 + 0,193233 * (\ln T)^3$$

mit einem Korrelationskoeffizienten  $r^2 = 0,9995$  und einem Fehler von etwa 0,1 K im 77K-Bereich.

Die Empfindlichkeit von Thermistoren des Typs A erreicht im Temperaturbereich von flüssigem Helium (4,2 K) Werte von mehr als 100 %/K. Die Empfindlichkeit von Thermistoren des Typs B liegt bei etwa 20 %/K und ihr elektrischer Widerstand beträgt bei 4,2 K in der Regel nicht mehr als 500 Ohm.

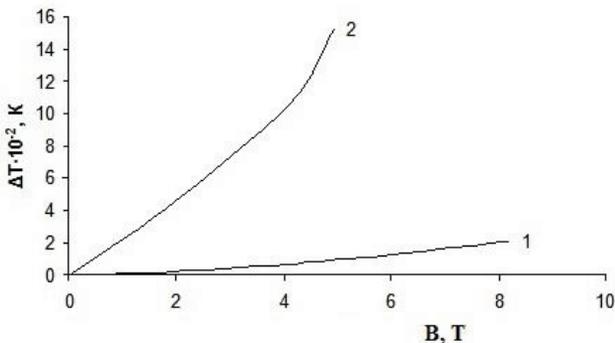


Abb. 1.10. Abhängigkeit des Temperaturmessfehlers  $\Delta T$  im Bereich von 4,2 K vom Wert des Magnetfeldes  $B$  für Thermistoren vom Typ A (Kurve 1) und Typ B (Kurve 2).

Abb. 1.10 zeigt die Abhängigkeit des Fehlers  $\Delta T$  der Temperaturmessung im Bereich von flüssigem Helium in Gegenwart von Magnetfeldern von der Größe des Magnetfeldes. Der Fehler von Thermistoren aus dem Material des Typs A (Kurve 1) beträgt im Feld von 8 T etwa 0,02 K, und der Fehler von Thermistoren des Typs B im Feld von 4 T erreicht 0,15 K. Es ist zu beachten, dass der Magnetwiderstand  $\Delta R/R$  (wobei  $\Delta R$  die Widerstandsänderung unter dem Einfluss des Magnetfeldes und  $R$  der Anfangswiderstand ist) in beiden Typen von Thermistoren etwa gleich ist. In einem 4-T-Feld beispielsweise liegt der Magnetwiderstand beider Typen innerhalb von (2,5 - 3,0) %. Die Messgenauigkeit in Magnetfeldern von Thermistoren des Typs A ist jedoch aufgrund der höheren Temperaturempfindlichkeit höher.

Zur Beseitigung der durch das Magnetfeld verursachten Fehler wurde eine spezielle Konfiguration verwendet. Das Schema ist in Abb. 1.11 dargestellt. Die Messdrähte sind so am Messkopf befestigt, dass sich die elektrischen Kontakte im Abstand

$$l = aR_H / \rho M, \quad (1.6)$$

Dabei ist  $a$  die Breite der Platte,  $R_H$  die Hall-Konstante,  $\rho$  der spezifische Widerstand und  $M = \Delta\rho/\rho B$  der Magnetowiderstand im Feld  $B$ .

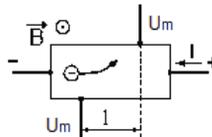


Abb. 1.11. Feldkompensierter Temperatursensor:  $U_m$  - die gemessene Spannung;  $l$  - Abstand zwischen den Kontakten.

Dadurch werden die an den Kontakten durch den Hall-Effekt und den Magnetowiderstand erzeugten Spannungen gegenseitig kompensiert, so dass die Feldwirkung auf die Messgenauigkeit minimiert wird.

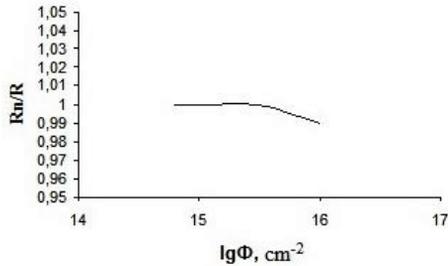


Abb. 1.12. Abhängigkeit der relativen Änderung des elektrischen Widerstands eines Thermistors (Typ A) nach Neutronenbestrahlung vom Wert der Neutronenflüsse  $\Phi$ .  $R$  - Anfangswiderstand,  $R_n$  - Widerstand nach der Bestrahlung.

Der Einfluss von Strahlung auf die Eigenschaften von Thermistoren auf Basis von dispergiertem Germanium wurde untersucht. Abb. 1.12 zeigt die Abhängigkeit des Widerstandes von Thermistoren des Typs A von der Strahlungseinwirkung. Die Auswirkung der Strahlung auf den Widerstandswert wurde bisher nur bei Raumtemperaturen evaluiert. Die Kennwerte wurden bei einer Temperatur von 300 K vor der Bestrahlung und nach der Bestrahlung mit Neutronenflüssen  $\Phi$  von  $8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  bis  $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  gemessen. Die Temperatur wurde während der Messungen mit einer Genauigkeit von 0,1 K stabilisiert. Die Neutronenenergie betrug 1 MeV und die Flussintensität war  $(2-4) \cdot 10^8 \text{ fl/s}$ . Die Abbildung zeigt, dass sich der elektrische Widerstand der Thermistoren deutlich zu verändern beginnt, wenn man sich Neutronenbestrahlungsstärken von  $10^{16} \text{ cm}^{-2}$  nähert.

### 1.9. Thermiodioden und Thermotransistoren

Thermiodioden und Thermotransistoren werden in Temperatursensoren verwendet, die im Bereich von  $-80$  bis  $+150 \text{ }^\circ\text{C}$  arbeiten. Die obere Grenze des Temperaturbereichs wird durch den thermischen Durchbruch des p-n-Übergangs begrenzt und erreicht bei einigen Typen von Germanium-Sensoren  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  und bei Silizium-Sensoren bis zu  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die untere Grenze des Temperaturbereichs von Thermiodioden und Thermotransistoren wird durch die Abnahme der Konzentration der Hauptträger bestimmt und kann für Germanium-Sensoren  $-(240-260) \text{ }^\circ\text{C}$ , für Silizium-Sensoren  $-200 \text{ }^\circ\text{C}$  erreichen.

Die Hauptvorteile von Thermiodioden und Thermotransistoren sind die geringen Abmessungen, die Austauschbarkeit und vor allem der geringe Preis, der ihre Verwendung in Einwegsensoren ermöglicht.

Die Beziehung zwischen dem Strom  $I$  durch einen p-n-Übergang (Diode oder Transistor) und dem Spannungsabfall  $U$  an diesem Übergang wird durch eine bestimmte Gleichung definiert. Diese Gleichung definiert den Strom durch den Übergang sowohl in Durchlassrichtung als auch in Sperrrichtung des Übergangs. Aus den bekannten Gleichungen und Formeln geht hervor, dass sowohl die Durchlass- als auch die Sperrströme eines p-n-Übergangs von der Temperatur abhängen. Offene p-n-Übergänge werden meist für Temperaturmessungen verwendet. Die Theorie zeigt, dass der Spannungsabfall an einem offenen *p-n-Übergang* bei einem Strom  $I$  durch den Übergang durch eine Näherungsformel bestimmt wird, aus der hervorgeht, dass der Spannungsabfall linear von der Temperatur abhängt und mit steigender Temperatur abnimmt. Die Temperaturempfindlichkeit des p-n-Übergangs in Bezug auf die Spannung beträgt  $\approx 1,5 \text{ mV/K}$ . Vergleicht man die Temperaturempfindlichkeitskoeffizienten für den Spannungsabfall am p-n-Übergang und die Thermo-EMK von Thermoelementen, die im gleichen Temperaturbereich arbeiten (z. B. Chromel - Kopel), so kann man sagen, dass die Empfindlichkeit des p-n-Übergangs etwa 100 Mal höher ist als die Empfindlichkeit von Thermoelementen.

### **1.10. Thermoelektrische Messwandler (Thermoelemente). Funktionsprinzip, Schemata des Einschaltens und Verwendung von Thermoelementen**

Das Funktionsprinzip eines Thermoelements beruht auf dem thermoelektrischen Effekt, der darin besteht, dass in einem geschlossenen Kreislauf, der aus zwei ungleichen Leitern besteht, eine Thermo-EMK (Spannung) auftritt, wenn die Verbindungspunkte der Leiter unterschiedliche Temperaturen haben. Nehmen wir einen geschlossenen Kreislauf (siehe Abb. 1.13), der aus ungleichen Leitern (Thermoelektroden) besteht, so treten an ihren Verbindungsstellen thermische EMK  $E(t)$  und  $E(t_0)$  auf, die von den Temperaturen dieser Verbindungsstellen  $t$  und  $t_0$  abhängen. Da die betrachteten Thermoelektroden in eine Gegenmaßnahme einbezogen sind, wird die resultierende thermoelektrische EMK, die im Kreislauf wirkt, als  $E(t) - E(t_0)$  definiert.

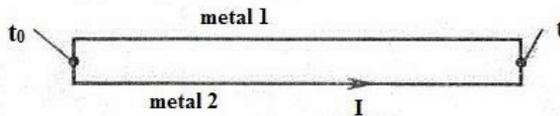


Abb. 1.13. Schematische Darstellung eines geschlossenen Stromkreises mit zwei Leitern

Bei gleicher Temperatur der beiden Anschlussstellen ist die resultierende thermische EMK gleich Null. In der Praxis wird eine der Verbindungsstellen des Thermoelements in einen Thermostaten (in der Regel schmelzendes Eis) getaucht, und die Temperaturdifferenz und die Temperatur der anderen Verbindungsstelle werden relativ dazu bestimmt. Die Anschlussstelle, die in das kontrollierte (untersuchte) Medium eingetaucht ist, wird als Arbeitsende des Thermoelements bezeichnet, die zweite Anschlussstelle (im Thermostaten) als das freie Ende.

Bei einem beliebigen Paar homogener Leiter hängt die Größe der resultierenden thermoelektrischen EMK nicht von der Temperaturverteilung entlang der Leiter ab, sondern nur von der Art der Leiter und der Temperatur der Verbindungsstelle. Wird ein thermoelektrischer Stromkreis an einer beliebigen Stelle unterbrochen und mit ungleichen Leitern versehen, so ändert sich die resultierende thermische EMK im Stromkreis nicht, vorausgesetzt, alle entstehenden Verbindungspunkte haben die gleiche Temperatur. Dieses Phänomen wird genutzt, um die thermische EMK eines Thermoelements zu messen. Die resultierende EMK in Thermoelementen ist gering: Sie beträgt weniger als 8 mV pro 100 °C und überschreitet in der Regel nicht den Absolutwert von 70 mV.

Thermoelemente können zur Messung von Temperaturen im Bereich von -270 bis 2200 °C verwendet werden. Zur Messung von Temperaturen bis 1100 °C werden Thermoelemente aus unedlen Metallen verwendet; zur Messung von Temperaturen zwischen 1100 und 1600 °C werden Thermoelemente aus Edelmetallen und Platingruppenlegierungen verwendet. Zur Messung noch höherer Temperaturen werden Thermoelemente aus hitzebeständigen Wolfram-Basis-Legierungen verwendet.

Gegenwärtig werden für Thermoelemente am häufigsten Platin, Platin-Rhodium, Chromel und Alumel verwendet.

Bei der Messung von Temperaturen in einem großen Bereich muss die Nichtlinearität der Umwandlungsfunktion von Thermoelementen

berücksichtigt werden. Zum Beispiel wird die Umwandlungsfunktion von Kupfer-Konstantan-Thermoelementen für den Temperaturbereich von -200 bis 300 °C mit einem Fehler von etwa  $\pm 2 \mu\text{V}$  durch die folgende Formel beschrieben

$$E = At^2 + Bt + C \quad (1.7),$$

wobei  $A$ ,  $B$  und  $C$  Konstanten sind, die durch Messung der thermischen EMK bei drei Temperaturen bestimmt werden,  $t$  ist die Temperatur der Arbeitsstelle in °C.

Die Zeitkonstante (Trägheit) thermoelektrischer Wandler hängt von der Konstruktion des Thermoelementes und der Qualität des thermischen Kontakts zwischen der Arbeitsstelle des Thermoelementes und dem zu untersuchenden Objekt ab. Bei industriellen Thermoelementen liegt die Zeitkonstante im Bereich von mehreren Minuten. Es gibt jedoch auch Thermoelemente mit geringer Trägheit, deren Zeitkonstante zwischen 5 und 20 Sekunden und sogar noch darunter liegt.

Das Messgerät wird am freien Ende des Thermoelements und einer der Thermoelektroden an den Thermoelementkreislauf angeschlossen.

Wie bereits erwähnt, muss das freie Ende des Thermoelements bei der Temperaturmessung eine konstante Temperatur aufweisen. Wenn die Länge des Thermoelements selbst nicht ausreicht, um dieses Ende in eine Zone mit konstanter Temperatur zu bringen, werden Drähte verwendet, die aus zwei Kernen aus Materialien (Metallen) bestehen, die die gleichen thermoelektrischen Eigenschaften haben wie die Elektroden des Thermometers.

Bei Thermoelementen aus unedlen Metallen bestehen die Verlängerungsdrähte meist aus denselben Materialien wie die Hauptthermoelektroden. Für Thermoelemente aus Edelmetallen werden Verlängerungsdrähte aus anderen (nicht teuren) Materialien hergestellt, die im Temperaturbereich von 0 - 150 °C die gleiche thermische EMK entwickeln wie die Thermoelektroden. Für Platin-Platin-Rhodium-Thermoelemente beispielsweise werden Verlängerungselektroden aus Kupfer und einer speziellen Legierung hergestellt. Diese Metalle bilden ein mit dem Platin-Platin-Rhodium-Thermoelement identisches Thermoelement im Bereich von 0 - 150 °C. Für Chrom-Alumel-Thermoelemente werden Verlängerungs-Thermoelektroden aus Kupfer und Konstantan hergestellt, und für Chrom-Copel-Thermoelemente können die Haupt-Thermoelektroden in Form von flexiblen Drähten hergestellt werden. Wenn

die Verlängerungsthermoelektroden falsch angeschlossen werden, kann ein erheblicher Fehler auftreten.

Unter Laborbedingungen wird die Temperatur des freien Endes des Thermoelements auf  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  gehalten, indem es in ein mit zerstoßenem Eis und Wasser gefülltes Dewar-Gefäß gestellt wird. Unter industriellen Bedingungen weicht die Temperatur des freien Endes des Thermoelements in der Regel von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ab und entspricht in der Regel der Raumtemperatur (Raumtemperatur). Da Thermoelemente bei einer Temperatur des freien Endes von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  kalibriert werden und die Kalibriertabellen relativ zu  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  angegeben werden, kann dieser Unterschied eine Quelle erheblicher Fehler sein. Um diesen Fehler zu verringern, ist in der Regel eine Korrektur der Messwerte des Thermometers (Thermoelementes) vorzunehmen. Bei der Auswahl der Korrektur werden sowohl die Temperatur der freien Enden des Thermoelements als auch der Wert der gemessenen Temperatur berücksichtigt (dies ist darauf zurückzuführen, dass die Umwandlungsfunktion des Thermoelements nicht linear ist); dies erschwert eine genaue Korrektur des Fehlers.

Um den Fehler zu beseitigen, wird häufig eine automatische Korrektur der Temperatur der freien Enden des Thermoelements verwendet. Zu diesem Zweck wird in die Schaltung von Thermoelement und Millivoltmeter eine Brücke eingebaut, deren einer Arm ein Kupferthermistor ist und deren andere Arme von Manganin-Thermistoren gebildet werden. Bei einer Temperatur der freien Enden des Thermoelements von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  befindet sich die Brücke im Gleichgewicht; wenn die Temperatur der freien Enden des Thermoelements von  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  abweicht, ist die Spannung am Ausgang der Brücke nicht gleich Null und wird zur thermischen EMK des Thermoelements addiert, was zu einer Korrektur der Messwerte des Geräts führt (der Wert der Korrektur kann durch einen speziellen Widerstand eingestellt werden). Aufgrund der Nichtlinearität der Thermoelement-Umwandlungsfunktion kann keine vollständige Kompensation des Fehlers erreicht werden, aber der Fehler wird erheblich reduziert.

Je nach der in der Praxis geforderten Genauigkeit bei der Verwendung eines Thermoelements werden die folgenden Anschlussschemata am häufigsten verwendet (siehe Abb. 1.14). Zum Beispiel wird das Thermoelement Kupfer (M) - Konstantan (K) genommen:

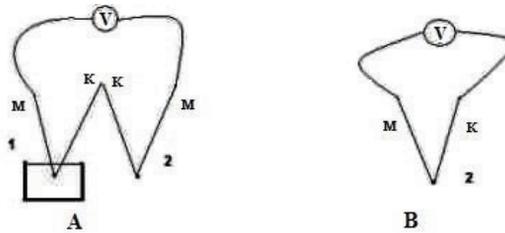


Abb. 1.14. Anschlussschemata für Thermoelemente.

A) Differentialschaltung. B) In diesem Schema kann die Temperatur des freien Endes als gleich der Raumtemperatur angesehen werden (Temperatur an den Anschlusspunkten des Messgeräts an das Thermoelement).

Bei der Differenzschaltung (Abb. 1.14.A) hat das freie Ende 1 eine konstante Temperatur (schmelzendes Eis,  $0^{\circ}\text{C}$ ). Aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen der Arbeitsstelle 2 und dem freien Ende 1 entsteht eine Thermo-EMK. Bei dem in Abb. 1.14.B dargestellten Anschlussschema kann die Temperatur des freien Endes als gleich der Raumtemperatur angesehen werden (Temperatur an den Anschlusspunkten des Messgeräts an das Thermoelement), und die Temperatur im Bereich der Arbeitsstelle 2 wird relativ dazu berechnet (korrigiert). In diesem Fall wird die thermische EMK im Thermoelement aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen der Arbeitsstelle und der Raumtemperatur gebildet.

Zur Messung der thermischen EMK werden Voltmeter mit einem hochohmigen Eingang oder andere Galvanometer verwendet. Zur Bestimmung der Temperatur werden Kalibriertabellen (siehe ANHANG) verwendet, die für die Bedingung erstellt wurden, dass das freie Ende des Thermoelementes bei null Grad Celsius liegt. Einige Kalibriertabellen, z. B. für Chrom-Alumel-Thermoelemente usw., sind in den Tabellen am Ende der Monographie aufgeführt.

### 1.11. Herstellung von Thermoelementen

Für Messungen und Forschungen unter Laborbedingungen (zu Hause) können Thermoelemente unabhängig hergestellt werden. Zu diesem Zweck werden industriell hergestellte Drähte aus für die Thermoelementherstellung geeigneten Materialien verwendet. Der Durchmesser des Drahtes ist wichtig für die Messung thermischer Prozesse in kleinen Volumina (Untersuchung kleiner Objekte). Je kleiner der Durchmesser des Thermodrahtes ist, desto geringer ist der Fehler bei der Bestimmung der Temperatur und der

Bestimmung der Parameter thermischer Prozesse, da der Einfluss des Thermoelements selbst auf den Wärmeaustausch reduziert wird. Das Material des Thermoelements wird je nach dem erwarteten Betriebstemperaturbereich, der erforderlichen Empfindlichkeit, dem Vorhandensein von Sekundärgeräten usw. ausgewählt. Die am häufigsten verwendeten Thermoelemente sind Chrom-Alumel, Kupfer-Konstantan usw.

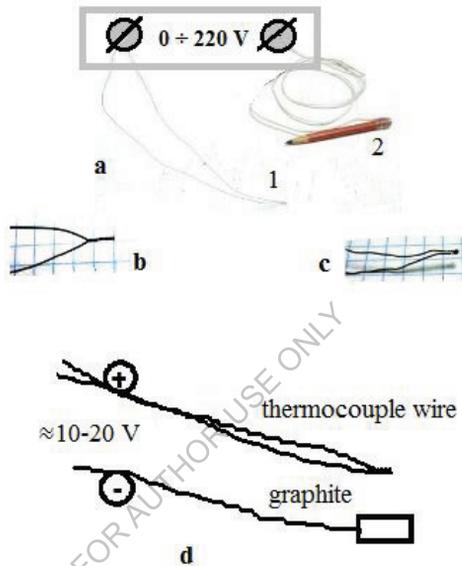


Abb. 1.15. Thermoelementschweißen: a - Verwendung eines Labortransformators, 1 - angeschlossene Thermodrähte, 2 - Graphit (Bleistift), b - vorangeschlossene Drähte, c - geschweißte Verbindung, d - allgemeines Verbindungsschema beim Schweißen.

Die Herstellung eines Thermoelements besteht darin, eine feste Verbindung (Schweißen, Abb. 1.15) zwischen zwei Materialien (Drähten) herzustellen. Zu diesem Zweck kann man eine Spannungsquelle mit ausreichender Leistung verwenden (z. B. LATR - Labor-Autotransformator (a), Autobatterie). Ein Thermoelement (beide freien Enden) wird an den einen Pol der Spannungsquelle angeschlossen - Abb. 1.15.a (1), d mit vormechanisch verbundenen Drähten - Abb. 1.15.b , und eine mit einem Stück Graphit verbundene Leitung (z. B. ein Bleistift - Abb. 1.15.a (2)) wird an den anderen Pol angeschlossen.

Wenn die angeschlossenen Enden des Thermoelements den Graphit berühren, wird ein Lichtbogen mit ausreichender Leistung erzeugt und die Thermodrähte werden verschweißt. Die zum Schweißen erforderliche Spannung wird experimentell gewählt, wobei mit kleinen Spannungen von 3-5 V begonnen wird.

Die optimale Spannung für das Schweißen hängt vom Thermoelementmaterial, dem Durchmesser und der Länge ab und liegt in der Regel nicht über 30-40 V. Bei der Arbeit müssen die Sicherheitsvorkehrungen beachtet werden: keine zu hohen Spannungen verwenden, keine blanken Teile des Stromkreises berühren. Der Einfachheit halber kann ein kleiner Abschnitt der Thermoelementdrähte mit Isolierband, Keramikrohr usw. umwickelt (isoliert) werden.

Eine ausreichend gute Verbindung kann auch durch Erhitzen der Thermodrähte mittels einer Bogenentladung, die zwischen ihnen und einer starken wässrigen Kochsalzlösung gezündet wird, erreicht werden.

### 1.12. Einteilung des Thermoelementes

Die Graduierung eines Thermoelements besteht darin, die Abhängigkeit der thermoelektromotorischen Kraft von der Temperaturdifferenz zwischen den Anschlussdrähten des Thermoelements zu ermitteln. Dies geschieht in der Regel, um in Zukunft keine Standardkalibrierungstabellen usw. mehr verwenden zu müssen. Die Skalierung kann z. B. wie folgt vorgenommen werden.

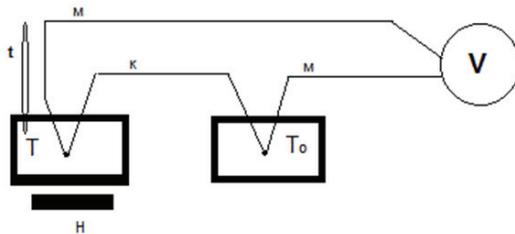


Abb. 1.16. Schema der Anschlüsse bei der Thermoelementkalibrierung

Ein einfacher Versuchsaufbau, aus dem das Wesen der Skalentechnik deutlich wird, ist in Abb. 1.16 dargestellt. Eine Verbindungsstelle (Arbeitsstelle) des Thermoelements (z.B. Kupfer (m) - Konstantan (k)) ist in ein Gefäß mit Öl (mit Temperatur  $T$ ) eingetaucht, die andere frei - in ein Gefäß mit Eis  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ . Da die Kalibrierungstabellen in der Literatur relativ

zu 0 °C angegeben sind, ist es am besten, sich an diese Bedingung zu halten, da es in Zukunft einfach sein wird, die erhaltenen experimentellen Ergebnisse mit den tabellarischen Ergebnissen zu vergleichen. Darüber hinaus ermöglicht das Schmelzen von Eis die einfache und genaue Festlegung einer der Temperaturen, auf die sich die Kalibrierung bezieht, und die anschließenden Messungen mit diesem Thermoelement. Ein Gefäß mit Öl wird durch einen elektrischen Heizer  $H$  erhitzt, und die Temperatur  $T$  wird mit einem Thermometer  $t$  mit der erforderlichen Genauigkeit gemessen. Die thermische EMK, die sich aus der Erwärmung der Verbindungsstelle des Thermoelements ergibt, wird mit einem Gleichstrompotentiometer  $V$  gemessen. Erstellen Sie eine Tabelle oder zeichnen Sie die Abhängigkeit der EMK von der Temperatur  $T$ .

Wenn eine hohe Genauigkeit der Teilung und Messung nicht erforderlich ist, ist es möglich, die Teilung relativ zur Raumtemperatur vorzunehmen. In diesem Fall kann die freie Verbindungsstelle in Öl mit Raumtemperatur ( $T_0$ , ca. 20 °C) eingelegt werden.

### 1.13. Legierungen für Thermolemente

Für die Herstellung von Thermolementen werden hauptsächlich Legierungen auf Metallbasis verwendet, obwohl es Materialien gibt, deren Thermospannung viel höher ist als die von Metallen. Halbleiter können zu solchen Materialien gezählt werden. Es ist jedoch sehr schwierig, Thermolemente aus Halbleitern herzustellen, und aufgrund ihrer technischen und konstruktiven Merkmale werden solche Thermolemente nicht häufig verwendet.

Die am häufigsten verwendeten Legierungen für Thermolemente sind:

- 1) Kopel (56% Cu und 44% Ni);
- 2) Alumel (95% Ni, der Rest - Al, Si und Mn);
- 3) Chromel (90% Ni und 10% Cu);
- 4) Platin-Rhodium (90% Pt und 10% Rh).

Abb. 1.17 zeigt die Abhängigkeiten der thermischen EMK von der Temperaturdifferenz zwischen der heißen und der kalten Verbindungsstelle für verschiedene Thermolemente.

Inkonsistenzen in der Legierungszusammensetzung können zu erheblichen Veränderungen der Werte der Thermospannung führen. In

solchen Fällen ist eine vorherige Kalibrierung erforderlich, um eine hohe Genauigkeit zu erreichen, anstatt Standardtabellen zu verwenden.

Je nach Zusammensetzung werden Thermoelemente zur Messung von Temperaturen in den folgenden Bereichen verwendet: Platin-Rhodium-Platin bis 1600°C; Kupfer-Konstantan und Kupfer-Kupfer bis 350°C; Eisen-Konstantan, Eisen-Kupfer und Chrom-Kupfer bis 600°C; Chrom-Alaun bis 900-1000°C.

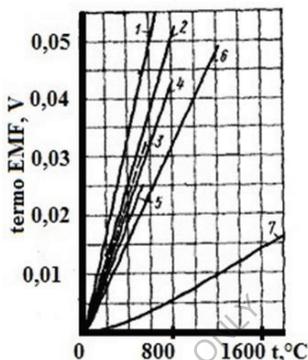


Abb. 1.17. Abhängigkeit der thermischen EMK von der Temperaturdifferenz zwischen heißer und kalter Verbindungsstelle für Thermoelemente: 1 - Chromel - Kopel, 2 - Eisen - Kopel, 3 - Kupfer - Kopel, 4 - Eisen - Konstantan, 5 - Kupfer - Konstantan, 6 - Chromel - Alumel, 7 - Platin-Rhodium - Platin.

Von den metallischen Thermoelementen hat das Thermoelement Chromel-Kopel bei gleicher Temperaturdifferenz die größte thermische EMK. Das Vorzeichen der thermischen EMK der in Abb. 1.17 gezeigten Thermoelemente ist wie folgt: In der kalten Verbindungsstelle fließt der Strom vom ersten Material des Paares zum zweiten (von Chromel zu Kopel, von Kupfer zu Konstantan usw.), und in der heißen Verbindungsstelle ist es umgekehrt.

Die meisten Thermoelemente arbeiten in einer oxidierenden Umgebung konstant. Im Laufe des Langzeitbetriebs ist eine allmähliche Veränderung der Thermospannung des Thermoelements zu beobachten. Die Gründe für diese Instabilität sind die Verunreinigung durch Verunreinigungen aus der umgebenden Atmosphäre, die Oxidation der Drähte, die Flüchtigkeit der Komponenten, scharfe Biegungen und mechanische Verformungen, die innere Spannungen einführen und

Inhomogenität der Struktur erzeugen. Die Platin-Rhodium-Thermoelemente haben die höchste Stabilität, Genauigkeit und Reproduzierbarkeit, trotz des niedrigen Wertes der thermischen EMK. Dies ist auf die chemische Inertheit des Materials und einen hohen Reinheitsgrad des gewonnenen Materials zurückzuführen.

#### **1.14. Beispiele für Temperaturmessung und -berechnung mit Thermoelementen**

##### **a) Berechnung aus dem Thermospannungswert eines Kupfer-Konstantan-Thermoelementes.**

Je nach erforderlicher Genauigkeit kann die Temperatur aus dem Thermoelement-Thermospannungswert unterschiedlich berechnet werden.

Bei Messungen, wenn es genug Genauigkeit in ein paar Bruchteile von Grad ist, können Sie die Kalibrierungstabellen verwenden und nach ihren Daten und Ablesungen des Voltmeters (Galvanometer), die Messung der Wert der thermischen EMF, um die Temperatur zu bestimmen. In diesem Fall, wenn das Thermoelement in das Schema der Abb. 1.14.A enthalten ist und das freie Ende ist bei  $0^{\circ}\text{C}$ , die Temperatur, die durch die oben genannte Methode durch den Wert der thermoEMF zwischen dem Arbeits- und freie Verbindung sollte mit der wahren Temperatur (innerhalb des Fehlers durch die Qualität des Thermoelements, die Methode der Verwendung der Tabellen bestimmt) im Bereich der Arbeitsstelle des Thermoelements übereinstimmen.

Wird ein einfacheres Schema des Thermoelementeinschlusses (Abb. 1.14.B) verwendet (das freie Ende des Thermoelements befindet sich bei Raumtemperatur, und die EMK im Thermoelement wird durch den Temperaturunterschied zwischen der Arbeitsstelle und der Raumtemperatur erzeugt), so ist bei der Verwendung der Tabellen eine Korrektur vorzunehmen.

Die Temperatur im Bereich der Arbeitsstelle kann beispielsweise durch den Wert der gemessenen thermischen EMK ( $E_i$ ) bestimmt werden, der mit der tabellierten thermischen EMK ( $E_{t_0}$ ) für eine bestimmte Raumtemperatur (die Temperatur, bei der sich das Messgerät befindet) summiert wird:  $E = E_i + E_{t_0}$ . Beträgt die Raumtemperatur z. B.  $20^{\circ}\text{C}$ , so ist der Wert von  $E_{t_0} = 0,790\text{ mV}$  für das Kupfer-Konstantan-Thermoelement für diese Temperatur - siehe Kalibriertabelle. Angenommen, der Messwert (gemessene EMK) des Kupfer-Konstantan-Thermoelementes  $E_i = 2,119$

mV. In diesem Fall ist die EMK, die zur Bestimmung der Vergleichsstellentemperatur aus den Tabellen zu verwenden ist, wie folgt:  $E = 0,790 + 2,119 = 2,909$  (mV). Mit Hilfe der Tabellen erhält man den Temperaturwert im Bereich der Arbeitsstelle  $t = 70$  °C. Abbildung 1.18 zeigt die Abhängigkeit des gemessenen EMK-Wertes ( $E_i$ ) und des Tabellenwertes ( $E_t$ ) von der Temperatur für diesen Fall.

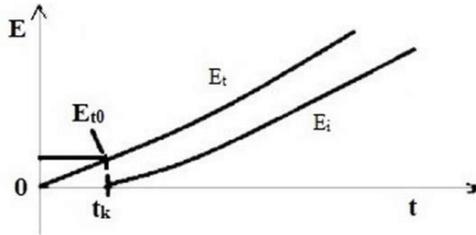


Abb. 1.18. Graphisches Schema der Temperaturabhängigkeit der thermischen EMK  $E$  eines Differentialthermoelementes  $E_t$  und eines Einpunkt-Thermoelementes  $E_i$ .

Gleichzeitig kann die thermische EMK von Thermoelementen manchmal erheblich von den Tabellenwerten abweichen, selbst wenn ein Differenzthermoelement verwendet und nach dem Schema eingeschaltet wird, bei dem eine Verbindungsstelle  $0$  °C beträgt. Dies kann auf das Vorhandensein von Verunreinigungen, Inhomogenitäten, mechanischen Verformungen, Abweichungen vom Verhältnis der Materialien in der Legierung im Thermodraht zurückzuführen sein. Wenn genauere Messungen erforderlich sind, wird daher eine spezielle Thermoelement-Teilung durchgeführt (siehe Teilung). Es ist zum Beispiel auch möglich, mehrere Punkte aus dem Arbeitstemperaturbereich auszuwählen, an denen die Temperatur stabilisiert und ausreichend genau und unabhängig bestimmt werden kann. Nachdem die Abhängigkeit der Differenz  $\Delta E$  zwischen den Werten der thermischen EMK (gemäß den Tabellendaten und den gemessenen Werten) und der Temperatur aufgetragen wurde, können Korrekturen vorgenommen werden, indem der Wert  $\Delta E$  zu den gemessenen thermischen EMK addiert oder subtrahiert wird. Auf diese Weise ist es möglich, eine Genauigkeit der Temperaturmessung von  $0,05$  °C zu erreichen. Wenn eine noch höhere Genauigkeit erforderlich ist, wird die Kalibrierung in spezialisierten Metrologielabors durchgeführt.

## b) Messung und Berechnung der Temperatur mit einem Thermoelement aus einer Chrom-Copel-Legierung.

Hier wird die Temperaturmessung mit einem selbst hergestellten Thermoelement beschrieben, aber die Informationen sind auch nützlich, um die Funktionsweise von im Handel erhältlichen Thermoelementen zu verstehen.

Wenn Sie eine Temperaturmessgenauigkeit von 0,5 K benötigen (kann auch höher sein; der Fehler hängt von den Möglichkeiten des Messgeräts  $V$  ab), müssen Sie ein Differenzthermoelement herstellen und verwenden (siehe Abb. 1.19.a).  $m_1$ ,  $m_2$  - Metall 1 bzw. 2 des Thermodrahts.

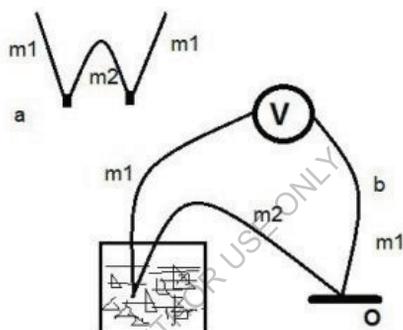


Abb. 1.19. Differentialthermoelement - a, und das Schema der Messung der Temperatur des Objekts  $O$  - b.

Hier ist anzumerken, dass für Temperaturmessungen im klimatischen Bereich (Raumtemperaturen) das Chrom-Kupfer-Thermoelement am besten geeignet ist, dessen Hauptvorteil die hohe Empfindlichkeit im Bereich der Raumtemperaturen ist. Für Messungen im Bereich tiefer Temperaturen können auch Thermoelemente aus Chrom-Aluminium, Kupfer-Konstantan usw. verwendet werden (siehe Kalibriertabellen). (siehe Kalibriertabellen). Für hohe Temperaturen werden Thermoelemente auf Platinbasis, Chromel-Alumel-Thermoelemente usw. verwendet.

Es sei daran erinnert, dass die Kalibrierungstabellen für Thermoelemente für den Fall erstellt werden, dass eine der Verbindungsstellen des Differentialthermoelementes  $0\text{ °C}$  beträgt. Um diese Bedingung in der Praxis zu verwenden, wird einer der Anschlüsse des

Thermoelementes in ein Gefäß (Thermoskanne) mit schmelzendem Eis getaucht, dessen Temperatur bekanntermaßen  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  beträgt.

Das Schema einer solchen Messung der Temperatur des Objekts **O** durch ein Differentialthermoelement ist in Abb. 1.19.b dargestellt.

Für das Beispiel gehen wir davon aus, dass die Messungen mit einem Chrom-Kupfer-Thermoelement durchgeführt werden. Die Temperatur des Objekts **O** wird durch die Ablesungen des Voltmeters (Galvanometer) **V** bestimmt. Zum Beispiel wissen wir, dass das Objekt bei einer Temperatur über  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ist, die Voltmeteranzeige  $U = 6,43\text{ mV}$ . Wir sehen uns die Tabelle an und stellen fest, dass ein solcher Wert der thermischen EMK einer Temperatur von  $+93\text{ }^{\circ}\text{C}$  entspricht. Es ist zu bedenken, dass das Vorzeichen der thermischen EMK von der Polarität des Thermoelementanschlusses an das Messgerät **V** abhängt und beim Übergang der Objekttemperatur durch  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  umgekehrt wird.

Wenn die technischen Bedingungen die Messgenauigkeit auf der Ebene von Gradeinheiten zulassen, kann ein Thermoelement mit einer Anschlussstelle verwendet werden (siehe Abb. 1.20).

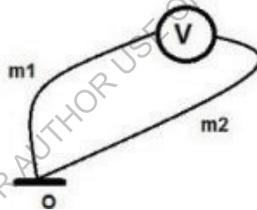


Abb. 1.20. Schema zur Messung der Temperatur des Objekts **O** mit einem Einpunkt-Thermoelement.

Wenn wir die physikalischen Vorgänge in einem solchen Messkreis analysieren, können wir sehen, dass in diesem Fall (wie oben erwähnt) die Rolle der Temperatur, in Bezug auf die die Thermo-EMK gebildet wird, spielt die Raumtemperatur (die Temperatur, bei der die Klemmen des Messgeräts - Voltmeter). Dementsprechend wird dies bei der Verwendung von Kalibrierungstabellen und der Bestimmung der Temperatur des Objekts berücksichtigt. Der Wert der thermischen EMK  $U$ , durch die, unter Verwendung der Tabellen, die Temperatur des Objekts bestimmt wird, wird gleich sein:

$$U = U_k + U_v \quad (1.8),$$

wobei  $U_k$  - Tabellenwert der EMK des Differentialthermoelementes (mit zwei Anschlussstellen) bei Raumtemperatur  $t_k$  (Gerätetemperatur - z. B.

$t_k = 24 \text{ }^\circ\text{C}$ , in diesem Fall  $U_k = 1,57 \text{ mV}$ ),  $U_v$  - gemessene thermische EMK (Voltmeteranzeige V).

Wir haben zum Beispiel die Temperatur im Raum  $24 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $U_k = 1,57 \text{ mV}$ ), wenn das Voltmeter Messwerte, zum Beispiel,  $3,05 \text{ mV}$ , dann jeweils  $U = 4,62 \text{ mV}$  und mit den Tabellen bestimmen, dass die Temperatur des Objekts **O** -  $68 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Zur Vereinfachung der Berechnung (wenn ein geringer Genauigkeitsverlust akzeptabel ist) kann bei der Bestimmung der Temperatur mit einem Thermoelement mit einer einzigen Verbindungsstelle die Abhängigkeit der EMK des Thermoelementes von der Temperatur durch eine lineare Abhängigkeit angenähert werden. In diesem Fall wird die Temperatur des zu messenden Objekts bestimmt:

$$t_o = t_k + U_v / j \quad (1.9),$$

wobei  $j = \Delta U / \Delta t$  die durchschnittliche Temperaturempfindlichkeit des Thermoelementes in einem bestimmten Temperaturbereich ist.

Für ein Chrom-Stift-Thermoelement im Temperaturbereich ( $0 - 200$ )  $^\circ\text{C}$  beträgt die durchschnittliche Empfindlichkeit  $j$  beispielsweise etwa  $0,074 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ .

### 1.15. Pyrometer

Pyrometer sind Geräte, die die elektromagnetische Strahlung von Körpern nutzen, um deren Temperatur zu bestimmen.

Die Oberflächen aller Körper, deren Temperatur über dem absoluten Nullpunkt liegt, strahlen elektromagnetische Wellen ab. Die Art dieser Strahlung und ihre Eigenschaften hängen von der Temperatur ab.

Der Wellenlängenbereich der Wärmestrahlung liegt zwischen  $0,1$  und  $1000 \text{ }\mu\text{m}$ . Neben der Strahlung absorbieren Körper auch Strahlung von anderen Körpern. Im Allgemeinen absorbiert ein Körper einen Teil der Energie, einen Teil reflektiert er, und einen Teil sendet er weiter. All dies wird durch entsprechende Koeffizienten charakterisiert. In der Physik der Wärmestrahlung gibt es den Begriff des absolut schwarzen Körpers. Ein absolut schwarzer Körper ist ein Körper, der die gesamte auf ihn fallende Strahlung absorbiert. Absorption und Strahlung von Körpern werden in Bezug auf einen solchen Körper betrachtet.

In der Praxis absorbiert und strahlt kein Körper wie ein absolut schwarzer Körper. Ein Modell für einen absolut schwarzen Körper kann die

Öffnung einer Kammer sein, deren Innenfläche ein gutes Absorptionsvermögen und die gleiche Temperatur hat.

Der Emissionsgrad eines absolut schwarzen Körpers und seine Abhängigkeit von der Temperatur ist in Abb. 1.21 dargestellt:

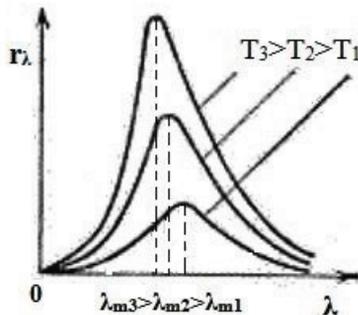


Abb.1. 21. Abhängigkeit des Emissionsgrades  $r_\lambda$  eines vollständig schwarzen Körpers von der Temperatur  $T$  und der Wellenlänge  $\lambda$ .

Die Wellenlänge der maximalen Strahlungsintensität wird durch das Wiensche Gesetz bestimmt:

$$\lambda_m = b/T \quad (10),$$

$b$  ist die Wiensche Konstante,  $T$  ist die absolute Temperatur.

Bei Kenntnis der Strahlungsgesetze ist es möglich, die Temperatur der bestrahlten Fläche anhand des gemessenen Strahlungsflusses, der auf eine bestimmte Fläche fällt, zu bestimmen.

Es gibt die folgenden Strahlungsempfänger:

A) Schwarze und graue Empfänger (thermisch). Zu diesen Empfängern gehören Temperatursensoren (Thermowiderstände, Thermoelemente), die auf geschwärzten Platten befestigt sind und die Strahlung empfangen. Ihre Empfindlichkeit ist unabhängig von der Wellenlänge.

B) Selektive Sensorelemente. Dies sind Fotzellen, Fotowiderstände, Fotodioden und Fototransistoren. Die absolute Empfindlichkeit selektiver Sensorelemente ist viel höher.

Die Strahlungsempfänger bewirken eine Änderung von Strom, Widerstand und Spannung in den entsprechenden elektrischen Signalverarbeitungsschaltungen.

Bei hohen Temperaturen der strahlenden Oberfläche (über 650 °C), wenn sich die Farbe zu verändern beginnt, kann auch das Auge des Betrachters als Strahlungsempfänger dienen.

*Es wird zwischen Pyrometern unterschieden:*

**Optische Pyrometer.** Optische Pyrometer sind nur in einem engen Wellenlängenbereich empfindlich. Dies wird durch die Verwendung eines speziellen Filters erreicht.

Die Strahlung des untersuchten Objekts wird entweder durch einen Strahlungsempfänger oder durch Vergleich mit einer Referenzstrahlungsquelle analysiert. Die am weitesten verbreiteten Pyrometer sind solche mit einem verschwindenden Glühfaden. Bei der Arbeit mit solchen Pyrometern vergleicht der Forscher in einem engen Wellenlängenbereich des sichtbaren Spektrums die Helligkeit der gemessenen Strahlung mit der Kontrollstrahlung (glühender Wolframdraht). Wenn beide Helligkeiten gleich groß sind, verschwindet der Glühfaden.

Die Heizleistung (Strom) des Glühfadens ist ein Hinweis auf die optische Temperatur des überwachten Objekts. Die Temperatur wird durch eine Skala bestimmt oder das Pyrometer kann bereits eine Skala haben. Die von einem Pyrometer gemessene (spektrale, optische) Helligkeitstemperatur ist gleich der wahren Temperatur, wenn der spektrale Emissionskoeffizient der Oberfläche des überwachten Objekts gleich 1 ist (absolut schwarzer Körper). In der Praxis ist die gemessene Temperatur immer kleiner als die tatsächliche Temperatur, und es ist notwendig, eine Korrektur in den gemessenen Wert einzuführen, die in Abhängigkeit von der gemessenen Temperatur und dem spektralen Emissionskoeffizienten  $k_i$  (bestimmt durch Tabellen) bestimmt wird (zum Beispiel für eine Wellenlänge  $\lambda = 0,65 \text{ nm}$  - Porzellan  $k_i = 0,78$  bei 1200 ° C, Eisen  $k_i = 0,35$  bei 800 ° C).

Pyrometer mit verschwindendem Faden sind sehr praktische und einfache Pyrometer. Der Nachteil ist die Begrenzung der unteren Temperaturgrenze sowie eine gewisse Subjektivität der Messergebnisse. Gleichzeitig ist die im Messergebnis vorgenommene Korrektur für nicht schwarz strahlende Objekte genauer als bei Strahlungs-pyrometern. Es wurden auch optische Pyrometer mit einem objektiven Strahlungsempfänger, einem photoelektrischen Element usw. entwickelt.

Messungen mit einem Pyrometer mit verschwindendem Faden werden aus einer Entfernung von 2 m bis unendlich durchgeführt. Die Entfernung

kann mit Hilfe einer speziellen Optik korrigiert werden. Die untere Temperaturgrenze liegt bei 650 °C bzw. 200 °C für den Objektivempfänger. Der obere Grenzwert beträgt in der Regel nicht mehr als 2500 °C. Pyrometer sind auf einen schwarzen Strahler oder eine Wolframglühlampe abgestuft.

**Strahlungspyrometer (Vollstrahlungspyrometer).** Das sind Pyrometer, die die Strahlung über den gesamten Spektralbereich erfassen. Sie gelten als solche, wenn mindestens 90% der Strahlung des Objekts im Pyrometer genutzt wird. Bei solchen Pyrometern können nur thermische Empfänger - Thermoelemente, Thermistoren - als Empfänger verwendet werden. Mit solchen Pyrometern kann die Temperatur im Bereich von -50 °C bis 2000 °C und darüber gemessen werden. Die Korrektur der Messwerte auf den Strahlungskoeffizienten erfolgt bei vielen Pyrometern automatisch, und das Pyrometer zeigt sofort die wahre Temperatur an, wenn Sie vorher einen bekannten Wert des Strahlungskoeffizienten einstellen.

#### **Literaturverzeichnis**

1. Orlova M.P., Pogorelova O.F., Ulybin S.A. *Nizkotemperaturnaya termometriya* [Tieftemperaturthermometrie]. M.: *Energoatomizdat*, 1987.-280 S.

2. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Verzeichnis "Messungen in der Industrie"] 1-3 Bände. M.: *Metallurgiya*, 1990.

3. N.Gorbachuk, M.Larionov, A.Firsov, N.Shatil Semiconductor Sensors for a Wide Temperature Range. *Sensors & Transducers Journal and Magazine*, Vol. 162, Issue 1, January 2014, pp.1-4.

4. N.S. Boltovets, V.K. Dugaev, V.V. Kholechuk et al., New Generation of Resistance Thermometers Based on Ge Films on GaAs Substrates, *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry 7*, 399-404 (2003).

5. Zarubin L.I., Nemish I.Yu. *Miniaturnyy termometr soprotivleniya na 1,3-200K*. [Miniatur-Widerstandsthermometer für 1,3-200K]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 1971, Nr. 4, S. 260.

6. Astrov D.I., Abilov G.S., Alshin B.I. *Izmerenie nizkikh temperatur v prisutstvii sil'nykh magnitnykh poley*. [Messung niedriger Temperaturen in Anwesenheit starker Magnetfelder]. *Izmeritel'naya tekhnika*, 1977, Nr. 4, S. 39.

7. V. F. Mitin. *Termometry soprotivleniya na osnove plenok germaniya*. [Widerstandsthermometer auf der Basis von Germaniumschichten]. *Fizika poluprovodnikov, kvantovaya elektronika i optoelektronika*. 1999. V. 2, N 1. P. 115-123.

8. Medvedeva L.A., Orlova M.P., Rabinkin A.G. *Termopara dlya izmereniya nizkikh temperature* [Thermoelement zur Messung niedriger Temperaturen]. *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 1970, Nr. 5, S. 208.

9. Gorbachuk N.T., Shybyryn V. S. "SEMICONDUCTOR TEMPERATURE SENSORS - THERMORESISTORS", *Modern engineering and innovative technologies, Germany, issue No16. April, 2021.*

10. N. T. Gorbachuk, *Sposob izmereniya temperatury*. [Methode der Temperaturmessung], Patent der Russischen Föderation. Nr. 2025736, Nr. 24, 1994.

11. Kiknadze G.I., Plesh A.G., Safronov A.N., Gorbachuk N.T. und andere. *Rezultaty eksperimental'nogo issledovaniya protsessa okhlazhdeniya model'noy seksii i eksperimental'nogo bloka sverkhprovodyashchey obmotki toroidal'nogo polya ustanovki T-15 na komplekse SIMS* [Ergebnisse einer experimentellen Untersuchung des Abkühlungsprozesses der Modellsektion und des experimentellen Blocks der supraleitenden Wicklung des toroidalen Feldes der T-15 Anlage auf dem SIMS Komplex]. *Vorabdruck IAE-4320/10, M., 1986, 24 S.*

12. Belyakov V.A., Gorbachuk N.T., Didenko P.I., Filatov O.G., Sychevskiy S.E., Firsov A.A. etc. *Poluprovodnikovyye izmeritel'ne preobrazovateli deformatsii, temperatury i magnitnogo polya dlya primeneniya v usloviyakh radiatsionnogo vozdeystviya, shirokom diapazone temperatur i magnitnykh poley* [Halbleiter-Messwandler der Verformung, der Temperatur und des magnetischen Feldes für den Einsatz unter den Bedingungen der Strahlenbelastung, eines breiten Bereichs von Temperaturen und magnetischen Feldern]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*", *Seriya: Elektrofizicheskaya apparatura*, v.3(29), 2005, p.46-54.

13. Mykola Gorbatschuk. *ELEKTROTECHNISCHE MATERIALIEN*. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, London, N2 9ED, Vereinigtes Königreich, 2024, 112 S. ISBN: 978-620-3-46212-8.

14. N. Stefan, S. A. Mullenko, N. T. Gorbachuk. "Laser Synthesis of Nanometric Chromium Oxide Films with High Seebeck Coefficient and High Thermoelectric Figure of Merit: An Experimental Study". *Current*

Overview on Science and Technology Research Vol. 4, Kapitel 1, S. 1-22.  
Print ISBN: 978-93-5547-861-0, eBook ISBN: 978-93-5547-862-7, DOI:  
10.9734/bpi/costr/v4/6196F

15. S.A.Mulenko, N.T.Gobachuk. Synthesis of nanometric iron oxide films by RPLD and LCVD for thermo-photo sensors. Applied Physics B: Lasers and Optics, v.105, #3, S.517-523, 2011.

16. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Izmeritel'nye preobrazovateli na osnove GaAs, polikremniya i dispersnogo germaniya i perspektivy ikh ispol'zovaniya* [Messwandler auf der Basis von GaAs, Polysilizium und dispergiertem Germanium und Perspektiven für ihre Verwendung]. *Perspektivnye materialy*, 2004, N 5, S.93-97.

17. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Vliyanie neytronnogo oblucheniya na kharakteristiki poluprovodnikovyykh izmeritel'nykh preobrazovateley temperatury, deformatsii, magnitnogo polya* [Der Einfluss von Neutronenbestrahlung auf die Eigenschaften von Halbleiter-Messwandlern von Temperatur, Dehnung und Magnetfeld]. *Poverkhnost'*, 2005, 4, S.57-58.

18. N.T.Gorbachuk, S.A. Mulenko, Yu.N.Petrov. Photonensynthese von Eisenoxid-Dünnschichten für thermo-photo-chemische Sensoren. *Angewandte Oberflächenwissenschaft*. Band 258, Ausgabe 23, 15. September 2012, Seiten 9186-9191.

19. Sergii Mulenko, Nicolaie Stefan, Floralice Miroiu, Nikolay Gorbachuk.

Laser-Synthese von Übergangsmetalloxiden in 2D-Struktur und Heterostruktur für Thermosensoren mit hohem Seebeck-Koeffizienten. *Frontiers in Sensors (FS) Volume 4*, 2016, S.16-26.

20. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Halbleiter].- *L. Nauka* 1967. 439p.

21. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki: Navchal'niy posibnik* [Allgemeiner Kurs der Physik: Studienführer], T. 1-3. - K.: Tekhnika, 2001.

## Kapitel 2. Mechanische Größen. Messwandler, Sensoren, Messung

### 2.1. Wägezellen

Da der Widerstand eines Leiters durch die folgende Beziehung definiert ist

$$R = \rho l/S \quad (2.1),$$

wobei  $\rho$  der spezifische Widerstand des Materials ist;  $l$  ist die Länge  $S$  ist die Querschnittsfläche, dann kann sich der Widerstand bei jeder Schwankung des gemessenen Wertes ändern, was eines oder mehrere der in diesem Ausdruck enthaltenen Argumente beeinflusst.

Diese Beziehung wird in Dehnungsmessstreifen verwendet, bei denen es sich um Messwandler handelt, die eine Änderung der aufgebrachten Kraft in eine Änderung des Widerstands umwandeln. In der Regel wird ein solcher Messwertaufnehmer in Verbindung mit einer Wheatstone-Brücke verwendet, bei der ein, zwei oder sogar alle vier Arme Wägezellen sind und sich die Ausgangsspannung als Reaktion auf Schwankungen der gemessenen Kraft ändert.

Dehnungsmessstreifen verwenden z. B. metallische Wandlerelemente, die bei mechanischer Belastung ihre Länge und Querschnittsfläche verändern. Dies wiederum führt zu einer Änderung des Widerstands. Einige Dehnungsmessstreifen-Materialien, wie z. B. Halbleitermaterialien, weisen einen piezoelektrischen Effekt auf, bei dem eine auf das Material ausgeübte Last eine große Änderung des spezifischen Widerstands bewirkt. Dehnungsmessstreifen dieser Art haben eine um zwei Größenordnungen höhere Empfindlichkeit als die zuvor beschriebenen metallischen Dehnungsmessstreifen.

Im Allgemeinen kann jeder Parameter, der eine Bewegung oder Kraft erfasst, zur Erstellung von Dehnungsmessstreifen-Aufnehmern verwendet werden.

**Dehnungsmessstreifen aus Draht** (Abb. 2.1) werden in Form von Leitern hergestellt, die fest mit einer Papier- oder Folienunterlage 2 verbunden sind. Der Leiter 3 ist ein dünner Zickzackdraht mit einem Durchmesser von 0,02-0,05 mm, an dessen Enden die Leitungen (Kupferleiter 4) durch Löten oder Schweißen angeschlossen sind. Die Leiter sind mit Papier, Folie oder Lack 1 überzogen. Nach dem Aufkleben des Dehnungsmessstreifen-Substrats auf die zu untersuchende verformbare

Oberfläche wird die Verformung dieser Oberfläche auf die Leiter übertragen und führt zu einer Änderung ihres Widerstands.

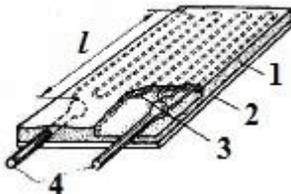


Abb. 2.1. Aufbau eines Dehnungsmessstreifen-Widerstands aus Draht.

Der Widerstand  $R$  des Widerstandes in Form eines Drahtes der Länge  $l$  wird durch den obigen Ausdruck (2.1) bestimmt.

Die Dehnungswirkung ist durch das Ausgangssignal gekennzeichnet, das mit der relativen Änderung des Widerstandes  $\Delta R/R$  verbunden ist. Das Verhältnis zwischen der relativen Änderung des Ausgangssignals und der relativen Verformung  $\epsilon$ , die es bei festen Werten von Strom, Temperatur usw. verursacht hat, wird als Dehnungsempfindlichkeitskoeffizient des Dehnungsmessstreifens bezeichnet.

$$k = \Delta R/R\epsilon \quad (2.2).$$

Das Verhältnis  $\Delta R/R$  wird bestimmt (mathematisch erhält man es durch Differenzieren von (2.1)) durch  $\Delta R/R = \Delta\rho/\rho + \Delta l/l - \Delta S/S$ , wobei  $\Delta R$ ,  $\Delta\rho$ ,  $\Delta l$ ,  $\Delta S$  - Änderungen des Widerstands, des spezifischen Widerstands, der Länge bzw. der Querschnittsfläche des Leiters.

Im Bereich der elastischen Verformungen können wir mit Hilfe der Theorie für feste Körper einen Ausdruck für den Dehnungsempfindlichkeitskoeffizienten in der Form erhalten:

$$k = 1 + 2\mu + \nu \quad (2.3).$$

Bei Leitern unterscheiden sich die Komponenten  $\mu$  (Poissonzahl) und  $\nu$  (Elastowiderstandskoeffizient) in ihrer Größe nicht wesentlich. Bei Halbleitern kann der Wert von  $\nu$  um zwei Größenordnungen größer sein als  $\mu$  und hängt von der Temperatur, der Dehnung und der kristallographischen Richtung ab. Daher haben Halbleiter-Dehnungsmessstreifen eine viel höhere Dehnungsempfindlichkeit, sind aber auch anfälliger für äußere Einflüsse.

Die Qualität von Dehnungsmessstreifen wird durch ihre Dehnungsempfindlichkeitskoeffizienten  $k$  und den Wert des Temperaturkoeffizienten des Widerstands (TCR) -  $\Delta R/R\Delta T$  - bestimmt. Je höher der Dehnungsempfindlichkeitskoeffizient  $k$  und je niedriger der

Temperaturkoeffizient des Widerstands (TCR) des Materials, aus dem der Dehnungsmessstreifen hergestellt ist, desto höher ist seine Qualität.

Bei Dehnungsmessstreifen aus Konstantan- und Mangan-Legierungen beispielsweise ist  $k \approx 2$ ,  $TCR = 30 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  bzw.  $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Bei Halbleiter-Dehnungsmessstreifen erreicht  $k$  den Wert 100 und mehr (z. B. Silizium).

Bei Folien-Dehnungsmessstreifen besteht das empfindliche Element aus einer Folie mit einer Dicke von 3-6 Mikrometern. Die Hauptvorteile von Dehnungsmessstreifen aus Folie sind die Möglichkeit, Dehnungsmessstreifen in beliebiger Form herzustellen, und die effektive Wärmeableitung während der Messung, wodurch ein höheres Ausgangssignal erzielt werden kann. Dehnungsmessstreifen aus Folie sind unempfindlich gegenüber Querverformungen und können in Größen ab 0,3 mm hergestellt werden.

Zu den wichtigsten messtechnischen Eigenschaften von Dehnungsmessstreifen gehören Dehnungsempfindlichkeit, Kriechen, mechanische Hysterese und Temperaturinstabilität.

Die Dehnungsempfindlichkeit wird hauptsächlich durch die dehnungsresistiven Eigenschaften des Materials des Sensorelements bestimmt. Die Dehnungsempfindlichkeit ist der Hauptparameter, durch den der Wert der gemessenen Dehnung bestimmt wird:

$$\varepsilon = \Delta R / R_k \quad (2.4).$$

Kriechen äußert sich als Änderung des Ausgangssignals bei einem gegebenen und unveränderten Wert von  $\varepsilon$ . Kriechen wird hauptsächlich durch elastische Unvollkommenheiten im Substrat und im Klebstoff verursacht.

Die mechanische Hysterese wird wie das Kriechen durch die elastische Unvollkommenheit des Substrats und des Klebstoffs verursacht und numerisch durch die Differenz der Ausgangswiderstandswerte für denselben Dehnungswert bestimmt, vorausgesetzt, dass der gegebene Dehnungswert mit seinem gleichmäßigen Anstieg und seiner gleichmäßigen Abnahme erreicht wird.

Die Temperaturinstabilität besteht in der Änderung des Widerstands des Dehnungsmessstreifens aufgrund seines TCR und auch aufgrund des Auftretens zusätzlicher mechanischer Spannungen aufgrund der unterschiedlichen Temperaturkoeffizienten der linearen Ausdehnung des Materials des Dehnungsmessstreifens und des untersuchten Teils.

Ein wichtiger Parameter von Dehnungsmessstreifen ist die zulässige Leistung, die in den Dehnungsmessstreifen abgeleitet werden kann, vorausgesetzt, dass seine Überhitzung den zulässigen Wert nicht überschreitet. Die zulässige Leistung eines Dehnungsmessstreifens ist abhängig von seinen geometrischen Abmessungen.

## 2.2. Dehnungsmessstreifen aus Folie

Bei Folien-Dehnungsmessstreifen besteht das empfindliche Element aus einer Folie mit einer Dicke von 3...6 Mikrometern.

Die Dicke von Dehnungsmessstreifen aus Folie ist geringer als die von Dehnungsmessstreifen aus Draht und beträgt 30...50 Mikrometer. Die Hauptvorteile von Dehnungsmessstreifen aus Folie sind die Möglichkeit, Dehnungsmessstreifen in beliebiger Form zu formen, und die wirksame Wärmeableitung während der Messungen, wodurch bei gleichen Verformungen ein höheres Ausgangssignal erzielt werden kann. Dehnungsmessstreifen aus Folie sind unempfindlich gegenüber Querverformungen und ermöglichen Konstruktionen mit kleiner Grundfläche ab 0,3 mm aufwärts.

Dehnungsmessstreifen aus Folie werden in der Regel aus Konstantanfolie hergestellt. Die elektromechanischen Eigenschaften von Folien sind innerhalb einer Charge weniger konstant als die von Dehnungsmessstreifen aus Konstantan. Die Wärmebehandlung ist weniger effektiv, so dass der Betriebsbereich von Dehnungsmessstreifen aus Folie  $\pm(3-5)10^{-3}$  relative Dehnungen ( $\pm 3000...5000$  URD, wobei  $1\text{URD} = 1\text{m}\cdot\text{m}^{-1} = 10^{-6}$  - eine Einheit der relativen Verformung)) nicht übersteigt, und der Temperaturbereich beträgt 75...575 K. Die Technologie der Herstellung von Dehnungsmessstreifen aus Folie basiert in der Regel auf der Anwendung photochemischer Prozesse. Diese Technologie ist für die Massenproduktion am besten geeignet. Abhängig von der Form der Tensorgitter werden Foliendehnungsmessstreifen in die folgenden typischen Modifikationen unterteilt (Abb. 2.2):

- rechteckiges Einzelelement für lineare Messungen;
- zwei- oder dreiteilige Rechteck- oder Rosetten-Dehnungsmessstreifen für Messungen in Bereichen mit flachem Spannungszustand;
- spezielle, die als Dehnungsmessstreifen in Membransensorelementen verwendet werden;

- usw.

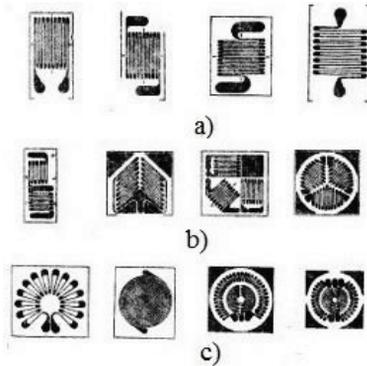


Abbildung 2.2. Formen einiger Tensorgitter von Folien-Dehnungsmessstreifen.

a - rechteckiges Einzelement; b - rechteckiges Mehrelement und Rosette; c - Membran.

### 2.3. Messung mechanischer Spannungen durch eine schwingende Saite. Tenzometer

Bei dieser Methode zur Messung mechanischer Spannungen (Dehnungen, Streckungen) wird als Messfühler eine Stahlsaite verwendet, die zwischen zwei Klemmen gespannt ist, die in der Struktur, deren Verformungen untersucht werden, befestigt sind. Eine Änderung der mechanischen Spannung der Saite führt zu einer Änderung  $\nu$  der Frequenz ihrer Schwingung, und die Messung von  $\Delta\nu$  ermöglicht es, die Verformungen zu bestimmen. Einer der Vorteile der betrachteten Methode ist die lange Lebensdauer des Sensors (Aufnehmer, Dehnungsmessstreifen), die Zuverlässigkeit und die geringe Anfälligkeit gegenüber äußeren Einflüssen (Feuchtigkeit, Strahlung usw.). Diese Vorteile ergeben sich aus der Festigkeit der Saite und der Konstruktion des Dehnungsmessstreifens. Bei dieser Methode ist der Informationsträger die Frequenz des Ausgangssignals, was zusätzliche Vorteile in Bezug auf die Unempfindlichkeit gegenüber Störungen in Form von Rauschen, Interferenzen, Einflüssen von Übertragungsleitungen schafft. Außerdem kann ein solches Signal leicht in eine digitale Form umgewandelt werden.

Die Grundfrequenz  $\nu$  der mechanischen Schwingungen einer Dehnungsmessstreifen-Saite, die zwischen zwei Punkten im Abstand  $l$

gespannt ist und auf die eine Kraft  $F$  wirkt, wird durch folgende Formel ausgedrückt

$$v = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{S\rho}} \quad (2.5),$$

wobei  $S$  die Querschnittsfläche der Saite und  $\rho$  ihre Dichte ist.

Unter dem Einfluss der mechanischen Spannung  $F/S$  erfährt die Saite des Tensometers eine Dehnung  $\Delta l$ . Analysiert man den Spannungs-Dehnungs-Zustand der Saite, erhält man einen Ausdruck für die relative Dehnung (relative Dehnung) durch die Änderung der Frequenz:

$$\Delta l/l = (4l^2 \rho/E)(v_1^2 - v_0^2) \quad (2.6),$$

wobei  $E$  der Elastizitätsmodul ist. Wenn man  $v_0$  (Anfangsfrequenz) kennt und  $v_1$  (Frequenz nach der Verformung der Struktur) misst, kann man so die Verformung der Struktur bestimmen.

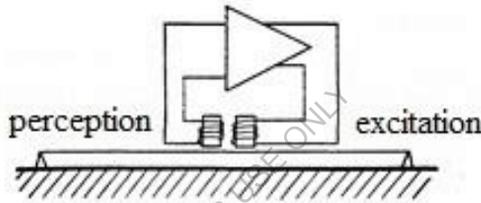


Abb. 2.3 Dehnungsmessstreifen mit einer schwingenden Saite

Abb. 2.3 zeigt einen Dehnungsmessstreifen (Schema) mit einer schwingenden Saite. Die Stahlsaite schwingt mit der Frequenz  $v$  vor der Signalspule und verursacht periodische Schwingungen des magnetischen Widerstands ihres magnetischen Kreises, der ein elektrisches Signal der gleichen Frequenz  $v$  erzeugt. Dieses Signal wird verstärkt und an die Erregerspule weitergeleitet, die die Schwingung aufrechterhält. Die Frequenz  $v$  kann mit einem Frequenzmessgerät gemessen werden. Die Merkmale dieser Art von Dehnungsmessstreifen sind in der Literatur zu finden. Ein von "Telemac" hergestellter Dehnungsmessstreifen hat beispielsweise folgende Eigenschaften: Höchsthäufigkeit  $\sim 1200$  Hz, Mindestfrequenz  $\sim 400$  Hz, Messbereich  $4000\mu\text{m/m}$ , Auflösung  $1\mu\text{m/m}$ , Genauigkeit 1 bis 2% des Messbereichs.

Der beschriebene Typ von Dehnungsmessern (Dehnungsmessstreifen) wird zur Kontrolle von mechanischen Verformungen und Spannungen im Bauwesen (Dämme, Brücken, Tunnel usw.), bei der Gewichtsmessung usw. verwendet.

## **2.4. Klebstoffe, Bindemittel für die Montage von Dehnungsmessstreifen**

Klebstoffe und Bindemittel, die für die Befestigung von Dehnungsmessstreifen auf der zu untersuchenden Oberfläche verwendet werden, sollten die folgenden grundlegenden Anforderungen erfüllen:

A) Sicherstellen, dass die Verformung der zu untersuchenden Oberfläche auf den Dehnungsmessstreifen übertragen wird und die Messwerte im Betriebsbereich der Temperaturen und Dehnungen möglichst wenig kriechen. Das Kriechen ist auf die Plastizität des Klebstoffs zurückzuführen.

B) Sicherstellung der elektrischen Isolierung des Dehnungsmessstreifens von der zu prüfenden Oberfläche

Die Lieferanten von Dehnungsmessstreifen liefern in der Regel in ihren Unterlagen eine Liste von Klebstoffen mit optimalen Eigenschaften für diese Art von Dehnungsmessstreifen und eine Beschreibung der Technologie ihrer Anwendung.

Die bei Dehnungsmessstreifen am häufigsten verwendeten Klebstoffe werden im Folgenden kurz beschrieben.

Für Folien-Dehnungsmessstreifen:

Cyacrine EO-Klebstoff. Dies sind kalthärtende, schnell abbindende Klebstoffe. Sie werden zum Verkleben von nicht porösen Materialien und Metallen verwendet. Sie härten innerhalb von 48 Stunden ohne Druckkräfte aus. Betriebstemperaturbereich -80 - +80 °C.

Klebstoff UVS-10T. Heißhärtend, einkomponentig. Verbindet nicht-metallische, nicht-poröse Materialien und Metalle. Betriebstemperaturbereich -70 - +200 °C. Polymerisation (Aushärtung) des Klebstoffs wird wie folgt durchgeführt: geklebt Dehnungsmessstreifen sollte für 0,5 Stunden unter normalen Bedingungen gehalten werden. Dann 5 Stunden bei der Temperatur 180 °C mit dem Pressdruck 0,1 - 0,3 MPa (1 - 3 atm) unter den Bedingungen des Thermoklosetts halten. Dann 5 Stunden lang bei 215 °C unter offenen Aushärtungsbedingungen aushärten.

BFR-2K-Klebstoff. Bezieht sich auf einkomponentige Heißkleber, Phenol-Formaldehyd. Polymerisationsbedingungen, Technologie der Verwendung sind ähnlich wie UVS-10T Leim.

## 2.5. Beglaubigung, Kalibrierung, Eichung von Dehnungsmessstreifen

Für den Nachweis, die Kalibrierung (Bestimmung der Kalibrierungsmerkmale) von Dehnungsmessstreifen werden elastische Referenzelemente (Balken) verwendet. Der Balken hat in der Regel Abmessungen (Form), die einen gleichen Biege­widerstand bieten (Abb. 2.4.a) oder einen konstanten Querschnitt (Abb. 2.4.b). Der Balken hat einen Abschnitt (Arbeitsbereich, in der Abbildung schraffiert), in dem die Verformung praktisch konstant ist.

Der Wert der Verformung der Balkenoberfläche bei gleichem Widerstand wird durch die Formel bestimmt:

$$\varepsilon = \frac{6PL}{EB(h+\Delta h)^2} \quad (2.7)$$

wobei:  $P$  ist der Wert der Belastungskraft (Last),  $H, L$  ist der Abstand von der Befestigungslinie des Trägers zum Punkt der Krafteinleitung,  $E$  ist der Elastizitätsmodul des Trägermaterials,  $B$  ist die Trägerbreite am Befestigungspunkt,  $h$  ist die Trägerdicke,  $\Delta h$  ist der Abstand von der Trägeroberfläche zur Mitte der Dehnungsmessstreifen-Dicke.

Die Größe der Verformung der Balkenoberfläche mit konstantem Querschnitt wird durch die Durchbiegung  $f$  nach folgender Formel berechnet:

$$\varepsilon = \frac{4(h+2\Delta h)f}{l^2+4f^2\pm 4fh} \quad (2.8),$$

wobei:  $h$  - Dicke des Trägers,  $\Delta h$  - Abstand von der Trägeroberfläche bis zur Mitte der Dehnungsmessstreifen-Dicke,  $l$  - Basis der Vorrichtung, mit deren Hilfe die Durchbiegung bestimmt wird,  $f$  - Durchbiegungsausleger an der Basis  $l$ .

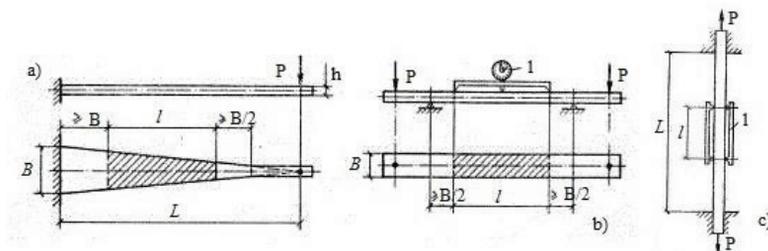


Abb. 2.4. Elastische Bezugs­elemente: a - mit gleichem Biege­widerstand, b - mit konstantem Querschnitt, c - unter Spannung arbeitender Balken. 1- Vorrichtung zur Messung der tatsächlichen Verformung.

Unter Spannung arbeitende Balken (Abb. 2.4.c) können ebenfalls zur Kalibrierung verwendet werden. In diesem Fall wird die direkte Messung des Dehnungswertes im Arbeitsbereich verwendet. Der Nachteil dieser Methode ist die Schwierigkeit, eine stabile axiale Belastung zu erzeugen.

## **2.6. Messung der mechanischen Verformungen (Spannungen) mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen**

Wie bereits erwähnt, ist ein Dehnungsmessstreifen ein Gerät, dessen elektrischer Widerstand sich ändert, wenn er verformt wird. Diese Widerstandsänderung ist über den Dehnungsempfindlichkeitskoeffizienten (siehe 2.2) mit der Größe der mechanischen Dehnung  $\varepsilon$  verknüpft.

Derzeit werden zur Messung mechanischer Verformungen am häufigsten Dehnungsmessstreifen aus Folien (Folienmaterial ist Metall) und zur Lösung bestimmter Probleme Halbleiter-Dehnungsmessstreifen verwendet. Die Vor- und Nachteile beider Arten von Dehnungsmessstreifen sind in der Literatur gut beschrieben. Der Hauptvorteil von Halbleiter-Dehnungsmessstreifen ist ihre höhere (bis zu 100-fache) Dehnungsempfindlichkeit, aber gleichzeitig sind sie zerbrechlicher, starrer und haben eine höhere Temperaturabhängigkeit der Parameter. Die hohe Dehnungsempfindlichkeit von Halbleiter-Dehnungsmessstreifen erklärt sich durch Veränderungen in der Zonenstruktur des Halbleitermaterials unter dem Einfluss mechanischer Spannungen und dementsprechend durch eine starke Abhängigkeit der Leitfähigkeit (Widerstand) von der Verformung. Bei metallischen Dehnungsmessstreifen hingegen wird die Dehnungsempfindlichkeit durch Änderungen der Größe des empfindlichen Elements (Folie) verursacht.

Folien-Dehnungsmessstreifen werden nach ihrem Verwendungszweck - zur Messung einachsiger Dehnungen, verteilter Dehnungen, für verschiedene Temperaturbereiche -, nach der Größe und Form des Gitters (Form der elektrisch leitfähigen Folie), nach den Werten des elektrischen Widerstands sowie nach einigen anderen Parametern unterschieden.

Einer der einfachsten Folien-Dehnungsmessstreifen ist in Abb. 2.5 dargestellt. Der Dehnungsmessstreifen ist so konstruiert, dass er praktisch nur dann reagiert (seinen Widerstand ändert), wenn die Dehnung entlang der Achse des Dehnungsmessstreifen-Gitters gerichtet (aufgebracht) wird oder

eine Komponente der komplex verteilten Dehnung in dieser Richtung vorhanden ist (dies wird als "Längsdehnungsempfindlichkeit" bezeichnet).

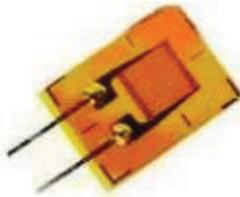


Abb. 2.5. Typischer Folien-Dehnungsmessstreifen

Darüber hinaus ist die Widerstandsänderung proportional zur Größe der Längsdehnung (oder der Komponente der komplexen Dehnung) und hängt mit ihrer Größe durch den Koeffizienten  $k$  zusammen. Es sollte beachtet werden, dass es auch eine Querdehnungsempfindlichkeit gibt, d.h. eine Empfindlichkeit gegenüber Dehnungen, die senkrecht zur Basis (Längsachse) des Dehnungsmessstreifens gerichtet sind, aber sie ist unbedeutend, in der Regel ist sie für Dehnungsmessstreifen aus Folie nahe Null und für Dehnungsmessstreifen aus Draht nicht mehr als 1% der Längsdehnung.

Der Hauptgrund für die Änderung des Widerstands des Dehnungsmessstreifens der Folie unter dem Einfluss der Verformung ist die Änderung der Größe des elektrisch leitfähigen Gitters. Wie bekannt, wird der elektrische Widerstand von Materialien durch die Abhängigkeit (2.1) bestimmt. Unter Zugbelastung nimmt der Widerstand zu, unter Druckbelastung nimmt er ab. Bei der Verwendung von Dehnungsmessstreifen wird dies berücksichtigt, um das Vorzeichen der Verformung des Objekts zu bestimmen.

Bei Folien-Dehnungsmessstreifen hängt der Dehnungsempfindlichkeitskoeffizient vom Folienmaterial ab. Sein Wert liegt im Bereich von  $k = 2-4$  und ist in den Pässen und Beschreibungen angegeben, die den Dehnungsmessstreifen beigelegt sind. Der Wert des elektrischen Widerstands liegt in der Regel bei 50 Ohm.

Um die Größe der Verformung des untersuchten Objekts zu messen, wird der Dehnungsmessstreifen an der Stelle des Objekts angebracht (geklebt), an der die Verformung gemessen werden soll. Um die Verformung des Objekts so genau wie möglich zu messen, muss sichergestellt werden, dass die Verformung nahezu verlustfrei vom Objekt auf die DMS-Anordnung übertragen wird. Dies wird durch die Wahl des geeigneten

Bindemittels (Klebstoff) und der Montagetechnik erreicht. Die wichtigste Anforderung an das Bindemittel ist die Abwesenheit von plastischer Verformung im Arbeitsbereich des Dehnungsmessstreifens. Das optimale Bindemittel und die Technologie der Verarbeitung sind in den technischen Beschreibungen zu den Dehnungsmessstreifen angegeben. Sehr oft werden als Bindemittel Klebstoffe des Typs BF-2 verwendet.

Der im Datenblatt angegebene und nach der Montage des Dehnungsmessstreifens am Objekt gemessene Widerstand kann leicht abweichen - bei der Polymerisation des Bindemittels können Verformungen des Dehnungsmessstreifen-Gitters auftreten. Dies ist bei genauen Messungen zu berücksichtigen.

Außerdem wird nach der Montage des Dehnungsmessstreifens auf dem Objekt während der mechanischen Prüfung des Objekts der elektrische Widerstand des Dehnungsmessstreifens gemessen. Wenn zum Beispiel der Empfindlichkeitskoeffizient des Dehnungsmessstreifens  $k = 2$ , der Anfangswiderstand (im Pass angegeben oder nach der Montage des Dehnungsmessstreifens auf dem Objekt gemessen)  $R_o = 200,1$  Ohm und während der mechanischen Belastung des Objekts  $R_\varepsilon = 200,9$  Ohm ist, dann ist der Betrag der mechanischen Verformung (in diesem Fall die Dehnung) am Montagepunkt des Dehnungsmessstreifens und in Richtung seiner Basis gleich:

$$\varepsilon = \Delta R / kR_o = (R_\varepsilon - R_o) / kR_o = 0,002 = 2 \cdot 10^3 \text{ mln}^{-1} = 2 \cdot 10^3 \text{ URD.}$$

D.h. der Wert der relativen Dehnung ist gleich 0,002. Relative Dehnungswerte werden manchmal in URD - Einheit der relativen Dehnung - ausgedrückt, was  $1/1000000$  (ein Millionstel Teil -  $\text{mln}^{-1}$ ) der Dehnungseinheit entspricht.

In der Praxis werden für die Messung von Verformungen spezielle Geräte verwendet, um die Messungen zu automatisieren, die Messtechniken sind komplexer, um eine maximale Genauigkeit zu erreichen, die Berechnung der Fehler erfolgt nach bestimmten Methoden usw.

Wenn es notwendig ist, die mechanischen Spannungen des Objekts an der Stelle der Dehnungsmessung zu bestimmen, wird die bekannte Beziehung zwischen mechanischer Dehnung  $\varepsilon$  und mechanischen Spannungen  $\sigma$  verwendet:

$$\sigma = \varepsilon E \quad (2.9),$$

wobei  $E$  der Elastizitätsmodul (Elastizität) des Objektmaterials ist.

Die Technik und der Ablauf der Messung mechanischer Dehnungen mit einem Halbleiter-Dehnungsmessstreifen sind im Wesentlichen die gleichen wie oben für einen Folien-Dehnungsmessstreifen beschrieben.

## **2.7. Hydroprotektive Dehnungsmessstreifen-Materialien**

Die Imprägnierung von Dehnungsmessstreifen nach der Installation am Messobjekt wird in der Regel immer dann durchgeführt, wenn die Umgebungsfeuchtigkeit auf über 50% ansteigen kann.

Am weitesten verbreitet ist die Methode der relativen Abdichtung, die darin besteht, hydrophobe Zusammensetzungen und Dichtungsmittel auf die Stellen aufzutragen, an denen die Dehnungsmessstreifen installiert werden. In der Regel haben solche Zusammensetzungen eine gute Haftung an der Basis von Dehnungsmessstreifen und der zu untersuchenden Oberfläche, so dass sie, ebenso wie Klebstoffe, nach dem Aushärten eine Einheit mit dem Dehnungsmessstreifen bilden.

Hydrophobe Zusammensetzungen und Dichtungsmassen dürfen sich nicht durch Schrumpfung oder veränderte Umgebungsbedingungen verformen und dürfen die Messstellen nicht sichtbar verstärken und müssen die Fähigkeit zur elastoplastischen Verformung behalten. Sie dürfen auch die Werkstoffe der Dehnungsmessstreifen und Patchdrähte nicht chemisch angreifen.

Die für die Dehnungsmessung verwendeten wasserdichten Beschichtungen werden unterteilt in:

- Filmbeschichtungen, die in mehreren Schichten mit einer Gesamtdicke von 50... 100 Mikrometern aufgetragen werden;
- weiche Dichtstoffe mit einem Elastizitätsmodul von bis zu 100 MPa, die normalerweise in einer Schicht mit einer Dicke von 2...3 mm aufgetragen werden.
- hart mit einem Elastizitätsmodul von mehr als 100 MPa, aufgetragen in einer oder mehreren Schichten mit einer Gesamtdicke von 0,5 bis 2...3 mm.

Dünnschichtige Beschichtungen werden aus Klebstofflösungen wie BF-2 und anderen hergestellt. Weiche wasserfeste Beschichtungen werden aus technischer Vaseline, Paraffin-Vaseline-Gemischen, Wachsfetten und Schmiermitteln sowie plastischer Knetmasse hergestellt.

Wachsfettmischungen und -fette oder Compounds enthalten neben Bienenwachs eine Reihe von weichmachenden und abdichtenden

Komponenten, da Wachs nicht ausreichend haftet und bei Minusgraden zur Rissbildung neigt.

Feste wasserdichte Beschichtungen werden aus Polymeren und bituminösen Verbindungen hergestellt. Zum Beispiel Carbinol-Zement und Epoxid, Epoxid-Spachtelmassen und andere.

Epoxidharzmassen und Spachtelmassen werden auf der Grundlage der Epoxidharze ED-5 und ED-6 unter Zugabe von Härtern hergestellt. Um die Steifigkeit zu verringern, werden der Masse Weichmacher zugesetzt. Epoxidharzmassen zeichnen sich durch einen niedrigen Feuchtigkeitsaufnahmekoeffizienten (weniger als 0,05 % in 24 Stunden), eine gute Haftung an den meisten Materialien und eine ausreichende Beständigkeit gegen aggressive Medien aus. Zu ihren Nachteilen gehören Sprödigkeit, Neigung zur Rissbildung und Unterbrechung der Klebeverbindungen an der Kontaktfläche bei Verformung sowie Toxizität.

## **2.8. Montage von Dehnungsmessstreifen für allgemeine Zwecke**

Die Montage von Dehnungsmessstreifen erfolgt je nach Typ und Prüfbedingungen durch Kleben oder Schweißen auf die zu prüfende Oberfläche sowie durch Einbetten in die zu prüfenden Elemente aus klebenden Materialien, z. B. Glasfaserkunststoff.

Die Verklebung von Dehnungsmessstreifen für allgemeine Zwecke, die für Dehnungsmessungen bis zu  $\pm 1$  % im klimatischen Temperaturbereich bestimmt sind, erfolgt in den meisten Fällen mit kalthärtenden Klebstoffen der Nitrocellulose- und Cyanacrylatgruppen. Die Verklebung von thermokompensierten Dehnungsmessstreifen, die im Bereich von 175...475 K eingesetzt werden, erfolgt mit wärmehärtenden Klebstoffen der Phenol-, Viniflex- und Furangruppen in Abhängigkeit vom Material des Messobjekts und dem Betriebstemperaturbereich. Bei der Montage von Hochtemperatur-Dehnungsmessstreifen, die bei Temperaturen von 525...575 K arbeiten, werden siliziumorganische Bindemittel verwendet.

Die Technologie des Klebens mit Klebstoffen aller aufgeführten Gruppen, mit Ausnahme von Expressklebstoffen der Cyanacrylatgruppe, reduziert sich auf die folgenden Arbeitsschritte:

- Unmittelbar vor dem Verkleben werden die Befestigungsstellen der Dehnungsmessstreifen von Staub gereinigt und mit einem mit Äthylalkohol oder Äther befeuchteten Tupfer abgewischt, um Kondenswasser zu entfernen;

- eine dünne Schicht Klebstoff wird mit einem Pinsel auf die vorbereiteten Bereiche des Messobjekts aufgetragen; gleichzeitig wird die gleiche Schicht auf die Kontaktfläche der Dehnungsmessstreifen-Basis aufgetragen und 10-15 Minuten lang getrocknet;

- Die zweite, dickere Klebstoffschicht wird auf den Dehnungsmessstreifen aufgetragen und 2-3 Minuten lang gehalten, bis sie eindickt;

- der Dehnungsmessstreifen wird entsprechend den Markierungen am Einbauort ausgerichtet und fest an die Oberfläche gedrückt;

- Fluorkunststoff- oder Triacetat-Folie wird über den Dehnungsmessstreifen gelegt, anschließend wird überschüssiger Kleber mit einem Finger oder einer Gummirolle entfernt;

- Der geklebte Dehnungsmessstreifen wird 1-2 Stunden lang unter einem Druck (Belastung) von etwa 0,2...0,3 MPa gehalten;

- Nach der Druckentlastung wird der Dehnungsmessstreifen von der Folie befreit und getrocknet, bis das überschüssige Lösungsmittel vollständig entfernt ist, was in der Regel innerhalb von 1-2 Tagen geschieht. Ein objektives Zeichen für den Abschluss der Trocknung ist die Stabilisierung des Isolationswiderstands gegenüber der zu prüfenden Oberfläche (bei leitfähigen Materialien);

- Wenn die Dehnungsmessstreifen mit einem wärmehärtenden Klebstoff geklebt werden, wird nach dem Trocknen eine normale Wärmebehandlung gemäß der für diesen Klebstoff empfohlenen Methode durchgeführt; während der Wärmebehandlung sollten die Dehnungsmessstreifen unter einem Druck von 0,3...0,5 MPa stehen;

- nach dem Trocknen oder der Polymerisation der aufgeklebten Dehnungsmessstreifen die Qualität der Verklebung und die korrekte Position der Dehnungsmessstreifen im Verhältnis zu den Markierungen überprüfen; außerdem die Geradheit der Gewinde des Gitters, das Vorhandensein eines Stromkreises, den Widerstand und den Isolationsgrad der Dehnungsmessstreifen im Verhältnis zur zu prüfenden Oberfläche überprüfen.

Das Verkleben von Dehnungsmessstreifen mit dem Cyanacrylat-Expresskleber Cyacrin-30 kann nach vorheriger Grundierung der Papierunterlage mit einem Dehnungsmessstreifen-Klebstoff und anschließender Trocknung oder Polymerisation erfolgen. Dehnungsmessstreifen mit Folienunterlage müssen nicht vorgrundiert

werden. Die Polyethylen-Ampulle mit dem Klebstoff wird aus dem Kühlschrank genommen und  $15 \pm 20$  Minuten lang bei einer Temperatur von  $295 \pm 10$  K gehalten. Dann wird ein Loch mit einem Durchmesser von etwa 0,3 mm in die Ampulle gestochen und eine dünne Schicht Klebstoff auf die Kontaktfläche der Dehnungsmessstreifenbasis aufgetragen. Unmittelbar nach dem Auftragen des Klebers wird der Dehnungsmessstreifen so genau wie möglich auf die markierte Stelle gesetzt und 1 Minute lang unter Druck gehalten. Die anschließende Trocknung erfolgt bei normaler Temperatur und Luftfeuchtigkeit 50...80% für 6 Stunden.

In allen Fällen ist es notwendig, Lehrmaterial mit einer detaillierten Beschreibung der Technologie des Klebens mit einem bestimmten Montagekleber zu verwenden. In den Beschreibungen sind allgemeine technologische Anforderungen für das Kleben von Dehnungsmessstreifen angegeben.

Gleichzeitig mit der Verklebung der Dehnungsmessstreifen werden Montagepads aus Isoliermaterial mit angeschlossenen Leitern für das Anlöten von Dehnungsmessstreifen und Patchkabeln angebracht und aufgeklebt. Die Pads werden in der Nähe der Querkante der DMS-Basis von der Seite der Anschlussdrähte aus aufgeklebt. Die Klebepads schützen die Dehnungsmessstreifen vor Brüchen bei der Montage und verhindern Kurzschlüsse bei den Messungen.

Das Isolationsniveau von geklebten Dehnungsmessstreifen sollte nicht unter 50...100 Mohm liegen, wenn die Messungen unter normalen Bedingungen durchgeführt werden und die zu erwartenden Verformungen 1% nicht überschreiten.

## **2.9. Halbleiter-Dehnungsmessstreifen**

Die wichtigsten Materialien für Halbleiter-Dehnungsmessstreifen sind derzeit Silizium und Germanium, wobei Silizium aufgrund seiner geringeren Temperaturempfindlichkeit häufiger verwendet wird. Auch Halbleiterverbindungen wie Galliumarsenid (GaAs) und andere werden verwendet.

Je nach den verwendeten Materialien lassen sich Halbleiter-Dehnungsmessstreifen in zwei Gruppen einteilen: monokristalline und polykristalline. Zu den monokristallinen Dehnungsmessstreifen gehören Dehnungsmessstreifen, die durch Schneiden aus einem Einkristall gewonnen werden, Nadelkristalle, die durch Wachsen aus der Gasphase gewonnen

werden, epitaktische Filme und Dendriten. Zu den polykristallinen Dehnungsmessstreifen gehören Tensolite, künstliche Mischungen aus z. B. Kohlenstoff (oder Ruß) und Bakelit-Lack.

Materialien für Halbleiter-Dehnungsmessstreifen sollten einen möglichst hohen Dehnungsempfindlichkeitskoeffizienten (SSC) und einen möglichst niedrigen Temperaturkoeffizienten des Widerstands (TCR) aufweisen sowie die Stabilität der Dehnungsmessstreifenparameter gewährleisten.

Ein sehr wichtiger Arbeitsschritt bei der Herstellung von Halbleiter-Dehnungsmessstreifen ist die Herstellung eines Metall-Halbleiter-Kontakts, der durch verschiedene Verfahren hergestellt wird: Löten, Schmelzen, Schweißen, Sputtern, elektrochemische oder chemische Beschichtung.

Von besonderem Interesse sind Halbleiter-Dehnungsmessstreifen aus dendritischen Germaniumbändern, die aufgrund der einfachen und erschwinglichen Herstellungstechnologie weite Verbreitung gefunden haben. Dendriten sind baumförmige, nadelförmige oder lamellare Kristalle mit komplexer Zwillingsstruktur, die durch Kristallisation in einer unterkühlten Schmelze oder aus der übersättigten Gasphase entstehen.

Dendritische Germanium-Dehnungsmessstreifen zeichnen sich durch eine geringere mechanische Festigkeit aus als Dehnungsmessstreifen aus Einkristallbarren. Zu den Vorteilen von dendritischen Dehnungsmessstreifen gehören die einfache Herstellung und die relative Preisgünstigkeit (im Vergleich zu anderen Halbleiter-Dehnungsmessstreifen sind dendritische Dehnungsmessstreifen die preiswertesten). Die Herstellung von dendritischen Dehnungsmessstreifen aus Germanium erfordert keine spezielle Ausrüstung (z. B. Schleif- und Schneidemaschinen) und beschränkt sich auf das Querschneiden von Korundnadeln mit dendritischen Bändern, das Abbrechen des Dehnungsmessstreifens und das Anlöten von elektrischen Leitungen mit Speziallot. Für die Herstellung von Dehnungsmessstreifen wird hauptsächlich Germanium-Dendritenband mit einem spezifischen Widerstand  $\rho = 1 \pm 0,2 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$  verwendet. Die Parameter solcher Dehnungsmessstreifen hängen stark von der Temperatur ab.

Halbleiter-Dehnungsmessstreifen können nach ihrer Bauart in geklebte und nicht geklebte Halbleiter-Dehnungsmessstreifen unterteilt werden. Gebondete Halbleiter-Dehnungsmessstreifen können mit oder ohne Substrat verwendet werden.

Halbleiter-Dehnungsmessstreifen ohne Substrat unterscheiden sich durch die Querschnittsform, das Material und die Methode zur Herstellung des ohmschen Kontakts. Ihr Design wird weitgehend durch die Herstellungstechnologie bestimmt. Der häufigste Typ von Dehnungsmessstreifen ist ein Stab.

Dehnungsmessstreifen, die durch Aufwachsen aus der Gasphase gewonnen werden, sind einkristalline Nadeln mit einem Durchmesser von 10 bis 100 Mikrometern. Der Aufbau eines solchen Dehnungsmessstreifens mit einem Substrat ist in Abb. 2.6.a dargestellt. Der Aufbau eines Film-Dehnungsmessstreifens ist in Abb. 2.6.b dargestellt; die Dehnungsmessstreifen werden in Form eines einzelnen leitenden Streifens hergestellt, der mit einer Lackschicht überzogen ist. Die Parameter einiger Halbleiter-Dehnungsmessstreifen sind in Tabelle 2.1 angegeben.

Die Hauptanwendung von Halbleiter-Dehnungsmessern sind Druck-, Kraft- und Spannungssensoren. Die Anwendung von Halbleiter-Dehnungsmessern in Beschleunigungsmessern ist vielversprechend.

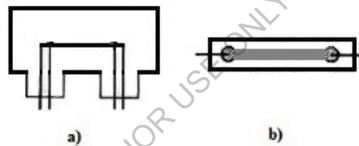


Abb. 2.6. Ausführungen einiger Halbleiter-Dehnungsmessstreifen: a - Nadelkristall-Dehnungsmessstreifen mit Substrat, b - Film-Dehnungsmessstreifen.

Tabelle 2.1. Spezifikationen einiger Halbleiter-Dehnungsmessstreifen

Parameter	Strain gauge type				
	p-Si	p-Si	n-Si	n-Ge (dendrite)	n-Ge
$\rho$ , Ohm $\cdot$ cm	0,017	0,02	0,35	0,25	0,8
Dimensions, mm					
length	12,7; 4,4	5	5	10	3,5
thickness	0,017	0,03-0,05	0,1	0,15-0,22	0,5
width	0,5	0,3	0,8	0,7-2,0	0,2
Nominal resistance at 20 °C	350;120	100-200	150-400	50-200	350
Strain sensitivity coefficient at 20 °C	130	135	-133	-100	-
Operating current, mA	20;35	20-40	10-20	20-35	5
Maximum operating temperature, °C	+300	+500	-	+150	-

## 2.10. Piezoresistiver Effekt in Halbleitern und darauf basierende Dehnungsmessstreifen

Mit Hilfe der Methoden der mathematischen Analyse werden wir die Physik des piezoresistiven Effekts in festen Materialien untersuchen. Wir werden uns auf Halbleiter wie Si in Masse und in Form von Siliziumschichten auf isolierenden Substraten konzentrieren. Wir werden die praktische Nutzung des Effekts zur Herstellung von Messwandlern für mechanische Verformungen - Dehnungsmessstreifen - betrachten. Es werden Beispiele für Sensorkonstruktionen und ihre wichtigsten Merkmale und Fähigkeiten vorgestellt. Wir analysieren die Vor- und Nachteile von Halbleiter-Dehnungsmessstreifen.

Die Ergebnisse experimenteller Studien werden hier für ionenimplantierte Siliziumschichten auf halbisolierenden Siliziumsubstraten mit einer  $\text{SiO}_2$  -Schicht auf der Oberfläche vorgestellt. Die meisten der erzielten Ergebnisse können für die Entwicklung von Dehnungsmessstreifen auf der Basis anderer Halbleiter verwendet werden.

Es ist bekannt, dass die elektrophysikalischen Eigenschaften von Halbleitern 10-100 mal empfindlicher auf mechanische Belastungen reagieren als die von Metallen. Gleichzeitig gibt es eine Reihe von Gründen, die den weit verbreiteten praktischen Einsatz von Halbleitermaterialien bei der Dehnungsmessung verhindern. Die wichtigsten sind die Temperaturabhängigkeit der elektrophysikalischen Parameter solcher Dehnungsmessstreifen (Messwertempfänger), die geringe mechanische Festigkeit und Steifigkeit, die zu einem Kriechen der Messwerte führt, und die erhebliche Empfindlichkeit gegenüber Querdehnungen.

Die Entwicklung von Wissenschaft und Technik ist ohne die Verbesserung der Mittel zur Überwachung verschiedener physikalischer Parameter nicht möglich. Dies gilt auch für die Dehnungsmessung, die heute unter Bedingungen wie kryogenen Temperaturen, starken Magnetfeldern, Strahlenbelastung usw. erforderlich ist.

Wie Sie wissen, ist der piezoresistive Effekt eine Änderung des elektrischen Widerstands eines Materials unter mechanischer Belastung. Es ist bekannt, dass die Änderung des elektrischen Widerstands in diesem Fall aus zwei Gründen erfolgt - aufgrund von Änderungen der geometrischen Abmessungen und aufgrund von Änderungen der Mobilität der Ladungsträger und dementsprechend der Leitfähigkeit des Materials. Der erste Grund betrifft Metalle, bei denen sich die Beweglichkeit der Stromträger unter mechanischer Einwirkung praktisch nicht ändert, und der

Widerstand ändert sich aufgrund von Größenänderungen während der Verformung - Abb. 2.7.

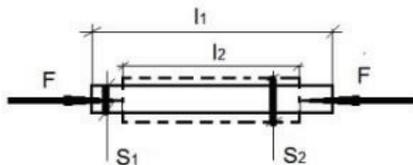


Abb. 2.7. Änderung der Abmessungen  $l$  - Länge,  $S$  - Querschnittsfläche der Probe bei mechanischer Einwirkung einer Kraft  $F$ .

Der elektrische Widerstand  $R$  des Materials wird durch den obigen Ausdruck (2.1) bestimmt:

$$R = \rho l / S,$$

wobei  $\rho$  der spezifische Widerstand,  $l$  die Länge der Probe und  $S$  die Querschnittsfläche ist.

Wie aus Abb. 2.7 und dem Ausdruck (2.1) hervorgeht, sinkt der elektrische Widerstand der Probe unter Druck aufgrund einer Abnahme der Länge  $\Delta l = l_1 - l_2$  und einer Zunahme der Querschnittsfläche  $\Delta S = S_2 - S_1$  und steigt unter Zug an.

In Halbleitern mit kubischem Gitter wird der piezoresistive Effekt für den allgemeinen Fall, dass die Richtung der mechanischen Spannung  $\sigma$  und die Stromdichte  $j$  beliebige Winkel sind, theoretisch durch piezoresistive  $\pi_{ij}$  ( $\pi = \Delta\rho/\rho_0 X$ , wobei  $\Delta\rho$  die Änderung des spezifischen Widerstands,  $\rho_0$  der Anfangswiderstand und  $X$  die mechanische Spannung ist) oder elastoresistive  $m_{ij}$  Koeffizienten beschrieben, die Tensoren vierten Ranges sind. Diese Koeffizienten sind durch die Koeffizienten der Verformbarkeit und der elastischen Module miteinander verbunden. Für Kristalle der Symmetrieklasse, zu der Silizium gehört, genügt es, drei Koeffizienten im kristallographischen Achsensystem zu kennen, um den piezoresistiven Effekt zu beschreiben:  $\pi$ ,  $\pi_{112}$  und  $\pi_{44}$ , die manchmal als piezoresistive Hauptkoeffizienten bezeichnet werden. Die piezoresistiven Hauptkoeffizienten hängen von vielen Faktoren ab: Material, Art der Leitfähigkeit, spezifischer Widerstand, Dotierungsgrad, Temperatur und Höhe der mechanischen Verformung (Spannung).

So sind in der Literatur verschiedene Kombinationen von Piezowiderstandskoeffizienten für Richtungen der mechanischen Spannung und der Stromdichte bekannt, die mit bestimmten kristallographischen Achsen übereinstimmen. Alle drei Hauptkoeffizienten des Piezowiderstands

können durch drei Messungen in verschiedenen Richtungen bestimmt werden. Der vollständige Piezowiderstandstensor  $\pi_{ijkl}$  ist wie folgt definiert:

$$\frac{\Delta\rho_{ij}}{\rho_0} = \sum_{kl}^3 \pi_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (2.10),$$

wobei  $\sigma_{kl}$  der Spannungstensor und  $\Delta\rho_{ij}$  der Widerstandstensor ist. Es ist bekannt, dass der Spannungstensor ein symmetrischer Tensor ist und sechs unabhängige Komponenten hat. Das Gleiche gilt für den Widerstandstensor.

Im sechsdimensionalen Raum ergibt sich somit folgendes Bild:

$$\frac{\Delta\rho_{ij}}{\rho_0} = \sum_{j=1}^6 \pi_{ij} \sigma_j, i=1,2,\dots,6 \quad (2.11)$$

Für *Bulk-n-Si* mit gleichmäßiger Dotierung und  $\rho = 11,7$  Ohm-cm werden in wissenschaftlichen Arbeiten folgende Werte angegeben:  $\pi_{11} = -102,2 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ ,  $\pi_{12} = 53,7 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ ,  $\pi_{44} = -13,6 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ , und für *p-Si* mit  $\rho = 7,8$  Ohm-cm,  $\pi_{11} = 6,6 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ ,  $\pi_{12} = -1,1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ ,  $\pi_{44} = 138,1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$ .

In Siliziumschichten mit Diffusionsdotierung werden die piezoresistiven Koeffizienten durch die Konzentration der Verunreinigung auf der Oberfläche der Schicht  $N_n$  bestimmt und hängen fast nicht vom Gesetz der Verunreinigungsverteilung ab. Aus den Ergebnissen verschiedener Arbeiten geht hervor, dass für n-Si-Schichten der Koeffizient  $\pi_{11}$  bei Raumtemperatur zwischen  $17 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$  ( $N_n = 1 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ) und  $88 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$  ( $N_n = 1,8 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) schwankt. Eine deutliche Temperaturabhängigkeit von  $\pi_{11}$  beginnt bei  $N_n = 9 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  (etwa 0,1 %/K).

Aufgrund der Besonderheiten der n-Si-Bandstruktur gelten die Annahmen für niedrig dotiertes Silizium:

$$\pi_{44} \approx 0; \pi_{11} \approx -2 \pi_{12} .$$

Mit zunehmender Störstellenkonzentration kommt es zu einer Verletzung dieser Annahmen, die bei der Analyse der Eigenschaften der Verformungseffekte berücksichtigt werden muss. Bei Diffusionsschichten treten Verstöße bei  $N_n \geq 5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  auf.

Je nach kristallografischer Ausrichtung der Siliziumprobe ergeben sich unterschiedliche Kombinationen von Längs- und Querpiezowiderstandskoeffizienten. Dies ist bei der Entwicklung von Dehnungsmessstreifen zu berücksichtigen, insbesondere bei solchen, deren empfindliches Element unter einachsiger Verformung arbeitet und deren Komponenten des empfindlichen Elements sowohl in Längs- als auch in Querrichtung orientiert sind. Anhand der Literaturdaten lässt sich berechnen,

dass für niedrig legiertes *p-Si* das optimale Verhältnis von Längs- und Querorientierung  $110 \perp 110$  und für *n-Si*  $100 \perp 010$  beträgt. Für Proben aus schwach legiertem *p-Si* mit einer Längsorientierung  $\langle 110 \rangle$  erhalten wir beispielsweise  $\pi_{\parallel} \approx 72 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 / \text{N}$  und  $\pi_{\perp} \approx -65 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 / \text{N}$  ( $\pi_{\parallel}$  ist der longitudinale Piezowiderstandskoeffizient,  $\pi_{\perp}$  ist der transversale Piezowiderstandskoeffizient).

Die Analyse der in der Literatur bekannten Daten zeigt, dass die für reines *p-Silizium* geltenden Beziehungen für *p-Si* in einem stark legierten Material verletzt werden. Gleichzeitig kann die Dehnungsempfindlichkeit für bestimmte Richtungen im Vergleich zu reinem Silizium zunehmen, was durch eine Zunahme des Beitrags schwerer Löcher erklärt werden kann.

Es sind weitere Faktoren bekannt, die die Eigenschaften des Dehnungsmessstreifens maßgeblich bestimmen. So ist beispielsweise der Einfluss der geometrischen Abmessungen auf die Dehnungsmessstreifen-Parameter erheblich. Einige Studien haben gezeigt, dass selbst bei einem starren Bindemittel nicht die gesamte Verformung vom verformten Untersuchungsobjekt auf das DMS-Sensorelement übertragen wird. Die übertragene Verformung hängt von der Größe des Dehnungsmessstreifens, seinen elastischen Eigenschaften und den Eigenschaften des Bindemittels ab, mit dem der Sensor am Träger befestigt ist. Dieser Effekt kann durch den Transmissionskoeffizienten berücksichtigt werden, dessen Wert (für den Fall, dass sich der Dehnungsmessstreifen in der Mitte der Probe befindet) durch die Formel bestimmt werden kann:

$$k_{nep} = 1 - \frac{2}{bl} \left( 1 - e^{-\frac{bl}{2}} \right) \quad (2.12)$$

wobei  $b = \sqrt{GC/EQ}$ ,  $G$  der Schermodul des Bindemittels,  $E$  der Elastizitätsmodul des empfindlichen Elements (Probe),  $Q$  die Querschnittsfläche der Probe,  $C = \frac{2\pi}{\ln 4h_c/h}$ ,  $h$  die Dicke der Probe,  $h_c$  die Dicke des Bindemittels,  $l$  die Länge der Probe ist.

Für die Untersuchung und Entwicklung von Messwandlern wurden dünne polykristalline Siliziumschichten, die durch Ionenimplantation mit Phosphor und Bor dotiert wurden, auf der Ebene (100) von einkristallinem Silizium mit einer Isolierschicht aus  $\text{SiO}_2$  verwendet. Solche Strukturen können bei der Verwendung planarer Technologien zur Herstellung von Messwandlern technologisch fortschrittlicher sein.

Der spezifische Widerstand  $\rho$ , die Koeffizienten der longitudinalen  $k_{II} = \Delta\rho_{II}/\rho - \varepsilon_{III}$  (wobei  $\Delta\rho_{II}$  die Änderung des spezifischen Widerstands entlang der Verformungsrichtung  $\varepsilon_{II}$  ist) und der transversalen  $k_{\perp} = \Delta\rho / \rho_{\perp} \cdot \varepsilon_{II}$  (wobei  $\Delta\rho_{\perp}$  die Änderung des spezifischen Widerstands senkrecht zur Verformungsrichtung  $\varepsilon_{II}$  ist) Dehnungsempfindlichkeit wurden experimentell gemessen, Piezowiderstands-Koeffizienten  $\pi_{II} = (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})/2$  und  $\pi_{\perp} = (\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44})/2$ , Temperatur- und Dehnungsabhängigkeit der Parameter der experimentellen Wandler.

Die Piezowiderstandskoeffizienten wurden mit Hilfe eines freitragenden Stahlträgers mit gleichem Biege­widerstand, auf den die Probe mit dem Klebstoff BF-2 geklebt wurde, und durch direkte Belastung der Proben gemessen. Durch den Vergleich der erhaltenen Ergebnisse kann der Wert des Dehnungsübertragungskoeffizienten berechnet und seine Übereinstimmung mit dem theoretisch anhand der Formel (2.12) berechneten Wert bewertet werden. Die verwendeten Schichten sind vom n-Typ auf einer (100) Siliziumebene. Die Dicke der Schichten beträgt 0,6  $\mu\text{m}$ , die Konzentration der legierenden Phosphorverunreinigung beträgt  $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Der spezifische Widerstand beträgt 0,013  $\text{ohm} \cdot \text{cm}$ . Die Messungen wurden an Proben (Dehnungsmessstreifen) mit den Abmessungen  $8 \times 0,6 \times 0,4 \text{ mm}$  und einer Schicht auf der Oberfläche durchgeführt.

Bei der Messung mit einem Balken und der Verwendung des Dehnungswerts, der nach der bekannten Formel  $\varepsilon_b = h\delta / l_b^2$  berechnet wird (wobei  $h$  die Dicke des Balkens,  $l_b$  die Länge des Balkens und  $\delta$  die Verschiebung des freien Endes des Balkens ist), sind die Werte der Dehnungsempfindlichkeitskoeffizienten  $k_{II}^b (\varepsilon_{II} \langle 110 \rangle ; J_{II} \langle 110 \rangle)$  i  $k_{\perp}^b (\varepsilon_{II} \langle 110 \rangle ; J_{\perp} \langle 110 \rangle)$  -27,3 und -2,8, respectively.

Bei der Messung der Dehnungsempfindlichkeit mit der Methode der direkten Belastung wurde die Probe freitragend gelagert und eine Biegebelastung aufgebracht. Der Messfehler der Koeffizienten bei dieser Methode lag nicht über 4 %. Die folgenden Werte wurden bei Raumtemperatur ermittelt:  $\pi_{II} = -24,9$  und  $\pi_{\perp} = -2,4$ . Wenn wir die bekannten Elastizitätskoeffizienten für Silizium verwenden und  $k$  berechnen, erhalten wir  $k_{II} = -39,1$ ,  $k_{\perp} = -3,8$ . Der Vergleich ergibt den experimentellen Transmissionskoeffizienten  $k_{tr}^e = 0,71$

Zum Vergleich wurden Messungen mit der Methode der direkten Belastung durchgeführt. Setzt man die Parameter der Messbedingungen in Formel (2.12) ein (für  $h_c = 0,15 \text{ mm}$ ), erhält man den theoretischen  $k_{tr} = 0,68$ .

Somit stimmen die experimentell und theoretisch ermittelten Dehnungsübertragungsparameter praktisch überein.

Es wurde auch festgestellt, dass in ionenimplantierten p-Si-Filmen mit einer Störstellenkonzentration von  $N_p = (10 - 10^{1819}) \text{ cm}^{-3}$  beispielsweise die Koeffizienten der Längs- und Querdehnungsempfindlichkeit  $k$  ( $k = \Delta\rho/\rho_o \varepsilon$ ,  $\varepsilon$  ist die relative mechanische Dehnung) für die Längsorientierung  $\langle 100 \rangle$  nahe beieinander lagen und mindestens  $k = 30$  betragen. Dies lässt sich durch die Polykristallinität des Films und die Besonderheiten der Bandstruktur von *p-Silizium erklären*, die die Dehnungswirkung durch leichte Löcher in einem schwach legierten Material bestimmen können, während ihr Beitrag in einem stark legierten Material abnimmt.

Der Mechanismus der Dehnungsübertragung führt dazu, dass, wie durch das Verhältnis der Sensorbreite  $d$  zur Höhe  $h$   $d/h < 2$  festgelegt, die Querverformung des Objekts praktisch nicht auf seine Oberfläche übertragen wird. Diese Eigenschaft wird bei der Herstellung von experimentellen Dehnungsmessstreifen (Messwertaufnehmern) genutzt.

Für die Herstellung von mechanischen Dehnungsaufnehmern wurden  $0,6 \mu\text{m}$  dicke Polysiliziumschichten vom n- und *p-Typ mit* Dotierungen von  $(1 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{19}) \text{ cm}^{-3}$  verwendet. Grundsätzlich wurden Proben mit p-Typ-Filmen der Längsorientierung  $\langle 100 \rangle$  und der Querorientierung  $\langle 010 \rangle$  im Experiment verwendet, da sich für hochdotiertes polykristallines *p-Silizium* gezeigt hat, dass die Quer- und Längskoeffizienten für diese Orientierung nahe beieinander liegen. Die legierende Verunreinigung für *p-Silizium* war Bor.

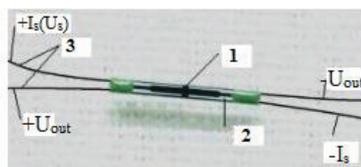


Abb. 2.8. Dehnungssensor. 1 - Dehnungsempfindlicher Mikroschaltkreis; 2 - Substrat; 3 - elektrische Anschlüsse;  $I_s (U_s)$  - Versorgungsstrom oder -spannung,  $U_{out}$  - Ausgangsspannung.

Abb. 2.8 zeigt eine Abbildung eines Dehnungsaufnehmers (Spannungsaufnehmers) und die Polarität der Stromversorgungs- und Messgeräte. Er besteht aus einem integrierten Sensorelement 1, das auf der

Grundlage eines Siliziumfilms hergestellt wird, der auf einem einkristallinen Siliziumsubstrat 2 mit einer Oxidschicht auf der Oberfläche aufgebracht ist.

Die elektrischen Leitungen 3 bestehen aus Aluminiumdraht  $d=80\ \mu\text{m}$ , dessen Enden mit Metallstreifen versehen sind, die mit herkömmlichem Lot verlötet werden können. Die Konstruktion und die integrale Ausführung des Sensorelements ermöglichen eine thermische Kompensation der wichtigsten Parameter, eine Kompensation des Einflusses des Magnetfeldes und das Fehlen einer Querdehnungsempfindlichkeit. Die Größe des Sensorsockels beträgt 8 mm, die elektrischen Widerstände am Eingang  $R_{in}$  und am Ausgang  $R_{out}$  hängen vom Dotierungsgrad und der Schichtdicke ab und liegen im Bereich von (200 - 3000) Ohm, der Versorgungsstrom hängt vom Widerstandswert ab und liegt üblicherweise im Bereich von (1 - 10) mA. Der Unterschied im elektrischen Widerstand der Sensoren einer Charge beträgt nicht mehr als 5 %, und falls erforderlich, kann eine Charge von Sensoren mit nahezu identischen technischen Eigenschaften gebildet werden.

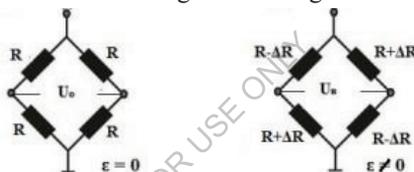


Abb. 2.9. Schematische Darstellung des Dehnungsmessstreifen-Sensorelements.

Das Funktionsprinzip des Dehnungsmessstreifens besteht darin, den elektrischen Widerstand der Widerstandselemente der integrierten Schaltung zu ändern, wenn eine mechanische Verformung entlang der Sensorachse (Abb. 2.9) aufgebracht wird, um die Schaltung zu kompensieren und als Ergebnis eine elektrische Spannung  $U_{out}$  an den Messkontakten zu erzeugen, wenn der Sensor mit Strom oder Spannung versorgt wird (siehe Abb. 2.9). Nach der Vorprogrammierung des Sensors, d. h. der Ermittlung der Abhängigkeit der Ausgangsspannung  $U_{out}$  vom Wert der mechanischen Verformung, wird die Verformung des Objekts durch den Wert der Ausgangsspannung des starr am Objekt befestigten Sensors bestimmt:

$$\epsilon = (U_{out} - U_o)/k \quad (2.13)$$

wobei  $U_{out}$  das Ausgangssignal des Sensors nach dem Auftreten der Verformung  $\epsilon$  des zu untersuchenden Objekts ist,  $U_o$  das anfängliche Ausgangssignal ist, das nach dem Anbringen des Sensors am Objekt gemessen wird,  $k = \Delta U_{out} / \Delta \epsilon$  die Dehnungsempfindlichkeit des Sensors ist.

Für die Befestigung des Sensors am Prüfobjekt können BF-2, BC-350 und andere Klebstoffe verwendet werden, die in der Dehnungsmessung weit verbreitet sind und eine ausreichende Befestigungssteifigkeit bieten. Die Zulässigkeit der Verwendung dieses Bindemittels kann anhand des Wertes der Sensormesswerte überprüft werden, die nach der Belastung des Prüfbalkens schleichen und den zulässigen Messfehler nicht überschreiten sollten.

Nachstehend sind die Ergebnisse einer genaueren Untersuchung der Messwandler mit  $R_{in} = 1,7 \text{ k}\Omega$  ( $N_p = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) aufgeführt. Die Empfindlichkeit bei einem Versorgungsstrom von 2 mA beträgt etwa  $42 \text{ }\mu\text{V}/\text{m}\ln^{-1}$  ( $42 \text{ }\mu\text{V}/\text{URD}$ ). Der Wert des Null-Ausgangssignals (Anfangssignal) des Sensors  $U_o$  beträgt  $\sim 6,2 \text{ mV}$  und kann bei Bedarf in der Nähe von Null eingestellt werden. Die Temperaturabhängigkeit der Dehnungsempfindlichkeit beträgt etwas mehr als  $0,02 \text{ \%}/\text{K}$ ,  $U_o \sim 8 \text{ }\mu\text{V}/\text{K}$ ,  $R \sim 0,03 \text{ \%}/\text{K}$ . Die Eigenschaften können z. B. durch Erhöhung des Versorgungsstroms (ohne Überhitzung und unzulässiges Rauschen) verändert werden, um die Empfindlichkeit zu erhöhen.

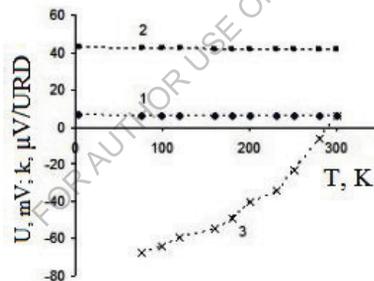


Abb. 2.10. Temperaturabhängigkeiten des Null-Ausgangssignals (relative Dehnung  $\varepsilon = 0$ ) (1), der Dehnungsempfindlichkeit  $k = \Delta U_{out} / \Delta \varepsilon$  (2) und des Ausgangssignals des auf eine Stahlplatte geklebten Sensors (3).

Abb. 2.10 zeigt die Temperaturabhängigkeit des Null-Ausgangssignals (relative Dehnung  $\varepsilon = 0$ ) (1), die Dehnungsempfindlichkeit  $k = \Delta U_v / \Delta \varepsilon$  (2) und das Ausgangssignal des auf die Stahlplatte geklebten Sensors (3). Letzterer überwacht die thermischen Spannungen.

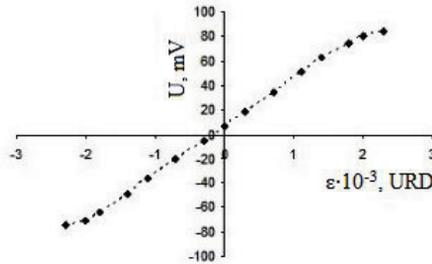


Abb. 2.11. Abhängigkeit der Ausgangsspannung  $U_{out}$  von der Größe der aufgetragenen Dehnung.

Abb. 2.11 zeigt die Abhängigkeit der Ausgangsspannung  $U_{out}$  von der Größe der aufgetragenen Dehnung. Die Grafik zeigt eine gute Linearität der Kennlinie bis zu Verformungen von etwa  $1 \cdot 10^3$  URD. Die Dehnungsempfindlichkeit des untersuchten Sensors beträgt, wie aus dem Diagramm ersichtlich,  $42 \mu\text{V/URD}$ .

Betrachtet man die Funktionsweise eines Dehnungsmessstreifens in Brückenform, bei dem ein Widerstandspaar ein Vorzeichen der Dehnungswirkung und das andere das entgegengesetzte Vorzeichen hat (vorausgesetzt, die Widerstände sind gleich), so erhält man den folgenden Ausdruck für die Spannung in der Brückendiagonale:

$$U = I R_{oo} [(k_{||} + k_{\perp})/2] \epsilon \quad (2.14).$$

Wenn  $|k_{||}| = |k_{\perp}| = k$ , dann ist  $U = I_o R_o k \epsilon$ ,

wobei  $k$  der Koeffizient der Dehnungsempfindlichkeit des Brückenarms (Widerstands),  $I_o$  der Versorgungsstrom der Brückenschaltung und  $R_o$  der Anfangswiderstand des Schaltungswiderstands ist.

Das heißt, dass die Ausgangsspannung bei konstantem Versorgungsstrom im Bereich der Linearität der Abhängigkeit von  $k(\epsilon)$  des Dehnungsmessstreifens oder der Konstanz des Wertes von  $k$  linear ist. Die experimentelle Nichtlinearität, die nach  $\epsilon > 1 \cdot 10^3$  URD ( $\text{mln}^{-1}$ ) beobachtet wird, kann sowohl mit den elektrophysikalischen Eigenschaften des empfindlichen Siliziumfilms als auch mit den Eigenschaften des Bindemittels zusammenhängen.

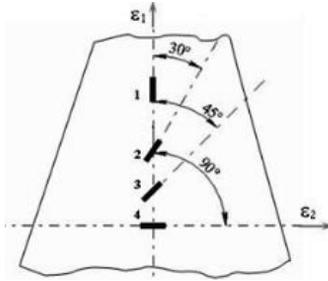


Abb. 2.12. Anordnung der Dehnungsmessstreifen bei der Untersuchung des Falls der Divergenz der Sensorachse und der Richtung der Hauptverformung  $\varepsilon_1$ .

Wir untersuchten auch den Fehler von Dehnungsmessungen mit Dehnungsmessstreifen unter Bedingungen, bei denen die Achse der Sensorbasis nicht mit der Richtung der Hauptverformung des Objekts übereinstimmt. Abb. 2.12 zeigt die Richtung der Hauptverformung  $\varepsilon_1$  des Balkens und die Anordnung der Sensoren auf dem Balken. Die Sensoren wurden mit BF-2-Kleber angebracht. Die Basisachse von Sensor 1 fällt mit der Richtung der Hauptdehnung  $\varepsilon_1$  zusammen, Sensor 2 befindet sich in einem Winkel von  $30^\circ$  zu  $\varepsilon_1$ , Sensor 3 in einem Winkel von  $45^\circ$  und Sensor 4 in einem Winkel von  $90^\circ$  (der mit der Hauptdehnung  $\varepsilon_2$  zusammenfällt). Alle Sensoren stammen aus der gleichen Charge, die nach dem gleichen technologischen Verfahren hergestellt wurde.

Der Wert der gemessenen Dehnung  $\varepsilon_e$  wurde anhand der Formel (2.13) bestimmt. Die berechneten Verformungen, die zum Vergleich mit den experimentell ermittelten Verformungen herangezogen wurden, wurden nach folgender Formel bestimmt:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} \cos 2\varphi \quad (2.15)$$

wobei  $\varphi$  der Winkel zwischen der Richtung  $\varepsilon_1$  und der Richtung ist, für die die Dehnung berechnet wird.

Die Dehnung  $\varepsilon_2$  wurde nach der Formel  $\varepsilon_2 = -\mu\varepsilon_1$  (wobei  $\mu$  die Poissonzahl ist) berechnet. Die Ergebnisse der Studie sind in Tabelle 2.2 aufgeführt.

Tabelle 2.2. Abhängigkeiten der berechneten  $\varepsilon_\varphi$  und experimentellen  $\varepsilon_e$  Verformungen von der Orientierung des Sensors relativ zur Hauptachse.

$\varphi$	$0^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$90^\circ$
$\varepsilon_\varphi$ , URD	$1 \cdot 10^3$	$0,68 \cdot 10^3$	$0,37 \cdot 10^3$	$-0,25 \cdot 10^3$
$\varepsilon_\varepsilon$ , URD	$1 \cdot 10^3$	$0,64 \cdot 10^3$	$0,36 \cdot 10^3$	$-0,24 \cdot 10^3$

Der größte Unterschied zwischen  $\varepsilon_\varphi$  und  $\varepsilon_\varepsilon$  wird für  $\varphi = 30^\circ$  beobachtet und beträgt 6 %, was auf dem Niveau des experimentellen Fehlers liegt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Querdehnungsempfindlichkeit der Sensoren unbedeutend ist.

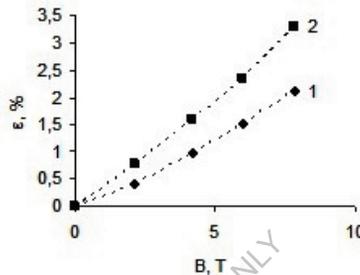


Abb. 2.13. Abhängigkeit des Messfehlers, der in einem Magnetfeld bei 4,2 K entsteht: 1 - unverformter Sensor, 2 - verformt auf  $\varepsilon = 10^3$  URD.

Abb. 2.13 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung eines der Sensoren in einem Magnetfeld bei  $T = 4,2$  K. Kurve (1) entspricht dem Dehnungswert, der aufzutreten scheint, wenn ein Magnetfeld auf einen undeformierten Sensor wirkt ( $\varepsilon = 0$ ), und Kurve (2) auf einen vordeformierten Sensor zu  $\varepsilon = 1 \cdot 10^3$  URD. Ein Feld von 7 T führt zu einem Fehler von etwa 3 %.

Es ist bekannt, dass die Genauigkeit der Messungen weitgehend von einem Parameter wie dem Kriechen der Messwerte abhängt. Das Kriechen wird durch die Steifigkeit der Sensor- und Bindemittelstruktur bestimmt und entsteht durch die plastische Verformung des Bindemittels (Kleber) bei mechanischer Verformung. In der Regel ist das Kriechen bei Halbleitersensoren deutlich höher als bei Metallfoliensensoren.

Bei den hier betrachteten Sensoren ist das Kriechen wahrscheinlich der größte Nachteil, der auf die recht starre Bauweise des Messwertaufnehmers zurückzuführen ist. Möglichkeiten zur Verringerung der Kriechneigung können eine weitere Miniaturisierung und Optimierung der Sensorform sowie die Auswahl eines Bindemittels sein.

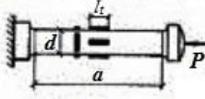
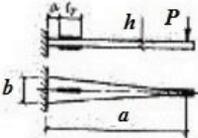
## **2.11. Dehnungs- und Druckaufnehmer zur Messung von Kraft und Druck**

Dehnungsmessstreifen (DMS) als Kraft- und Druckaufnehmer werden in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt, da sie mit elastischen Elementen (Balken) unterschiedlicher Form und Größe Kräfte und Drücke im Bereich von einigen Milli- bis mehreren MN messen können. Bei der Konstruktion von Dehnungsmessstreifen (Druck- und Kraftaufnehmern) wird besonders darauf geachtet, dass das System, das die Kraft und den Druck wahrnimmt, möglichst wenig verformt wird und dass der Einfluss von Querkraftkomponenten, die durch Exzentrizitäten entstehen, kompensiert wird. Zur Vermeidung von Exzentrizitäten werden üblicherweise Kugel- und Segmentzwischenlager sowie elastische Membranen verwendet, die entlang der Kraftachse flexibel und quer zur Kraftachse starr sind. Zur Verringerung der Hysterese an den Verbindungsstellen von Elementen in Kraft- und Druckaufnehmern wird die Verwendung elastischer Gelenke empfohlen.

Bei der Messung großer Kräfte von 10 kN bis 10 MN werden in Kraft- und Druckaufnehmern verschiedene Bauformen von elastischen Elementen (Balken) verwendet. Die einfachste Form ist das stabförmige elastische Element, das zur Messung von Kräften von 50 kN bis 5 MN verwendet wird. Um eine gleichmäßige Spannungsverteilung über den Querschnitt des elastischen Elements in der Dehnungsmessstreifen-Zone zu gewährleisten, sollte das Verhältnis von Höhe zu Quermaß mindestens 3 betragen. Wird dieses Verhältnis über 5 erhöht, kann es zu Stabilitätsverlusten kommen. Zur Erhöhung der Stabilität wird eine zentrierende elastische Membran oder ein System von elastischen Gelenken verwendet.

Kraft- und Druckaufnehmer zur Messung kleiner Kräfte (bis zu 10 kN) haben in der Regel balkenelastische Elemente. Weit verbreitet sind auch Dehndynamometer in Form von biegbaren Ringen, die mit zweistelligen Verformungen arbeiten. Ringelastische Elemente haben eine relativ hohe Empfindlichkeit bei ausreichender Steifigkeit gegenüber der Kräfteinwirkungsebene.

Tabelle 2.3. Berechnungsschemata und Formeln zur Charakterisierung einiger einfacher elastischer Elemente von Kraft- und Druckaufnehmern.

Type of elastic element	Elastic element diagram	Calculation formula
Rods	 <p><math>a &gt; 5d; l_t &lt; a/5</math></p>	$\frac{4P10^6}{\pi d^2 E}$
Beam	 <p><math>a_t &gt; b; l_t &lt; a/2</math></p>	$\frac{6Pa10^6}{bh^2 E}$

## 2.12. Elektromechanische Wandler

Elektromechanische Messwertgeber werden in Form einer mechanischen Kontaktvorrichtung hergestellt, die unter der Einwirkung einer sich ändernden physikalischen Größe, die gemessen wird, arbeitet. Sie können in verschiedenen Ausführungen hergestellt werden. In der Regel haben die Kontakte eine einfache Form und arbeiten in einem diskreten Modus, wie z. B. ein Bimetallschalter (Abb. 2.13)

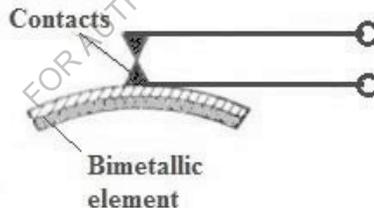


Abb. 2.13. Beispiel für ein Bimetallement, das als elektromechanischer Wandler arbeitet

Wenn der Messwert den Schwellpunkt überschreitet, öffnet oder schließt sich der Kontakt, was zu einem Ausgangssignal des Messwertgebers im geschlossenen oder offenen Stromkreis führt.

Elektromechanische Messwertgeber sind in der Regel digital (diskret), da ihre Kontakte nur zwei Stellungen einnehmen können und ein Ein-Aus-Element darstellen.

## 2.13. Beschleunigungsaufnehmer. Beschleunigungsaufnehmer.

Beschleunigungsmesser sind Messwertaufnehmer, die die Beschleunigung eines Objekts messen, die es erfährt, wenn es gegenüber seiner Ausgangslage verschoben wird. Beschleunigungsmesser werden zur Messung der Beschleunigung horizontaler Verschiebungen, der durch die Erdanziehung verursachten Beschleunigungen und anderer Beschleunigungen verwendet. Heutzutage werden Beschleunigungsmesser auf der Grundlage von mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) in Massenproduktion hergestellt.

Betrachten wir nun die Funktionsprinzipien der wichtigsten Beschleunigungsmesserkreise. Abb. 2.14 zeigt einige Ausführungen von Dehnungsmessstreifen-Beschleunigungsaufnehmern. Der einfachste Beschleunigungsaufnehmer (a) besteht aus einem Sockel, einem freitragenden Sensorelement mit Dehnungsmessstreifen und einer Trägheitsmasse am Ende. Die Berechnung eines solchen Beschleunigungsaufnehmers beschränkt sich auf die Bestimmung des Querschnitts und der Spannweite des Auslegers bei Einwirkung einer Kraft, die dem Produkt aus Masse und gemessener Beschleunigung entspricht. Beschleunigungsaufnehmer dieser Art werden zur Messung von Beschleunigungen im Bereich von 0...20g bis 0...20000g mit einem Frequenzbereich von 0...15 bis 1500 Hz verwendet. Die Eigenfrequenz von freitragenden Beschleunigungsaufnehmern wird durch die Steifigkeit des Auslegers und die Trägheitsmasse bestimmt. Der Frequenzbereich kann durch die Verwendung elastischer Elemente ohne konzentrierte Masse erweitert werden. Die auf einen solchen Beschleunigungsaufnehmer wirkende Kraft wird durch das Produkt aus der gemessenen Beschleunigung und der Auslegermasse bestimmt.

Der in Abb. 2.14.b) gezeigte Beschleunigungsaufnehmer unterscheidet sich dadurch, dass er eine Rahmenmesszelle mit einer Trägheitsmasse besitzt, die zwischen zwei freitragenden Trägern gelagert ist. Im Vergleich zu den freitragenden Beschleunigungsaufnehmern kann in diesem Fall ein höherer Umwandlungsfaktor bei gleichen Eigenfrequenzen erreicht werden. Das Rahmenelement ist so ausgelegt, dass es an beiden Enden starr an den Streben befestigt ist. Niederfrequenz-Beschleunigungsaufnehmer verfügen in der Regel über eine Flüssigkeitsdämpfung, bei der sich die Messzelle in einem abgedichteten Gehäuse befindet, das z. B. mit Polyxyloxan-Flüssigkeit gefüllt ist.

Hochfrequenz-Beschleunigungsmesser haben eine Trägheitsmasse, die über einen Kraftmesser mit massivem oder rohrförmigem Querschnitt mit der Basis verbunden ist. Der Beschleunigungsmesser ist so ausgerichtet, dass die gemessene Beschleunigung entlang der Achse des Messfühlers wirkt. Die Berechnung eines solchen Beschleunigungsmessers beschränkt sich auf die Bestimmung der Abmessungen des Kraftmessers, der mit einer Kraft belastet wird, die dem Produkt aus Beschleunigung und Masse entspricht.

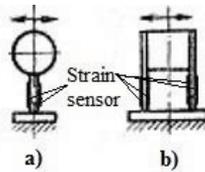


Abb. 2.14. Beispiele für einige Ausführungen von Beschleunigungsmessern.

#### 2.14. Integraler Halbleiterstrahl-Beschleunigungsmesser

Die Technologien der modernen Mikroelektronik ermöglichen die Herstellung von miniaturisierten Beschleunigungsmessern mit stabilen messtechnischen Eigenschaften. Dies macht es möglich, sie in einer Vielzahl von technischen Geräten einzusetzen und verschiedene wissenschaftliche, technische und produktionstechnische Probleme zu lösen.

Als Beispiel sei der bekannte **Silizium-Beschleunigungsmesser mit integriertem Strahl (MEMS-Aufnehmer)** genannt. Es handelt sich um eine Mikro-Miniaturkonstruktion, die in Abb. 2.15 dargestellt ist. Der Beschleunigungsmesser besteht aus einem Siliziumkristall, der in der optimalen kristallographischen Ebene im Hinblick auf die tensometrischen Eigenschaften ausgerichtet ist. In den Kristall wird durch anisotropes Ätzen ein Balken mit einem mechanischen Spannungskonzentrator und Dehnungsmessstreifen sowie ein massiver Teil - die Trägheitsmasse - eingebracht, der entweder aus demselben Silizium wie der Balken oder aus einem anderen Material hergestellt werden kann. Der Balken ist durch ein Langloch von der Basis getrennt. Der Siliziumkristall ist oben und unten durch Glasabdeckungen mit geätzten Vertiefungen verschlossen, die eine geschlossene Kammer bilden, die den Balken und die Dehnungszelle vor der äußeren Umgebung schützt und die freie Bewegung des Balkens bei

Überlastungen einschränkt. Die Abdeckungen sind durch eine anodische Passung mit dem Silizium verbunden. Darüber hinaus sind auf der oberen Abdeckung Kontaktpads angebracht, an die die externen Kabel angeschlossen werden. Wie die Autoren berichten, sind die Abmessungen des betrachteten Beispiel-Beschleunigungsmessers  $2 \times 3 \times 0,6$  mm, die Masse  $0,02$  g, der Bereich der gemessenen Beschleunigungen von  $0,1$  bis  $500$  m/s<sup>2</sup>, im Frequenzbereich von  $0$  bis  $100$  Hz.

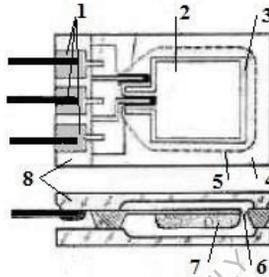


Abb. 2.15. Beispiel für den Aufbau des Integralstrahl-Beschleunigungsmessers. 1 - Kontaktflächen; 2 - Balken; 3 - Luftspalt; 4 - Silizium; 5 - Kerbe in der Abdeckung; 6 - Luftspalt; 7 - Trägheitsmasse; 8 - Glasabdeckung

## 2.15. Messwertaufnehmer für Schwingungen. Vibrometer

Trägheits-Tensor-Messwertaufnehmer für Schwingungen (Vibrometer) können nach dem Schema von Beschleunigungsmessern aufgebaut werden und unterscheiden sich von diesen nur durch das Verhältnis von Eigenfrequenzen und Frequenzen der zu untersuchenden Prozesse. Da die trägen Massen von Vibrometern relativ größer sind und der Amplitudenbereich der Amplitude der gemessenen Schwingungen entsprechen sollte, ist auch die Konstruktion von Niederfrequenz-Vibrometern und Beschleunigungsmessern etwas anders.

Abbildung 2.16 zeigt die schematische Darstellung eines Trägheitsvibrometers, bei dem die Trägheitsmasse auf Lagern gelagert ist. Die Masse wird durch eine Feder eines elastischen Elements (Aufhängung) im Gleichgewicht gehalten, und ihre Bewegungen bewirken die Auslenkung eines Balkens mit Dehnungsmessstreifen des Wegaufnehmers 4. Vibrometer dieser Bauart können eine Eigenfrequenz in der Größenordnung von einigen

Hertz haben. Niederfrequenz-Vibrometer zeichnen sich durch eine gewisse Instabilität der Nullreferenz aufgrund des Einflusses von Reibungskräften in den Lagern aus, was einen begrenzten Messbereich zur Folge hat.

Es gibt auch Vibrometer mit einer Trägheitsmasse in Form eines Pendels. Dabei wird die träge Masse auf dem Hebel durch zwei Federn oder elastische Abtastelemente von Wegaufnehmern in der Gleichgewichtslage gehalten.

Bei Kontaktvibrometern wird die Schwingung über einen Stab auf das Messelement übertragen. Bei den Messungen wird der Körper des Vibrometers in den Händen gehalten oder auf einer festen Unterlage verstärkt.

Vibrometer in Form von Kontaktschwingungs sonden werden bei der Untersuchung von Strukturen verwendet, die den Untersuchungsgegenstand und einen festen Träger verbinden. Als Vibrationssonden können Tensoresistor-Wandler beliebiger Art verwendet werden, deren Messbereich den Schwingungsverschiebungen des Untersuchungsobjekts entspricht. Eine Variante der berührenden Vibrationssonden sind die handgehaltenen Vibrationssonden. Während der Messung hält der Bediener den Tastkopfkörper in den Händen und drückt die Spitze gegen das Objekt, so dass sich der DMS-Wegaufnehmer in der Mitte des Messbereichs befindet.

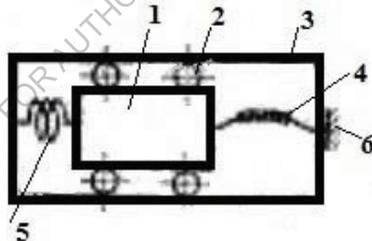


Abb. 2.16. Beispiel für den Aufbau eines Vibrometers: 1 - Trägheitsmasse, 2 - Lager, 3 - Gehäuse, 4 - Träger mit Dehnungsmessstreifen, 5 - Feder, 6 - Trägerbefestigung.

### 2.16. Silizium-Dehnungsmessstreifen-Druckmessumformer

Siliziummembranen für die Herstellung von Druckwandlern sind weit genug verbreitet, Tenso-Effekte in solchen Membranen mit verschiedenen kristallographischen Orientierungen sind gut untersucht, Technologien der Arbeit mit ihnen, die Schaffung von dehnungsresistiven empfindlichen Elementen auf ihnen und ihre Verbindung in integrierten Schaltungen sind

ausgearbeitet. Die Verwendung von Silizium und modernen mikroelektronischen Technologien ermöglicht die Herstellung von Miniatur-Drucksensoren für medizinische Anwendungen und andere spezielle Aufgaben in verschiedenen Bereichen von Wissenschaft und Technik.

Betrachten wir einen der in der Literatur beschriebenen integrierten Absolutdruckaufnehmer mit Dehnungsmessstreifen. Er hat die in Abb. 2.17 gezeigte Struktur. Die Konstruktion besteht aus einer flachen Glasabdeckung, in die eine Aussparung geätzt ist, und einem Siliziumkristall mit einer dünnen Membran, in der vier Dehnungsmessstreifen in einer Brückenschaltung angebracht sind. Die Membran ist von einer dicken Siliziumringbasis umgeben. Unter der Membran befindet sich eine Aussparung in der Glasplatte, und die Platte selbst ist mit dem Siliziumkristall durch eine Anodenpassung verbunden. Das Anodenbilden erfolgt durch Erhitzen der Glas- und Siliziumplatten auf 400 °C und anschließendes Anlegen einer Spannung von 600 V an das Silizium im Verhältnis zur geerdeten Glasplatte. Der Anodensitz sorgt für eine völlig hermetische Verbindung, so dass die Aussparung in der Glasplatte zusammen mit der Membran eine geschlossene hermetische Kammer bildet.

Nach Angaben der Autoren können die Außenabmessungen des Wandlers betragen: 1,5x2,0x0,2 mm. Die Empfindlichkeit beträgt 0,2 mV/(kPa· V). Die Temperaturdrift entspricht 250 Pa pro 1 °C, und die Ausgangsspannung variiert linear bis zu einem Druck von 40 kPa.

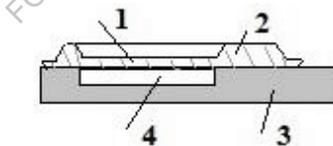


Abb. 2.17. Beispiel für den Aufbau eines integralen Silizium-Absolutdruckaufnehmers: 1 - Siliziummembran; 2 - Basis; 3 - Glasplatte; 4 - hermetische Kammer.

## 2.17. Einige im Handel erhältliche Drucksensoren. Sapphire, Motorola

Drucksensor (Messumformer) Sapphire. Der Druckmessumformer des Komplexes Sapphire 22 ist für die kontinuierliche Umwandlung des gemessenen Parameterwertes - Absolut-, Über-, Vakuum-, hydrostatischer Druck und Druckdifferenz von neutralen und aggressiven Medien, sowie für

die Niveaumumwandlung in ein einheitliches Stromausgangssignal bestimmt. Der Druckmessumformer ist für den Betrieb in Systemen der automatischen Steuerung, Regelung und Verwaltung von technologischen Prozessen in verschiedenen Industriezweigen, einschließlich der Anwendung in der explosiven Produktion der Erdöl- und Erdgasindustrie, in Kernkraftwerken (VAE) und für den Export bestimmt.

Der Druckmessumformer besteht aus einer Mess- und einer Elektronikeinheit. Alle Konverter haben eine einheitliche Elektronikeinheit und unterscheiden sich nur in der Ausführung der Messeinheit.

Das Funktionsprinzip der Drucksensoren Sapphire 22 beruht auf der Wirkung des gemessenen Drucks (Druckdifferenz) auf die Membranen der Messeinheit, die eine Verformung des elastischen Sensorelements und eine Änderung des Widerstands der Dehnungsmessstreifen-Widerstände bewirkt. Die Widerstandsänderung wird in ein elektrisches Signal umgewandelt, das vom Dehnungsmessstreifen an den elektronischen Wandler übertragen wird. Weiter in Form von Standardstrom einheitliches Signal.

Der Druckmessumformer ist in explosionsgeschützter Ausführung. Der Druckmessumformer in explosionsgeschützter Ausführung ist für die Installation in explosionsgefährdeten Bereichen von Gebäuden und Außenanlagen gemäß den Dokumenten zur Regelung der Verwendung von elektrischen Geräten in explosionsgefährdeten Bereichen vorgesehen.

**Drucksensoren von Motorola.** Motorola ist weithin bekannt für die Entwicklung und Herstellung verschiedener Arten von Sensoren. Die neuesten Entwicklungen sind Halbleiter-Drucksensoren. Die Sensoren zeichnen sich durch geringe Größe, einfache Handhabung aus. Das Design verwendet Membranen entwickelt ein neues patentiertes Sensorelement. Dieses Sensorelement arbeitet nach dem Prinzip eines Hall-Sensors. In ihm, unter der Wirkung der mechanischen Belastung auf die Ausgangsklemmen des Sensors erscheint eine elektrische Spannung proportional zum Druck. Die Spannung entsteht aufgrund der inhomogenen Verformung der Widerstandselemente des Drucksensors. Wie bereits erwähnt, hat der Drucksensor mit dem vorgeschlagenen Design des Sensorelements Vorteile wie verbesserte Linearität, Einfachheit bei der thermischen Kompensation, etc. Je nach Art des zu messenden Drucks werden Differenz-, Relativ- und Absolutdrucksensoren hergestellt.

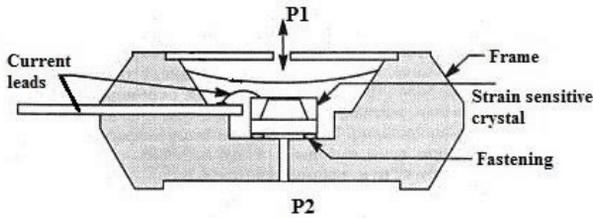


Abb. 2.18. Allgemeiner Aufbau eines Druckmessumformers von Motorola.

Piezelektrischer Druckwandler. Allgemeines Schema des Geräts. Der piezelektrische Effekt, der in Wandlern genutzt wird, ist das Auftreten elektrischer Ladungen auf der Oberfläche bestimmter kristalliner Dielektrika (Quarz, Bariumtitanat) unter der Einwirkung mechanischer Spannung oder Verformung.

Abb. 2.19 zeigt das Schema einer Vorrichtung zur Messung des Gasdrucks mit einem piezelektrischen Wandler. Der gemessene Druck  $P$  wirkt auf die Membran 1 unten im Wandlerkörper. Zwei Quarzplatten 2 sind zwischen drei metallischen Abstandshaltern 3 eingebettet. Zwischen dem Deckel und der Oberseite befindet sich eine Kugel 4, um eine gleichmäßige Verteilung des gemessenen Drucks zu gewährleisten. An der mittleren Platte - der negativen Elektrode - ist ein Draht 5 befestigt, der durch eine Isolierhülse verläuft.

Die Potentialdifferenz zwischen der negativen Elektrode und dem Gehäuse ist proportional zum gemessenen Druck. Der Druck wird durch die gemessene Potentialdifferenz bestimmt.

Da die Ladungen verschwinden, wenn der Druck weggenommen wird, müssen geeignete Messkreise verwendet werden, damit die Ladung keine Zeit hat, sich wesentlich zu verändern.

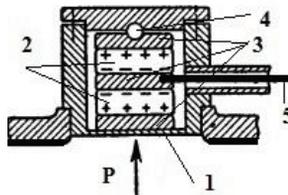


Abb. 2.19. Vorrichtung eines piezelektrischen Wandlers für die Gasdruckmessung. Allgemeines Schema des Geräts.

## 2.18. Verschiebungsaufnehmer

Einer der einfachen Wegaufnehmer ist ein resistiver potentiometrischer Teiler, bei dem sich der Schleifkontakt oder Potentiometerschieber entlang des Widerstandselements bewegt (Abb. 2.20). Der Schleifer ist mechanisch mit einer empfindlichen Rolle (Stift) verbunden, die den Bewegungen des Messobjekts folgt. Wenn an das Widerstandselement eine Spannung angelegt wird, zeigt die vom Potentiometerschieber abgezogene Spannung den Wert der Bewegung an.

Lineare und rotierende Winkelaufnehmer, die auf dem Prinzip der Spannungsteilung beruhen, sind weit verbreitet. Winkelaufnehmer werden zur Messung von Winkelverschiebungen von einigen Grad bis zu einigen Umdrehungen der Scheibe verwendet, während lineare Aufnehmer im Bereich von einigen Millimetern bis zu einigen Metern arbeiten.

Die Form des Widerstandselements bestimmt die Auflösung des Messwertaufnehmers. Wenn dieses Element aus Draht besteht, hängt die Auflösung von der Anzahl der Drahtwindungen pro Längeneinheit des Elements ab. Andere Arten von auf Spannungsteilung basierenden Wandlern verwenden einen Film aus Metall, Kohlenstoff usw., um das Widerstandselement zu bilden, was eine theoretisch unendliche Auflösung ermöglicht.

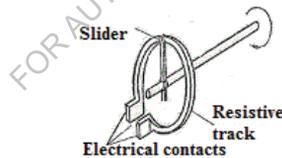


Abb. 2.20. Die einfachste potentiometrische Vorrichtung zur Erfassung von Winkelverschiebungen

**Kapazitive Wegaufnehmer.** Kapazitive Wegaufnehmer arbeiten nach dem Prinzip eines Kondensators, der aus zwei durch ein Dielektrikum getrennten Platten besteht. Eine Änderung der Größe der Platten, des Abstands zwischen ihnen oder zwischen ihnen und dem Dielektrikum bewirkt eine Änderung der Kapazität.

Abbildung 2.21 zeigt eines der Funktionsprinzipien eines kapazitiven Wegaufnehmers. Dabei wird die Kapazität durch Verschieben des Dielektrikums zwischen den beiden Platten des Kondensators verändert. Es

gibt auch andere Prinzipien - die Bewegung einer Platte relativ zur anderen, die Änderung des Überlappungsbereichs der Platten - und eine Ausführung, bei der das Dielektrikum stationär bleibt und seine Eigenschaften ändert.

Auf diesem Prinzip beruhen kapazitive Näherungssensoren und kapazitive Näherungsschalter, die in der Lage sind, das Ziel in einiger Entfernung vom Gerät zu erkennen. Das gleiche Prinzip liegt dem kapazitiven Füllstandstransmitter zugrunde. Er variiert die Dielektrizitätskonstante als Folge von Änderungen des Flüssigkeitsstands.

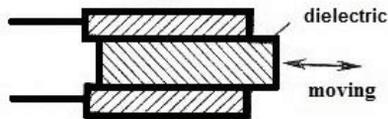


Abb. 2.21. Funktionsprinzip eines kapazitiven Wegaufnehmers

**Induktive Wegaufnehmer.** Die Selbstinduktivität einer Spule ändert sich, wenn sich ein magnetisch permeabler Körper ihr nähert, so dass die Verschiebung des Körpers relativ zur Spule mit Hilfe einer Messspule mit Selbstinduktivität bestimmt werden kann. Messwertaufnehmer, die dieses Prinzip nutzen, sind in der Regel berührungslos (Abb. 2.22.a). Es gibt auch gekoppelte induktive Wegaufnehmer (Abb. 2.22.b), bei denen der Spulenkern mit dem Körper, dessen Weg gemessen wird, mechanisch gekoppelt ist. Berührungslose Wegaufnehmer der beschriebenen Art werden als Grundlage für den Bau von induktiven Näherungssensoren und induktiven Näherungsschaltern verwendet.

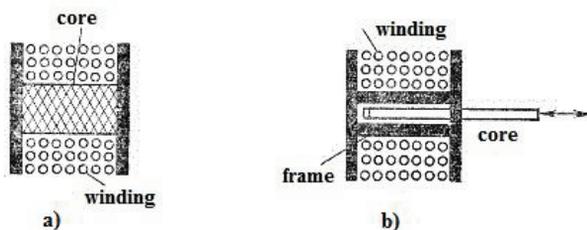


Abb. 2.22. Induktive Wegaufnehmer: a - berührungslos; b - angeschlossen

**Magnetische Wegaufnehmer.** Wandler dieser Art basieren auf der Nutzung der Änderung des magnetischen Widerstands zwischen zwei oder mehreren Magnetspulen in Abhängigkeit von der Verschiebung des Körpers. Die Verschiebung bewirkt eine Änderung der Ausgangsspannung des

Aufnehmers. Es können auch konstante oder wechselnde Magnetfelder verwendet werden, deren Größe linear variiert. In diesem Fall verfolgt ein Magnetfeldsensor, der auf dem zu bewegendem Körper angebracht wird, die Verschiebung.

**Induktive Wegaufnehmer.** Das Funktionsprinzip von induktiven Wegaufnehmern beruht auf der Abhängigkeit der Induktivität oder der gegenseitigen Induktivität der Wicklungen von der Lage, den geometrischen Abmessungen und dem magnetischen Zustand der Bestandteile ihres magnetischen Kreises.

Aus der Theorie (und den mathematischen Formeln) ergibt sich, dass die Induktivität und die Gegeninduktivität durch Beeinflussung der geometrischen Abmessungen (Länge, Querschnittsfläche) des Luftabschnitts des Magnetkreises, der magnetischen Permeabilität und der Verluste im Magnetkern verändert werden können.

Der durch die Spule fließende Wechselstrom erzeugt ein wechselndes Magnetfeld. Wenn ein elektrisch leitendes Material (Metall usw.) darin platziert wird, wird ein Teil der Energie des Magnetfeldes auf das Metallobjekt übertragen. Diese übertragene Energie induziert Wirbelströme (Foucaultströme) auf der Oberfläche des Objekts. Ihr Ausmaß hängt von der Größe, der Zusammensetzung des Metalls und der Lage des Objekts zum Magnetfeld ab. Die Wirbelströme im Objekt erzeugen ein eigenes Magnetfeld, das mit dem von der Spule erzeugten Primärfeld wechselwirkt. Aufgrund dieses Effekts nimmt die effektive Induktivität der Spule ab, wodurch sich die Resonanzfrequenz des Stromkreises, in dem die Induktivität enthalten ist, ändert.

## **2.19. Instrumente zur Durchflussmessung. Durchflussmesser**

**Mechanisch.** In der Praxis sind eine ganze Reihe von Methoden zur Durchflussbestimmung bekannt. Die einfachsten und daher gebräuchlichsten Methoden der Durchflussmessung sind die mit mechanischen Messfühlern, bei denen die Strömung einen Festkörper bewegt oder dreht. Diese Verschiebung oder Drehung des Festkörpers wird dann als proportional zur Durchflussmenge angesehen.

Abbildung 2.23 zeigt eine schematische Darstellung eines der mechanischen Durchflussmessverfahren. Sie zeigt ein federbelastetes, drehbar gelagertes Paddel, das sich auslenkt, um eine Öffnung zu öffnen,

während die Flüssigkeit durch den Messwandler fließt. Je größer die Durchflussmenge ist, desto stärker wird der Flügel ausgelenkt.

Es gibt noch andere Arten von mechanischen Methoden der Durchflussmessung. In einem Durchflusswandler kann ein Propeller verwendet werden, der sich dreht, wenn eine Substanz fließt. Die Drehgeschwindigkeit des Propellers ist proportional zur Durchflussmenge dieser Substanz.

Der gebräuchlichste mechanische Durchflussmesser ist ein Turbinendurchflussmesser mit einem rotierenden Propeller (oder in diesem Fall einer Turbine). Die Turbine ist mit Hilfe von Lagern in der Strömung der Substanz montiert. Im Allgemeinen bestehen die Turbinenschaufeln aus ferromagnetischem Material. Daher wird eine am Gehäuse des Durchflussmessers angebrachte Spule zur Bestimmung der Turbinendrehzahl verwendet. Das elektromagnetische Sensorelement des Durchflussmessers erzeugt einen Bremseffekt der Turbine, der die Winkelgeschwindigkeit der Turbine bei niedrigen Durchflussraten beeinflussen kann. Für die Messung niedriger Durchflüsse werden auch andere Arten von Messfühlern, wie z. B. elektrooptische Messfühler, verwendet.

Für genaue Messungen ist es wichtig, dass es zu keinen Verwirbelungen der strömenden Substanz kommt, da dies die Turbinendrehzahl direkt beeinflusst. Aus diesem Grund werden in der Regel am Einlass des Durchflussmessers strömungsberuhigende Schaufeln angebracht. Diese Schaufeln bilden auch einen der Bezugspunkte der Turbine. Natürlich sind auch wesentlich einfachere Durchflussmesserkonstruktionen möglich, wenn die Messgenauigkeit nicht von entscheidender Bedeutung ist, d.h. wenn Strömungsbremmung und Verwirbelung vernachlässigt werden können.

Einer der Vorteile von Turbinendurchflussmessern gegenüber anderen Arten von Durchflussmessern ist die lineare Abhängigkeit ihres Ausgangssignals von der Strömungsgeschwindigkeit in dem für das Gerät eingestellten Bereich.

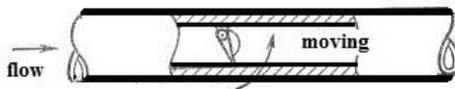


Abb. 2.23. Ein Beispiel für die Konstruktion eines mechanischen Durchflussmessgeräts.

Die Durchflussmessung basiert auf thermischen Phänomenen. Thermische Durchflussmesser arbeiten nach dem Prinzip, dass die von einer Substanz von einem Punkt zu einem anderen transportierte Wärme proportional zum Massendurchfluss dieser Substanz ist. Abb. 2.24.a zeigt beispielsweise, wie zwei Temperaturwandler (T) die Temperatur eines Stoffes vor und nach der Erwärmung bestimmen, die durch ein Heizelement zwischen diesen Wandlern erfolgt.

Abbildung 2.24.b zeigt ein Thermoanemometer, das den Durchfluss einer Substanz mit Hilfe eines einzigen Heizelements misst, das sich in ihrem Strom befindet. Der Abkühlungseffekt der Substanz, die durch dieses Element fließt, charakterisiert den Massendurchfluss, d. h. die Abkühlung wird aufgrund der Änderung des Widerstands der Heizelementdrähte überwacht. Häufig wird anstelle eines Drahtelements im Messwertaufnehmer ein Metall- oder Halbleiterfilm verwendet. Mit dem Thermoanemometer ist es möglich, extrem schnelle Schwankungen in der Durchflussmenge von Stoffen zu messen.

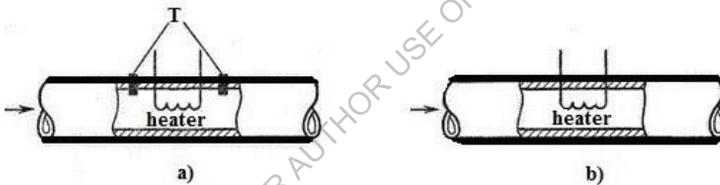


Abb. 2.24. Methoden zur Realisierung des thermischen Prinzips der Durchflussmessung mit einem Heizelement

**Thermoanemometrische Methode der Durchflussbestimmung.**  
**Prinzip der Messung.** Die Methode ermöglicht die Bestimmung der Durchflussmenge durch Temperaturänderung eines elektrisch beheizten Metalldrahtes oder -films (Durchflusswandler), der in den kontrollierten Gasstrom eingebracht wird. Die Abkühlung des Messwertaufnehmers hängt von der Strömungsgeschwindigkeit, den physikalischen Eigenschaften des Gases (Wärmeleitfähigkeit, Temperatur und Dichte) und dem Temperaturunterschied zwischen dem Messwertaufnehmer und dem Gas ab.

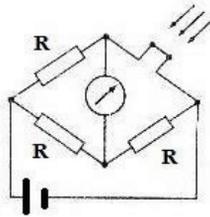


Abb. 2.25. Mit Gleichspannung betriebenes Thermoanemometer

**Es sind zwei Methoden bekannt:**

**A. Konstantstrom-Methode.** Der Strom (oder die Spannung), der den Draht erwärmt, wird konstant gehalten und durch die Änderung des Widerstands gemessen, die durch seine Abkühlung verursacht wird:  $R = f(V)$ . Die Parameter und die Stromversorgung der Brückenschaltung (Abb. 2.25) werden so gewählt, dass sie sich bei der Nullgeschwindigkeit  $V$  des Gases im Gleichgewicht befindet. Die Abweichung des Galvanometerpfeils dient als Maß für die Strömungsgeschwindigkeit.

Die Methode ist nur bei niedrigen Geschwindigkeiten kontrollierter Strömungen ausreichend empfindlich und eignet sich nicht für die Messung hoher Geschwindigkeiten ( $V > 0,5 \text{ cm/s}$ ).

**B. Methode der konstanten Temperatur.** Der Widerstand des durchflussgekühlten Messwertempfängers wird durch Einstellung der Heizspannung (Brückenspeisespannung) konstant gehalten. Diese Brückenspeisespannung bzw. dieser Strom dient als Maß für die Geschwindigkeit der überwachten Strömung. Wie im vorigen Fall nimmt die Empfindlichkeit des Thermoanemometers mit zunehmender Geschwindigkeit des überwachten Stroms ab, aber diese Abnahme ist wesentlich geringer als bei einer Thermomanemometerschaltung mit konstanter Heizspannung.

**Bewertung der thermoanemometrischen Methode.** Die thermoanemometrische Methode hat eine Reihe von Vorteilen:

- hohe Empfindlichkeit;
- miniaturisierte Abmessungen des Sensorelements;
- einfache Schemata und Geräte sind für Messungen anwendbar.

Zu den Nachteilen der Methode gehören:

- abnehmende Empfindlichkeit mit zunehmender Strömungsgeschwindigkeit;

- die Notwendigkeit einer individuellen Kalibrierung der primären Messwertgeber;

- Instabilität der Kalibrierkennlinie.

Die Verwendung von geglühtem Draht verringert die Alterungsrate. Die niedrige Betriebstemperatur des Drahtes erhöht den Einfluss der Gastemperatur. Dieser Einfluss kann durch Temperaturkompensation eliminiert werden. Selbstkonvektive Gasströmungen um den beheizten Draht (bei Nullgeschwindigkeit der überwachten Strömung) verzerren ebenfalls die Messwerte, was besonders bei Messungen mit niedrigen Geschwindigkeiten wichtig ist. Aufgrund der geringen Trägheit werden Drahtthermoanemometer bei Untersuchungen von turbulenten Strömungen eingesetzt.

**Magnetoinduktionsverfahren zur Durchflussmessung.** Wenn sich ein Leiter in einem Magnetfeld bewegt, wird nach dem Gesetz der elektromagnetischen Induktion eine elektromotorische Kraft in dem Leiter erzeugt und ein elektrischer Strom induziert. Dieser Effekt wird im Induktionsdurchflussmesser zur Bestimmung der Durchflussmenge genutzt. Die durchfließende Flüssigkeit muss eine bestimmte Mindestleitfähigkeit aufweisen. Nach dem Faraday'schen Gesetz wird in einer elektrisch leitenden Flüssigkeit, die durch ein Magnetfeld fließt, ein elektrisches Feld erzeugt. Die kontrollierte Strömung fließt durch ein mit einem Isolator bedecktes Rohr, in dessen Wänden zwei diametral angeordnete Elektroden senkrecht zur Richtung des Magnetfeldes und der Strömung der Flüssigkeit (des Mediums) angebracht sind, an denen die Spannung abgenommen wird. Der Spannungswert ist proportional zur Durchschnittsgeschwindigkeit des Mediums. Diese von einer hochohmigen Quelle (Flüssigkeit) erzeugte Spannung wird über ein Kabel zum Messumformer geführt, der sie verstärkt und weiterverarbeitet. Der Signalwert liegt in der Regel bei einigen Millivolt.

Die Theorie des Induktionsdurchflussmessers basiert auf den Maxwell'schen Gleichungen. Eine leitende, fließende Flüssigkeit hat eine bestimmte Anzahl (Konzentration) von elektrischen Ladungen. Die Lorentzkraft wirkt auf die sich bewegenden Ladungen und lenkt sie in senkrechter Richtung ab, wodurch eine elektrische Potentialdifferenz (elektrische Spannung) entsteht. Der Spannungswert ist proportional zur Strömungsgeschwindigkeit und den elektrophysikalischen Eigenschaften der Flüssigkeit (Strömung).

Das Ausgangssignal eines solchen Durchflussmessers ist klein. Bei einem solchen Schema der Durchflussmessung gibt es erhebliche Interferenzen. Um diese Nachteile zu beseitigen, wird in der Industrie bei Durchflussmessern dieses Typs ein variables oder schaltbares Magnetfeld verwendet. Diese Technik ermöglicht es, das Nutzsignal zu isolieren und eine akzeptable Messgenauigkeit zu erreichen.

## **2.20. Schalter und Sensoren für die Näherungserkennung (Bewegungsmelder)**

Näherungssensoren haben keine physische Verbindung zu Objekten. Sie erkennen die Anwesenheit eines Körpers anhand eines physikalischen Erkennungsprinzips, das in den jeweiligen Messwertgebern implementiert ist,

**Ein induktiver Näherungssensor** verwendet einen abgestimmten Oszillator. Wenn sich ein leitender Körper dem Sensor nähert, werden die Schwingungen gedämpft, was von der Kopplungsschaltung erfasst wird. Allgemeinere und einfachere Geräte sind induktive Näherungsschalter, bei denen eine Schnittstellenschaltung verwendet wird, um sie ein- oder auszuschalten, wenn sich ein leitender Körper ihnen nähert.

**Kapazitive Näherungssensoren haben** entweder die Form von Messwandlern oder von Schaltern. Ihr Funktionsprinzip besteht darin, dass ein in der Nähe befindlicher Körper die Dielektrizitätskonstante eines Kondensators verändert, wodurch die Brücke in einem der Arme, an dem der Kondensator angebracht ist, aus dem Gleichgewicht gebracht wird. Kapazitive Sensoren sind in der Lage, die Nähe von Körpern aus verschiedenen Materialien in einem weiten Entfernungsbereich zu erfassen.

Es gibt auch eine große Anzahl von **optischen Sensoren** für die Näherungsmessung. Sie bestehen aus einem Basis-Sensorelement und einem Schema für dessen Anschluss an das Messsystem. Die folgenden Methoden der Näherungserkennung können in den hier betrachteten Geräten funktionieren (Abb. 2.26). Die Sensoren können so beschaffen sein (Abb. 2.26.a), dass die Lichtquelle und das Sensorelement zusammen angeordnet sind und das ausgesendete Licht zurückreflektiert wird und den gleichen Weg wie das einfallende Licht zurücklegt. Bei anderen Geräten (Abb. 2.26.b) stehen der Strahl der Lichtquelle und der reflektierte Lichtstrahl in einem bestimmten Winkel zueinander und werden von der Körperoberfläche

wie von einem Spiegel reflektiert. Auch Sensoren, bei denen der Durchgang des Lichts durch die Körperoberfläche genutzt wird, sind möglich.

**Magnetische Näherungssensoren** sind sehr weit verbreitet und umfassen Reed-Relais oder Hall-Sensoren.

**Radar-Näherungssensoren** bestehen aus einem Radarsignalgenerator und einem Mischer, in dem das reflektierte und das Sondersignal zusammenwirken. Unter Ausnutzung des Dopplereffekts (die Frequenz des reflektierten Signals unterscheidet sich von der Frequenz des Sondierungssignals, wenn sich der Körper bewegt) ist die Frequenz des Mischerausgangs gleich Null, wenn sich der Körper nicht bewegt, und verschieden von Null, wenn er sich bewegt. Die meisten dieser Näherungssensoren arbeiten im Röntgenbereich.

Die Anwendung dieser Geräte (Näherungssensoren) ist nicht nur auf die Messung des Weges beschränkt. Die Sensoren können auch die Entfernung und damit die Geschwindigkeit erfassen, indem sie die Zeit zwischen den gesendeten und reflektierten Impulsen bestimmen und mit den Ergebnissen dieser Messungen die erforderlichen Berechnungen durchführen.

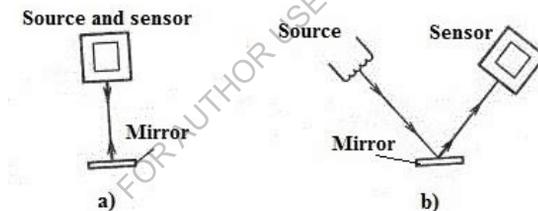


Abb. 2.26. Funktionsprinzipien einiger optischer Geräte (Sensoren, Messwandler) für die Näherungserkennung

## 2.21. Gewichtssensoren. Methoden und Mittel zur Umrechnung

**Elektromechanische Gewichtssensoren. Gewichtssensoren mit Dehnungsmessstreifen.** Gewichtssensoren mit Dehnungsmessstreifen gehören zu den genauesten Kraftmessgeräten, die zum Wiegen verwendet werden. Zusammen mit den Dehnungsmessstreifen sind in den Gewichtssensoren Widerstände zur Einstellung der Brückenschaltung eingebaut, was die Austauschbarkeit der Sensoren sowie die Möglichkeit bietet, bei Bedarf mehrere Sensoren in eine gemeinsame Schaltung einzubinden. Die Kennlinie des DMS-Gewichtssensors gibt den Wert der Ausgangsspannung in Millivolt bei Nennlast an, bezogen auf 1 V

Versorgungsspannung. Typischerweise liegt dieser Wert bei 1-2 mV/V. Überlasten von mehr als 150 % des Nennwerts führen nicht zu einer Nullpunktverschiebung. Überlastungen bis zu 500 % des Nennwerts führen ebenfalls nicht zu mechanischen Schäden.

**Wägesensoren mit schwingender Saite.** Das Funktionsprinzip sieht vor, dass eine vorgespannte Saite durch ein elektromagnetisches System zu Schwingungen mit konstanter Frequenz angeregt wird und die von der Last in der Waage entwickelte Kraft auf die Saite übertragen wird. Diese Kraft erhöht die Spannung der Saite und infolgedessen die Frequenz ihrer Schwingung. Die Änderung der Frequenz ist ein Maß für die ermittelte Masse der Last. Mit solchen Sensoren kann eine hohe Genauigkeit der Gewichtsmessung erreicht werden.

**Magnetoelastische Gewichtssensoren.** Der magnetoelastische Effekt bewirkt, dass einige Materialien (z. B. Permalloy), die einer Belastung ausgesetzt sind, ihre magnetische Suszeptibilität ändern. Ein solches Material wird als Kern einer Wicklung verwendet, deren Gesamtwiderstand mit zunehmender Belastung aufgrund einer Abnahme der magnetischen Suszeptibilität abnimmt. Solche Sensorelemente haben eine relativ hohe Ausgangsleistung, so dass ihr Ausgangssignal ohne Verstärkung verwendet werden kann. Der kleine Linearitätsbereich der Kennlinie ist jedoch für genaue Messungen unzureichend.

**Induktive Gewichtssensoren.** Bei induktiven Gewichtssensoren wird die Änderung der Wicklungsinduktivität durch die Verschiebung des Eisenkerns durch die gemessene Kraft verursacht.

Von besonderer Bedeutung im Bereich der Gewichtsmesstechnik sind die folgenden Geräte:

- a) Mit zwei oder vier veränderlichen Induktivitäten (Zwillingsinduktor mit Anzug oder Kreuzanker);
- b) mit veränderlicher Gegeninduktivität (Differenzialtransformator mit angezogenem Anker).

Im Vergleich zu Dehnungsmessstreifen haben induktive Gewichtssensoren höhere Ausgangsspannungen, eine geringere Empfindlichkeit gegenüber Temperatur und Feuchtigkeit und größere Ankerauslenkungen. Diese Eigenschaften ermöglichen die Verwendung weicher Federn, was wiederum die Messung kleiner Kräfte ermöglicht. Die Genauigkeit von induktiven Gewichtssensoren ist jedoch geringer als die von Dehnungsmessstreifen (DMS).

**Gewichtssensoren mit elektromagnetischer Kraftkompensationsvorrichtung.** Bei dieser Vorrichtung ist die Waagschale über einen Hebel mit einer Kompensationsspule verbunden, die sich im Feld eines Permanentmagneten befindet. Der Strom in der Wicklung dieser Spule wird durch einen an einen Verstärker angeschlossenen Positionssensor gesteuert. Die Änderung des Stroms in der Wicklung der Kompensationsspule erfolgt so lange, bis das Gleichgewicht erreicht ist. Wenn sich die Last in der Waage verändert, ändert sich der Strom in der Spule, der ein Maß für das Gewicht der Last ist, entsprechend.

**Hydraulische Gewichtssensoren.** Die Kraft wird durch Messung des Drucks bestimmt, der durch die Last auf den Kolben oder die Membran des Hydrauliksystems entsteht. Der Flüssigkeitsdruck wird mit einem Manometer gemessen. Durch die Konstruktion der Gummimembran am Ausgang wird Reibung vermieden. Darüber hinaus lassen Sensoren dieses Typs Abweichungen der Richtung der einwirkenden Kraft bis zu einigen Grad von der Senkrechten ohne zusätzliche Fehler zu. Der Fehler wird auf  $\pm 0,2$  % innerhalb des Wägebereichs geschätzt. Die größten Wägebereiche reichen von 50 kg bis 500 Tonnen.

**Gewichtssensoren mit Ionisationsmessverfahren.** Das Wägen mit radioaktiven Isotopen kann mit zwei Methoden durchgeführt werden: der Transmissionsmethode und der Streumethode.

Bei der Transmissionsmethode wird die Absorption der Strahlung durch das zu wägende Gewicht gemessen. Durch die Verwendung von harter Strahlung kann der Wert des Masseschwächungskoeffizienten als unabhängig von der chemischen Zusammensetzung des Materials betrachtet werden. Bei der Streumethode wird die direkte Strahlung abgeschirmt. Die seitliche Strahlung wird von dem Material gestreut und zum Detektor geleitet. Das Wägeverfahren ermöglicht den Einsatz dieser Waagen als Förderbandwaagen oder Fahrzeugwaagen unter rauen Umgebungsbedingungen, wo Waagen mit herkömmlichen Messsystemen schnell verschleifen. Die Fehlerbereiche können mehrere Prozent erreichen.

## **2.22. Füllstandssensoren. Füllstandsmessung**

Je nach Branche und Einsatzbedingungen werden an die Füllstandssensoren unterschiedliche Anforderungen gestellt. Wenn man den Einsatz eines Füllstandmessers plant, muss man die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Füllmaterialien (Viskosität, elektrische

Leitfähigkeit, Radioaktivität, Abrasivität usw.), die äußeren Messbedingungen - Temperatur, Druck, Aggressivität der Umgebung usw. - kennen.

Es gibt eine ganze Reihe von physikalischen Effekten und Materialeigenschaften, auf deren Grundlage Füllstandssensoren (Messumformer) konstruiert und hergestellt werden können.

**Messung mit Schwimmer.** Ein Schwimmer wird als Messelement eines Flüssigkeitsstandssensors verwendet. In der Regel werden als Schwimmer kugelförmige Körper verwendet, deren Dichte geringer ist als die Dichte der Flüssigkeit. Die Übertragung der Informationen vom Sensor über den Füllstand kann mechanisch mit Hilfe von verschiedenen Rollen, Zahnrädern, Kabeln oder durch elektrische Datenübertragungssysteme (Verbindung der Bewegung mit einem variablen Widerstand usw.) erfolgen. Für die Datenübertragung können auch Stufenschalter, Sendeimpulse, magnetische Übertragung der Schwimmerbewegung, induktive Wegsensoren verwendet werden.

Messfehler in solchen Geräten sind hauptsächlich auf Änderungen der Dichte der abzufüllenden Flüssigkeit oder auf Änderungen der Datenübertragungsbedingungen (Reibung, Spiel usw.) zurückzuführen.

**Kapazitive Methode der Füllstandsmessung. Kapazitive Füllstandssensoren.** Die kapazitive Methode der Füllstandsmessung ermöglicht es, den Füllstand von pulverförmigen, zähflüssigen und körnigen Materialien zu messen. Die kapazitive Methode misst die Füllstände von pulverförmigen Lebensmitteln, Getreide, Waschpulver, Zement, Sand, Kohlenstaub, Heizöl, Wasser, Säuren, Laugen usw. Die kapazitive Methode ermöglicht die kontinuierliche Messung des Füllstands von pulverförmigen Lebensmitteln, Getreide, Waschpulver, Zement, Sand, Kohlenstaub, Heizöl, Heizöl, Wasser, Säuren, Laugen usw. Die kapazitive Methode ermöglicht kontinuierliche Messungen. Die Funktionsweise der Sensoren beruht auf der Messung der elektrischen Kapazität (Prinzip des Kondensatorbetriebs). Der Kondensator besteht aus der Tankwand und einer Sonde, die in den Tankinhalt eingetaucht ist. Die Kapazität wird in der Regel durch Anlegen einer elektrischen Spannung mit hoher Frequenz gemessen. Die Kapazität variiert mit dem Füllstand. Die Kapazität ist gleich der Summe der Kapazitäten des eingetauchten Teils und des Teils an der Luft. Die beiden Kapazitäten werden parallel geschaltet und die Gesamtkapazität wird summiert. Die Genauigkeit hängt von der Konstruktion der Sonde ab. Die

Sonde besteht aus einem Kabel, einem Stab oder einem Rohr. Falls erforderlich, wird eine isolierende Beschichtung aufgebracht.

Besteht der Behälter aus dielektrischem Material, muss eine separate Gegenelektrode vorgesehen werden. Manchmal wird bei der Konstruktion von Füllstandsanzeigern ein zylindrischer Kondensator verwendet, dessen offenes Ende in das Medium eintaucht.

**Füllstandsmessung auf der Grundlage der Leitfähigkeit.** Sensoren und die leitfähigkeitsbasierte Füllstandsmessung können nur für die Füllstandsmessung von leitfähigen flüssigen Materialien verwendet werden.

Das Messprinzip beruht auf der Änderung des elektrischen Widerstands zwischen zwei Elektroden, wenn diese in das Füllmaterial eingetaucht werden. Der Widerstand nimmt mit dem Eintauchen ab. Dieses Verfahren und die Sensoren haben Anwendung bei der Füllstandsmessung in Dampfkesseln gefunden. Der Nachteil des Verfahrens ist, dass es nur zur Messung des Füllstands von elektrisch leitfähigen flüssigen Materialien verwendet werden kann.

**Hydrostatische und pneumatische Verfahren zur Füllstandsmessung.** Mit diesen Methoden kann der Füllstand einer beliebigen Flüssigkeit gemessen werden. Bei der hydrostatischen Methode wird der Druck der Flüssigkeit am Boden des Behälters und seine Veränderung bei einer Änderung des Füllstands genutzt. Der Druck am Boden eines Flüssigkeitsbehälters kann in offenen Tanks mit einem herkömmlichen oder einem Differenzdruckmessgerät gemessen werden. In geschlossenen Tanks, in denen die Flüssigkeit unter Druck stehen kann, nur mit einem Differenzdruckmanometer. Der Druck hängt von der Höhe der Flüssigkeitssäule und ihrer Dichte ab. Wenn das Manometer nicht in Höhe des Bodens angebracht ist, muss eine Korrektur vorgenommen werden.

Bei der pneumatischen Methode der Füllstandsmessung muss Luft oder Schutzgas in den Behälter gepresst werden. Diese Methode wird in Dampfkesseln, Reaktoren usw. verwendet.

Bei der pneumatischen Füllstandsmessung wird ein Rohr bis zu einer bestimmten Höhe in die Flüssigkeit getaucht, deren Füllstand gemessen werden soll. Durch eine spezielle Drossel wird Luft (oder ein beliebiges Gas) in das Rohr eingeleitet. Der Druck im Rohr bzw. über der Drossel ist gleich dem Druck der Flüssigkeitssäule (bzw. hängt vom Flüssigkeitsstand ab), bezogen auf die Unterkante des Rohres.

Die Vorteile dieser Methoden und Füllstandssensoren liegen in ihrer relativ hohen Zuverlässigkeit.

**Ultraschall-Füllstandsmessverfahren.** Das Ultraschall-Füllstandsmessverfahren kann für Flüssigkeiten und Schüttgüter verwendet werden. Sie kann nur dann nicht verwendet werden, wenn die Flüssigkeit feste Partikel enthält, was zu großen Messfehlern führen kann. Diese Messmethode ermöglicht eine einfache Automatisierung des Messvorgangs.

Um die Ultraschallmethode zur Füllstandsmessung zu realisieren, sind eine Ultraschallquelle (Sender) und ein Empfänger erforderlich. Üblicherweise werden Frequenzen von 20 kHz bis zu mehreren Megahertz verwendet. Es gibt zwei Möglichkeiten, Ultraschallschwingungen zu erzeugen: piezoelektrische und magnetostriktive.

Ein Maß für den Füllstand kann z. B. die Laufzeit eines Ultraschallstrahls sein. Die Geschwindigkeit des Strahls hängt vom Ausbreitungsmedium ab. Diese Art der Füllstandsmessung kann zur Signalisierung von Füllstandsgrenzen dienen (siehe Abb. 2.27). Wenn ein bestimmter Raum gefüllt ist, sendet das Ultraschallgerät ein Signal.

Für Flüssigkeiten ist jedoch die auf dem Echolotprinzip basierende Ultraschall-Füllstandsmessung bequemer und genauer. Der Ultraschall breitet sich im Raum über der Flüssigkeit aus, wird von der Oberfläche (Luft-Flüssigkeits-Grenzfläche) reflektiert und durch die Zeit der Rückkehr zum Empfänger wird der Füllstand bestimmt.

Einer der Hauptvorteile des Ultraschall-Füllstandssensors ist die Möglichkeit, ihn an schwer zugänglichen Stellen einzusetzen.

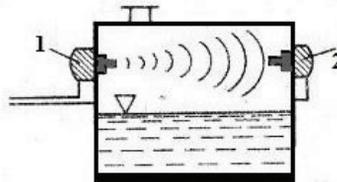


Abb. 2.27. Aufbau eines Ultraschall-Füllstandmessers. 1 - Sender, 2 - Empfänger

**Füllstandsmessgeräte auf der Basis radioaktiver Isotope. Messverfahren.** Füllstandssensoren auf Basis radioaktiver Isotope werden dort eingesetzt, wo Messungen mit herkömmlichen Sensoren nicht möglich sind. Am häufigsten wird die Methode der Füllstandsmessung auf der Grundlage radioaktiver Isotope zur Messung des Füllstands von aggressiven

Stoffen, in Behältern mit hoher Temperatur, in Hüttenwerken, bei Materialien wie Kohle, Erz usw. verwendet. Die häufigste Anwendung von Füllstandssensoren auf der Basis radioaktiver Isotope ist die Messung des Füllstands von aggressiven Stoffen.

Die Funktionsweise der Sensoren beruht auf dem Phänomen der Absorption radioaktiver Strahlung durch die im Behälter enthaltenen Materialien. In der Praxis werden in der Regel dicke Materialschichten gemessen, so dass in solchen Sensoren meist  $\gamma$ -Strahlen verwendet werden. Der Strahl der  $\gamma$ -Strahlung durchläuft den Tank in einer geraden Linie. An der gegenüberliegenden Wand des Tanks befindet sich ein Strahlungsempfänger. Die Intensität der Strahlen, die auf den Empfänger treffen, hängt vom Grad der Absorption durch das Material ab. Die Konstruktion von Sensoren und Füllstandsmesssystemen mit radioaktiven Isotopen kann je nach den technischen Bedingungen und Anforderungen variieren.

Wird ein Füllstandssensor benötigt, der nach dem Prinzip eines Signalgebers arbeitet, so ist sein Aufbau in etwa derselbe wie auf der Basis von Ultraschallstrahlung (siehe Abb. 2.27). Wenn sich der Füllstand ändert und das Material den Strahl überlappt, werden der Sensor und das Messsystem ausgelöst.

Wenn eine kontinuierliche Füllstandsmessung erforderlich ist, werden andere Sensorkonstruktionen verwendet. So werden beispielsweise mehrere Sender an der Tankwand angebracht, deren Strahlen auf den Empfänger auf der anderen Seite gerichtet sind. Wenn sich der Füllstand des Materials ändert, überlappt sich ein Teil der Strahlen und die Intensität der Strahlung, die den Empfänger erreicht, ändert sich.

Die Vorteile der betrachteten Methode der Füllstandsmessung sind: Kontaktlosigkeit, Möglichkeit der Messung unter besonders schwierigen Bedingungen, Betriebssicherheit.

**Andere Methoden und Sensoren zur Füllstandsmessung.**  
Füllstandsmessung mit Temperatursensoren - Thermoelemente, Thermistoren. Diese Messmethode ist für flüssige Materialien möglich, die nicht aggressiv sind. Das Messprinzip beruht auf der Differenz zwischen der Temperatur des Materials im Behälter und der Außentemperatur. Die Auslegung solcher Messumformer hängt von den Anforderungen und Messbedingungen ab.

**Messungen mit Dynamometern.** Im Wesentlichen werden der Tank und das darin befindliche Material gewogen. Das Verfahren eignet sich zur Messung des Füllstandes von Schüttgütern, aggressiven Materialien. Die Ausführungen der Messsysteme können unterschiedlich sein und werden je nach den technischen Anforderungen entwickelt.

Die Füllstandsmessung kann auch mit Hilfe von Grenzwertschaltern mit vibrierenden Sensorelementen usw. durchgeführt werden. Es gibt Füllstandssensoren, die auf dem interferometrischen Verfahren basieren.

**Mechanische Verfahren zur Messung des Füllstands. Messung des Flüssigkeitsfüllstandes mit Hilfe eines Schwimmers.** Das physikalische Prinzip der Messung kann anhand von Abb. 2.28 erläutert werden. Auf den Schwimmer wirken drei Kräfte - die Gewichtskraft  $P$ , die Schubkraft (archimedische Kraft)  $F_a$  und die Reaktionskraft des Ausleseübertragungssystems  $F_r$ . Die Größe der Kräfte hängt hauptsächlich von der Luftdichte, der Flüssigkeitsdichte und der Art des Kommunikationssystems zwischen Schwimmer und Messgerät ab. Im Gleichgewichtszustand ist die Summe dieser Kräfte gleich 0. Wenn sich der Flüssigkeitsstand ändert, wird das Gleichgewicht der Kräfte durchbrochen und der Schwimmer bewegt sich nach oben oder unten. Die Verschiebung bestimmt die Höhe des Flüssigkeitsspiegels im Verhältnis zur Ausgangsposition.

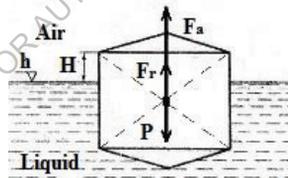


Abb. 2.28. Schwimmerverfahren zur Messung des Flüssigkeitsstands

Als Schwimmer in Sensoren werden hauptsächlich hohle kugelförmige oder kugelzylindrische Körper verwendet, deren Dichte geringer ist als die Dichte der Flüssigkeit, so dass sie auf deren Oberfläche schwimmen können. Eine Änderung der Dichte der Flüssigkeit oder der Reibungsverhältnisse im Sensorübertragungssystem führt zu einer Verfälschung des Messergebnisses. Dieser Effekt ist in Bezug auf die Auftriebshöhe umso weniger ausgeprägt, je flacher der Sensorschwimmer ist.

Im einfachsten Fall ist der Sensorschwimmer an einem Seil oder einer Kette befestigt, die über eine Rolle oder ein Zahnrad geführt wird. In diesem Fall wird der Messwert mechanisch übertragen. Um einen Dauerbetrieb des Sensors zu gewährleisten, wird am anderen Ende des Seils oder der Kette ein Gegengewicht angebracht.

Bei dieser Methode der Füllstandsmessung entspricht der Drehwinkel der Walze der Veränderung des Flüssigkeitsstandes. Die Achse der Führungsrolle kann mit dem Schieber des Sensorpotentiometers verbunden werden, um die elektrische Übertragung des Messwerts zu realisieren.

Die mechanische Übertragung von Füllstandsdaten ist bei offenen Tanks durch ein Kabelsystem oder bei geschlossenen Tanks durch eine Stopfbuchse recht einfach, wenn die Entfernungen für die Datenübertragung kurz sind.

In den meisten Fällen, sowohl in offenen als auch in geschlossenen Tanks, werden jedoch elektrische Datenübertragungssysteme in Füllstandssensoren verwendet, insbesondere wenn das Messergebnis an ein Rechenwerk weitergeleitet wird.

**Ein Beispiel für einen Schwimmerfüllstandssensor ist ein Kraftstofffüllstandssensor für Kraftfahrzeuge (Abb. 2.29).** Hier wird das sogenannte potentiometrische Verfahren zur Übertragung von Informationen über den Flüssigkeitsstand verwendet (potentiometrischer Füllstandssensor). Der Schwimmer 1 ist mechanisch mit dem Rheostat 2 verbunden. Der Schwimmer, der sich entsprechend dem Flüssigkeitsstand bewegt, bewegt mechanisch den Schieber des Potentiometers (Rheostats) 2. Dadurch ändert sich der elektrische Ausgangswiderstand des Potentiometers (Rheostats), der vom Sensor verarbeitet und an die entsprechende Kraftstoffstandsanzeige ausgegeben wird.

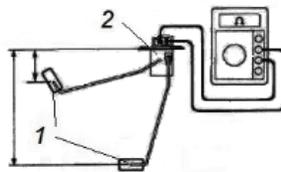


Abb. 2.29. Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Kraftstoffstandssensors.

Zu den Vorteilen potentiometrischer Kraftstoffstandssensoren gehören die Einfachheit des Geräts und die geringen Kosten. Der Nachteil

ist der Verschleiß der beweglichen elektrischen Kontakte des Sensors. Dies gilt insbesondere für Fahrzeuge, die aggressive Kraftstoffe wie Ethanol, Methanol und Biodiesel verwenden. Unter solchen Bedingungen wird ein berührungsloser Kraftstoffstandssensor eingesetzt, der die Wechselwirkung magnetischer Elemente nutzt.

### **2.23. Messung der Geschwindigkeit. Tachometer**

Messwertaufnehmer dieser Art werden zur Messung der linearen oder der Winkelgeschwindigkeit verwendet. Winkelgeschwindigkeitsmesser sind in der Regel elektromagnetische Geräte und werden als Tachometer bezeichnet. Tachometer des elektronenoptischen Typs werden als Stroboskope bezeichnet. Die lineare Geschwindigkeit wird in der Regel indirekt durch Umrechnung der linearen Geschwindigkeit der Schwungrad- oder Getriebedrehung bestimmt. Die Winkelgeschwindigkeit wird dann mit einem Winkelmessgerät (Tachometer) gemessen. Die direkte Bestimmung der linearen Geschwindigkeit erfolgt mit elektromagnetischen Messwertgebern, berührungslosen Doppler-Mikrowellen-Radar-Messwertgebern usw.

**Impulstachometer.** Die gebräuchlichste Art der Umwandlung ist die, bei der die Empfangsspule bekannter Bauart es ermöglicht, die Drehzahl der Welle zu bestimmen. In der Regel ist eine solche Welle mit Aussparungen oder Vorsprüngen versehen und bildet so ein Zahnrad (Abb. 2.30). Wenn der Vorsprung oder die Aussparung die Spule durchläuft, ändert sich die Spannung des Ausgangsstroms. Die Berechnung der Änderung der Ausgangsspannung über ein bestimmtes Zeitintervall ergibt den Wert der Winkelgeschwindigkeit.

Bei Impulstachometern können beispielsweise der Hall-Effekt, induktive Wirbelströme oder optische Phänomene (in berührungslosen Messwertgebern) genutzt werden, am häufigsten wird jedoch das elektromagnetische Prinzip verwendet.

Der ferromagnetische Rotor mit einem Sensorelement wird hier in Form eines Permanentmagneten oder einer Spule hergestellt. Der Magnet erzeugt ein magnetisches Feld um das Sensorelement. Wenn der Rotorzahn das Feld kreuzt, ändert sich der magnetische Fluss und eine EMK wird in der Tachometerspule induziert. Der Vorteil dieses Umwandlungsprinzips ist die Abhängigkeit des Ausgangssignals von der Rotorzahnkonfiguration. Einige

bekannte Arten von Ausgangsimpulsen für verschiedene Formen von Tachometer-Rotorzähnen sind in Abb. 2.30 dargestellt.

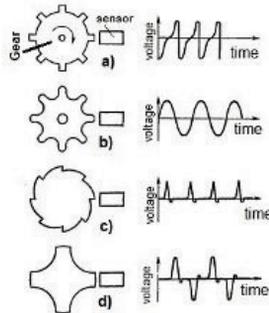


Abb. 2.30. Abhängigkeit des Ausgangssignals des elektromagnetischen Impulstachometers von der Konfiguration der Rotorzähne: a-raue Zähne, b-präzise bearbeitete Rotortachometerzähne, c- und d-Sonderform der Zähne.

**Tachometer-Generatoren.** Wenn die Geschwindigkeitsmessung einen bestimmten Oszillator betrifft, kann die Winkelgeschwindigkeit anhand der Amplitude oder Frequenz seiner Ausgangsspannung beurteilt werden. Zu diesem Zweck verwendete Generatoren werden als Tachometer bezeichnet.

Für den Messwertnehmer sollte eine so geringe Energie des bewegten Körpers gewählt werden, dass der Einfluss des Tachogenerators auf die Winkelgeschwindigkeit der Welle eliminiert wird.

**Stroboskope.** Stroboskope sind spezielle elektro-optische Tachometer, bei denen die sich drehende Welle durch Lichtblitze beleuchtet wird. Die Geschwindigkeit der Lichtblitze wird manuell eingestellt, solange das Bild der Welle stillsteht. Dies ist der Fall, wenn jeder Lichtblitz eine Umdrehung der Tachometerwelle auslöst.

### Literaturverzeichnis

1. Klokova N.P. *Tenzorezistory* [Dehnungsmessstreifen]. - M.Mashinostroenie, 1990.-224p.
2. Daychik M.L., Prigorovskiy N.I., Khurshudov G.Kh. *Metody i sredstva natsurnoy tenzometrii. Spravochnik* [Methods and means of full-scale strain gauging. Directory] M. Mashinostroenie, 1989.-240p.

3. Vaganov V. I. *Integral'nye tenzopreobrazovateli* [Integrale Dehnungsmessstreifen]. -M.: Energoatomizdat, 1983. - 136 p.
4. Gridchin V.M., Lyubimsky V.M. *P'ezosoprotivlenie v plenkakh polikristallicheskogo kremniya p-tipa* [Piezowiderstand in p-Typ polykristallinen Siliziumschichten]. *FTP*, 2004, v.38, №.8, 38-46p.
5. Klokoval N.P. *Tenzorezistory* [Dehnungsmessstreifen]. *Datchiki i sistemy* [Sensoren und Systeme] 2004, №3, S.10-12.
6. Nikolay Gorbachuk, Mikhail Larionov, Aleksey Firsov, Nikolay Shatil. Halbleitersensoren für einen breiten Temperaturbereich. *Sensors & Transducers Journal and Magazine*, Vol. 162, Issue 1, January 2014, pp.1-4
7. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Issledovanie nekotorykh elektrofizicheskikh svoystv plenok n-Si, legirovannykh ionnoy implantatsiy* [Untersuchung einiger elektrophysikalischer Eigenschaften von durch Ionenimplantation dotierten n-Si-Filmen]. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya*, 2006, №4, p.104-106
8. Druzhinin A.A., Mar'yamova I.I., Kubrakov A.P., Pavlovskiy I.V. *Tenzorezistory dlya nizkikh temperatur na osnove nitevidnykh kristallov kremniya* [Dehnungsmessstreifen für tiefe Temperaturen auf Basis von Silizium-Whiskern]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. 2008, №4, s. 26-30.
9. Terston R. *Primenenie poluprovodnikovyykh preobrazovateley dlya izmereniya deformatsiy, uskoreniy i smeshcheniy* [Anwendung von Halbleiteraufnehmern zur Messung von Verformungen, Beschleunigungen und Verschiebungen]. -V' kn.: *Fizicheskaya akustika/ Pod red. U. Mezona, t.1, chast' B -Metody i pribory ul'trazvukovykh issledovaniy. Per. s angl.* - M.: Mir, 1967, S.187-209.
10. Mykola Gorbatschuk. **ELEKTROTECHNISCHE MATERIALIEN**. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, London, N2 9ED, Vereinigtes Königreich, 2024, 112 S. ISBN: 978-620-3-46212-8.
11. Zeeger K. *Fizika poluprovodnikov* [Halbleiterphysik]. *Per. s angl. pod red. Yu.K. Pozhely.* -M.: Mir, 1977, S. 615.
12. Smith C.S. Piezowiderstandseffekt in Germanium und Silizium. - *Phys. Rev.* 1954, v. 94, 1, S. 42-49.
13. Tufte O.N., Stelzer E.L. Piezoresistive properties of silicon diffused lauers. - *J. Appl. Phys.*, 1963, v. 34, 9, S. 313-318.

14. Patent RF 2043671. *Poluprovodnikovyy tenzorezistor* [Halbleiter-Dehnungsmessstreifen]. *Avt. Gorbachuk N.T. / B.I.* 1995, №25.
15. A.B.Renskiy und andere. *Tenzometrirovaniye stroitel'nykh konstruksiy i materialov* [Dehnungsmessung von Baukonstruktionen und Materialien]. M.- Stroyizdat, 1977, 239 S.
16. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. Piezo-Hall effect in p-germanium. *Phys. Stat. Sol.(c)* 100. 1980, p.309.
17. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. On determining the deformation potential constants of semiconductors of the p-germanium type from the temperature dependence of the piezoresistance. *FTP*, Bd. 15, V. 14, S. 649, 1981.
18. Gorbachuk N.T., Shvarts Yu.M. *Vliyaniye deformatsii na velichinu magnitosoprotivleniya v ob "emnom p-Ge i plenkakh p-Ge na arsenide galliya* [Auswirkung der Verformung auf die Größe des Magnetowiderstandes in bulk p-Ge und p-Ge-Filmen auf Galliumarsenid]. *OPT*, 1984, №6, s.88.
19. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. *Poluprovodnikovyy termotenzodatchik* [Semiconductor thermal strain gauge]. *PSU*, 1984, Nr. 9, S. 21.
20. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. *P'ezogal'vanomagnitnye svoystva plenok germaniya na arsenide galliya i perspektivy ispol'zovaniya ikh v kachestve tenzorezistorov* [Piezogalvanomagnetische Eigenschaften von Germaniumfilmen auf Galliumarsenid und Aussichten für ihre Verwendung als Dehnungsmessstreifen]. *UFZh*, 1984, Nr. 12, S. 1850.
21. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. *Sposob opredeleniya temperatury i deformiruyushego usiliya*. [Methode zur Bestimmung der Temperatur und der Verformungskraft]. *A.s.* No. 932282, 05/30/82 Bulletin. Nr. 20.
22. Gorbachuk N.T., Sakidon P.A., Thorik Yu.A., Shvarts Yu.M. *Poluprovodnikovyy tenzorezistor* [Halbleiter-Dehnungsmessstreifen]. *A.s.* Nr. 11 16305 1984.
23. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Izmeritel'nye preobrazovateli na osnove GaAs, polikremniya i dispersnogo germaniya i perspektivy ikh ispol'zovaniya* [Messwandler auf der Basis von GaAs, Polysilizium und dispergiertem Germanium und Perspektiven für ihre Verwendung]. *Perspektivnyye materialy*, 2004, N 5, S.93-97.

24. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Vliyanie neytronnogo oblucheniya na kharakteristiki poluprovodnikovyykh izmeritel'nykh preobrazovatelye temperatury, deformatsii, magnitnogo polya* [Der Einfluss von Neutronenbestrahlung auf die Eigenschaften von Halbleiter-Messwandlern von Temperatur, Dehnung und Magnetfeld]. *Poverkhnost'*, 2005, 4, S.57-58.

25. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Verzeichnis "Messungen in der Industrie"] 1-3 Bände. M.: *Metallurgiya*, 1990.

26. Kiknadze G.I., Plesh A.G., Safronov A.N., Gorbachuk N.T. und andere. *Rezultaty eksperimental'nogo issledovaniya protsessa okhlazhdeniya model'noy seksii i eksperimental'nogo bloka sverkhprovodyashchey obmotki toroidal'nogo polya ustanovki T-15 na komplekse SIMS* [Ergebnisse einer experimentellen Untersuchung des Abkühlungsprozesses der Modellsektion und des experimentellen Blocks der supraleitenden Wicklung des toroidalen Feldes der T-15 Anlage auf dem SIMS-Komplex]. *Vorabdruck IAE-4320/10*, M., 1986, 24 S.

27. Belyakov V.A., Gorbachuk N.T., Didenko P.I., Filatov O.G., Sychevskiy S.E., Firsov A.A. etc. *Poluprovodnikovyye izmeritel'ne preobrazovatelye deformatsii, temperatury i magnitnogo polya dlya primeneniya v usloviyakh radiatsionnogo vozdeystviya, shirokom diapazone temperatur i magnitnykh poley* [Halbleiter-Messwandler der Verformung, der Temperatur und des magnetischen Feldes für den Einsatz unter den Bedingungen der Strahlenbelastung, eines breiten Bereichs von Temperaturen und magnetischen Feldern]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*", *Seriya: Elektrofizicheskaya apparatura*, v.3(29), 2005, p.46-54.

21. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki: Navchal'niy posibnik* [Allgemeiner Kurs der Physik: Studienführer], T. 1-3. - K.: *Tekhnika*, 2001.

## Kapitel 3. Magnetische Felder. Messwandler, Sensoren, Messung

### 3.1. Hall-Sensoren. Funktionsprinzip, Beschreibung, Gerät

Ein Hallensensor ist ein Gerät, das die Größe eines Magnetfeldes mit Hilfe des Hall-Effekts misst. Der Hall-Sensor besteht aus einer rechteckigen Halbleiterplatte, an die vier elektrische Leitungen angeschlossen sind. Das Sensorelement eines Hallensensors ist in Abb. 3.1 schematisch dargestellt.

Hall-Effekt. Die Probe hat die Form einer rechteckigen Platte mit der Länge  $l$ , der Breite  $d$  und der Dicke  $b$  (siehe Abb.3.1).

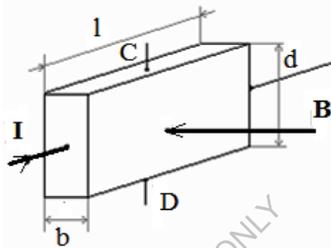


Abb. 3.1 Hall-Effekt in einer Platte mit einem Längsstrom  $I$  und einem Magnetfeld  $B$ , das senkrecht zur Plattenebene steht.

Wenn ein elektrischer Strom  $I$  entlang der Probe fließt und ein Magnetfeld  $B$  senkrecht zur Plattenebene erzeugt wird, entsteht an den Seitenebenen der Platte in  $CD$ -Richtung ein elektrisches Feld, das als Hall-Feld bezeichnet wird. In der Praxis wird das Hall-Feld in der Regel durch eine Potentialdifferenz charakterisiert, die zwischen den symmetrischen Punkten  $C$  und  $D$  auf der Seitenfläche der Probe gemessen wird. Diese Potentialdifferenz wird als Hall-Potentialdifferenz  $U_{hal}$  oder Hall-EMK  $\varepsilon_{hal}$  bezeichnet.

In der klassischen Leitungstheorie wird der Hall-Effekt dadurch erklärt, dass in einem Magnetfeld die Lorentzkraft auf bewegte elektrische Ladungen wirkt, deren Größe und Richtung durch die Vektorgleichung bestimmt werden:

$$F = e [\mathbf{VB}] \quad (3.1),$$

wobei  $\mathbf{B}$  der Vektor der Magnetfeldinduktion,  $\mathbf{V}$  der Vektor der Ladungsgeschwindigkeit,  $e$  die Ladung der Stromträger unter Berücksichtigung des Vorzeichens ist.

Aufgrund dieser Kraft in CD-Richtung kommt es zu einem Konzentrationsunterschied zwischen den Stromträgern und damit zu einem elektrischen Feld. In unserem Fall steht  $V$  senkrecht zu  $B$ , und auf der Grundlage der bekannten Gesetze der Elektrophysik ist das elektrische Feld von Hall definiert:

$$E_{hal} = F/e = VB \quad (3.2),$$

Das Feld ist mit der Hall-EMK  $\varepsilon_{hal}$  oder der Hall-Potentialdifferenz  $U_{hal}$  wie folgt verknüpft:

$$\varepsilon_{hal} \approx U_{hal} = E_{hal} d = VBd \quad (3.3).$$

Die Stromstärke, die durch eine Einheitsquerschnittsfläche der Probe fließt, ist gleich der Stromdichte:

$$J = I/S = enV \quad (3.4),$$

wobei  $n$  die Anzahl der Stromträger in einer Volumeneinheit der Probe ist (Konzentration der Stromträger).

Daraus ergibt sich die derzeitige Stärke:

$$I = jbd = enVbd \quad (3.5).$$

Das macht es möglich zu schreiben:

$$V = I / enbd \quad (3.6).$$

Daraus folgt:

$$\varepsilon_{hal} = IB / enb \quad (3.7).$$

Die Hall-EMK (oder  $U_{hal}$ ) ist also proportional zur Stromstärke, der Induktion des Magnetfeldes und umgekehrt proportional zur Dicke der Probe und der Konzentration der Stromträger in ihr.

Es wird oft geschrieben:

$$\varepsilon_{hal} = R \cdot IB/b \quad (3.8).$$

Dabei ist der Koeffizient  $R = 1/ne$  die Hall-Konstante, die z. B. für Halbleiter einen Wert von  $10$  bis  $10^5 \text{ cm}^3 / \text{Kl}$  hat.

### 3.2. Funktionsprinzip eines Hallsensors

Abbildung 3.2 zeigt eine typische Form des Sensorelements eines Hall-Sensors. Diese Art von Sensorelement kann entweder aus Schüttgut oder auf der Grundlage von Materialien in Folienform hergestellt werden.

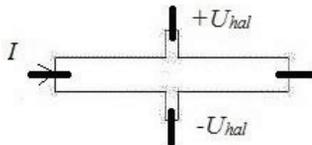


Abb. 3.2 Schematische Darstellung der Form des Sensorelements des Hallensors.

Abb. 3.3 zeigt die charakteristische Abhängigkeit von  $U_{hal}$  (Potentialdifferenz in Richtung der Kontakte CD - Abb. 3.1) vom Magnetfeld bei konstantem Versorgungsstrom.

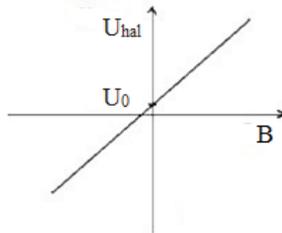


Abb. 3.3. Abhängigkeit der elektrischen Spannung an den Hall-Kontakten  $U_{hal}$  von der Größe der Magnetfeldinduktion  $B$

In Abwesenheit eines Magnetfeldes sollte die Hall-EMK (Potentialdifferenz) gleich Null sein. Aufgrund verschiedener Nebenerscheinungen (z. B. unzureichend symmetrische Anordnung der Messelektroden des Sensors) kann das Messgerät jedoch auch bei Abwesenheit eines Magnetfeldes eine gewisse Potentialdifferenz  $U_o$  am Ausgang des Hallensors anzeigen. Um die damit verbundenen Fehler zu beseitigen, sollte der Wert von  $U_o$  von der gemessenen Potentialdifferenz im Magnetfeld abgezogen werden.

Eine der wichtigsten Eigenschaften eines Hallensors ist seine Empfindlichkeit:

$$\gamma = \Delta U_{hal} / \Delta B \quad (3.9).$$

Die im Datenblatt des Hallensors angegebene Empfindlichkeit wird zur Bestimmung der Induktionsgröße des gemessenen Magnetfelds verwendet:

$$B = U_{hal} / \gamma \quad (3.10).$$

Beachten Sie, dass der Hall-Sensor die senkrechte (zur Sensorebene) Komponente des Magnetfeldvektors misst. Wenn also der Maximalwert des Magnetfelds gemessen werden soll, muss der Hallsensor entsprechend ausgerichtet werden.

Die Halbleiter InP, InSb, GaAs, Ge und Si werden am häufigsten für die Herstellung von Hall-Sensoren verwendet. Die Verwendung von Halbleitern ist darauf zurückzuführen, dass sie aufgrund der hohen

Beweglichkeit von Stromträgern eine hohe Empfindlichkeit gegenüber dem Einfluss des Magnetfeldes haben. Das Sensorelement des Hallsensors kann entweder aus Bulkmaterial oder auf der Grundlage von Halbleiterschichten auf isolierenden Substraten hergestellt werden. Der Hall-Sensor kann eine andere Form haben, was sich auf die Linearität der Abhängigkeit des Ausgangssignals vom Magnetfeld und die Empfindlichkeit auswirkt. Die Abmessungen der modernen Hall-Sensoren dürfen  $1 \times 1 \times 0,5$  mm nicht überschreiten, die Versorgungsströme betragen in der Regel 1- 100 mA (hängt vom Eingangswiderstand des Sensors ab), die Empfindlichkeit kann 1000 mV/T und mehr erreichen, der Betriebstemperaturbereich reicht von  $-270$  °C bis  $200$  °C. Neben der Empfindlichkeit ist einer der wichtigsten Parameter der Hall-Sensoren die Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit, des Eingangswiderstandes, des anfänglichen Ausgangssignals  $U_o$ . Bei guten Hall-Sensoren sollten sie unbedeutend sein.

### 3.3. Moderne Hall-Effekt-Sensoren

Hall-Sensoren werden von vielen Unternehmen in der Welt hergestellt, zum Beispiel von Honeywell. DHC-0.5A-Sensoren sind in Russland bekannt.

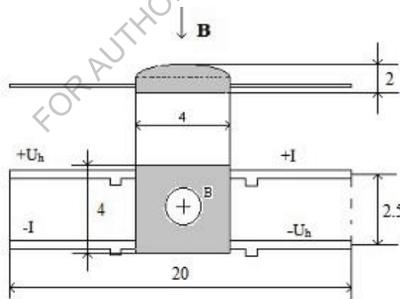


Abb. 3.4. Schematische Darstellung eines der Sensoren DHC-0.5A

Der Hall-Sensor DHC-0.5A dient zur Messung der magnetischen Induktion auf der Grundlage der Umwandlung der magnetischen Induktion in eine Ausgangsspannung. Der Sensor wird auf der Grundlage einer planaren topologischen Struktur hergestellt, die auf der Oberfläche eines Siliziumkristalls gebildet wird.

***Wichtigste technische Merkmale:***

Der Nennsteuerstrom beträgt 3 mA;

Hallspannung bei magnetischer Induktion 0,25 T und Nennsteuerstrom - 70 mV (Empfindlichkeit  $\gamma = 280 \text{ mV/T}$ );

Restspannung bei Nennsteuerstrom - nicht mehr als 7 mV

Eingangswiderstand - 1,8 ... 3 kOhm (Widerstand zwischen den Stiften I);

Ausgangswiderstand - nicht mehr als 3 kOhm (Widerstand zwischen den Stiften  $U_h$ );

Gewicht - nicht mehr als 2,5 g.

- $I_h$  und + $I_h$  - Pins für den Anschluss der Steuerstromquelle (Strompins);

- $U_h$  und + $U_h$  sind Ausgangssignalstifte (Hallstifte); der Widerstand zwischen den Stromstiften ist kleiner als zwischen den Hallstiften.

Der DHC-0.5A-Sensor ist bekannt empfindlich sowohl in Bezug auf die Richtung der magnetischen Induktion als auch auf die Polarität des Steuerstroms.

**Magnetfeldsensoren (Hall-Sensoren) auf der Grundlage von GaAs-Schichten.** Die technischen Merkmale von Magnetfeldsensoren auf der Grundlage des Hall-Effekts (Hall-Sensoren) hängen sowohl vom verwendeten Material als auch von den geometrischen Abmessungen und der Form des Sensorelements ab. Die am häufigsten verwendeten Materialien für empfindliche Elemente von Hall-Sensoren sind InSb und GaAs, deren Hauptvorteile in der hohen Mobilität der Ladungsträger liegen, was zu einer hohen Empfindlichkeit der Sensoren führt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Entwicklung und der experimentellen Untersuchung der messtechnischen Eigenschaften von Magnetfeldwandlern (Sensoren) und die Auswirkungen der Neutronenbestrahlung auf die wichtigsten Parameter vorgestellt.

GaAs-Schichten auf halbisolierendem Galliumarsenid wurden zur Herstellung von Sensoren verwendet. Ziel der Entwicklung war es, Sensoren mit geringem Rauschen, hoher Linearität der Abhängigkeit des Nutzsignals vom Magnetfeld, geringer Abhängigkeit der Parameter von der Temperatur sowie einer Miniaturisierung des Arbeitsbereichs zu schaffen. Abb. 3.2 zeigt ein ungefähres Schema des Sensorelements.

Die Dicke der GaAs-Schichten variierte zwischen 0,1-5  $\mu\text{m}$ , und die aktuelle Ladungsträgerkonzentration betrug  $\cong 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . Die Größe der Arbeitsfläche betrug  $100 \times 100 \mu\text{m}$ . Abhängig von der Schichtdicke und der Stromträgerkonzentration variierten die elektrischen Eingangs- und

Ausgangswiderstände der Sensoren im Bereich von 15 - 1500 Ohm. Die Versorgungsströme betragen 3 - 150 mA. Das anfängliche Ausgangssignal  $U_o$  lag im Bereich von 0,01 - 5 mV, die Temperaturabhängigkeit von  $U_o$  betrug weniger als 0,1 %/K,  $R \sim 0,08$  %/K, die Empfindlichkeit gegenüber dem Magnetfeld lag im Bereich von 80 - 500 mV/T. Die Linearität des Ausgangssignals im Feld bis zu 2 Tesla ist nicht schlechter als 0,1%.

Die Sensoren können in einem Temperaturbereich von 4,2 - 400 K arbeiten.

Es ist zum Beispiel bekannt, dass die Beständigkeit von Halbleiterbauelementen gegenüber Strahlung vom Dotierungsgrad, der Defektivität des Halbleitermaterials usw. abhängt. Die elektrophysikalischen Eigenschaften von Halbleitern werden am stärksten durch Neutronenbestrahlung beeinflusst. Die Neutronenbestrahlung hat den größten Einfluss auf die elektrophysikalischen Eigenschaften von Halbleitern. Der Mechanismus des Einflusses besteht hauptsächlich in der Bildung von Strukturdefekten und der radioaktiven Umwandlung von Atomen. Mit zunehmendem Dotierungsgrad wird der Einfluss der Bestrahlung abgeschwächt.

Die Eigenschaften der Sensoren wurden bei einer Temperatur von 300 K vor der Bestrahlung und nach der Bestrahlung mit Neutronenflüssen  $\Phi$  von  $8 \cdot 10^{14}$  cm<sup>-2</sup> bis  $1 \cdot 10^{17}$  cm<sup>-2</sup> gemessen. Die Temperatur wurde während der Messungen mit einer Genauigkeit von 0,1 K stabilisiert. Die Neutronenenergie betrug 1 MeV, die Flussintensität war  $(2-4) \cdot 10^8$  fl/s.

Abb. 3.5 zeigt die Abhängigkeit der relativen Änderung des Eingangswiderstands von Magnetfeldmesswandlern (Hall-Sensoren) vom Wert des Neutronenflusses  $\Phi$ . Der Eingangswiderstand der Sensoren beträgt 1,1 kOhm, das anfängliche Ausgangssignal ist nicht mehr als 4,5 mV, die Empfindlichkeit beträgt 350 mV/T.

Die Widerstandsänderungen beginnen bei Flüssen von  $1 \cdot 10^{15}$  cm<sup>-2</sup> und betragen 15-20 %, und bei  $1 \cdot 10^{16}$  cm<sup>-2</sup> erhöht sich der Widerstand um das 3,3-fache. Gleichzeitig änderte sich das ursprüngliche Ausgangssignal bei einer konstanten Versorgungsspannung von 4,5 V um nicht mehr als 15 %, was der Wirkung eines Magnetfeldes von bis zu 1 mT entspricht. Bei konstanter Versorgungsspannung nahm die Empfindlichkeit nach der Bestrahlung etwa um das 1,4-fache ab. Nach Bestrahlung mit Flüssen von  $1 \cdot 10^{17}$  cm<sup>-2</sup> wächst der Widerstand der Sensoren ins Unendliche.

So sind die Magnetfeldsensoren in einem breiten Temperaturbereich einsetzbar, haben eine schwache Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit und des anfänglichen Ausgangssignals (weniger als 0,1%). Die Nichtlinearität des Ausgangssignals überschreitet nicht 0,1% im Feld bis zu 2T, die Empfindlichkeit kann 500 mV/T erreichen.

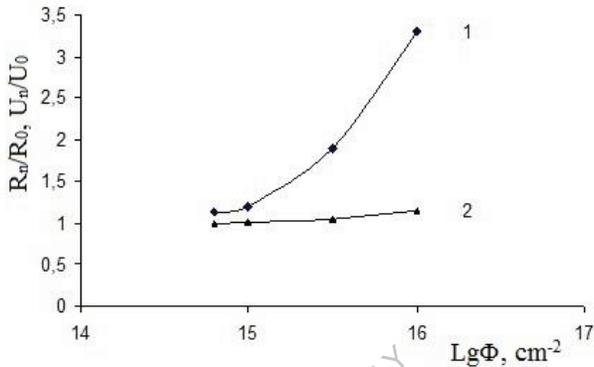


Abb. 3.5. Abhängigkeit der relativen Änderung des Eingangswiderstands  $R_n / R_0$  (1) (wobei  $R_n$  - Wert des Widerstands nach der Bestrahlung,  $R_0$  - Anfangswiderstand) und des Anfangsausgangssignals  $U_n/U_0$  (2) (wobei  $U_n$  - Wert des Ausgangssignals nach der Bestrahlung,  $U_0$  - Anfangsausgangssignal) des Magnetfeldmesswandlers vom Wert der Neutronenflussbestrahlung.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die entwickelten Wandler bei 300 K bis zu Neutronenbestrahlungsstärken von  $10^{15} \text{ cm}^{-2}$  funktionsfähig sind. Die sich daraus ergebenden Änderungen der Eigenschaften der Wandler bis zu Werten von  $1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$  können bis zu einem gewissen Grad erklärt werden, da eine gute Wiederholbarkeit der Ergebnisse beobachtet wurde. Die Wandler können sowohl für die Diagnostik von technischen Geräten der Kernkrafttechnik, kryogenen Anlagen als auch, aufgrund der hohen Empfindlichkeit, in der Ökologie zur Kontrolle von Umweltparametern, wie z.B. elektromagnetischen Feldern, eingesetzt werden.

***Einige Eigenschaften von experimentellen Magnetfeldsensoren (Hall-Sensoren) auf der Basis von GaAs-Filmen für kryogene Temperaturen und klimatische Bereiche:***

- Werkstoff - GaAs

- Betriebstemperaturbereich 4,2 - 400 K
- Versorgungsstrom 1 - 100 mA
- Empfindlichkeit 60 - 500 mV/T
- Anfangssignal innerhalb von 0,010 - 5 mV
- aktive Fläche des Sensors 100x100  $\mu\text{m}$
- Gesamtabmessungen - mindestens 1x1x0,4 mm

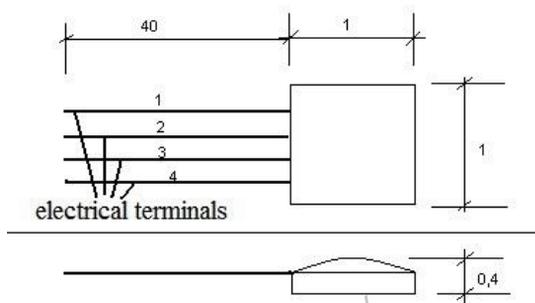


Abb. 3.6: Schematische Darstellung des Hallensors. Ausgänge: 1,4 - Versorgungsspannung (Strom); 2,3 - Ausgangsspannung ( $U_h$ )

### 3.4. Eine Reihe von Präzisions-Hall-EMK-Generatoren (Hall-Sensoren)

Die Forschungsergebnisse und Eigenschaften von hochpräzisen Hall-Sensoren auf der Basis von InSb und GaAs werden hier vorgestellt (Zhelamsky M.V., Gorbachuk N.T. et al.). Magnetische Messungen sind einer der wichtigsten Aspekte bei der Entwicklung elektrophysikalischer Geräte, die Magnetfelder nutzen. Die geringe Größe von Hall-EMF-Generatoren (HG) ist ein unbestreitbarer Vorteil gegenüber anderen Magnetometergeräten, deren breite Anwendung für magnetische Messungen in der Elektrophysik bestimmt.

Bei der Messung starker Felder ist eine der Hauptfehlerquellen der Einfluss der Temperatur auf das HG-Ausgangssignal, der vor dem Hintergrund eines relativ großen Ausgangssignals unbedeutend ist. Bei einem 2-Tesla-Feld kann das HG-Ausgangssignal beispielsweise 200 mV erreichen, während eine Temperaturänderung von 1°C das Ausgangssignal um einige Mikrovolt verändert. Außerdem ist der Temperatureinfluss bei solchen Signalen additiv zum Hauptsignal und kann methodisch kompensiert werden, insbesondere im kryogenen Bereich, wo flüssiges

Helium ein idealer Temperaturstabilisator ist und die Felder hoch genug sind. Bei der Messung starker Felder sollte besonders darauf geachtet werden, die Planar- und Gradientenkomponenten des HG-Ausgangssignals zu minimieren.

In schwachen Magnetfeldern, auf der Ebene der kleinen HG-Ausgangssignale, sind zusätzliche Fehlerquellen wie thermoelektrische (Seebeck-, Peltier-) Effekte, Eigenfeldeffekte, Eigenschaften und Homogenität des verwendeten Materials stärker ausgeprägt. Daher sind z. B. besondere Maßnahmen erforderlich, um die Magnetfeldverteilung in der Mittelzone eines Quadrupolmagneten zu messen.

In beiden Fällen ist die Minimierung des Fehlers, der Kalibrierung und der Richtwirkung ebenfalls wichtig.

Ziel der Arbeit war es, sowohl die ultimative absolute Empfindlichkeit von Hall-Generatoren bei der Messung schwacher Magnetfelder zu erreichen als auch die Genauigkeit und Stabilität bei der Messung starker Felder zu maximieren.

Es werden die Ergebnisse der Entwicklung von Magnetometergeräten auf der Grundlage von Hall-Generatoren zur Messung schwacher Magnetfelder auf der Ebene des Erdfeldes beschrieben, einschließlich der Optimierung des Designs, der Herstellungstechnologie und der elektrophysikalischen Eigenschaften von HGs sowie einer Reihe von Schaltkreisen, Design und methodischen Maßnahmen, die darauf abzielen, eine hohe Genauigkeit und absolute Empfindlichkeit der Messungen zu erreichen.

Die entwickelten Dreikomponenten-Magnetfeldsensoren werden ebenfalls beschrieben.

#### **Die wichtigsten Eigenschaften und Merkmale der entwickelten Geräte werden analysiert.**

Es wurden zwei Halbleitermaterialien verwendet - dotiertes Galliumarsenid (GaAs) und Indiumantimonid (InSb). Das erste wird verwendet, um eine maximale Temperaturstabilität und Linearität zu erreichen, das zweite, um eine maximale Empfindlichkeit der Messungen zu erreichen.

Um die Messgenauigkeit zu verbessern, wird eine optimale kreuzförmige Kristallform gewählt, wie in Abb. 3.7 dargestellt.



Abb. 3.7. Quarz (Chip) des Hall-Oszillators.

Die Abmessungen der aktiven Zone des Generators betragen  $100 \times 100 \mu\text{m}$  und können bei Bedarf weiter verkleinert werden. Die Bestimmung der Mittellage des Arbeitsbereichs erfolgt auf speziellen Geräten mit einer Genauigkeit von nicht schlechter als  $\pm 0,5 \mu\text{m}$ , die Bestimmung der Winkellage der Normalen zur HG-Ebene mit einer Genauigkeit von nicht schlechter als  $\pm 0,1^\circ$ .

Ein breiter Bereich von Eingangswiderstandsvariationen (5-1500 Ohm) bietet die Möglichkeit, den Nennstromwert innerhalb von 1-200 mA bei unveränderter magnetischer Empfindlichkeit zu wählen, um die erforderliche Auflösung und Geschwindigkeit von Magnetfeldmessungen zu erhalten.

Der Wert des anfänglichen HG-Offsets, der durch die Technologie bestimmt wird, beträgt  $-500 \mu\text{V}$ . Die Verringerung des Offsets auf einen Wert  $< 100 \mu\text{V}$  wird durch eine zusätzliche Justierung erreicht. Die Variation der Parameter in einer Charge beträgt nicht mehr als 10 %. Der Temperaturkoeffizient der anfänglichen Offsetspannung wird durch das HG-Design bestimmt und kann auf einen Wert von weniger als  $1-2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  gebracht werden.

Die aktive Thermostabilisierung des HG sorgt für eine Stabilität der Ergebnisse bei  $\pm 0,05 \text{ Gs}$  über 8 Stunden Betrieb. Der Betriebstemperaturbereich beträgt  $4,2-450 \text{ K}$ .

Bei Präzisions-HGs beträgt die magnetische Empfindlichkeit bei Nennversorgungsstrom  $8 \pm 2 \mu\text{V}/\text{Gs}$  für GaAs und  $25 \pm 3 \mu\text{V}/\text{Gs}$  für InSb. Die hohe absolute Empfindlichkeit der Messungen wird durch die Minimierung des HG- und Gerätauswechsels, durch geeignete Schaltungen und Konstruktionsmaßnahmen sowie durch einen speziellen Algorithmus erreicht.

Auf der Grundlage der beschriebenen HGs wurden thermostabilisierte Dreikomponenten-Baugruppen hergestellt. Jede Baugruppe besteht aus drei Einkomponenten-HGs, die auf den orthogonalen Ebenen des tragenden Kupferwürfels montiert sind. Ein Thermometer und ein Heizelement sind

auf den freien Flächen angebracht und dienen zur Stabilisierung der Temperatur der Baugruppe. Der Trägerwürfel auf der Leiterplatte ist mit einer externen Wärmeisolierung versehen und auf einem wärmeisolierenden Gestell montiert. Die wichtigsten Parameter der Dreikomponenten-HG-Baugruppen sind in Tabelle 3.1 aufgeführt.

Tabelle 3.1. Grundlegende Parameter von Dreikomponenten-HG-Baugruppen

Parameter	Value
Assembly size	Cube with a side of 7 mm
Accuracy of determining the spatial and angular coordinates of single-component GH	0.5 $\mu\text{m}$ , 0.1 corner radius
Rated supply current	30 mA
Assembly stabilization accuracy in the range $\pm$ - 60	No worse 0,05 $^{\circ}\text{C}$
Absolute sensitivity with special equipment	<1 mGs
Assembly dimensions without equipment	20x20x15 mm

### 3.5. Geschätzte Messungen von magnetischen Wechselfeldern in der Umwelt

Zahlreiche Arbeiten befassen sich mit dem Problem der Messung magnetischer und elektromagnetischer Wechselfelder. Eine Analyse der Literatur zeigt, dass die gängigsten Methoden zur Messung magnetischer Felder auf dem Phänomen der elektromagnetischen Induktion und dem Hall-Effekt beruhen.

Das Induktionsmessverfahren beruht auf dem Phänomen der elektromagnetischen Induktion, das darin besteht, dass in einem leitenden Kreis, der sich in einem Magnetfeld befindet, unter bestimmten Bedingungen eine elektromotorische Kraft (EMK) entsteht, die durch den bekannten Ausdruck bestimmt wird:

$$\varepsilon_i = -N d\Phi/dt \quad (3.11),$$

wobei  $N$  die Anzahl der Windungen im Stromkreis,  $\Phi$  der den Stromkreis durchdringende magnetische Fluss und  $t$  die Zeit ist.

Mit der Induktionsmethode lassen sich sowohl variable als auch konstante Magnetfelder messen.

Um permanente Magnetfelder zu messen, müssen ein oder mehrere Parameter der Induktionsspule (des Stromkreises) direkt über die Zeit

verändert werden: der Winkel  $\alpha$  zwischen der Senkrechten auf die Ebene des Stromkreises und dem Vektor der magnetischen Induktion, die Fläche des Stromkreises  $S$ , die relative magnetische Permeabilität des Kerns  $\mu_c$ , der Entmagnetisierungskoeffizient des Kerns  $k$ . Der Wert der EMK-Induktion für diese Bedingungen lässt sich durch den Ausdruck

$$\varepsilon_i = -N \left( X \frac{dB}{dt} + B \frac{dX}{dt} \right) \quad (3.12),$$

wobei  $X = S \cdot \mu \cdot \cos \alpha / [1 + N(\mu_c - 1)]$  der sogenannte verallgemeinerte Parameter der Induktionsspule ist, dessen Einzelheiten für diese Arbeit nicht von Bedeutung sind.

Die Genauigkeit der Messung von Magnetfeldern mit einem Induktionssensor hängt sowohl von den Konstruktionsmerkmalen des Sensors selbst als auch in hohem Maße vom Messschema und den Sekundärgeräten ab, die die Größe des Ausgangssignals bestimmen.

Dabei ist zu beachten, dass das gemessene Signal in der Praxis in der Regel keine korrekte Sinusform hat, sondern oft in Form von einzelnen Impulsen etc. vorliegt.

Das Wesen der Messmethode mit Hilfe von Hall-Wandlern (Sensoren) besteht in der Nutzung des Hall-Effekts, der im Auftreten von EMK  $\varepsilon_{hal}$  in der Richtung senkrecht zum Strom  $I$  in der Leiterplatte besteht, die im Magnetfeld  $B$  platziert ist. Bei einem konstanten Wert des Stroms in der Platte wird der Wert der EMK durch den Ausdruck bestimmt:

$$\varepsilon_{hal} = A \cdot I \cdot B / n \cdot e \cdot d \quad (3.13),$$

wobei  $A$  eine Konstante ist, die je nach den Mechanismen der Stromträgerstreuung innerhalb von 1...2 variiert,  $n$  die Konzentration der Stromträger im Plattenmaterial ist,  $e$  die Elektronenladung ist und  $d$  die Plattendicke ist.

Für die Herstellung von Hall-Wandlern werden Halbleitermaterialien verwendet, da bei ihnen der berücksichtigte Effekt von größter Bedeutung ist. In jüngster Zeit werden auch Halbleiter in Form von Schichten auf isolierenden Substraten verwendet, was die Herstellungstechnologie vereinfacht, eine Miniaturisierung ermöglicht usw.

Hall-Wandler auf der Basis von InSb und GaAs haben die höchste Empfindlichkeit. Darüber hinaus werden verschiedene technologische Methoden eingesetzt, um die Empfindlichkeit zu erhöhen: integriertes Design, Verwendung von ferromagnetischen Konzentratoren und andere.

Die experimentelle Bewertung der Werte magnetischer Wechselfelder in der Umgebung, die beim Betrieb verschiedener Haushalts- und

Industriegeräte entstehen, wurde mit einer hergestellten Induktionsspule und in einigen Fällen mit einem Hall-Wandler auf InSb-Basis durchgeführt.

Die Messungen mit Hilfe der Induktionsspule wurden nach deren Kalibrierung gemäß dem vereinfachten Anschlussschema durchgeführt. Während der Kalibrierung wurde die Spule in ein magnetisches Wechselfeld gebracht, das durch einen sinusförmigen Strom  $I$  im Leiter erzeugt wurde. Zu diesem Zweck wurde ein Wechselstromgenerator verwendet. Das Ausgangssignal der Spule wurde mit einem Wechselspannungsvoltmeter gemessen.

Die Größe des Magnetfeldes in einem bestimmten Abstand  $r$  vom Leiter wurde auf der Grundlage des Bio-Savard-Laplace-Gesetzes berechnet:

$$B = -N\mu\mu_0 I/2\pi r \quad (3.14),$$

wobei  $\mu$  die relative magnetische Permeabilität des Mediums,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Gn/m die magnetische Konstante ist.

Während der Kalibrierung wurden der Abstand zum Leiter, die Stärke des Stroms und seine Frequenz variiert. Die Ergebnisse wurden dann gemittelt und aufgezeichnet.

Abb. 3.8 zeigt die Abhängigkeit der resultierenden elektromotorischen Kraft in der Spule (mit einem Voltmeter gemessene Spannung  $U$ ) von der Frequenz des magnetischen Wechselfeldes (Strom im Leiter). Das Diagramm zeigt die Neuberechnung von  $U$  in Abhängigkeit vom Magnetfeld.

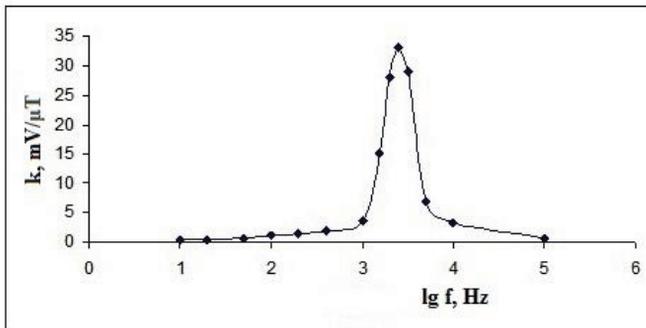


Abb. 3.8. Abhängigkeit der Empfindlichkeit  $k = \Delta U / \Delta B$  der hergestellten Induktionsspule von der Frequenz des Magnetfeldes  $f$ .

Bei der anschließenden praktischen Anwendung der Spule wurden das Ausgangssignal und seine Frequenz gemessen. Für die Graduierungen und die praktischen Messungen wurde dasselbe Voltmeter verwendet, da seine technischen Eigenschaften die erzielten Ergebnisse beeinflussen können. Anhand der erhaltenen Daten und der Kalibrierungskurve wurde der Wert des magnetischen Wechselfeldes bestimmt.

Für die Messungen mit dem InSb-basierten Hall-Wandler wurde ein ferromagnetischer Konzentrador verwendet. Dadurch lag die Empfindlichkeit bei etwa  $1 \cdot 10^4$  mV/T und kann durch konstruktive Verbesserungen erhöht werden. Die mit den Hall-Wandlern gewonnenen Daten stimmten mit den Messungen der Induktionsspule mit einer Genauigkeit von 20 % überein.

Die ermittelten Werte der magnetischen Wechselfelder, die von verschiedenen elektrischen Geräten ausgehen, sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst.

Tabelle 3.2. Ergebnisse der Messungen der Magnetfelder verschiedener Strahlungsquellen

<b>Object</b>	<b>Distance</b>	<b>Magnetic field value, <math>\mu</math>T</b>
Supra TV	1.5 m from the screen	1-2
	3.5 m from the screen	0.03
	1.5 m from the side	5
TV Slavutich (big screen)	3 m from the screen	4
	0,2 m from the side	50
computer monitor	0,1-0,2 m from the screen	3-5
high-voltage power line (110 kV)	70-100	2-5
in - off household appliances (iron, lamp)	0.1-1.0	up to 2 (pulses)

Die bestehenden Gesundheitsnormen für die zulässigen Werte von Magnetfeldern, die aus verschiedenen Quellen stammen, liegen bei Werten von 0,2-0,5  $\mu$ T. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass in der bekannten Literatur die Frequenzen der Strahlung nicht angegeben werden, obwohl sie

aus physikalischer Sicht auf biologische Objekte nicht in gleicher Weise einwirken können.

Trotz des eher vereinfachten Ansatzes stimmen die erzielten Ergebnisse recht gut mit anderen bekannten Literaturdaten überein. Dies erlaubt es uns, über die Möglichkeit zu sprechen, die beschriebenen Methoden für die Anzeige und Bewertung von elektromagnetischen Strahlungspegeln, die Schaffung von kostengünstigen (Haushalts-) Indikatoren für elektromagnetische Strahlung sowie die Schaffung von hochpräzisen Messgeräten auf der Grundlage von Hall-Wandlern zu verwenden.

### 3.6. Kfz-Hall-Sensor. Hall-Sensor in der Zündanlage

Hallsensoren sind derzeit in der Automobilindustrie weit verbreitet. Sie werden verwendet, um die Bewegung und Drehung verschiedener Komponenten des Fahrzeugs, Motorvibrationen, im Zündsystem und anderen zu kontrollieren.

Der wohl bekannteste ist der Hallsensor für Kraftfahrzeuge, der zur Steuerung und Gewährleistung des Betriebs der Zündanlage eines Autos verwendet wird. Das Schema dieses Geräts ist in Abb. 3.9 dargestellt.

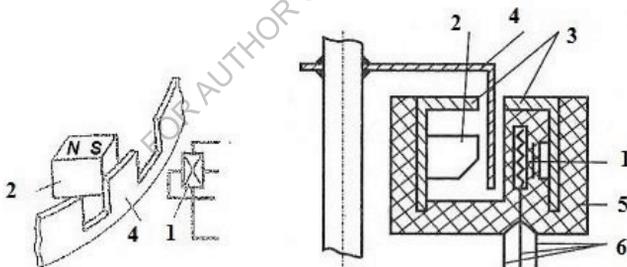


Abb. 3.9. Schematische Darstellung der Vorrichtung des Kfz-Hallsensors. 1 - empfindliches Element des Hallsensors, von dem die Leitungen zum Chip für die Verarbeitung des Ausgangssignals ausgehen, 2 - Permanentmagnet, 3 - magnetische Leiter, 4 - Rotorblätter, 5 - Kunststoffgehäuse, 6 - Leitungen vom Sensor.

Der Sensor besteht aus einem Sensorelement 1 (Hall-Sensor direkt) und einem darin integrierten Mikrocontroller 1 (Mikroschaltkreis zur Verarbeitung des Ausgangssignals des Hall-Sensors). Der Kfz-Hall-Sensor verfügt somit über drei Kontakte 6 (Klemmen) zum Anschluss an den Stromkreis (Schaltung) des Fahrzeugs. Der Kfz-Hall-Sensor für die

Zündanlage verfügt außerdem über einen Dauermagneten 2, der durch einen Spalt vom Sensorelement des Hall-Sensors getrennt ist, sowie über Magnetdrähte. Das Magnetfeld des Dauermagneten ist in der Lage, ein Ausgangssignal des Hallsensors zu induzieren, und die Metallflügel 4 der rotierenden Welle, die den magnetischen Fluss überlagern (überbrücken), führen zu einer entsprechenden Änderung (Oszillation) des Ausgangssignals. Außerdem wird das Ausgangssignal mit dem System der Zündfunkenversorgung zum gewünschten Zeitpunkt der Wellenposition verbunden.

### Wie überprüfe ich den Hall-Sensor?

Es gibt mehrere Möglichkeiten zu prüfen, ob der Hall-Sensor Ihres Fahrzeugs ordnungsgemäß funktioniert. Eine der einfachsten ist die folgende. Schließen Sie den Kfz-Hallsensor gemäß dem in Abb. 3.10 gezeigten Schema an. Der ausgebaute Hall-Sensor kann mit einer Krona-Batterie (9 V) betrieben werden. Um das Ausgangssignal (Spannung)  $V$  zu messen, verwenden Sie am besten ein kompaktes Digitalmultimeter. Wenn sich der magnetische Fluss durch das Sensorelement des Hallsensors ändert (z. B. durch Drehen der Rotorwelle oder einfach durch Überbrücken des Spalts mit einer Metallplatte), ändert sich auch das Ausgangssignal des Sensors, was auf seine Funktionsfähigkeit schließen lässt. Das Ausgangssignal kann je nach Sensormodell variieren, liegt aber normalerweise zwischen 0,5 und 1,0 V.

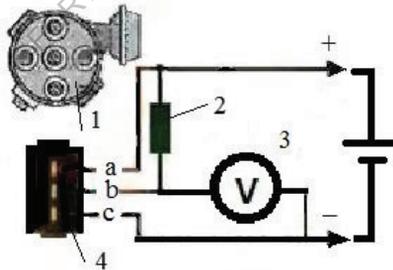


Abb. 3.10. Überprüfung des Hallsensors. Allgemeine chem. 1 - Verteilersensor, 2 - Widerstand von 2 kOhm, 3 - Voltmeter (Digitalmultimeter), 4 - Stecker des Verteilersensors (Hallsensor).

### 3.7. Magnetoresistive Wandler. Magnetoresistiver Effekt

Die Änderung des Magnetfeldwiderstands eines Leiters (Halbleiters), in dem ein elektrischer Strom fließt, wird als magneto-resistiver Effekt

bezeichnet. Die Zunahme des elektrischen Widerstands unter der Einwirkung eines Magnetfeldes tritt sowohl bei Senkrechtstellung des magnetischen Induktionsvektors zur Oberfläche von Halbleiterplatten (transversaler Magnetowiderstand) als auch bei Parallelstellung (longitudinaler Magnetowiderstand) auf. Allerdings ändert sich der Widerstand im zweiten Fall in der Regel nur unwesentlich.

Die Änderung des Halbleiterwiderstands in einem Magnetfeld  $B$  ist proportional zum Quadrat der Mobilität  $\mu$  der Stromträger:

$$\Delta\rho/\rho = c \mu^2 \cdot B^2 \quad (3.15),$$

wobei  $c$  der Proportionalitätskoeffizient für die Streuung der Ladungsträger ist.

In einer Halbleiterplatte, die sich in einem Magnetfeld befindet, wirkt auf die sich bewegenden Ladungsträger eine zum elektrischen Hall-Feld proportionale Lorentz-Kraft. Das Hall-Feld gleicht jedoch nur die Ladungsträger aus, die sich mit mittleren Geschwindigkeiten bewegen. In langsameren Medien ist das Hall-Feld größer, in schnellen Medien ist die Lorentz-Kraft größer. Die Flugbahn krümmt sich und die effektive freie Weglänge nimmt ab, was zu einem erhöhten Widerstand führt. Es liegt auf der Hand, dass der Widerstand umso größer ist, je kleiner der Hall-Effekt in einem Halbleiter ist. In einem Halbleiter mit zwei Arten von Ladungsträgern ist das Hall-Feld kleiner, so dass die Stromlinien nicht parallel zu den Flächen verlaufen und der Magnetowiderstandseffekt dementsprechend größer ist.

Um den Einfluss des Hall-Effekts zu eliminieren, kann man spezielle geometrische Formen von Proben in einem Halbleiter verwenden, bei denen eine Art von Ladungsträgern überwiegt. Das offensichtlichste Beispiel für den Einfluss der Struktur auf den Magnetowiderstandseffekt ist die Corbino-Scheibe, eine Halbleiterplatte mit einer konzentrischen Anordnung von Kontakten: einer in der Mitte und der zweite am Umfang in gleichen Abständen vom ersten. Legt man an die Elektroden einer solchen Scheibe eine Spannung an, so sehen die Flugbahnen der Elektronen wie radiale Strahlen aus, die vom Zentrum ausgehen. In einem Magnetfeld senkrecht zur Plattenebene werden die Ladungsträger entlang der Oberfläche abgelenkt, die Stromlinien werden verlängert, aber es kommt nicht zu einer Ladungshäufung, und die Hall-EMK tritt nicht auf. Bei dieser Struktur wird der maximale Magnetowiderstandseffekt beobachtet, aber aufgrund

technischer Schwierigkeiten ist die praktische Anwendung der Corbino-Platte sehr schwierig.

### 3.8. Entwürfe für Magnetwiderstände

Der Effekt der Erhöhung des Magnetowiderstands aufgrund der Widerstandsgeometrie kann auch in einem Halbleiterplättchen erzielt werden, dessen Länge  $L$  viel kleiner ist als seine Breite  $W$ . Wenn das Plättchen einem Magnetfeld ausgesetzt wird, dessen Richtung senkrecht zur Plättchenebene steht, wird die Hall-Spannung aufgrund des Shunt-Effekts der Stromelektroden abgeschwächt. Geometrisch ist der Magnetowiderstandseffekt in diesem Fall umso stärker, je kleiner das  $L/W$ -Verhältnis ist. Um den Effekt weiter zu verstärken, werden Widerstände mit einem kleinen  $L/W$ -Verhältnis angeschlossen.

Die Basis des Magnetowiderstandsmaterials ist in der Regel Indiumantimonid, das eine hohe Mobilität der Stromträger aufweist, dem 1,8 % NiSb zugesetzt wird. Nach dem Schmelzen und anschließendem Abkühlen kristallisiert Nickelantimonid in Indiumantimonid in Form von Nadeln mit einer Dicke von  $1 \mu\text{m}$  und einer Länge von etwa  $50 \mu\text{m}$ , die parallel zueinander und senkrecht zur Stromrichtung angeordnet sind. Die Leitfähigkeit der NiSb-Nadel beträgt etwa  $10^4 \text{ Ohm}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ , während die von InSb um zwei Größenordnungen geringer ist.

So spielen die Nadeln die Rolle von gut leitenden Elektroden, die die Masse des Halbleiters in separate Bereiche mit einem kleinen  $L/W$ -Verhältnis unterteilen. Dies führt zu einer starken Unterdrückung des Hall-Feldes und folglich zu einer Krümmung der Elektronenbahnen unter der Einwirkung des Magnetfeldes, d. h. zu einer Zunahme des Magnetowiderstandseffekts.

Eine andere Möglichkeit, dieses Prinzip auf der Grundlage der Mikroelektronik-Technologie zu realisieren. Sein Wesen liegt in der Bildung von Magnetowiderständen auf der Grundlage eines epitaktischen Siliziumfilms, der Shunt-Abschnitte aus polykristallinem Silizium (PS) mit geringem Widerstand enthält, die senkrecht zur Stromrichtung angeordnet sind.

Die Herstellungstechnologie für ein solches magneto-resistives Material basiert auf dem gleichzeitigen Wachstum von mono- und polykristallinen Siliziumschichten (PS). Mittels Oxidations- und

Fotolithographieprozessen werden lokale SiO<sub>2</sub>-Bereiche gebildet, in denen PC-Schichten während des epitaktischen Schichtwachstums wachsen.

Um die Hall-EMK zu schließen, werden die PS-Bereiche mit Phosphoratomen bis zu einer Konzentration von  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  dotiert, und unter Berücksichtigung der höheren Diffusionsrate der Dotieratome in PS im Vergleich zu einkristallinem Silizium erfolgt die Dotierung gleichzeitig mit dem Prozess der Filmerzeugung in einkristallinen n<sup>+</sup> - Bereichen unter ohmschen Kontakten.

### Literaturverzeichnis

1. O.K.Homeriki. *Poluprovodnikovye preobrazovateli magnitnogo polya* [Halbleiter-Wandler des Magnetfeldes]. M.- *Energoatomizdat*, 1986, 136 pp.

2. Vikulin I.M., Stafeev V.I. *Fizika poluprovodnikovykh priborov* [Physik der Halbleiterbauelemente]. M.: *Radio i svyaz'*, 1990. 264 p.

3. Belyakov V.A., Gorbachuk N.T., Didenko P.I., Filatov O.G., Sychevskiy S.E., Firsov A.A. etc. *Poluprovodnikovye izmeritel'nye preobrazovateli deformatsii, temperatury i magnitnogo polya dlya primeneniya v usloviyakh radiatsionnogo vozdeystviya, shirokom diapazone temperatur i magnitnykh poley* [Halbleiter-Messwandler der Verformung, der Temperatur und des magnetischen Feldes für den Einsatz unter den Bedingungen der Strahlenbelastung, eines breiten Bereichs von Temperaturen und magnetischen Feldern]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*", Seriya: Elektrofizicheskaya apparatura, v.3(29), 2005, p.46-54.

4. N.Gorbachuk, M.Larionov, A.Firsov, N.Shatil *Semiconductor Sensors for a Wide Temperature Range. Sensors & Transducers Journal and Magazine*, Vol. 162, Issue 1, January 2014, pp.1-4.

5. Kulakov V.M., Ladygin E.A., Shekhovtsov V.I. et al. *Deystvie pronikayushchey radiatsii na izdeliya elektronnoy tekhniki*. Moskva [Einwirkung durchdringender Strahlung auf Produkte elektronischer Geräte]. Moskva: *Sov. radio*, 1980. 224 p.

6. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Izmeritel'nye preobrazovateli na osnove GaAs, polikremniya i dispersnogo germaniya i perspektivy ikh ispol'zovaniya* [Messwandler auf der Basis von GaAs, Polysilizium und dispergiertem Germanium und Perspektiven für ihre Verwendung]. *Perspektivnye materialy*, 2004, N 5, S.93-97.

7. Gorbachuk N.T., Didenko P.I. *Vliyanie neytronnogo oblucheniya na kharakteristiki poluprovodnikovyykh izmeritel'nykh preobrazovatelye temperature, deformatsii, magnitnogo polya* [Der Einfluss von Neutronenbestrahlung auf die Eigenschaften von Halbleiter-Messwandlern von Temperatur, Dehnung und Magnetfeld]. *Poverkhnost'*, 2005, 4, S.57-58.

8. Henrichsen K. N. Klassifizierung von magnetischen Messmethoden //CERN acceleration schol. Magnetische Messung und Ausrichtung. Montreux. Switzerland. March, 1992 , p.70-83.

9. Berkes B. Hall-Generatoren //CERN acceleration schol. Magnetische Messung und Ausrichtung. Montreux. Switzerland. March, 1992 , p.167-192.

10. Afanasyev Yu. V., Sludentsov N. V., Shchelkin A. P. *Magnitometricheskie preobrazovately, pribory, ustanovki*. L.: [Magnetometrische Messwandler, Geräte, Anlagen]. L.: *Energiya. Leningradskiy filial*. 1972.- 272p.

11. Knoopers H. G. et.al. Third round of the ITER strand bench mark test // Proceedings of EUCAS-97. P. 1271-1274.

12. Zhelamskii M.V., Sychevskii S.E., Filatov O.G., Gorbachuk N.T. et al. *Ryad pretzionnykh generatorov E.D.S. Kholla* [A Range of Precision E.D.S. Hall Oscillators]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Elektrofizicheskaya apparatura*, v. 1(27), 2002, pp.9-14.

13. V.V.Panin, B.M.Stepanov. *Izmerenie impul'snykh magnitnykh i elektricheskikh poley* [Measurement of Pulsed Magnetic and Electric Fields]. - Moskva: *Energoatomizdat*, 1987. - 120 p.

14. I.A.Bolshakova, M.R.Gladun, R.L.Golyaka und andere. *Mikroelektronnye sensornye ustroystva magnitnogo polya: Monografiya / Pod red. Z.Ya. Gotri* [Mikroelektronische Sensorgeräte des Magnetfeldes: Monographie / Herausgegeben von Z.Y. Gotry]. - L'vov: *Izdatel'stvo Natsional'nogo universiteta "L'vovskaya politekhnika"*, 2001. - 412 p.

15. Gorbachuk N.T., Firsov A.A.. *Datchiki magnitnogo polya (datchiki Kholla) na osnove plenok GaAs* [Magnetfeldsensoren (Hall-Sensoren) auf Basis von GaAs-Filmen].

Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Perspektivnye innovatsii v nauke, obrazovanii, proizvodstve i transporte '2010" [Internationale wissenschaftliche und praktische Konferenz "Perspektivische Innovationen in Wissenschaft, Bildung, Produktion und

Transport '2010']. *Sbornik nauchnykh trudov*, vol.6, pp.24-25, June 21-30, 2010, Odessa.

16. N.T. Gorbachuk, P.I. Didenko. *Otsenochnye izmereniya peremennykh magnitnykh poley v okruzhayushchey srede* [Geschätzte Messungen von magnetischen Wechselfeldern in der Umwelt]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Nauchnye issledovaniya i ikh prakticheskoe primeneniye. Sovremennoe sostoyaniye i puti razvitiya '2010"* [Internationale wissenschaftliche und praktische Konferenz "Wissenschaftliche Forschung und ihre praktische Anwendung. Moderner Staat und Wege der Entwicklung '2010']. *Sbornik nauchnykh trudov*, vol.3,p.40-41, October 4-15, 2010, Odessa.

17. Amoskov V.M., Vasiliev V.N., Gorbachuk N.T., Sychevsky S.E. et al. *16. Pretsizionnyy trekhkomponentnyy magnitometr na generatorakh e.d.s. Kholla dlya izmereniya slabykh magnitnykh poley* [Präzisions-Dreikomponenten-Magnetometer auf Hall-e.d.s.-Generatoren zur Messung schwacher Magnetfelder] // *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroskopie und Navigation], Nr. 4(31), 2000. p. 56.

18. Filatov, O.G.; Soldatenkov, V.A.; Sychevskiy, S.E.; Gorbachuk, N.T., et al. *Sistema elektromagnitnogo pozitsionirovaniya dlya sistemy pritselivaniya i indikatsii, ustanovlennoy na shleme* [Electromagnetic Positioning System for Helmet Mounted Targeting and Indication System]. *Elektronika: Nauka, tekhnologii, biznes.* [Elektronik: Wissenschaft, Technik, Wirtschaft]. 5/2003, p.62-67.

19. Filatov O.G., Sychevskiy S.E., Gorbachuk N.T., et al. *Razrabotka pretsizionnykh datchikov fizicheskikh velichin na osnove optimizirovannykh magnitnykh tsepey* [Entwicklung von Präzisionssensoren physikalischer Größen auf der Grundlage optimierter Magnetkreise]. *Nauchno-tekhnicheskyy zhurnal "Aviakosmicheskoe priborostroeniye"* [Wissenschaftliche und technische Zeitschrift "Aviakosmicheskoe Instrument Engineering"], 2004, N 5, S. 7-13.

20. Zhelamskiy M.V., Konstantinov A.B., Sychevskiy S.E., Gorbachuk N.T., et al. *Odnokomponentnyy pervichnyy preobrazovatel', odnokomponentnyy datchik, trekhkomponentnyy pervichnyy preobrazovatel' i trekhkomponentnyy datchik magnitnogo polya, rabotayushchie na effekte Kholla.* [Ein-Komponenten-Primärwandler, Ein-Komponenten-Sensor, Drei-Komponenten-Primärwandler und Drei-Komponenten-

Magnetfeldsensor, der nach dem Hall-Effekt arbeitet]. Russische Föderation Patent №2001115570.

21. Gorbachuk N.T., Mitin V.V. Thorik Yu.A. Schwartz Yu.M. Piezo-Hall effect in p-germanium. Phys. Stat. Sol.(c) 100. 1980, p.309.

22. Gorbachuk N.T. *Chuvstivitel'nost' magnitosoprotivleniya i khollovskoy podvizhnosti v slabolegirovannom p-Ge k izmeneniyu kontsentratsii primesi* [Empfindlichkeit des Magnetowiderstands und der Hall-Mobilität in leicht dotiertem p-Ge gegenüber Änderungen der Störstellenkonzentration]. *UFZh*, 1984, Nr. 6, S.92.

23. Gorbachuk N.T., Shvarts Yu.M. *Vliyanie deformatsii na velichinu magnitosoprotivleniya v ob "emnom p-Ge i plenkakh p-Ge na arsenide galliya* [Auswirkung der Verformung auf die Größe des Magnetowiderstandes in bulk p-Ge und p-Ge Filmen auf Galliumarsenid]. *OPT*, 1984, Nr. 6, S. 88.

24. Mykola Gorbatschuk. ELEKTROTECHNISCHE MATERIALIEN. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, London, N2 9ED, Vereinigtes Königreich, 2024, 112 S. ISBN: 978-620-3-46212-8.

25. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Halbleiter].- L. Nauka 1967. 439p.

26. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki: Navchal'niy posibnik* [Allgemeiner Kurs der Physik: Studienführer], T. 1-3. - K.: Tekhnika, 2001.

27. Baranochnikov M.L. *Mikromagnitoelektronika* [Mikromagnitoelektronika]. Tom 1. DMK.-M.:2001.

## Kapitel 4. Luftfeuchtigkeit, Gase. Methoden zur Messung der Luftfeuchtigkeit. Hygrometer

Die Luft um uns herum enthält eine gewisse Menge an Wasserdampf (Wassermoleküle). Die maximal mögliche Menge an Wasserdampf in der Luft (Sättigung der Luft mit Wasserdampf) hängt von der Temperatur ab. Die Anzahl der Moleküle im Sättigungswasserdampf nimmt mit steigender Temperatur zu. Sättigungswasserdampf bildet sich beispielsweise an der Wasseroberfläche, wenn die Temperaturen von Wasser und Luft gleich sind - es stellt sich ein Gleichgewicht ein: die Anzahl der verdampfenden Wassermoleküle ist gleich der Anzahl der kondensierenden Moleküle.

Im Allgemeinen enthält normale Luft bei einer bestimmten Temperatur keinen sättigenden Wasserdampf. Wenn sich jedoch die Lufttemperatur ändert (z. B. nachts), kann ungesättigter Wasserdampf in sättigenden Wasserdampf übergehen - der Taupunkt. Der Taupunkt ist die Temperatur, bei der der Wasserdampf in der Luft sättigend wird.

Je nach Höhe des Wasserdampfgehalts wird die Luft durch die Luftfeuchtigkeit charakterisiert. Die absolute Luftfeuchtigkeit  $\rho$  ist die Menge an Wasserdampf, die in 1 Kubikmeter bei einer bestimmten Temperatur enthalten ist. Die relative Luftfeuchtigkeit  $f$  ist das Verhältnis zwischen der absoluten Luftfeuchtigkeit und der Wasserdampfmenge  $\rho_o$ , die erforderlich ist, um 1 Kubikmeter Luft bei einer bestimmten Temperatur zu sättigen (d. h. die Menge, die der Taupunktbedingung bei einer bestimmten Temperatur entspricht. Der Wert von  $\rho_o$  ist den entsprechenden Tabellen zu entnehmen):

$$f = (\rho/\rho_o)100\% \quad (4.1).$$

Instrumente zur Messung der Luftfeuchtigkeit werden als Hygrometer bezeichnet. Derzeit werden hauptsächlich die folgenden Methoden und Instrumente zur Messung der Luftfeuchtigkeit verwendet.

### 4.1. Hygrometer

**Taupunkt-Hygrometer.** Ein kleiner Spiegel, der gekühlt wird (z. B. durch ein Peltier-Element), wird in den Strom des zu untersuchenden Gases gestellt. Mit Hilfe einer Fozelle, die die Bildung von Tau auf dem Spiegel erkennt, wird seine Temperatur geregelt. Nach der Messung der Temperatur wird der Taupunkt bestimmt. Es gibt Hygrometer, die anstelle eines Spiegels Elektroden verwenden, deren Leitfähigkeit sich durch die Beschlagsbildung ändert.

**Psychrometer.** Ein Instrument, das aus zwei Thermometern besteht, einem befeuchteten und einem normalen. Durch Analyse der Differenz der Thermometerwerte wird der Taupunkt bestimmt. Je geringer die Sättigung der Luft mit Wasserdampf ist, desto intensiver verdunstet Wasser von der Oberfläche des befeuchteten Thermometers und desto niedriger ist seine Temperatur und desto größer ist der Unterschied zwischen den Messwerten der beiden Thermometer.

**Elektrolyse-Hygrometer.** Ein gemessener Luftstrom (Gas) wird an Platinelektroden mit Phosphorpentoxid vorbeigeführt, das Wasser absorbiert. Wenn eine Spannung an die Elektroden angelegt wird, zerfällt das Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff. Der Elektrolysestrom ist proportional zur absorbierten Wassermenge, d. h. zur absoluten Feuchtigkeit.

**Infrarot-Hygrometer.** Durch Messung der Absorption von Infrarotstrahlung wird die absolute Luftfeuchtigkeit bestimmt.

**Elektrische Hygrometer mit einer leitfähigen Folie.** Je nach der Menge des absorbierten Wasserdampfs ändert sich der elektrische Widerstand der leitfähigen Folie. Nach Kalibrierung des Films kann die absolute Feuchtigkeit des untersuchten Gases bestimmt werden.

**Haar-Hygrometer.** In solchen Hygrometern wird die Dehnung von entfettetem menschlichem Haar gemessen und die Luftfeuchtigkeit bestimmt. Die Dehnung unter dem Einfluss der Luftfeuchtigkeit kann bis zu 2,5 % betragen.

**Hygrometer mit einem bimorphen Element.** Die Grundlage eines solchen Hygrometers ist eine Metallspiralfeder, die auf einer Seite mit einer feuchtigkeitsabsorbierenden Substanz überzogen ist. Unter dem Einfluss von absorbiertem Wasser dehnt sich die Substanz aus und verändert die geometrischen Parameter der Feder. Durch Kalibrierung ist es möglich, die Luftfeuchtigkeit (Gas) zu bestimmen.

**Leitfähiges Film-Hygrometer.** Das von bestimmten Materialien absorbierte Wasser kann die elektrophysikalischen Eigenschaften dieser Materialien beeinflussen. Dieses Phänomen ist die Grundlage des Leitschicht-Hygrometers. Je nach dem Feuchtigkeitsgehalt der Luft (des Gases) in Hygrometern mit leitfähiger Folie ändert sich der elektrische Widerstand der Folie - des empfindlichen Elements des Hygrometers -.

Diese Art von Hygrometer misst die relative Luftfeuchtigkeit, was einer der Hauptvorteile ist, da die relative Luftfeuchtigkeit nur sehr wenig

von der Temperatur abhängt. Der Nachteil ist, dass jedes Hygrometer kalibriert werden muss und die Kalibrierung nicht sehr stabil ist. Die Kalibrierung kann sich aufgrund von Ionenablagerungen auf der Folie verschieben, wenn diese mit Staub und anderen Gasbestandteilen in Berührung kommt. Darüber hinaus hat das Hygrometer keine hohe Ausgangssignalleistung, was ebenfalls ein Nachteil ist. Die Signalleistung des Hygrometers kann durch Vergrößerung des Sensorelements erhöht werden, aber gleichzeitig verliert es an Geschwindigkeit und es tritt eine Hysterese auf.

Ein Leitschichthygrometer besteht aus einem Sensorelement - einer Schicht aus einer hygroskopischen Substanz, die auf ein isolierendes Substrat aufgebracht ist. Oxide einiger Metalle und anderer Materialien werden häufig als hygroskopische Substanz (Hygrometer-Sensorelement) verwendet. Die elektrischen Kontakte werden in der Regel in Form von Kämmen hergestellt. Mit zunehmender Feuchtigkeit des Gases und dementsprechend auch des Sensorfilms nimmt dessen elektrischer Widerstand ab. Die Abhängigkeit ist in den meisten Fällen exponentiell.

Ein Hygrometer mit einer leitfähigen Folie hat eine ausreichend geringe Trägheit und wird häufig zur Bestimmung kleiner Werte der Luft(gas)feuchtigkeit verwendet.

#### **4.2. Resistive Gasanalyse. Messwertgeber für die Gaskonzentration**

**Ein resistiver Sauerstoffkonzentrationsmesswertgeber**, wie z. B. ein Messwertgeber auf Titanoxidbasis, kann als Grundlage für einen Abgasanalysator (Sensor) dienen. Titanoxid ist eine Substanz, deren Widerstand je nach der Anzahl der an ihrer Oberfläche adsorbierten Sauerstoffmoleküle variiert.

Der Messwertaufnehmer besteht beispielsweise aus Platindraht oder einem Dünnschichtwiderstand, dessen Oberfläche mit Titanoxid beschichtet ist. Je nach Sauerstoffgehalt des Abgases ändert die Titanoxidschicht ihren Widerstand und damit den Gesamtwiderstand des Geräts.

Andere Stoffe werden in resistiven Gasanalysatoren verwendet, um den Gehalt an anderen Gasen zu bestimmen. Es gibt auch resistive Messwandler für den Nachweis von Propan und Methan. Widerstandsmesswandler haben in der Regel zwei Sensorelemente, von denen eines mit einer Substanz beschichtet und das andere unbeschichtet ist.

Dieses wird als Temperatenausgleichselement verwendet, wenn der Messwertaufnehmer in eine Brückenschaltung eingebunden ist.

Es gibt resistive Gasanalysatoren und Gassensorelemente, die auf ihrer Empfindlichkeit gegenüber Veränderungen der thermophysikalischen Eigenschaften der umgebenden Gase basieren.

Zum Beispiel ein Sensorelement, das auf der Änderung des elektrischen Widerstands von Metallen mit der Temperatur beruht. Das empfindliche Element eines solchen Messwertaufnehmers (Katarometer) besteht aus einem ausreichend langen Metalldraht, der an eine elektrische Spannungsquelle angeschlossen ist. Der Draht befindet sich in der Strömung des analysierten Gases. Die Stromstärke, die den Draht erwärmt, wird mit hoher Genauigkeit gesteuert. Wenn sich die Konzentration des umgebenden Gases ändert, ändert sich auch die Wärmeleitfähigkeit des Gases entsprechend. Infolgedessen ändert sich der Wärmeübergang zwischen dem Draht und dem umgebenden Gas. Entsprechend ändern sich die Temperatur des Drahtes und sein elektrischer Widerstand. Dies führt zu einer Änderung des Wertes des elektrischen Stroms, der von der Messeinrichtung erfasst wird.

### **Literaturverzeichnis**

1. Jan F. Kreider. *Handbook of Heating, Ventilation, and Air Conditioning*. -Taylor & Francis, 2019, 680 S.

2. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki: Navchal'niy posibnik* [Allgemeiner Kurs der Physik: Studienführer], T. 1-3. - K.: Tekhnika, 2001.

3. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Halbleiter]. - L. Nauka 1967. 439p.

4. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Verzeichnis "Messungen in der Industrie"] 1-3 Bände. M.: Metallurgiya, 1990.

## Kapitel 5. Licht. Messwandler, Fotozellen

### 5.1. Lichtleitfähigkeit

Während bei Metallen die Leitfähigkeit bei verschiedenen Temperaturen beobachtet wird, entsteht die Leitfähigkeit von Halbleitern unter normalen Bedingungen nur durch Wärmebewegung. Es ist jedoch möglich, Bedingungen zu schaffen, die das Auftreten von Leitfähigkeit in einem Halbleiter gewährleisten, ohne seine Temperatur zu erhöhen. Da die elektrische Leitfähigkeit des Halbleiters nur dadurch entsteht, dass die Elektronen in die Leitungszone fallen, reicht es aus, den Elektronen die nötige Energie zu geben, um sie in die freie Zone zu werfen, damit Leitfähigkeit entsteht. Diese Energie erhalten die Elektronen unter normalen Bedingungen von anderen Teilchen, die an der thermischen Bewegung beteiligt sind, aber die Energie kann auch von außen kommen, insbesondere zum Beispiel in Form von Strahlung.

Bereits im letzten Jahrhundert wurde entdeckt, dass sich der Widerstand eines Selenstabs je nach Beleuchtung drastisch verändert. Sorgfältige Studien haben gezeigt, dass der Widerstand von Selen mit der Beleuchtung abnimmt.

Später wurde festgestellt, dass diese Eigenschaft nicht nur Selen, sondern auch einige andere Halbleiter besitzen. Das Aufkommen quantenmechanischer Konzepte ermöglichte es, dieses Phänomen zu erklären, das in der Wissenschaft als Photoleitfähigkeit oder interner Photoeffekt bezeichnet wurde.

Die physikalische Natur der Lichtleitfähigkeit ist wie folgt. Bei einer bestimmten Temperatur befindet sich in einem abgedunkelten Halbleiter eine gewisse Anzahl von Elektronen  $n$  in der freien Zone. Diese Elektronen sind für die normale elektrische Leitfähigkeit der Substanz verantwortlich, die auch als dunkle Leitfähigkeit bezeichnet wird. Wird der Halbleiter nun mit Licht bestrahlt, so erscheint in der freien Zone zusätzlich zu den zuvor dort vorhandenen dunklen Elektronen eine neue Anzahl  $n_1$  von Lichtelektronen, und die Gesamtzahl der Elektronen in der Zone wird gleich  $n + n_1$ . Die elektrische Leitfähigkeit nimmt in diesem Zusammenhang zu und wird gleich:

$$\sigma = neU + n_1 eU_1, (5.1)$$

wobei der erste Summand der Dunkelleitung entspricht und der zweite - der Lichtleitfähigkeit,  $e$  - Elektronenladung,  $U$  - Beweglichkeit der Stromträger (Elektronen).

Aus den allgemeinen Vorstellungen über die Natur von Halbleitern wird der Grund für das Auftreten von Photoelektronen in der freien Zone deutlich. Es besteht kein Zweifel daran, dass der Lieferant sowohl der dunklen als auch der hellen Elektronen in einem verunreinigungsfreien Halbleiter eine gefüllte Zone ist. Es ist klar, dass diese und andere Elektronen nur deshalb in die freie Zone gelangt sind, weil sie die notwendige Energie erhalten haben, um die verbotene Zone zu überwinden

" mit einer Breite von  $\Delta E$ . Folglich ist die Photoleitfähigkeit dadurch entstanden, dass die Photonen, die auf die Oberfläche des Halbleiters fallen und von ihm absorbiert werden, ihre gesamte Energie an die Photoelektronen abgegeben haben. Jedes Photon trägt eine Energie  $h\nu$ . Wenn diese Energie größer als die Energie  $\Delta E$  oder zumindest gleich groß ist, kann das Elektron aus der gefüllten Zone in die Leitungszone wandern. Daraus folgt eine unabdingbare Konsequenz: Photoleitfähigkeit ist möglich, wenn  $h\nu > \Delta E$  ist. Somit gibt es für jede lichtempfindliche Substanz eine andere Grenze der Lichtleitfähigkeit, die der folgenden Bedingung entspricht:

$$h\nu_0 = \Delta E \quad (5.2).$$

Wenn die Frequenz  $\nu$  der auf den Halbleiter auftreffenden Strahlung kleiner als  $\nu_0$  ist, tritt keine Lichtleitfähigkeit auf.

Nur Strahlung mit einer Frequenz  $\nu > \nu_0$  kann Lichtleitfähigkeit erzeugen.

Die Grenze des Photoeffekts (rote Grenze), d. h. der Wert von  $\nu_0$ , hängt von dem Halbleiter selbst ab, in dem der Photoeffekt beobachtet wird, ob er frei von Verunreinigungen ist oder nicht.

Die Photoleitfähigkeit oder der interne Photoeffekt tritt nicht bei allen Halbleitern auf. Unabhängig davon ist die Absorption der auf die Materie einfallenden Strahlung eine unabdingbare Voraussetzung für das Entstehen von Lichtleitfähigkeit. Nur in diesem Fall kann der Photoeffekt im Prinzip entstehen.

Experimente von Physikern haben ergeben, dass sich Photoelektronen in ihrem Verhalten nicht von thermischen Elektronen unterscheiden, bis hin zur fast vollständigen Übereinstimmung ihrer Beweglichkeit.

Eine sorgfältige Untersuchung des internen Photoeffekts hat gezeigt, dass die Widerstandsänderung bei verschiedenen Stoffen unter der

Einwirkung von Strahlung mit unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung auftritt: Bei einigen Stoffen wird sie beobachtet, wenn der Stoff mit ultravioletten Strahlen beleuchtet wird, bei anderen - wenn er mit sichtbaren oder infraroten Strahlen beleuchtet wird.

Die durch das Licht freigesetzten Elektronen befinden sich nur für eine sehr kurze Zeit in der freien Zone. Während dieser Zeit wandern sie in den interatomaren Lücken und bewegen sich bei einem Potenzialunterschied zwischen zwei Punkten des Halbleiters hauptsächlich in eine Richtung, wodurch ein elektrischer Strom entsteht. Die Fotoelektronen wandern dann zu niedrigeren Verunreinigungsniveaus oder in die gefüllte Zone. Bei kontinuierlicher Beleuchtung des Halbleiters treten jedoch immer mehr Fotoelektronen auf, und gleichzeitig kehrt eine gewisse Anzahl von ihnen zurück. Infolgedessen stellt sich ein dynamisches Gleichgewicht ein, d. h. die Zahl der entstehenden Fotoelektronen entspricht der Zahl der zurückkehrenden Elektronen.

Im freien Zustand befinden sich die Photoelektronen nur für eine sehr kurze Zeit (in der Größenordnung von  $10^{-3}$  bis  $10^{-7}$  Sekunden) im freien Zustand. Aber während dieser kurzen Lebenszeit sind sie vollwertige Leitungselektronen. Halbleitersubstanzen erhöhen ihre elektrische Leitfähigkeit nicht nur durch die Einwirkung von Strahlung erheblich. Jedes andere Teilchen, das in das Atom eindringt und seine gesamte Energie an das Elektron abgibt, ist im Prinzip in der Lage, das Elektron in einen freien Zustand zu versetzen. Und in der Tat haben zahlreiche, wiederholte Experimente gezeigt, dass die Leitung auch dann stattfindet, wenn die Oberfläche einer Substanz mit schnellen Elektronen, Alphateilchen, Protonen und anderen Teilchen beschossen wird. Es ist klar, dass dazu die Energie des beschossenen Teilchens größer sein muss als die Energie des Übergangs des Elektrons in den freien Zustand.

In Halbleitern ist die Konzentration der Leitungselektronen bei Raumtemperatur viel geringer als in Metallen, und die Zahl der unter Lichteinfluss auftretenden Photoelektronen ist relativ groß. Bei geeigneter Beleuchtung kann in einigen Substanzen, wie z. B. Cadmiumsulfid (CdS), die Zahl der Photoelektronen die Zahl der dunklen Leitungselektronen um vier Größenordnungen übersteigen. Bei anderen, weniger lichtempfindlichen Substanzen kann die Zahl der Fotoelektronen, selbst bei nicht zu intensiver Bestrahlung, 20-30 % der Gesamtzahl der

Leitungselektronen erreichen. Diese Eigenschaft einiger Halbleiter macht sie in verschiedenen Umwandlungstechnologien wichtig und notwendig.

## 5.2. Der Photoeffekt der Begrenzungsschicht

In Abschnitt 5.1 wurde gezeigt, dass unter der Einwirkung von absorbiertem Licht Elektronen aus der gefüllten Zone in die freie Zone wandern können, wodurch Photoleitfähigkeit entsteht. In diesem Fall findet nur eine zusätzliche Leitung im Halbleiter statt, aber es werden keine intrinsischen elektromotorischen Kräfte erzeugt. Ein anderes Phänomen ist jedoch offen und bekannt - das Auftreten elektromotorischer Kräfte als Folge der Beleuchtung des Halbleiters. Wenn wir beispielsweise den Halbleiter einer ungleichmäßigen Beleuchtung aussetzen, so dass einige Teile der Probe viel stärker und andere viel schwächer beleuchtet werden, ist es in einigen Fällen möglich, einen Potenzialunterschied zwischen hellen und dunklen Bereichen zu erkennen. Dieses Phänomen lässt sich dadurch erklären, dass die Elektronen im Moment der Beleuchtung in größerer Zahl von den beleuchteten zu den dunklen Bereichen diffundieren als in umgekehrter Richtung. Diese bevorzugte Diffusion führt dazu, dass die dunklen Bereiche im Falle des elektronischen Leitmechanismus allmählich negativ geladen werden, während die hellen Bereiche positiv geladen werden. Infolgedessen bildet sich im Inneren des Halbleiters ein allmählich zunehmendes elektrisches Feld, das schließlich einen Gleichgewichtszustand herstellt, der dadurch gekennzeichnet ist, dass die elektronischen Flüsse in beide Richtungen gleich sind.

Wenn sich das Gleichgewicht einstellt, besteht zwischen dem hellen und dem dunklen Teil des Halbleiters ein gewisser Potenzialunterschied von bis zu einem Zehntel Volt.

**Die Wirkung von Licht auf den Halbleiter äußert sich außerdem im so genannten Sperrschichtphotoeffekt.**

Wenn wir die in Abb. 5.1 gezeigte Struktur schaffen, ist es möglich, den Photoeffekt der Sperrschicht experimentell zu beobachten.

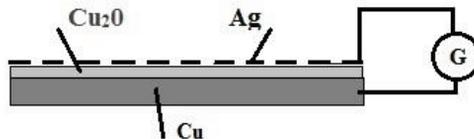


Abb. 5.1. Photoeffekt der Sperrschicht. Schematische Darstellung des Materialaufbaus

Wenn wir eine Kupferplatte Cu oxidieren und darauf eine Schicht aus Kupferoxid  $\text{Cu}_2\text{O}$  bilden, erhalten wir einen klassischen Halbleiter. Dann legen wir eine dünne Silberschicht auf den Halbleiter  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Die dünne Silberschicht wird für Licht durchlässig sein. Wenn wir ein Galvanometer zwischen der Silberschicht und einer Kupferplatte anschließen (siehe Abb. 5.1), fließt ein Strom im Stromkreis, wenn die versilberte Oberfläche beleuchtet wird. Dieses Phänomen wird durch das Vorhandensein einer so genannten Sperrschicht in dem Metall-Halbleiter-System erklärt.

In diesem Fall wandern die Elektronen unter Lichteinfluss vom Kupferoxid durch die Sperrschicht in das Kupfer. Infolgedessen ist die Kupferplatte negativ und die transparente Silberelektrode positiv geladen. Wenn der Stromkreis geschlossen ist, wird ein Strom im Kreislauf induziert. Ein ähnliches Phänomen kann bei anderen Halbleitern beobachtet werden. Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt bei Systemen, die solche Halbleiter wie Schwefel-Thallium, Schwefel-Silber, Selen, Germanium, Silizium und andere enthalten.

Der Ventilphotoeffekt (Sperrschichtphotoeffekt) bezieht sich auf das Auftreten einer elektromotorischen Kraft bei der Lichtabsorption in einem System, das den Kontakt von zwei verunreinigten Halbleitern mit unterschiedlicher Leitfähigkeit oder in einem Halbleiter-Metall-System enthält (Abb. 5.2).

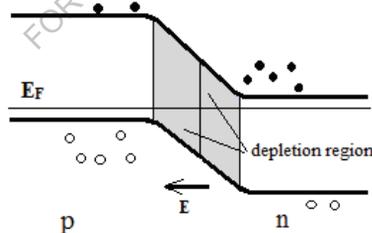


Abb. 5.2. Allgemeines Energiediagramm eines p-n-Übergangs (Sperrschicht)

Wenn ein solches System beleuchtet wird, überträgt das absorbierte Licht Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband. Dabei entstehen Löcher in der Valenzzone, d.h. es werden Elektron-Loch-Paare erzeugt. Das Verhalten von Nicht-Gleichgewichtsträgern hängt davon ab, in welchem Bereich des Systems die Strahlung absorbiert wird. Wird die Strahlung im

*p-Bereich* absorbiert, können die Elektronen in der Nähe des p-n-Übergangs dorthin gelangen und bewegen sich unter der Einwirkung des elektrischen Kontaktfeldes in den n-Bereich.

Wenn die Strahlung im *n-Bereich* absorbiert wird, werden nur Löcher durch den p-n-Übergang in den *p-Bereich* ausgestoßen.

Wenn die Paare im Bulk-Ladungsbereich (p-n-Übergang) erzeugt werden, "verteilt" das Feld die Ladungsträger so, dass sie in dem Bereich landen, in dem sie basisch sind.

In diesem Fall sind die Elektronen im *n-Halbleiter* konzentriert, während die Löcher im *p-Halbleiter* konzentriert sind.

Das von ihnen erzeugte elektrische Feld wächst und verhindert den weiteren Übergang von Nicht-Basisträgern durch die Einschlussschicht.

Es stellt sich ein dynamisches Gleichgewicht ein, bei dem die Anzahl der nichtbasischen Ladungsträger, die sich pro Zeiteinheit durch die Sperrschicht bewegen, gleich der Anzahl der gleichen Ladungsträger ist, die sich in der gleichen Zeitspanne in die entgegengesetzte Richtung bewegen.

Mit dem Eintreten des Gleichgewichts stellt sich zwischen dem *p-* und dem *n-Halbleiter* eine Potenzialdifferenz ein, die die photoelektromotorische Kraft darstellt.

Das Phänomen der Entstehung von Ventil-Photo-EMF bei der Beleuchtung des p-n-Übergangs wird zur Herstellung von Photodetektoren und photovoltaischen Energiewandlern - Solarbatterien - genutzt.

Dies ist der Mechanismus der photoelektromotorischen Kraft in einem System, das aus p- und n-Halbleitern und einer dazwischen liegenden Sperrschicht besteht.

Der Ventilphotoeffekt ist besonders aktiv in Halbleitersystemen mit einer großen Diffusionslänge der "Nicht-Haupt"-Stromträger und einer entsprechend langen Lebensdauer.

Aus der Betrachtung des Mechanismus des Auftretens der photoelektromotorischen Kraft des Ventils wird deutlich, dass die Elektrode, die direkt mit dem Elektronenhalbleiter in Kontakt steht, immer negativ geladen ist, während die Elektrode, die direkt mit dem Lochhalbleiter in Kontakt steht, positiv geladen ist. Daher kann bei verschiedenen Typen von Ventillezellen die obere durchscheinende Elektrode positiv oder negativ geladen sein.

Die Entdeckung des Sperrschichtphotoeffekts erweiterte die Möglichkeiten der praktischen Nutzung von Halbleitern und bildete die

Grundlage für die Einrichtung von Photovoltaik-Ventilzellen - Geräte, die die Energie des Lichts in elektrische Energie umwandeln.

### 5.3. Solarbatterie

Die Solarzelle war die Bezeichnung für die erste photovoltaische Zelle auf Siliziumbasis. Die Fozelle ist ein Umwandler von Sonnenenergie (Licht) in elektrische Energie.

Die elektrische Leitfähigkeit von Silizium schwankt je nach Sorte und Anzahl der Verunreinigungen in einem ziemlich großen Bereich. Silizium ist seit vielen Jahren Gegenstand umfassender physikalischer Forschung. Das Ergebnis der langjährigen Forschungsarbeit sind Ergebnisse, die sowohl für die Theorie als auch für die Praxis von großem Wert sind.

Ein wichtiges Ergebnis ist die Entwicklung einer Technologie zur Einführung von Fremdatomen in Silizium-Einkristalle, die es ermöglicht, in einem Kristall einen p-n-Übergang zu erhalten, auf dessen Grundlage eine Silizium-Fozelle mit einer Sperrschicht geschaffen wurde. Auf der Grundlage solcher Fozellen wurde eine Solarbatterie entwickelt.

Die Technologie der Herstellung von Silizium-Fozellen ist ziemlich kompliziert. Heutzutage werden zu diesem Zweck moderne planare Mikroelektronik-Technologien eingesetzt.

Einzelne photovoltaische Zellen können miteinander in Reihe und parallel geschaltet werden, so dass eine photovoltaische (Solar-)Batterie entsteht. Eine solche Solarbatterie kann zur Stromversorgung von Haushaltsgeräten, tragbarer Elektronik usw. verwendet werden. Die ersten Solarzellen sind bereits entwickelt worden.

Praktisch schon die ersten Silizium-Photovoltaikzellen hatten einen Wirkungsgrad von etwa 6 %. Zum Vergleich kann man anführen, dass Dampfmaschinen einen Wirkungsgrad von etwa 6-8 % haben. Darüber hinaus ist zu bedenken, dass die Lebensdauer von Halbleiterzellen im Gegensatz zu anderen Energiewandlern sehr lang sein kann.



Abb. 5.3. Moderne tragbare Solarbatterie - Batterie (Solarladegerät)

#### **5.4. Bolometer**

Ein Bolometer ist ein Gerät, mit dem die Strahlungsenergie mit hoher Genauigkeit gemessen werden kann. Die meisten Bolometer beruhen auf dem Prinzip der Umwandlung von Strahlungsenergie in Wärmeenergie. Mit der Entdeckung der elektrophysikalischen Eigenschaften von Halbleitern wurden diese für die Bolometertechnologie nutzbar gemacht und die Empfindlichkeitsgrenze von Bolometern stark erhöht.

Bolometer werden für eine Vielzahl von Zwecken eingesetzt. Bolometer sind von außergewöhnlichem Wert, wenn es darum geht, spektrometrische Untersuchungen durchzuführen.

Die Hauptschaltung eines gewöhnlichen Bolometers besteht aus einer Brücke, deren einer Arm einen empfindlichen Thermowiderstand enthält. Wenn eine Wärmestrahlung auf den Thermistor fällt, erhöht sie dessen Temperatur, wodurch das Gleichgewicht der Brücke gestört wird und der Pfeil des Messgeräts, der in den entsprechenden Einheiten vorprogrammiert ist, um die entsprechende Anzahl von Teilungen abweicht. Der Thermistor befindet sich häufig in einem Vakuumzylinder aus Metall oder Glas mit einem Fenster aus einem transparenten Material. An der Außenseite des Zylinders befinden sich Leitungen zum Thermistor, um ihn in den Stromkreis einzubinden.

Die Empfindlichkeit von modernen Bolometern beträgt  $10^{-5} \cdot 10^{13}$  V/W. Bolometer werden zur Aufzeichnung optischer Strahlung im Infrarotbereich verwendet. Sie sind sehr empfindlich gegenüber Wärmestrahlung und werden hauptsächlich zur Erfassung von IR-Strahlung mit Wellenlängen von 10 bis 5000  $\mu\text{m}$  eingesetzt.

#### **5.5. Lichtschranken aus Selen**

Die erste Fozelle wurde aus Kupferoxid hergestellt und war einige Jahre lang in Gebrauch. Fast zur gleichen Zeit wurde die Selenzelle entdeckt, die viel weiter verbreitet war und bis heute nichts von ihrer Bedeutung verloren hat.

Die Technologie zur Herstellung einer Selen-Fotozelle hat sich erheblich verändert.

Jede Fotozelle mit einer Sperrschicht ist ein System, das aus einem Metallsubstrat, einer Halbleiterschicht und einer oberen halbtransparenten Metallelektrode besteht.

Das Substrat der künftigen Fotozelle erfüllt zwei Funktionen. Zum einen dient es als Träger der zerbrechlichen Selenschicht und schützt sie vor mechanischer Beschädigung, zum anderen dient es dazu, einen zuverlässigen elektrischen Kontakt herzustellen. Die scheibenförmige Seite des Substrats, auf der die Selenschicht aufgebracht ist, wird geschliffen, damit die Selenschicht gut auf der Stahlscheibe haftet. Das geschliffene Substrat wird in der Vakuumanlage aufgehängt.

Die Selenschicht wird durch Vakuumverdampfung aufgebracht.

Um photovoltaische Zellen mit guten Parametern zu erhalten, muss die Dicke der Halbleiterschicht 0,1 mm betragen.

Das abgeschiedene Selen liegt in amorpher Form vor, hat einen sehr hohen spezifischen Widerstand und verfügt noch nicht über die erforderlichen photovoltaischen Eigenschaften. Daher wird das Selen in der nächsten Stufe des technologischen Prozesses von der amorphen in die kristalline Modifikation umgewandelt, die eine hohe Lichtempfindlichkeit aufweist. Zu diesem Zweck wird eine Scheibe, auf der Selen abgeschieden ist, unter der Haube herausgenommen und in einen speziellen Ofen gelegt. Mit Hilfe eines bestimmten technologischen Prozesses im Ofen wird das amorphe Selen in kristallines Selen umgewandelt.

Die obere durchscheinende Metallelektrode wird in der Regel durch Kathodenzerstäubung aufgebracht.

Die fertigen Scheiben der Lichtschranke werden in einem Ebonit- oder Kunststoffdorn mit zwei nach außen geführten Klemmen montiert.

## **5.6. Selen-Photoresistoren**

Der elektrische Widerstand einer Probe eines Halbleitermaterials nimmt unter dem Einfluss von Lichtstrahlung ab, aber es wird kein EMF oder elektrischer Strom in ihr erzeugt.

Der Fotowiderstand ist also ein Halbleiterbauelement, das seinen elektrischen Widerstand unter Lichteinwirkung ändert.

Aus der vorangegangenen Betrachtung des physikalischen Wesens des internen Photoeffekts wird die grundlegende Struktur des Photowiderstands deutlich. Ein Fotowiderstand ist eine Platte (in den meisten Fällen eine dünne Halbleiterschicht), an deren Randbereichen Metallelektroden angebracht sind, um einen zuverlässigen elektrischen Kontakt zu gewährleisten. Ein solcher Fotowiderstand ist in einer Schaltung in Reihe mit der Stromversorgung enthalten.

Wenn der Fotowiderstand abgedunkelt wird, fließt im gesamten Stromkreis und somit auch im Fotowiderstand selbst ein elektrischer Strom, dessen Wert durch den ohmschen Widerstand des Fotowiderstands und die an ihn angelegte Potenzialdifferenz bestimmt wird. Dieser Strom wird als Dunkelstrom bezeichnet. Bei Beleuchtung des Fotowiderstands nimmt der Strom zu, und zwar umso mehr, je größer der Lichtstrom ist. Die Differenz zwischen Licht- und Dunkelstrom ergibt den Wert des Fotostroms.

Je nach Verwendungszweck werden Fotowiderstände aus verschiedenen Halbleitermaterialien hergestellt. Die Empfindlichkeit von Fotowiderständen ist viel höher als die Empfindlichkeit von Vakuum-Fotozellen mit externem Fotoeffekt. Das bedeutet, dass der Fotowiderstand bei gleicher Beleuchtung den Strom im Stromkreis im Vergleich zu einer Fotozelle mit externem Fotoeffekt um ein Vielfaches erhöht. Der wesentliche Nachteil der meisten der zuerst entwickelten Fotowiderstände war eine erhebliche Trägheit, während die Vakuumfotozelle mit externem Fotoeffekt praktisch trägheitsfrei ist.

Der zweite wesentliche Nachteil von Fotowiderständen ist die nichtlineare Abhängigkeit des Fotostromanstiegs von der Zunahme der Lichtstromstärke. Abb. 5.4 zeigt die Abhängigkeit des Fotostroms vom Lichtstrom.

Heutzutage werden neue Halbleitermaterialien hergestellt, die weitgehend frei von diesen Nachteilen sind, und es werden neue Typen von Fotowiderständen mit verbesserten Parametern entwickelt. In jüngster Zeit ist es den Physikern gelungen, viele Schwierigkeiten zu überwinden und Fotowiderstände zu entwickeln, die weitgehend frei von den Nachteilen ihrer Vorgänger sind.

Je nach der Substanz, aus der die Fotowiderstände hergestellt werden, haben sie unterschiedliche spektrale Eigenschaften und eine unterschiedliche integrale Empfindlichkeit. Die spektrale Empfindlichkeit charakterisiert die Menge des Fotostroms, die durch die Einwirkung einer Einheit des Lichtenergieflusses einer bestimmten Wellenlänge entsteht. Wenn also die integrale Empfindlichkeit einer Fotozelle durch eine Zahl bestimmt werden kann - den Wert des Fotostroms, der einer Einheit der einfallenden Energie zugeordnet ist -, wird die spektrale Empfindlichkeit jeder Fotozelle gewöhnlich in Form einer Grafik dargestellt. Der erste Fotowiderstand wurde aus Selen hergestellt, das in der Geschichte der Wissenschaft und Technik eine wichtige Rolle spielte.

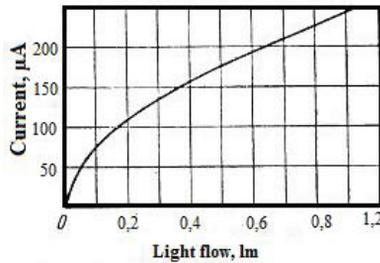


Abb. 5.4. Abhängigkeit des Fotostroms vom Lichtstrom. Beispiel für die Lichtcharakteristik des Selen-Photoresistors.

### 5.7. Photoelektrische Wandler. Allgemeine Funktionsprinzipien

Photoelektrische Messwertaufnehmer sind solche primären Messwertaufnehmer, die auf elektromagnetische Strahlung reagieren, die auf die Oberfläche des Wandlerelements fällt. Die Strahlung kann sowohl sichtbar sein, d. h. Licht, als auch eine längere oder kürzere Wellenlänge haben und unsichtbar sein.

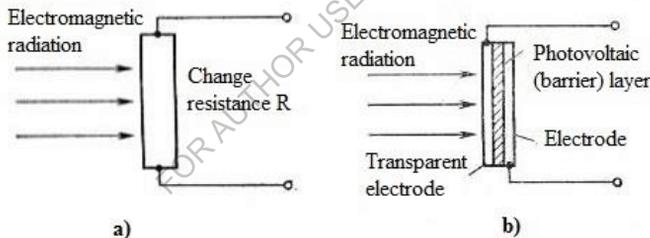


Abb. 5.5. Beispiele für Photowandler. a) - photokonduktive Umwandlung, b) - Solarzelle als Beispiel für photovoltaische Umwandlung.

**Photoleitende Wandler.** Diese Wandler wandeln die Änderung der Messgröße in die Änderung des Widerstands des verwendeten Materials um (Abb. 5.5.a). Solche Wandler werden als passive Wandler bezeichnet, d.h. sie benötigen eine externe Energieversorgung. Oft charakterisiert ihr Name die Art der Umwandlung, z. B. bei lichtempfindlichen Widerständen.

Der Widerstand eines Materials ist eine Funktion der Dichte der Grundladungsträger, und da die Dichte mit zunehmender Strahlungsintensität steigt, nimmt auch die Leitfähigkeit zu. Da die Leitfähigkeit umgekehrt proportional zum Widerstand ist, lässt sich daraus schließen, dass der Widerstand eine umgekehrte Funktion der

Bestrahlungsintensität ist. Der Widerstandswert bei voller Bestrahlung liegt im Allgemeinen bei 100-200 Ohm, und bei völliger Dunkelheit beträgt dieser Widerstand Megaohm. Cadmiumsulfid, Cadmiumselenid usw. werden bei der Entwicklung von lichtabhängigen Widerständen verwendet.

**Solarzellen.** Solarzellen sind photovoltaische Wandler, die elektromagnetische Energie in elektrische Energie umwandeln (Abb. 5.5.b).

Der Konverter besteht aus einer Schicht aus lichtempfindlichem Material mit hohem Widerstand zwischen zwei leitenden Elektroden. Eine der Elektroden besteht aus einem transparenten Material, durch das die Strahlung hindurchgeht und auf das lichtempfindliche Material trifft. Bei voller Beleuchtung erzeugt eine einzelne Zelle eine Ausgangsspannung von etwa 0,5 V zwischen den Elektroden.

Als photovoltaische Schicht werden in der Regel Halbleiter-Ventil-Photovoltaikzellen (Photovoltaikzellen mit Sperrschicht) verwendet (Abb. 5.5.b).

Einer der wichtigsten Parameter einer photovoltaischen Zelle, die als Quelle für elektrische Energie genutzt wird, ist der Wirkungsgrad (EF). Der Wirkungsgrad einer Solarzelle ist das Verhältnis zwischen der maximalen Leistung des elektrischen Stroms, der aus der Zelle gewonnen werden kann, und der Leistung der Lichtstrahlung, die auf die Zelle fällt. Der Wirkungsgrad ist umso größer, je größer der Teil des Spektrums der Lichtstrahlung ist, der an der Erzeugung von Stromträgern beteiligt ist. Eine der Möglichkeiten, den Wirkungsgrad von Solarzellen zu erhöhen, besteht darin, Fotozellen mit möglichst breiten spektralen Eigenschaften herzustellen. Fotozellen aus Silizium haben einen Wirkungsgrad von bis zu 12 %. Fotozellen auf der Basis von Galliumarsenidverbindungen haben einen Wirkungsgrad von bis zu 20 %.

**Photodetektoren.** Halbleiterwandler zur Messung von Änderungen der Parameter der Lichtstrahlung werden als Fotodetektoren bezeichnet. Ein fotoelektrischer Wandler, der einfachste Typ von Fotodetektoren, ist eine Halbleiterdiode. Einer der wichtigsten dieser Wandler ist die Fotodiode, die sich die Wirkung der Bestrahlung eines negativ vorgespannten p-n-Übergangs mit Licht (sichtbare oder andere Wellenlängen) zunutze macht. Durch die Bestrahlung ändert sich der Strom, der durch den Übergang fließt. Die Reaktionszeit einer solchen Fotodiode beträgt nur wenige Nanosekunden.

Um eine schnellere Reaktion auf Änderungen der Strahlungsparameter zu ermöglichen, wurden PIN-Dioden entwickelt, bei denen sich zwischen den  $p$ - und  $n$ -Typ-Schichten eine Schicht aus verunreinigungsfreiem Halbleiter befindet.

**Fototransistoren.** In einer Reihe von Geräten werden Fotodioden zusammen mit Verstärkern verwendet, um die Empfindlichkeit zu erhöhen. Es gibt aber auch Geräte, die diese Eigenschaften in sich vereinen - Fototransistoren. Sie bestehen aus einem transparenten Gehäuse, das die Lichtstrahlung durchlässt. Licht, das auf den Kollektor-Basis-Übergang des Fototransistors ( $p$ - $n$ -Übergang mit negativer Vorspannung) fällt, verursacht einen Fotostrom in der Basis, der durch die Verstärkung des Transistors verstärkt wird, was zu einem sehr großen Emitterstrom führt.

Da Fotodetektoren Halbleiterbauelemente sind, ist ihr Sättigungsstrom temperaturabhängig. In Abwesenheit von Lichtstrahlung fließt in ihnen ein Dunkelstrom, was die Messung von geringer Lichtstrahlung einschränkt.

**Fotowiderstände. Merkmale von Fotowiderständen.** Der Wert des Dunkelwiderstands hängt von der Form, der Größe, der Temperatur und der physikalisch-chemischen Beschaffenheit der lichtempfindlichen Schicht des Fotowiderstands ab. Einen sehr hohen Dunkelwiderstand (von  $10^4$  bis  $10^9$  Ohm bei  $25^\circ\text{C}$ ) besitzen Fotowiderstände auf der Basis von PbS, CdS, CdSe. Der Dunkelwiderstand von InSb, InAs, CdHgTe ( $10$  bis  $10^3$  Ohm bei  $25^\circ\text{C}$ ) ist nicht sehr hoch. Der Widerstand von bestrahlten Fotowiderständen nimmt mit zunehmender Bestrahlung rasch ab (Abb. 5.6).

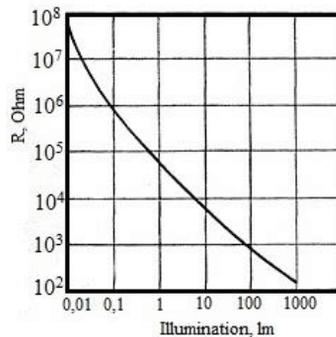


Abb. 5.6. Beispiel für die Abhängigkeit des Widerstands des Fotowiderstands von der Beleuchtung

### 5.8. Ventil-Lichtschranken. Ausführungen

Der Aufbau aller Fotozellen mit Sperrschicht ist praktisch gleich. Es kann einige Unterschiede geben, die aber den allgemeinen Charakter des Aufbaus der Fotozelle nicht verändern. Die Form der Lichtschranke, ihre Abmessungen, die Art der Anbringung der oberen Elektrode, die Leistung dieser Elektroden usw. können variieren.

Die Herstellung der Ventil-Fotozelle (Abb. 5.7) beginnt in der Regel mit der sogenannten unteren Elektrode - einer 1-2 mm dicken Metallplatte, auf die eine dünne Halbleiterschicht aufgebracht wird. Die Halbleiterschicht wird dann so behandelt, dass in ihrer Dicke ein p-n-Übergang entsteht. Danach wird in den meisten Fällen eine obere Metallelektrode, eine dünne durchsichtige Metallschicht, die Licht durchlässt, auf die Außenfläche aufgebracht.

Eine Ventil-Fotozelle umfasst eine untere Metallelektrode, eine Elektronen- (oder Loch-) Halbleiterschicht, eine Sperrschicht, eine Loch- (oder Elektronen-) Schicht und eine obere halbtransparente Metallelektrode (Abb. 5.7).

Die Fotozelle befindet sich in einem Kunststoffgehäuse mit elektrischen Kabeln und einem Fenster für Licht.

Der auf die Oberfläche der Fotozelle fallende Strahlungsfluss wird teilweise von der halbtransparenten Metallelektrode reflektiert und teilweise von ihr absorbiert. Ein Teil des Strahlungsflusses, der die Elektrode durchquert hat, wird in der angrenzenden Halbleiterschicht absorbiert. Infolgedessen entstehen in dieser Schicht Elektronen-Loch-Paare. Die Elektronen konzentrieren sich an der Elektrode, die die Halbleiterschicht bedeckt, die über einen elektronischen Leitmechanismus verfügt, und die Löcher konzentrieren sich an der Elektrode des Lochhalbleiters.

Zwischen der unteren und der oberen Elektrode entsteht eine Potentialdifferenz, deren Wert bis zu einer bestimmten Grenze um so größer ist, je stärker der Strahlungsfluss ist. Indem man die Elektroden der Fotozelle durch einen externen Stromkreis schließt, schafft man Bedingungen für den Stromfluss in der Fotozelle. Dies ist der Fall, solange die Fotozelle beleuchtet ist, und im Bereich kleiner Lichtströme mit einem Grenzwert von 1 Lumen hängt der Kurzschlussstrom der Fotozelle fast linear von der Intensität des Lichtstroms ab. Wenn ein externer Widerstand in den Stromkreis der Fotozelle einbezogen wird, wird diese Linearität durchbrochen.

Die Wissenschaftler forschen und bemühen sich ständig, Fotozellen aus neuen Materialien mit erheblicher integraler Empfindlichkeit zu erhalten und die Fotozelle nicht nur den gesamten sichtbaren Teil des Spektrums erfassen zu lassen, sondern möglicherweise auch den unsichtbaren - Infrarot und Ultraviolett.

Die photovoltaischen Prozesse, die in Ventil-Fotozellen ablaufen, haben eine merkbare Trägheit, die sich auf die Form ihrer Frequenzcharakteristik auswirkt. Die starke Abnahme der Ausbeute der meisten Ventilzellen mit zunehmender Frequenz schränkt ihre Verwendung in Fällen variabler Lichtströme mit relativ hoher Frequenz ein.

Ventil-Photovoltaikzellen werden aus verschiedenen lichtempfindlichen Halbleitermaterialien hergestellt. Weit verbreitet sind Selen-Fotozellen. Die spektrale Charakteristik der Selen-Fotozelle liegt nahe an der Empfindlichkeit des menschlichen Auges, das Maximum der spektralen Empfindlichkeit liegt im Bereich von  $5500-6000 \text{ \AA}$  ( $0,55 - 0,6 \mu\text{m}$ ), d. h. im sichtbaren Teil des Spektrums (Abb. 5.8). Die integrale Empfindlichkeit der Selen-Fotozelle erreicht  $600 \mu\text{A/lm}$ , d. h. sie übertrifft die Empfindlichkeit von Fotozellen mit externem Fotoeffekt.

Silbersulfid ( $\text{Ag}_2\text{S}$ ) Fotozellen - PCSS - sind noch weiter verbreitet. Die Gesamtempfindlichkeit von PCSS erreicht  $9000 \mu\text{A/lm}$ , die spektrale Charakteristik ist ziemlich breit (von  $0,4$  bis  $1,4 \mu\text{m}$ ) mit einer maximalen Empfindlichkeit im nahen Infrarotbereich ( $0,8 - 0,9 \mu\text{m}$ ). Schwefel-Silber-Fotozellen haben eine hohe Stabilität im Betrieb.

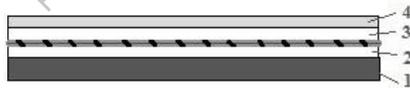


Abb. 5.7. Schematischer Aufbau einer Ventil-Fotozelle: 1 - untere Metallelektrode; 2 - Elektronen- (Loch-) Halbleiterschicht; 3 - Loch- (Elektronen-) Halbleiterschicht; 4 - obere Metallhalbleiterelektrode. Der gestrichelte Bereich ist die Sperrschicht.

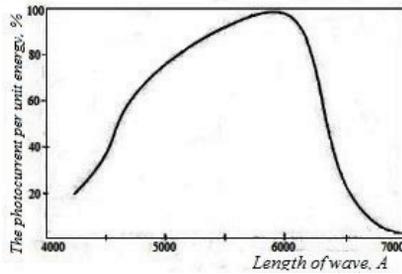


Abb. 5.8. Spektralkennlinie einer Selen-Fotозelle. Reines Selen.

### 5.9. LEDs

Die Emission in LEDs ist auf die Rekombination der injizierten Ladungsträger in einem Teil des p-n-Übergangs zurückzuführen. Die Rekombination findet statt, wenn sich Ladungsträger von höheren zu niedrigeren Niveaus bewegen. Interzonenübergänge zwischen dem Minimum des Leitungsbandes und dem Maximum des Valenzbandes gehen mit effektiver Emission einher, wenn die Übergänge direkt sind, d. h. das Minimum und das Maximum liegen auf demselben Wert des Wellenvektors  $k$ . Solche Übergänge werden z. B. in Galliumarsenid bei  $k = 0$  realisiert.

Das Hauptmerkmal von LEDs ist die interne Quanteneffizienz  $\eta_{iqe}$  (das Verhältnis zwischen der Anzahl der erzeugten Photonen und der Anzahl der in den Sockel injizierten Ladungsträger) und die externe  $\eta_{eqe}$  (das Verhältnis zwischen der Anzahl der Photonen, die die LED verlassen, und der Gesamtzahl der Ladungsträger, die sie durchströmen).

Die Abnahme von  $\eta_{eqe}$  wird durch strahlungsfreie Rekombination an Defekten in der Struktur und Photonenabsorption im Halbleiter selbst (Selbstabsorption) verursacht, da die Photonenenergie nahe bei  $E_g$  liegt.

Die heute am weitesten verbreiteten LEDs, die durch epitaktischen Aufbau von mit Silizium dotiertem Galliumarsenid (*p-Typ*) auf *n-GaAs* hergestellt werden, weisen beträchtliche  $\eta_{vnt}$  auf (bis zu 20-28 %). Dies ist sowohl auf die größere Perfektion der Kristallstruktur als auch auf die Tatsache zurückzuführen, dass der Bereich des hoch siliziumkompensierten Halbleiters Lichtquanten mit Energien von 1,31 ... 1,34 eV emittiert, die niedriger sind als  $E_g$  von nicht kompensiertem Galliumarsenid, was die Selbstabsorption bei der Emission von Strahlung durch den *n-Bereich* verringert.

Viele Probleme von LEDs werden auch durch den Einsatz moderner Heteroübergänge gelöst.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wichtigsten Materialien, die derzeit zur Herstellung von LEDs mit der besten Leistung in den entsprechenden Spektralbereichen verwendet werden. Der Parameter  $\eta_{\text{eqe}}$  hängt wesentlich von der Technologie ab und kann mit dem Wachstum der Technologie deutlich erhöht werden.

LEDs finden breite Anwendung in digitalen Anzeigen und Leuchtdisplays für Messgeräte und Computerausgabegeräte sowie in optoelektronischen Geräten. Im Vergleich zu herkömmlichen Lichtquellen zeichnen sich LEDs durch geringe Abmessungen, niedrige Betriebsspannungen, hohe Geschwindigkeit (bis zu  $10^{-9}$  s) und lange Lebensdauer aus.

Tabelle 5.1. Einige Materialien, die zur Herstellung von LEDs verwendet werden

Material	Impurity or composition	Glow color	$\lambda_{\text{max}}$ , nm	$\eta_{\text{iqe}}$
GaAs	Si, Zn	IR	950	12-50
			900	
GaP	Zn, O, N	Red	690	7
		green	550	0,7
GaAs <sub>1-x</sub> P <sub>x</sub>	x=0,39 x=0,5-0,75	Red	660	0,5
		amber	610	0,04
Ga <sub>1-x</sub> Al <sub>x</sub> As	x=0,05-0,1 x=0,3	IR	800	12
		red	675	1,3
In <sub>1-x</sub> Ga <sub>x</sub> P	x=0,58	Red	659	0,2
		Amber	617	0,1
		yellow-green	570	0,02

### 5.10. Halbleiterlaser. P-n-Übergang-Laser

Das Funktionsprinzip eines Halbleiterlasers ist wie folgt. In einem intrinsischen Halbleiter gibt es immer Elektronen, die thermisch aus dem Valenzband in das Leitungsband abgegeben werden. Wenn Licht durch den Halbleiter fällt, absorbieren die Elektronen im Valenzband Lichtquanten und können in das Leitungsband wechseln, wenn die Frequenz des einfallenden Lichts gleich ist:

$$\nu \geq E_g / h \quad (5.3),$$

wobei  $E_g$  die Breite der verbotenen Zone und  $h$  die Plancksche Konstante ist. Daher nimmt die Intensität des Lichts nach dem Durchgang durch den Halbleiter ab. Gleichzeitig stimuliert die auf den Halbleiter auftreffende Strahlung die Übergänge angeregter Elektronen vom Leitungsband zum Valenzband und die Emission von Lichtquanten (Abb. 5.9.a). Diese Quanten werden beim Durchgang durch den Halbleiter der externen Strahlung hinzugefügt, d. h. es kommt zu einer Lichtverstärkung.

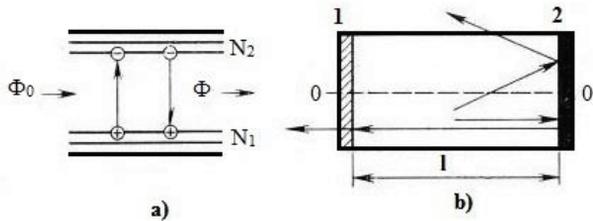


Abb. 5.9. Interzonenübergänge unter der Einwirkung von Strahlung auf einen Halbleiter - a, Diagramm eines Halbleiterlasers - b.

Übergänge, die unter dem Einfluss von externer Strahlung stattfinden, werden als induziert bezeichnet, im Gegensatz zu spontanen Übergängen, die unabhängig von externer Strahlung stattfinden. Im thermodynamischen Gleichgewicht ist die Anzahl der Elektronen im Valenzband um ein Vielfaches größer als im Leitungsband. Daher dominiert die Absorption von Licht gegenüber der Verstärkung. Für die Lichtverstärkung müssen Bedingungen geschaffen werden, bei denen die Konzentration der Elektronen in der Nähe des Bodens der Leitungszone größer ist als ihre Konzentration in der Nähe der Decke der Valenzzone ( $N_2 > N_1$ ). Ein solcher Zustand des Halbleiters wird als Zustand mit Niveaupopulationsumkehr bezeichnet.

Der Lichtverstärkungsfaktor  $\alpha$  beim Durchgang von Licht durch einen Halbleiter hängt von der Differenz zwischen den Populationen des oberen und des unteren Niveaus ab. Da die Wahrscheinlichkeiten von Aufwärts- und Abwärts-Elektronenübergängen gleich sind, tritt die Verstärkung ein, wenn der Populationsunterschied zwischen dem oberen und dem unteren Niveau  $N_2 - N_1 > 0$  ist.

Die Abschwächung von Licht, das einen Halbleiter durchquert, wird nicht nur durch Elektronenübergänge vom Valenzband zum Leitungsband verursacht, sondern auch durch Streuung des Lichts an verschiedenen

Inhomogenitäten des Kristalls. Infolgedessen ändert sich die Lichtintensität mit dem Abstand  $x$  innerhalb des Halbleiters gemäß dem Gesetz:

$$\Phi = \Phi_0 \exp(\alpha - \chi_{ls})x \quad (5.4),$$

wobei  $\alpha$  der Verstärkungskoeffizient ist, der Koeffizient  $\chi_{ls}$  die Verluste charakterisiert und  $x$  die Entfernung ist.

Ein Halbleiterkristall verstärkt also externe Strahlung, wenn in ihm eine Besetzungsinversion vorliegt und der Gewinn den Verlustkoeffizienten übersteigt ( $\alpha > \chi_{ls}$ ).

Um einen Verstärker in einen Strahlungsgenerator zu verwandeln, ist es notwendig, eine positive Rückkopplung einzuführen, d. h. einen Teil der Strahlung vom Ausgang zum Eingang zu leiten. Bei Lasern wird der Arbeitskristall zur Erzeugung einer Rückkopplung zwischen zwei parallelen Spiegeln (1 und 2 in Abb. 5.9.b) angeordnet. Das Licht, das den Kristall durchläuft, wird  $\exp(\alpha - \chi_{ls})^l$  mal verstärkt, dann vom Spiegel reflektiert, erneut durch den Kristall geleitet und erneut um den gleichen Faktor verstärkt usw. Die primären Lichtquanten entstehen durch spontane Übergänge, und dann gibt es eine Verstärkung des Lichts während seiner Ausbreitung im Kristall durch induzierte Übergänge.

Die Populationsinversion von Halbleiterniveaus kann durch verschiedene Methoden erzeugt werden. Eine davon besteht darin, den Halbleiter selbst mit intensivem Licht zu bestrahlen (optisches Pumpen). Die Elektronen aus dem Valenzband wandern in das Leitungsband und sammeln sich dort an. Wenn die Pumpintensität ausreichend hoch ist, kann es zu einer Umkehrung der Niveaupopulation kommen. Eine andere Methode ist der Transfer von Elektronen aus dem Valenzband in das Leitungsband, indem der Halbleiter mit schnellen Elektronen beschossen wird. Mit beiden Methoden lassen sich hohe Emissionsleistungen erzielen, aber im Allgemeinen ist der Wirkungsgrad der Bauelemente gering.

Der p-n-Übergangslaser hat den höchsten Wirkungsgrad und ist einfach im Aufbau. Die Wirkung des Lasers beruht auf der Tatsache, dass bei direkter Vorspannung Elektronen in den *p-Bereich* injiziert werden, wo ihre strahlende Rekombination mit den dort vorhandenen Löchern stattfindet. Um einen Zustand mit Besetzungsinversion zu erzeugen, ist eine hohe Konzentration von Löchern im Valenzband erforderlich, was durch eine Erhöhung der Konzentration der dotierenden Akzeptor-Verunreinigung erreicht wird. Damit die Injektion von Elektronen in den *p-Bereich* die Injektion von Löchern in den *n-Bereich* (wo die Rekombination

strahlungsfrei ist) übersteigt, ist es erforderlich, dass die Konzentration der Donor-Verunreinigung im *n-Bereich* höher ist als die Konzentration der Akzeptor-Verunreinigung im *p-Bereich*, d. h.  $n_n > p_p$ .

Um einen Zustand mit Besetzungsinversion im *p-Bereich* zu erreichen, ist daher ein hoher Dotierungsgrad beider Bereiche des p-n-Übergangs mit Verunreinigungen erforderlich.

Das beste Material für Laserdioden ist Galliumarsenid. Die Dicke des emittierenden Teils des *p-Bereichs* liegt in der Größenordnung von 2  $\mu\text{m}$ . Die Laserdiode ist der erste Laser, bei dem eine direkte Umwandlung von elektrischer Energie in Energie aus kohärenter Lichtstrahlung möglich war. Sie hat auch den höchsten Wirkungsgrad und die höchste Geschwindigkeit.

Grundsätzlich ist der Hauptgrund für die Abnahme der Effizienz der Laserdiode die Notwendigkeit einer starken Dotierung der *p-* und *n-Regionen* des Übergangs. Gleichzeitig mit der Einführung von Verunreinigungen in den Halbleiter bildet sich eine große Anzahl von Defekten im aktiven Bereich, was zu erheblichen Strahlungsverlusten führt. Darüber hinaus können die Defekte Energieniveaus in der verbotenen Zone des Halbleiters bilden. Da die Konzentration der Verunreinigungen in beiden Teilen des p-n-Übergangs groß ist, ist die Breite des p-n-Übergangs klein, so dass Stromträger vom Leitungsband zu diesen Niveaus wandern und dann in das Valenzband des *p-Bereichs* tunneln können. Der Tunnelstrom ist nicht an die Strahlung gekoppelt, was ebenfalls zu einer Verschlechterung des Wirkungsgrads führt.

Laserdioden können u. a. in Lichtdetektoren für die Beobachtung und Fotografie im Dunkeln, in Entfernungsmessern und für die Kommunikation eingesetzt werden.

## Literaturverzeichnis

1. John Kimbala, Mehmet Kanoglu. Fundamentals and Applications of Renewable Energy. - McGraw-Hill, 2019, 416 S.
2. David L. Greenaway, Gunter Harbeke. Optical properties and band structure of semiconductors. Pergamon Press Ltd., Headington Hill Hall, Oxford 4&5 Fitzroy Square, London W.I. 1968, 172 S.
3. Paul Holmes, Shalve Mohile, Shantanu Mohile. Solarenergie für Einsteiger: Wie Sie die beste Solarstromanlage für Ihr Haus entwerfen und installieren (DIY Solar Power) Kindle Edition. 2020, 179 Seiten, ISBN-13979-8642013625
4. Nsakalagos L., Balch J., Fronheiser J., Korevaar B.A., Sulima O., Rand J. Silicon nanowire solar cells//Appl. Phys. Lett. 2007. - Vol. 91. - P. 233117(1)-233117(3).
5. Vikulin I.M., Stafeev V.I. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov* [Physik der Halbleiterbauelemente]. M.: *Radio i svyaz'*, 1990. 264 p.
6. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Halbleiter].- L. Nauka 1967. 439p.
7. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Verzeichnis "Messungen in der Industrie"] 1-3 Bände. M.: *Metallurgiya*, 1990.
8. Mykola Gorbatschuk. ELEKTROTECHNISCHE MATERIALIEN. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, London, N2 9ED, Vereinigtes Königreich, 2024, 112 S. ISBN: 978-620-3-46212-8.
9. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki: Navchal'niy posibnik* [Allgemeiner Kurs der Physik: Studienführer],T. 1-3. - K.: *Tekhnika*, 2001.

## Kapitel 6. Ionisationswandler. Sensoren

### 6.1. pH-Messwertgeber

Ionisationswandler wandeln eine Änderung einer Messgröße in eine Änderung z. B. eines Ionisationsstroms um, der durch eine zwischen zwei Elektroden befindliche Flüssigkeit fließt (Abb. 6.1). Ein typisches Beispiel für die Anwendung des Ionisationsprinzips ist ein Gerät zur Messung des Säuregehalts einer Lösung. Der Säuregrad einer Lösung wird durch die Konzentration der positiv geladenen Wasserstoffionen in der Lösung bestimmt, die als Wasserstoffpotential bezeichnet wird (besser bekannt unter der Abkürzung  $pH$ ). Außerdem:

$$pH = -\log[H^+],$$

wobei  $H^+$  die Wasserstoffionenkonzentration in Gramm pro Liter ist.

Der pH-Wert beträgt 0 für eine rein saure Lösung, 7 für eine neutrale Lösung (wie reines Wasser) und 14 für eine rein alkalische Lösung.

Eine typische pH-Sonde hat Elektroden aus Gelatine mit einem bekannten Wert des Wasserstoffpotenzials. Sie werden von einer speziellen Glasmembran gebildet, die mit der Lösung, deren pH-Wert gemessen wird, in Kontakt ist. Die Potentialdifferenz zwischen den beiden Elektroden spiegelt den pH-Wert der Lösung wider (etwa 59 mV pro pH-Einheit).

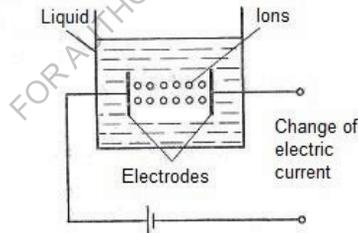


Abb. 6.1 Ionisierungstransformation, bei der Ionen in Flüssigkeiten zu Elektroden wandern und als Ladungsträger einen elektrischen Strom erzeugen

### 6.2. Ionisationskammern. Allgemeine Grundsätze der Funktionsweise

Ein Gerät (Sensor) mit einer Ionisationskammer besteht aus einer Kammer K mit einer inneren und einer äußeren Elektrode, einer Spannungsquelle, einem Anzeigesystem (Anzeigegerät) G und einem Messwiderstand R oder Messkondensator C (Abb. 6.2). Der Ionisationsstrom (Flussdichte oder Dosisleistung) wird durch den Wert des

Spannungsabfalls über dem hochohmigen Widerstand  $R$  gemessen. Die Ladungsmessung als Integral des Stroms über die Zeit (Fluss- oder Dosismessung) wird durch die Aufladung des Kondensators  $C$  bestimmt.

Je nach geforderter Empfindlichkeit und geometrischer Anpassung an die jeweilige Messaufgabe werden verschiedene Ionisationskammern eingesetzt. Der Messbereich von Detektoren nach dem Ionisationskammerprinzip umfasst Werte von Bruchteilen von Mikrograys bis zu Tausenden von Grays ( $\mu\text{Gy/h}$  bis  $\text{kGy/h}$ ).

Mit Luft gefüllte Ionisationskammern sind per Definition für die Messung der Ionendosis geeignet. Zu diesem Zweck sind jedoch spezielle Konstruktionen erforderlich, die den Einfluss der Ionisationskammerwände, die das Luftvolumen begrenzen, ausschließen oder kompensieren. Für praktische Messungen wurden zahlreiche Messkammern entwickelt. Bei ihrer Verwendung sind neben der Empfindlichkeit, dem Messbereich und der Reproduzierbarkeit der erzielten Ergebnisse die folgenden Punkte zu berücksichtigen:

1. Die Energieabhängigkeit der Empfindlichkeit zeigt, inwieweit der Messwert von der Strahlungsenergie abhängt. Typische Beispiele für diese Energieabhängigkeit für verschiedene Arten von Strahlungsdetektoren sind in Abb. 6.3 dargestellt.

2. Die Abhängigkeit der Empfindlichkeit von der Flugrichtung der Teilchen (Strahlen) ist auf die Konstruktion des Detektors selbst zurückzuführen. Je nach Einfallsrichtung der Strahlen müssen Korrekturen vorgenommen werden, die wiederum von der Energie der Strahlung abhängen können.

3. Die Abhängigkeit der Empfindlichkeit von Temperatur und Druck zeigt sich darin, dass sich bei nicht abgedichteten Ionisationskammersystemen die berechnete Masse mit der Lufttemperatur und dem Druck ändert. Dies macht auch einen Korrekturfaktor erforderlich, mit dem der Messwert multipliziert werden muss, um den korrekten Wert der Messgröße zu erhalten, wenn die Empfindlichkeit des Messsystems nicht vorher mit Hilfe eines Referenzstroms eingestellt wurde.

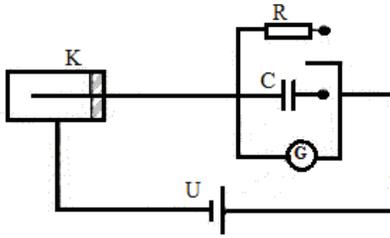


Abb. 6.2. Prinzipschema einer Ionisationskammer zur Messung der Dosisleistung oder der Energiedosis

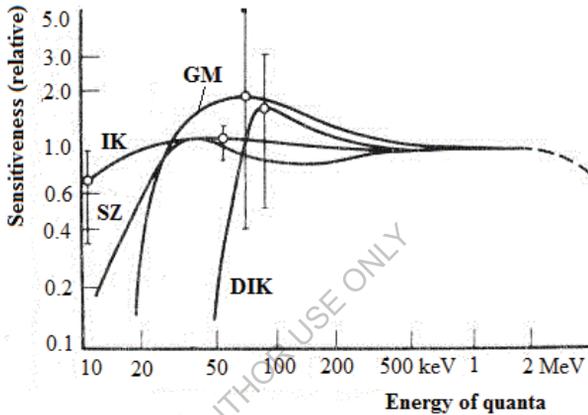


Abb. 6.3. Typische Abhängigkeiten der Empfindlichkeit verschiedener Strahlungsdetektoren vom Energieniveau (Durchschnittswerte für eine große Anzahl von Einzeldetektoren) und maximale Streuungen im kritischen Bereich. GM - Geiger-Müller-Zähler; IK - Ionisationskammer; SZ - Szintillationszähler; DIK - Hochdruck-Ionisationskammer.

### 6.3. Ionisationsmesswandler

Abb. 6.4 zeigt das Strukturschema eines der Ionisationswandler mit radioaktivem Isotop. Das Gerät ist für die kontinuierliche Dickenmessung eines laufenden Bandes oder z. B. von Walzstahl ausgelegt.

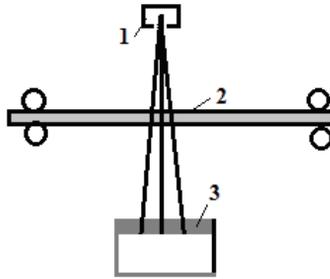


Abb. 6.4. Schema des Ionisationswandlers für die Messung der Banddicke.

Das Funktionsprinzip des Geräts ist wie folgt. Die radioaktive Strahlung des Isotops 1 wird teilweise von dem Produkt 2 absorbiert. Die Menge der vom Indikator 3 empfangenen Energie hängt vom Material und der Dicke des Produkts ab. Der Indikator 3 ist über einen Verstärker mit dem Messsystem verbunden, das auf die Werte des gemessenen Wertes geeicht ist.

Abb. 6.5 zeigt schematische Darstellungen von Füllstandmessgeräten und Gasdruckmessgeräten, die nach dem Ionisationsprinzip arbeiten.

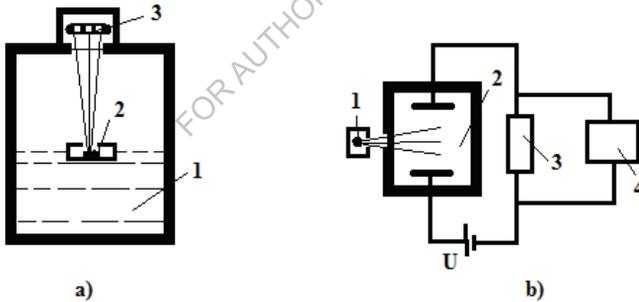


Abb. 6.5. a - Schema des Ionisationspegelmessers, b - Schema des Gasdruckmessgeräts.

Der Schwimmer 2 mit dem radioaktiven Isotop schwimmt auf der Oberfläche der Flüssigkeit 1 (Abb. 6.5.a). Der Indikator 3, der die Strahlung wahrnimmt, befindet sich oberhalb des Schwimmers. Wenn sich der Flüssigkeitsstand ändert, ändert sich der Abstand zwischen der Strahlungsquelle und dem Indikator und damit auch die vom Indikator

empfangene Energiemenge. Auf diese Weise wird der Flüssigkeitsstand überwacht.

Abb. 6.5.b zeigt das Strukturschema des Ionisationsgasdruckmessers. Unter dem Einfluss von radioaktiver Strahlung des Isotops 1 kommt es im Gefäß 2 zur Gasionisation. In Abhängigkeit vom Gasdruck ändert sich die Ionisationsintensität. Infolgedessen ändert sich der Ionisationsstrom, der unter der Wirkung der angelegten Spannung  $U$  durch den Stromkreis fließt. Das Messgerät ist mit dem Widerstand 3 verbunden, an dem der Spannungsabfall durch den Ionisationsstrom entsteht.

Ionisationsgasanalysatoren haben ein ähnliches Gerät.

#### 6.4. Ionisationskammer. Radioaktive Strahlung. Zähler

Im einfachsten Fall ist die Ionisationskammer ein Gerät, das aus zwei voneinander isolierten und durch einen Gasspalt getrennten Metallplatten besteht (Abb. 6.6).

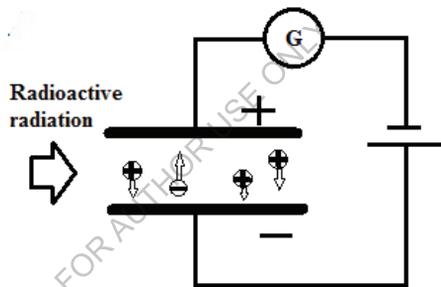


Abb. 6.6. Schematische Darstellung und Funktionsweise einer Ionisationskammer.

Jeder Luftkondensator kann als Ionisationskammer dienen. Der Raum zwischen den Platten wird als das Arbeitsvolumen der Kammer bezeichnet. Wird an eine Platte eine konstante Spannung angelegt, entsteht ein Raum mit einem elektrischen Feld, dessen Kraftlinien von der positiven Platte zur negativen Platte verlaufen. Auf ein elektrisch geladenes Teilchen, das sich in dem elektrischen Feld befindet, wirkt eine Kraft, und es bewegt sich entlang einer Bahn, die mit der Richtung der elektrischen Feldlinien übereinstimmt. Die Bewegungsrichtung von positiv geladenen Teilchen fällt mit der Richtung der Feldlinien zusammen. Negative Teilchen bewegen sich in die entgegengesetzte Richtung.

Betrachten wir die Prozesse, die im Arbeitsvolumen der Ionisationskammer ablaufen. Wenn an den Elektroden der Kammer keine Spannung anliegt, bewegen sich die Ionen und Elektronen, die sich im Arbeitsvolumen durch die radioaktive Strahlung gebildet haben, zufällig zusammen mit den neutralen Atomen, von denen einige die Elektroden erreichen werden. Legt man nun eine kleine konstante Spannung an die Elektroden an, so erhalten die Ionen und Elektronen unter dem Einfluss des elektrischen Feldes eine gerichtete Bewegung entsprechend den Feldlinien (Abb. 6.6). Die Elektronen bewegen sich in Richtung der positiv geladenen Anodenplatte und die positiven Ionen in Richtung der negativ geladenen Kathodenplatte. Die Bewegungsgeschwindigkeit schwerer positiver Ionen ist tausende und zehntausende Male geringer als die Geschwindigkeit leichter Elektronen.

Bei niedriger Spannung ist das Elektrodenfeld schwach und die Teilchen bewegen sich langsam. Daher rekombinieren die meisten von ihnen und erreichen die Elektroden nicht. Sie verwandeln sich in neutrale Gasteilchen. Infolgedessen ist der Strom im externen Stromkreis sehr gering.

Die Stärke des Ionisationsstroms ist gleich der gesamten elektrischen Ladung, die von den geladenen Teilchen während einer Sekunde auf die Elektrodenoberfläche übertragen wird. Je mehr Ionen auf die Elektrode treffen, desto größer ist der Strom. Dieser Strom wird mit einem beliebigen elektrischen Messgerät aufgezeichnet, das an den Stromkreis der Kammer angeschlossen ist.

Mit zunehmender Spannung an den Platten nimmt die Stärke des elektrischen Feldes zu, und immer mehr geladene Teilchen, die noch keine Zeit zur Rekombination hatten, fallen auf die Elektroden. Die Stromstärke im äußeren Stromkreis nimmt zu (Abb. 6.7, von O nach A).

Bei einer bestimmten Spannung  $U_1$  nimmt die elektrische Feldstärke zu, so dass alle geladenen Teilchen, die vom externen Ionisator im Arbeitsvolumen der Kammer gebildet werden, auf die Elektroden fallen. In diesem Fall wird der Strom im externen Stromkreis nur durch die Ionisationskapazität der Strahlung bestimmt. Wenn sich die Ionisationskapazität der Strahlung nicht ändert, ändert sich auch der Strom in der Kammer nicht (Kurve A-B). Dieser Strom wird als Sättigungsstrom der Kammer bezeichnet.

Wenn die Spannung weiter auf  $U_2$  erhöht wird, beginnt der im Kammerkreis fließende Strom wieder anzusteigen, zunächst langsam und

dann immer schneller (Teil der Kurve über dem Punkt). Das liegt daran, dass bei Spannungen oberhalb von  $U_2$  die elektrische Feldstärke im Inneren der Kammer zunimmt, so dass die Elektronen Geschwindigkeiten erreichen, die ausreichen, um die neutralen Gasatome zu ionisieren, wenn sie aufeinander treffen. Daher wird der Strom im externen Stromkreis durch die Gesamtmenge der Ladungen bestimmt, die sich unter dem Einfluss des externen Ionisators und unter der Wirkung der ionisierenden Elektronen bilden, die im Arbeitsvolumen der Kammer gefangen sind.

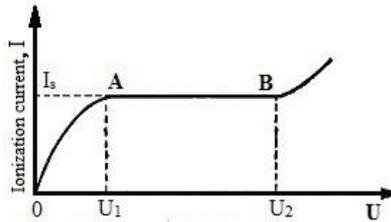


Abb. 6.7. Volt-Ampere-Kennlinie einer Ionisationskammer.

Die Kurve der Abhängigkeit des Ionisationsstroms der Kammer von der Höhe der angelegten Spannung wird als Volt-Ampere-Kennlinie bezeichnet.

Ionisationskammern arbeiten normalerweise im Sättigungsbereich des Stroms. Da die Größe dieses Stroms proportional zur Anzahl der erzeugten Ionen ist, kann er als Maß für die Ionisierungskapazität der Strahlung dienen.

Je nach Verwendungszweck gibt es zwei Arten von Ionisationskammern:

- Eine Kammer zur Messung der Gesamtionisierung, die durch den Durchgang einer signifikanten Anzahl ionisierender Teilchen verursacht wird, wird als integrierende Ionisationskammer bezeichnet. Die Größe des Sättigungsstroms ist gleich dem Produkt aus der Anzahl der Ionenpaare, die pro Sekunde und Kubikzentimeter der Kammer erzeugt werden, ihrer Vorspannung und der Ladung jedes Ions. Folglich kann der Sättigungsstromwert als Maß für die Strahlendosis dienen.

- Der zweite Typ sind Zähl-Ionisationskammern, mit denen die Ionisationskapazität eines einzelnen ionisierenden Teilchens (z. B. eines  $\alpha$ -Teilchens), das im Arbeitsvolumen der Kammer eingefangen wird, geprüft und bestimmt werden kann.

**Geiger-Muller-Ionisationskammer.** Abbildung 6.8 zeigt ein Gerät, das aus einem Metallzylinder besteht, auf dessen Achse ein Drahtfaden auf Isolatoren aufgespannt ist. Ein solches Gerät wird als Gasentladungszähler bezeichnet. Abbildung 6.8 zeigt den Querschnitt des Zählers. Der Zylinder ist mit dem Minuspol der Batterie verbunden und wird als Kathode bezeichnet. Die Anode ist über den Lastwiderstand angeschlossen.

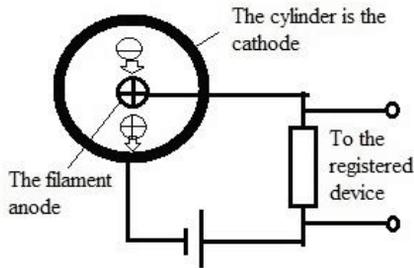


Abb. 6.8. Schematische Darstellung und Funktionsweise des Ionisationszählers

Wenn ein ionisierendes Teilchen das Arbeitsvolumen des Zählers durchläuft, entstehen in der Kammer positive Ionen und Elektronen, die sich unter der Wirkung des elektrischen Feldes zu den Elektroden bewegen: Elektronen zum Glühfaden, Ionen zum Zylinder. Im externen Stromkreis fließt ein Stromimpuls, der am Lastwiderstand einen Spannungsabfallimpuls bildet. Dieser Spannungsimpuls kann mit einem Aufzeichnungsgerät aufgezeichnet werden.

Die Strommenge im Stromimpuls hängt von der Höhe der angelegten Spannung ab. Im Allgemeinen ist diese Abhängigkeit in Abb. 6.7 dargestellt, und die physikalischen Funktionsprinzipien des Messgeräts sind denen der Ionisationskammer (Abb. 6.6) ähnlich.

Je nach angelegter Spannung kann der Zähler als Ionisationskammer, als Proportionalzähler und als Gasentladung-Geiger-Muller-Zähler arbeiten. In der Praxis handelt es sich jedoch um drei verschiedene Gerätetypen, die unterschiedlich aufgebaut sind und je nach Verwendungszweck das eine oder andere Gerät verwenden.

**Zähler-Designs. Konstruktion des Gamma-Zählers.** Die Konstruktionen der Gasentladungszähler werden ständig verbessert und verändert. Die Zähler können in mehrere Gruppen eingeteilt werden: Gamma-Zähler, sogenannte Beta-Gamma-Zähler, Zähler für weiche  $\beta$ -Teilchen, die in ihrer Konstruktion ein Fenster für den Durchgang von

weichen  $\beta$ -Teilchen haben sollten, Zähler für Photonen (Lichtquanten) und andere.

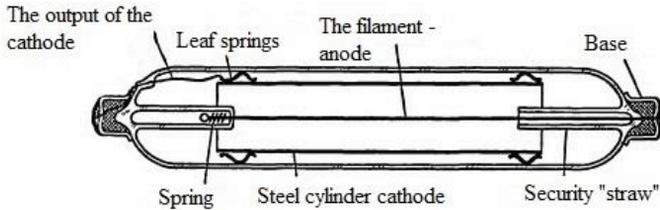


Abb. 6.9. Schematische Darstellung des Gamma-Zählers im Schnitt

Das Gerät des Gamma-Zählers ist recht einfach. Ein Gamma-Zähler mit Argongehalt ist in Abb. 6.9 dargestellt. Hier ist eine dünnwandige Zylinder-Edelstahlkathode in einen Glaszylinder eingesetzt. Der Kontakt wird mit einem Molybdändraht aus dem Zylinder herausgeführt. An der Achse ist ein Metalldraht (Anode) befestigt. Der Zähler ist mit einem Halogengemisch (Neon-Argon-Brom) gefüllt und kann sowohl im Impuls- (Zähl-) als auch im Strommodus verwendet werden. Dieser Zähler gehört zur STM-Serie (Stahlzähler).

Im Impulsmodus hat der Zähler eine sehr lange Lebensdauer. Die Zähler der Serie STM ermöglichen Zählraten von hunderttausend Impulsen pro Minute und mehr; dabei bleibt die Proportionalität zwischen Bestrahlungsstärke und Zählrate bis zu zweihunderttausend Impulsen pro Minute erhalten.

Diese Zählratencharakteristik entspricht einer Dosis von etwa 0,25 (R / h). Die Dosisleistung, bis zu der die Zählrate direkt proportional zu ihr bleibt, sowie der Wert der maximalen Dosis des Zählerbetriebs im Strommodus, hängen von den geometrischen Abmessungen ab. Je kleiner der Kathodendurchmesser und die Betriebslänge sind, desto größer ist die Dosisgrenze und desto länger bleibt die Proportionalität zwischen Zählrate und Strahlendosisleistung erhalten.

Bei der Wahl der Arbeitslänge werden die Arbeitslängenverhältnisse im Messgerät so eingestellt, dass sie mindestens das Doppelte des Kathodendurchmessers betragen. Bei einer kleineren Arbeitslänge funktioniert das Messgerät zwar auch, aber der potenzielle Funkenentladungswert steigt drastisch an.

Bei einem Zähler mit einem Kathodendurchmesser von 10 mm und einer Arbeitslänge von 5 Durchmessern (50 mm) beträgt die Zündspannung

bei einer bestimmten Gasfüllung 400 V, bei einer Arbeitslänge von zwei Kathodendurchmessern 405 V, bei einer Arbeitslänge von einem Kathodendurchmesser 450 V und bei einer Arbeitslänge von 0,5 Kathodendurchmessern steigt das Zündpotenzial auf 500 V.

Mit abnehmender Arbeitslänge des Fadens nehmen sowohl die Zählplateaulänge als auch die Eigenschaften ab.

FOR AUTHOR USE ONLY

## Literaturverzeichnis

1. Strahlungstechnologien und Anwendungen in der Materialwissenschaft. Herausgegeben von Subhendu Ray Chowdhuru. - Taylor & Francis, 2022, 396 Seiten. ISBN 9781032343945
2. Mykola Gorbatschuk. ELEKTROTECHNISCHE MATERIALIEN. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, London, N2 9ED, Vereinigtes Königreich, 2024, 112 S. ISBN: 978-620-3-46212-8.
3. Kucheruk I.M., Gorbachuk I.T., Lutsik P.P. *Zagal'niy kurs fiziki: Navchal'niy posibnik* [Allgemeiner Kurs der Physik: Studienführer], T. 1-3. - K.: *Tekhnika*, 2001.
4. Vikulin I.M., Stafeev V.I. *Fizika poluprovodnikovyykh priborov* [Physik der Halbleiterbauelemente]. M.: *Radio i svyaz'*, 1990. 264 p.
5. Sominskiy M.S. *Poluprovodniki* [Halbleiter].- L. *Nauka* 1967. 439p.
6. P. Profos. *Spravochnik "Izmereniya v promyshlennosti"* [Verzeichnis "Messungen in der Industrie"] 1-3 Bände. M.: *Metallurgiya*, 1990.

## Anhang

**Tabelle 1.**

Abhängigkeit der EMK eines Differentialthermoelementes aus Chrom-Kupfer (**Тип Л**) von der Temperatur der Arbeitsstelle (Kalibriertabelle).

Temperaturbereich von  $-20^{\circ}\text{C}$  bis  $+200^{\circ}\text{C}$

t, °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	EMF, mV									
-20	-1,27	-1,35	-1,39	-1,46	-1,52	-1,58	-1,64	-1,70	-1,77	-1,83
-10	-0,64	-0,70	-0,77	-0,83	-0,89	-0,96	-1,02	-1,08	-1,14	-1,21
-0	0	-0,06	-0,13	-0,19	0,26	-0,32	-0,38	0,45	-0,51	-0,58
+0	0	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
80	5,48	5,56	5,63	5,70	5,78	5,85	5,92	5,99	6,07	6,14
90	6,21	6,29	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,87
100	6,95	7,03	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	7,47	7,54	7,62
110	7,69	7,77	7,84	7,91	7,99	8,06	8,13	8,21	8,28	8,35
120	8,43	8,50	8,58	8,65	8,73	8,80	8,88	8,95	9,03	9,10
130	9,18	9,25	9,33	9,40	9,48	9,55	9,63	9,70	9,78	9,85
140	9,93	10,00	10,08	10,16	10,23	10,31	10,38	10,46	10,54	10,61
150	10,69	10,77	10,85	10,92	11,00	11,08	11,15	11,23	11,31	11,38
160	11,46	11,54	11,62	11,69	11,77	11,85	11,93	12,00	12,08	12,16
170	12,24	12,32	12,40	12,48	12,55	12,63	12,71	12,79	12,87	12,93
180	13,03	13,11	13,19	13,27	13,36	13,44	13,52	13,60	13,68	13,76
190	13,84	13,92	14,00	14,08	14,16	14,23	14,33	14,42	14,50	14,58
200	14,66	14,74	14,82	14,90	14,98	15,06	15,14	15,22	15,30	15,38

**Tabelle 2.**

Abhängigkeit der EMK eines Chrom-Aluminium-Differentialthermoelementes (**Typ K**) von der Temperatur der Arbeitsstelle (Kalibriertabelle).

Temperaturbereich von -270 °C bis 1370 °C.

t, °C	EMF, mV										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
-270	-8.458										
-260	-8.441	-8.444	-8.448	-8.448	-8.450	-8.452	-8.453	-8.455	-8.458	-8.457	-8.458
-250	-8.404	-8.408	-8.413	-8.417	-8.421	-8.425	-8.429	-8.432	-8.435	-8.438	-8.441
-240	-8.344	-8.351	-8.358	-8.364	-8.370	-8.377	-8.382	-8.388	-8.393	-8.399	-8.404
-230	-8.262	-8.271	-8.280	-8.289	-8.297	-8.306	-8.314	-8.322	-8.329	-8.337	-8.344
-220	-8.158	-8.170	-8.181	-8.192	-8.202	-8.213	-8.223	-8.233	-8.243	-8.252	-8.262
-210	-8.035	-8.048	-8.061	-8.074	-8.087	-8.099	-8.111	-8.123	-8.135	-8.147	-8.158
-200	-5.891	-5.907	-5.922	-5.936	-5.951	-5.965	-5.980	-5.994	-6.007	-6.021	-6.035
-190	-5.730	-5.747	-5.763	-5.780	-5.797	-5.813	-5.829	-5.845	-5.861	-5.876	-5.891
-180	-5.550	-5.569	-5.588	-5.606	-5.624	-5.642	-5.660	-5.678	-5.695	-5.713	-5.730
-170	-5.354	-5.374	-5.395	-5.415	-5.435	-5.454	-5.474	-5.493	-5.512	-5.531	-5.550
-160	-5.141	-5.163	-5.185	-5.207	-5.228	-5.250	-5.271	-5.292	-5.313	-5.333	-5.354
-150	-4.913	-4.936	-4.960	-4.983	-5.006	-5.029	-5.052	-5.074	-5.097	-5.119	-5.141
-140	-4.669	-4.694	-4.719	-4.744	-4.768	-4.793	-4.817	-4.841	-4.865	-4.889	-4.913
-130	-4.411	-4.437	-4.463	-4.490	-4.516	-4.542	-4.567	-4.593	-4.618	-4.644	-4.669
-120	-4.138	-4.166	-4.194	-4.221	-4.249	-4.276	-4.303	-4.330	-4.357	-4.384	-4.411
-110	-3.852	-3.882	-3.911	-3.939	-3.968	-3.997	-4.025	-4.054	-4.082	-4.110	-4.138
-100	-3.554	-3.584	-3.614	-3.645	-3.675	-3.705	-3.734	-3.764	-3.794	-3.823	-3.852
-90	-3.243	-3.274	-3.306	-3.337	-3.368	-3.400	-3.431	-3.462	-3.492	-3.523	-3.554
-80	-2.920	-2.953	-2.986	-3.018	-3.050	-3.083	-3.115	-3.147	-3.179	-3.211	-3.243
-70	-2.587	-2.620	-2.654	-2.688	-2.721	-2.755	-2.788	-2.821	-2.854	-2.887	-2.920
-60	-2.243	-2.278	-2.312	-2.347	-2.382	-2.416	-2.450	-2.485	-2.519	-2.553	-2.587
-50	-1.889	-1.925	-1.961	-1.996	-2.032	-2.067	-2.103	-2.138	-2.173	-2.208	-2.243
-40	-1.527	-1.564	-1.600	-1.637	-1.673	-1.709	-1.745	-1.782	-1.818	-1.854	-1.889
-30	-1.156	-1.194	-1.231	-1.268	-1.305	-1.343	-1.380	-1.417	-1.453	-1.490	-1.527
-20	-0.778	-0.816	-0.854	-0.892	-0.930	-0.968	-1.006	-1.043	-1.081	-1.119	-1.156
-10	-0.392	-0.431	-0.470	-0.508	-0.547	-0.586	-0.624	-0.663	-0.701	-0.739	-0.778
0	0.000	-0.039	-0.079	-0.118	-0.157	-0.197	-0.236	-0.275	-0.314	-0.353	-0.392
0	0.000	0.039	0.079	0.119	0.158	0.198	0.238	0.277	0.317	0.357	0.397
10	0.397	0.437	0.477	0.517	0.557	0.597	0.637	0.677	0.718	0.758	0.798
20	0.798	0.838	0.879	0.919	0.959	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023
50	2.023	2.064	2.106	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.438
60	2.438	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	3.267
80	3.267	3.308	3.350	3.391	3.433	3.474	3.516	3.557	3.599	3.640	3.682
90	3.682	3.723	3.765	3.806	3.848	3.889	3.931	3.972	4.013	4.055	4.096
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.262	4.303	4.344	4.385	4.427	4.468	4.509
110	4.509	4.550	4.591	4.633	4.674	4.715	4.756	4.797	4.838	4.879	4.920
120	4.920	4.961	5.002	5.043	5.084	5.124	5.165	5.206	5.247	5.288	5.328
130	5.328	5.369	5.410	5.450	5.491	5.532	5.572	5.613	5.653	5.694	5.735
140	5.735	5.775	5.815	5.856	5.896	5.937	5.977	6.017	6.058	6.098	6.138
150	6.138	6.179	6.219	6.259	6.299	6.339	6.380	6.420	6.460	6.500	6.540
160	6.540	6.580	6.620	6.660	6.701	6.741	6.781	6.821	6.861	6.901	6.941
170	6.941	6.981	7.021	7.060	7.100	7.140	7.180	7.220	7.260	7.300	7.340
180	7.340	7.380	7.420	7.460	7.500	7.540	7.579	7.619	7.659	7.699	7.739
190	7.739	7.779	7.819	7.859	7.899	7.939	7.979	8.019	8.059	8.099	8.138

Fortsetzung von Tabelle 2

200	8.138	8.178	8.218	8.258	8.298	8.338	8.378	8.418	8.458	8.499	8.539	200
210	8.539	8.579	8.619	8.659	8.699	8.739	8.779	8.819	8.859	8.900	8.940	210
220	8.940	8.980	9.020	9.061	9.101	9.141	9.181	9.222	9.262	9.302	9.343	220
230	9.343	9.383	9.423	9.464	9.504	9.545	9.585	9.626	9.666	9.707	9.747	230
240	9.747	9.788	9.828	9.869	9.909	9.950	9.991	10.031	10.072	10.113	10.153	240
250	10.153	10.194	10.235	10.278	10.318	10.357	10.398	10.439	10.480	10.520	10.561	250
260	10.561	10.602	10.643	10.684	10.725	10.766	10.807	10.848	10.889	10.930	10.971	260
270	10.971	11.012	11.053	11.094	11.135	11.176	11.217	11.259	11.300	11.341	11.382	270
280	11.382	11.423	11.465	11.506	11.547	11.588	11.630	11.671	11.712	11.753	11.795	280
290	11.795	11.838	11.877	11.919	11.960	12.001	12.043	12.084	12.126	12.167	12.209	290
300	12.209	12.250	12.291	12.333	12.374	12.416	12.457	12.499	12.540	12.582	12.624	300
310	12.624	12.665	12.707	12.748	12.790	12.831	12.873	12.915	12.956	12.998	13.040	310
320	13.040	13.081	13.123	13.165	13.206	13.248	13.290	13.331	13.373	13.415	13.457	320
330	13.457	13.498	13.540	13.582	13.624	13.665	13.707	13.749	13.791	13.833	13.874	330
340	13.874	13.916	13.958	14.000	14.042	14.084	14.126	14.167	14.209	14.251	14.293	340
350	14.293	14.335	14.377	14.419	14.461	14.503	14.545	14.587	14.629	14.671	14.713	350
360	14.713	14.755	14.797	14.839	14.881	14.923	14.965	15.007	15.049	15.091	15.133	360
370	15.133	15.175	15.217	15.259	15.301	15.343	15.385	15.427	15.469	15.511	15.554	370
380	15.554	15.596	15.638	15.680	15.722	15.764	15.806	15.849	15.891	15.933	15.975	380
390	15.975	16.017	16.059	16.102	16.144	16.186	16.228	16.270	16.313	16.355	16.397	390
400	16.397	16.439	16.482	16.524	16.566	16.608	16.651	16.693	16.735	16.778	16.820	400
410	16.820	16.862	16.904	16.947	16.989	17.031	17.074	17.116	17.158	17.201	17.243	410
420	17.243	17.285	17.328	17.370	17.413	17.455	17.497	17.540	17.582	17.624	17.667	420
430	17.667	17.709	17.752	17.794	17.837	17.879	17.921	17.964	18.006	18.049	18.091	430
440	18.091	18.134	18.176	18.218	18.261	18.303	18.346	18.388	18.431	18.473	18.516	440
450	18.516	18.558	18.601	18.643	18.686	18.728	18.771	18.813	18.856	18.898	18.941	450
460	18.941	18.983	19.026	19.068	19.111	19.154	19.196	19.239	19.281	19.324	19.366	460
470	19.368	19.409	19.451	19.494	19.537	19.579	19.622	19.664	19.707	19.750	19.792	470
480	19.792	19.835	19.877	19.920	19.962	20.005	20.048	20.090	20.133	20.175	20.218	480
490	20.218	20.261	20.303	20.346	20.389	20.431	20.474	20.516	20.559	20.602	20.644	490
500	20.644	20.687	20.730	20.772	20.815	20.857	20.900	20.943	20.985	21.028	21.071	500
510	21.071	21.113	21.156	21.199	21.241	21.284	21.326	21.369	21.412	21.454	21.497	510
520	21.497	21.540	21.582	21.625	21.668	21.710	21.753	21.796	21.838	21.881	21.924	520
530	21.924	21.966	22.009	22.052	22.094	22.137	22.179	22.222	22.265	22.307	22.350	530
540	22.350	22.393	22.435	22.478	22.521	22.563	22.606	22.649	22.691	22.734	22.776	540
550	22.776	22.819	22.862	22.904	22.947	22.990	23.032	23.075	23.117	23.160	23.203	550
560	23.203	23.245	23.288	23.331	23.373	23.416	23.458	23.501	23.544	23.586	23.629	560
570	23.629	23.671	23.714	23.757	23.799	23.842	23.884	23.927	23.970	24.012	24.055	570
580	24.055	24.097	24.140	24.182	24.225	24.267	24.310	24.353	24.395	24.438	24.480	580
590	24.480	24.523	24.565	24.608	24.650	24.693	24.735	24.778	24.820	24.863	24.905	590
600	24.905	24.948	24.990	25.033	25.075	25.118	25.160	25.203	25.245	25.288	25.330	600
610	25.330	25.373	25.415	25.458	25.500	25.543	25.585	25.627	25.670	25.712	25.755	610
620	25.755	25.797	25.840	25.882	25.924	25.967	26.009	26.052	26.094	26.136	26.179	620
630	26.179	26.221	26.263	26.306	26.348	26.390	26.433	26.475	26.517	26.560	26.602	630
640	26.602	26.644	26.687	26.729	26.771	26.814	26.856	26.898	26.940	26.983	27.025	640
650	27.025	27.067	27.109	27.152	27.194	27.236	27.278	27.320	27.363	27.405	27.447	650
660	27.447	27.489	27.531	27.574	27.616	27.658	27.700	27.742	27.784	27.826	27.869	660
670	27.869	27.911	27.953	27.995	28.037	28.079	28.121	28.163	28.205	28.247	28.289	670
680	28.289	28.332	28.374	28.416	28.458	28.500	28.542	28.584	28.626	28.668	28.710	680
690	28.710	28.752	28.794	28.835	28.877	28.919	28.961	29.003	29.045	29.087	29.129	690

Fortsetzung von Tabelle 2

700	29.129	29.171	29.213	29.255	29.297	29.338	29.380	29.422	29.464	29.506	29.548
710	29.546	29.589	29.631	29.673	29.715	29.757	29.798	29.840	29.882	29.924	29.965
720	29.965	30.007	30.049	30.090	30.132	30.174	30.216	30.257	30.299	30.341	30.382
730	30.382	30.424	30.466	30.507	30.549	30.590	30.632	30.674	30.715	30.757	30.798
740	30.798	30.840	30.881	30.923	30.964	31.006	31.047	31.089	31.130	31.172	31.213
750	31.213	31.255	31.296	31.338	31.379	31.421	31.462	31.504	31.545	31.586	31.628
760	31.628	31.669	31.710	31.752	31.793	31.834	31.876	31.917	31.958	32.000	32.041
770	32.041	32.082	32.124	32.165	32.206	32.247	32.289	32.330	32.371	32.412	32.453
780	32.453	32.495	32.536	32.577	32.618	32.659	32.700	32.742	32.783	32.824	32.865
790	32.865	32.906	32.947	32.988	33.029	33.070	33.111	33.152	33.193	33.234	33.275
800	33.275	33.316	33.357	33.398	33.439	33.480	33.521	33.562	33.603	33.644	33.685
810	33.685	33.726	33.767	33.808	33.848	33.889	33.930	33.971	34.012	34.053	34.093
820	34.093	34.134	34.175	34.216	34.257	34.297	34.338	34.379	34.420	34.460	34.501
830	34.501	34.542	34.582	34.623	34.664	34.704	34.745	34.786	34.826	34.867	34.908
840	34.908	34.948	34.989	35.029	35.070	35.110	35.151	35.192	35.232	35.273	35.313
850	35.313	35.354	35.394	35.435	35.475	35.516	35.556	35.596	35.637	35.677	35.718
860	35.718	35.758	35.798	35.839	35.879	35.920	35.960	36.000	36.041	36.081	36.121
870	36.121	36.162	36.202	36.242	36.282	36.323	36.363	36.403	36.443	36.484	36.524
880	36.524	36.564	36.604	36.644	36.685	36.725	36.765	36.805	36.845	36.885	36.925
890	36.925	36.965	37.006	37.046	37.086	37.126	37.166	37.206	37.246	37.286	37.326
900	37.326	37.366	37.406	37.446	37.486	37.526	37.566	37.606	37.646	37.686	37.725
910	37.725	37.765	37.805	37.845	37.885	37.925	37.965	38.005	38.044	38.084	38.124
920	38.124	38.164	38.204	38.243	38.283	38.323	38.363	38.402	38.442	38.482	38.522
930	38.522	38.561	38.601	38.641	38.680	38.720	38.760	38.799	38.839	38.878	38.918
940	38.918	38.958	38.997	39.037	39.076	39.116	39.155	39.195	39.235	39.274	39.314
950	39.314	39.353	39.393	39.432	39.471	39.511	39.550	39.590	39.629	39.669	39.708
960	39.708	39.747	39.787	39.826	39.866	39.905	39.944	39.984	40.023	40.062	40.101
970	40.101	40.141	40.180	40.219	40.259	40.298	40.337	40.376	40.415	40.455	40.494
980	40.494	40.533	40.572	40.611	40.651	40.690	40.729	40.768	40.807	40.846	40.885
990	40.885	40.924	40.963	41.002	41.042	41.081	41.120	41.159	41.198	41.237	41.276
1000	41.276	41.315	41.354	41.393	41.431	41.470	41.509	41.548	41.587	41.626	41.665
1010	41.665	41.704	41.743	41.781	41.820	41.859	41.898	41.937	41.976	42.014	42.053
1020	42.053	42.092	42.131	42.169	42.208	42.247	42.286	42.324	42.363	42.402	42.440
1030	42.440	42.479	42.518	42.556	42.595	42.633	42.672	42.711	42.749	42.788	42.826
1040	42.826	42.865	42.903	42.942	42.980	43.019	43.057	43.096	43.134	43.173	43.211
1050	43.211	43.250	43.288	43.327	43.365	43.403	43.442	43.480	43.518	43.557	43.595
1060	43.595	43.633	43.672	43.710	43.748	43.787	43.825	43.863	43.901	43.940	43.978
1070	43.978	44.016	44.054	44.092	44.130	44.169	44.207	44.245	44.283	44.321	44.359
1080	44.359	44.397	44.435	44.473	44.512	44.550	44.588	44.626	44.664	44.702	44.740
1090	44.740	44.778	44.816	44.853	44.891	44.929	44.967	45.005	45.043	45.081	45.119
1100	45.119	45.157	45.194	45.232	45.270	45.308	45.346	45.383	45.421	45.459	45.497
1110	45.497	45.534	45.572	45.610	45.647	45.685	45.723	45.760	45.798	45.836	45.873
1120	45.873	45.911	45.948	45.986	46.024	46.061	46.099	46.136	46.174	46.211	46.249
1130	46.249	46.286	46.324	46.361	46.398	46.436	46.473	46.511	46.548	46.585	46.623
1140	46.623	46.660	46.697	46.735	46.772	46.809	46.847	46.884	46.921	46.958	46.995
1150	46.995	47.033	47.070	47.107	47.144	47.181	47.218	47.255	47.293	47.330	47.367
1160	47.367	47.404	47.441	47.478	47.515	47.552	47.589	47.626	47.663	47.700	47.737
1170	47.737	47.774	47.811	47.848	47.884	47.921	47.958	47.995	48.032	48.069	48.105
1180	48.105	48.142	48.179	48.216	48.252	48.289	48.326	48.363	48.399	48.436	48.473
1190	48.473	48.509	48.546	48.582	48.619	48.656	48.692	48.729	48.765	48.802	48.838
1200	48.838	48.875	48.911	48.948	48.984	49.021	49.057	49.093	49.130	49.166	49.202
1210	49.202	49.239	49.275	49.311	49.348	49.384	49.420	49.456	49.493	49.529	49.565
1220	49.565	49.601	49.637	49.674	49.710	49.746	49.782	49.818	49.854	49.890	49.926
1230	49.926	49.962	49.998	50.034	50.070	50.106	50.142	50.178	50.214	50.250	50.286
1240	50.286	50.322	50.358	50.393	50.429	50.465	50.501	50.537	50.572	50.608	50.644
1250	50.644	50.680	50.715	50.751	50.787	50.822	50.858	50.894	50.929	50.965	51.000
1260	51.000	51.036	51.071	51.107	51.142	51.178	51.213	51.249	51.284	51.320	51.355
1270	51.355	51.391	51.426	51.461	51.497	51.532	51.567	51.603	51.638	51.673	51.708
1280	51.708	51.744	51.779	51.814	51.849	51.885	51.920	51.955	51.990	52.025	52.060
1290	52.060	52.095	52.130	52.165	52.200	52.235	52.270	52.305	52.340	52.375	52.410
1300	52.410	52.445	52.480	52.515	52.550	52.585	52.620	52.654	52.689	52.724	52.759
1310	52.759	52.794	52.828	52.863	52.898	52.932	52.967	53.002	53.037	53.071	53.106
1320	53.106	53.140	53.175	53.210	53.244	53.279	53.313	53.348	53.382	53.417	53.451
1330	53.451	53.486	53.520	53.555	53.589	53.623	53.658	53.692	53.727	53.761	53.795
1340	53.795	53.830	53.864	53.898	53.932	53.967	54.001	54.035	54.069	54.104	54.138
1350	54.138	54.172	54.206	54.240	54.274	54.308	54.343	54.377	54.411	54.445	54.479
1360	54.479	54.513	54.547	54.581	54.615	54.649	54.683	54.717	54.751	54.785	54.819
1370	54.819	54.852	54.886								1370

**Tabelle 3.**

Abhängigkeit der EMK eines Kupfer-Konstantan-Differentialthermoelementes (Typ T) von der Temperatur der Arbeitsstelle (Kalibriertabelle).

Temperaturbereich von -270 °C bis 400 °C.

t, °C	EMF, mV										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
-270	-8,258										
-260	-8,232	-8,236	-8,239	-8,242	-8,245	-8,248	-8,251	-8,253	-8,255	-8,256	-8,258
-250	-8,180	-8,187	-8,193	-8,198	-8,204	-8,209	-8,214	-8,219	-8,223	-8,228	-8,232
-240	-8,105	-8,114	-8,122	-8,130	-8,138	-8,146	-8,153	-8,160	-8,167	-8,174	-8,180
-230	-8,007	-8,017	-8,028	-8,038	-8,049	-8,059	-8,068	-8,078	-8,087	-8,096	-8,105
-220	-5,888	-5,901	-5,914	-5,928	-5,938	-5,950	-5,962	-5,973	-5,985	-5,996	-6,007
-210	-5,753	-5,767	-5,782	-5,795	-5,809	-5,823	-5,838	-5,850	-5,863	-5,876	-5,888
-200	-5,603	-5,619	-5,634	-5,650	-5,665	-5,680	-5,695	-5,710	-5,724	-5,739	-5,753
-190	-5,439	-5,456	-5,473	-5,489	-5,506	-5,523	-5,539	-5,555	-5,571	-5,587	-5,603
-180	-5,261	-5,279	-5,297	-5,316	-5,334	-5,351	-5,369	-5,387	-5,404	-5,421	-5,439
-170	-5,070	-5,089	-5,109	-5,128	-5,146	-5,167	-5,186	-5,205	-5,224	-5,242	-5,261
-160	-4,865	-4,886	-4,907	-4,928	-4,949	-4,969	-4,989	-5,010	-5,030	-5,050	-5,070
-150	-4,648	-4,671	-4,693	-4,715	-4,737	-4,759	-4,780	-4,802	-4,823	-4,844	-4,865
-140	-4,419	-4,443	-4,466	-4,489	-4,512	-4,535	-4,558	-4,581	-4,604	-4,628	-4,649
-130	-4,177	-4,202	-4,226	-4,251	-4,275	-4,300	-4,324	-4,348	-4,372	-4,395	-4,419
-120	-3,923	-3,949	-3,975	-4,000	-4,026	-4,052	-4,077	-4,102	-4,127	-4,152	-4,177
-110	-3,657	-3,684	-3,711	-3,738	-3,765	-3,791	-3,818	-3,844	-3,871	-3,897	-3,923
-100	-3,379	-3,407	-3,435	-3,463	-3,491	-3,519	-3,547	-3,574	-3,602	-3,629	-3,657
-90	-3,089	-3,118	-3,148	-3,177	-3,206	-3,235	-3,264	-3,293	-3,322	-3,350	-3,379
-80	-2,788	-2,818	-2,849	-2,879	-2,910	-2,940	-2,970	-3,000	-3,030	-3,059	-3,089
-70	-2,476	-2,507	-2,539	-2,571	-2,602	-2,633	-2,664	-2,695	-2,726	-2,757	-2,788
-60	-2,153	-2,186	-2,218	-2,251	-2,283	-2,316	-2,348	-2,380	-2,412	-2,444	-2,476
-50	-1,819	-1,853	-1,887	-1,920	-1,954	-1,987	-2,021	-2,054	-2,087	-2,120	-2,153
-40	-1,475	-1,510	-1,545	-1,579	-1,614	-1,648	-1,683	-1,717	-1,751	-1,785	-1,819
-30	-1,121	-1,157	-1,192	-1,228	-1,264	-1,299	-1,335	-1,370	-1,405	-1,440	-1,475
-20	-0,757	-0,794	-0,830	-0,867	-0,904	-0,940	-0,976	-1,013	-1,049	-1,085	-1,121
-10	-0,383	-0,421	-0,459	-0,496	-0,534	-0,571	-0,608	-0,646	-0,683	-0,720	-0,757
0	0,000	-0,039	-0,077	-0,116	-0,154	-0,193	-0,231	-0,269	-0,307	-0,345	-0,383
0	0,000	0,039	0,078	0,117	0,156	0,195	0,234	0,273	0,312	0,352	0,391
10	0,391	0,431	0,470	0,510	0,549	0,589	0,629	0,669	0,709	0,749	0,790
20	0,790	0,830	0,870	0,911	0,951	0,992	1,033	1,074	1,114	1,155	1,196
30	1,198	1,238	1,279	1,320	1,362	1,403	1,445	1,486	1,528	1,570	1,612
40	1,612	1,654	1,696	1,738	1,780	1,823	1,865	1,908	1,950	1,993	2,036
50	2,036	2,079	2,122	2,165	2,208	2,251	2,294	2,338	2,381	2,425	2,468
60	2,468	2,512	2,556	2,600	2,643	2,687	2,732	2,776	2,820	2,864	2,909
70	2,909	2,953	2,998	3,043	3,087	3,132	3,177	3,222	3,267	3,312	3,358
80	3,358	3,403	3,448	3,494	3,539	3,585	3,631	3,677	3,722	3,768	3,814
90	3,814	3,860	3,907	3,953	3,999	4,046	4,092	4,138	4,185	4,232	4,279
100	4,279	4,325	4,372	4,419	4,466	4,513	4,561	4,608	4,655	4,702	4,750
110	4,750	4,798	4,845	4,893	4,941	4,988	5,036	5,084	5,132	5,180	5,228
120	5,228	5,277	5,325	5,373	5,422	5,470	5,519	5,567	5,616	5,665	5,714
130	5,714	5,763	5,812	5,861	5,910	5,959	6,008	6,057	6,107	6,156	6,206
140	6,206	6,255	6,305	6,355	6,404	6,454	6,504	6,554	6,604	6,654	6,704
150	6,704	6,754	6,805	6,855	6,905	6,956	7,006	7,057	7,107	7,158	7,209
160	7,209	7,260	7,310	7,361	7,412	7,463	7,515	7,566	7,617	7,668	7,720
170	7,720	7,771	7,823	7,874	7,926	7,977	8,029	8,081	8,133	8,185	8,237
180	8,237	8,289	8,341	8,393	8,445	8,497	8,550	8,602	8,654	8,707	8,759
190	8,759	8,812	8,865	8,917	8,970	9,023	9,076	9,129	9,182	9,235	9,288

Fortsetzung von Tabelle 3

200	9.288	9.341	9.395	9.448	9.501	9.555	9.608	9.662	9.715	9.769	9.822	200
210	9.822	9.876	9.930	9.984	10.038	10.092	10.146	10.200	10.254	10.308	10.362	210
220	10.362	10.417	10.471	10.525	10.580	10.634	10.689	10.743	10.798	10.853	10.907	220
230	10.907	10.962	11.017	11.072	11.127	11.182	11.237	11.292	11.347	11.403	11.458	230
240	11.458	11.513	11.569	11.624	11.680	11.735	11.791	11.846	11.902	11.958	12.013	240
250	12.013	12.069	12.125	12.181	12.237	12.293	12.349	12.405	12.461	12.518	12.574	250
260	12.574	12.630	12.687	12.743	12.799	12.856	12.912	12.969	13.026	13.082	13.139	260
270	13.139	13.196	13.253	13.310	13.366	13.423	13.480	13.537	13.595	13.652	13.709	270
280	13.709	13.766	13.823	13.881	13.938	13.995	14.053	14.110	14.168	14.226	14.283	280
290	14.283	14.341	14.399	14.456	14.514	14.572	14.630	14.688	14.746	14.804	14.862	290
300	14.862	14.920	14.978	15.036	15.095	15.153	15.211	15.270	15.328	15.386	15.445	300
310	15.445	15.503	15.562	15.621	15.679	15.738	15.797	15.856	15.914	15.973	16.032	310
320	16.032	16.091	16.150	16.209	16.268	16.327	16.387	16.446	16.505	16.564	16.624	320
330	16.624	16.683	16.742	16.802	16.861	16.921	16.980	17.040	17.100	17.159	17.219	330
340	17.219	17.279	17.339	17.399	17.458	17.518	17.578	17.638	17.698	17.759	17.819	340
350	17.819	17.879	17.939	17.999	18.060	18.120	18.180	18.241	18.301	18.362	18.422	350
360	18.422	18.483	18.543	18.604	18.665	18.725	18.786	18.847	18.908	18.969	19.030	360
370	19.030	19.091	19.152	19.213	19.274	19.335	19.396	19.457	19.518	19.579	19.641	370
380	19.641	19.702	19.763	19.825	19.886	19.947	20.009	20.070	20.132	20.193	20.255	380
390	20.255	20.317	20.378	20.440	20.502	20.563	20.625	20.687	20.748	20.810	20.872	390
400	20.872											400

FOR AUTHOR USE ONLY

**Tabelle 4.**

Abhängigkeit der EMK eines Differenzthermoelementes c Platin-30% Rhodium/Platin-6% Rhodium (**Typ B**) von der Temperatur der Vergleichsstelle (Kalibriertabelle).

Temperaturbereich von 0 °C bis 1820 °C.

t, °C	EMF, mV										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
0	0.000	0.000	0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002
10	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.003	-0.003
20	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
30	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	0.000
40	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002
50	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006
60	0.006	0.007	0.007	0.008	0.008	0.009	0.009	0.010	0.010	0.011	0.011
70	0.011	0.012	0.012	0.013	0.014	0.014	0.015	0.015	0.016	0.017	0.017
80	0.017	0.018	0.019	0.020	0.020	0.021	0.022	0.022	0.023	0.024	0.025
90	0.025	0.026	0.026	0.027	0.028	0.029	0.030	0.031	0.031	0.032	0.033
100	0.033	0.034	0.035	0.036	0.037	0.038	0.039	0.040	0.041	0.042	0.043
110	0.043	0.044	0.045	0.046	0.047	0.048	0.049	0.050	0.051	0.052	0.053
120	0.053	0.055	0.056	0.057	0.058	0.059	0.060	0.062	0.063	0.064	0.065
130	0.065	0.066	0.068	0.069	0.070	0.072	0.073	0.074	0.075	0.077	0.078
140	0.078	0.079	0.081	0.082	0.084	0.085	0.086	0.088	0.089	0.091	0.092
150	0.092	0.094	0.095	0.096	0.098	0.099	0.101	0.102	0.104	0.106	0.107
160	0.107	0.109	0.110	0.112	0.113	0.115	0.117	0.118	0.120	0.122	0.123
170	0.123	0.125	0.127	0.128	0.130	0.132	0.134	0.135	0.137	0.139	0.141
180	0.141	0.142	0.144	0.146	0.148	0.150	0.151	0.153	0.155	0.157	0.159
190	0.159	0.161	0.163	0.165	0.166	0.168	0.170	0.172	0.174	0.176	0.178
200	0.178	0.180	0.182	0.184	0.186	0.188	0.190	0.192	0.195	0.197	0.199
210	0.199	0.201	0.203	0.205	0.207	0.209	0.212	0.214	0.216	0.218	0.220
220	0.220	0.222	0.225	0.227	0.229	0.231	0.234	0.236	0.238	0.241	0.243
230	0.243	0.245	0.248	0.250	0.252	0.255	0.257	0.259	0.262	0.264	0.267
240	0.267	0.269	0.271	0.274	0.276	0.279	0.281	0.284	0.286	0.289	0.291
250	0.291	0.294	0.296	0.299	0.301	0.304	0.307	0.309	0.312	0.314	0.317
260	0.317	0.320	0.322	0.325	0.328	0.330	0.333	0.336	0.338	0.341	0.344
270	0.344	0.347	0.349	0.352	0.355	0.358	0.360	0.363	0.366	0.369	0.372
280	0.372	0.375	0.377	0.380	0.383	0.386	0.389	0.392	0.395	0.398	0.401
290	0.401	0.404	0.407	0.410	0.413	0.416	0.419	0.422	0.425	0.428	0.431
300	0.431	0.434	0.437	0.440	0.443	0.446	0.449	0.452	0.455	0.458	0.462
310	0.462	0.465	0.468	0.471	0.474	0.478	0.481	0.484	0.487	0.490	0.494
320	0.494	0.497	0.500	0.503	0.507	0.510	0.513	0.517	0.520	0.523	0.527
330	0.527	0.530	0.533	0.537	0.540	0.544	0.547	0.550	0.554	0.557	0.561
340	0.561	0.564	0.568	0.571	0.575	0.578	0.582	0.585	0.589	0.592	0.596
350	0.596	0.599	0.603	0.607	0.610	0.614	0.617	0.621	0.625	0.628	0.632
360	0.632	0.636	0.639	0.643	0.647	0.650	0.654	0.658	0.662	0.665	0.669
370	0.669	0.673	0.677	0.680	0.684	0.688	0.692	0.696	0.700	0.703	0.707
380	0.707	0.711	0.715	0.719	0.723	0.727	0.731	0.735	0.738	0.742	0.746
390	0.746	0.750	0.754	0.758	0.762	0.766	0.770	0.774	0.778	0.782	0.787
400	0.787	0.791	0.795	0.799	0.803	0.807	0.811	0.815	0.819	0.824	0.828
410	0.828	0.832	0.836	0.840	0.844	0.849	0.853	0.857	0.861	0.865	0.870
420	0.870	0.874	0.878	0.883	0.887	0.891	0.896	0.900	0.904	0.909	0.913
430	0.913	0.917	0.922	0.926	0.930	0.935	0.939	0.944	0.948	0.953	0.957
440	0.957	0.961	0.966	0.970	0.975	0.979	0.984	0.988	0.993	0.997	1.002
450	1.002	1.007	1.011	1.016	1.020	1.025	1.030	1.034	1.039	1.043	1.048
460	1.048	1.053	1.057	1.062	1.067	1.071	1.076	1.081	1.086	1.090	1.095
470	1.095	1.100	1.105	1.109	1.114	1.119	1.124	1.129	1.133	1.138	1.143
480	1.143	1.148	1.153	1.158	1.163	1.167	1.172	1.177	1.182	1.187	1.192
490	1.192	1.197	1.202	1.207	1.212	1.217	1.222	1.227	1.232	1.237	1.242

Fortsetzung von Tabelle 4

500	1.242	1.247	1.252	1.257	1.262	1.267	1.272	1.277	1.282	1.288	1.293	500
510	1.293	1.298	1.303	1.308	1.313	1.318	1.324	1.329	1.334	1.339	1.344	510
520	1.344	1.350	1.355	1.360	1.365	1.371	1.376	1.381	1.387	1.392	1.397	520
530	1.397	1.402	1.408	1.413	1.418	1.424	1.429	1.435	1.440	1.445	1.451	530
540	1.451	1.456	1.462	1.467	1.472	1.478	1.483	1.489	1.494	1.500	1.505	540
550	1.505	1.511	1.516	1.522	1.527	1.533	1.539	1.544	1.550	1.555	1.561	550
560	1.561	1.568	1.572	1.578	1.583	1.589	1.595	1.600	1.606	1.612	1.617	560
570	1.617	1.623	1.629	1.634	1.640	1.646	1.652	1.657	1.663	1.669	1.675	570
580	1.675	1.680	1.686	1.692	1.698	1.704	1.709	1.715	1.721	1.727	1.733	580
590	1.733	1.739	1.745	1.750	1.756	1.762	1.768	1.774	1.780	1.786	1.792	590
600	1.792	1.798	1.804	1.810	1.816	1.822	1.828	1.834	1.840	1.846	1.852	600
610	1.852	1.858	1.864	1.870	1.876	1.882	1.888	1.894	1.901	1.907	1.913	610
620	1.913	1.919	1.925	1.931	1.937	1.944	1.950	1.956	1.962	1.968	1.975	620
630	1.975	1.981	1.987	1.993	1.999	2.006	2.012	2.018	2.025	2.031	2.037	630
640	2.037	2.043	2.050	2.056	2.062	2.069	2.075	2.082	2.088	2.094	2.101	640
650	2.101	2.107	2.113	2.120	2.126	2.133	2.139	2.146	2.152	2.158	2.165	650
660	2.165	2.171	2.178	2.184	2.191	2.197	2.204	2.210	2.217	2.224	2.230	660
670	2.230	2.237	2.243	2.250	2.256	2.263	2.270	2.276	2.283	2.289	2.296	670
680	2.296	2.303	2.309	2.316	2.323	2.329	2.336	2.343	2.350	2.356	2.363	680
690	2.363	2.370	2.376	2.383	2.390	2.397	2.403	2.410	2.417	2.424	2.431	690
700	2.431	2.437	2.444	2.451	2.458	2.465	2.472	2.479	2.485	2.492	2.499	700
710	2.499	2.506	2.513	2.520	2.527	2.534	2.541	2.548	2.555	2.562	2.569	710
720	2.569	2.576	2.583	2.590	2.597	2.604	2.611	2.618	2.625	2.632	2.639	720
730	2.639	2.646	2.653	2.660	2.667	2.674	2.681	2.688	2.695	2.703	2.710	730
740	2.710	2.717	2.724	2.731	2.738	2.746	2.753	2.760	2.767	2.775	2.782	740
750	2.782	2.789	2.796	2.803	2.811	2.818	2.825	2.833	2.840	2.847	2.854	750
760	2.854	2.862	2.869	2.876	2.884	2.891	2.898	2.906	2.913	2.921	2.928	760
770	2.928	2.935	2.943	2.950	2.958	2.966	2.973	2.980	2.987	2.995	3.002	770
780	3.002	3.010	3.017	3.025	3.032	3.040	3.047	3.055	3.062	3.070	3.078	780
790	3.078	3.085	3.093	3.100	3.108	3.116	3.123	-3.131	3.138	3.146	3.154	790
800	3.154	3.161	3.169	3.177	3.184	3.192	3.200	3.207	3.215	3.223	3.230	800
810	3.230	3.238	3.246	3.254	3.261	3.269	3.277	3.285	3.292	3.300	3.308	810
820	3.308	3.316	3.324	3.331	3.339	3.347	3.355	3.363	3.371	3.379	3.388	820
830	3.388	3.394	3.402	3.410	3.418	3.426	3.434	3.442	3.450	3.458	3.466	830
840	3.466	3.474	3.482	3.490	3.498	3.506	3.514	3.522	3.530	3.538	3.546	840
850	3.546	3.554	3.562	3.570	3.578	3.586	3.594	3.602	3.610	3.618	3.626	850
860	3.626	3.634	3.643	3.651	3.659	3.667	3.675	3.683	3.692	3.700	3.708	860
870	3.708	3.716	3.724	3.732	3.741	3.749	3.757	3.765	3.774	3.782	3.790	870
880	3.790	3.798	3.807	3.815	3.823	3.832	3.840	3.848	3.857	3.865	3.873	880
890	3.873	3.882	3.890	3.898	3.907	3.915	3.923	3.932	3.940	3.949	3.957	890
900	3.957	3.965	3.974	3.982	3.991	3.999	4.008	4.016	4.024	4.033	4.041	900
910	4.041	4.050	4.058	4.067	4.075	4.084	4.093	4.101	4.110	4.118	4.127	910
920	4.127	4.135	4.144	4.152	4.161	4.170	4.178	4.187	4.195	4.204	4.213	920
930	4.213	4.221	4.230	4.239	4.247	4.256	4.265	4.273	4.282	4.291	4.299	930
940	4.299	4.308	4.317	4.326	4.334	4.343	4.352	4.360	4.369	4.378	4.387	940
950	4.387	4.396	4.404	4.413	4.422	4.431	4.440	4.448	4.457	4.466	4.475	950
960	4.475	4.484	4.493	4.501	4.510	4.519	4.528	4.537	4.546	4.555	4.564	960
970	4.564	4.573	4.582	4.591	4.599	4.608	4.617	4.626	4.635	4.644	4.653	970
980	4.653	4.662	4.671	4.680	4.689	4.698	4.707	4.716	4.725	4.734	4.743	980
990	4.743	4.753	4.762	4.771	4.780	4.789	4.798	4.807	4.816	4.825	4.834	990

Fortsetzung von Tabelle 4

1000	4.834	4.843	4.853	4.862	4.871	4.880	4.889	4.898	4.908	4.917	4.926
1010	4.926	4.935	4.944	4.954	4.963	4.972	4.981	4.990	5.000	5.009	5.018
1020	5.018	5.027	5.037	5.046	5.056	5.065	5.074	5.083	5.092	5.102	5.111
1030	5.111	5.120	5.130	5.139	5.148	5.158	5.167	5.176	5.186	5.195	5.205
1040	5.205	5.214	5.223	5.233	5.242	5.252	5.261	5.270	5.280	5.289	5.299
1050	5.299	5.308	5.318	5.327	5.337	5.346	5.356	5.365	5.375	5.384	5.394
1060	5.394	5.403	5.413	5.422	5.432	5.441	5.451	5.460	5.470	5.480	5.489
1070	5.489	5.499	5.508	5.518	5.528	5.537	5.547	5.556	5.566	5.576	5.585
1080	5.585	5.595	5.605	5.614	5.624	5.634	5.643	5.653	5.663	5.672	5.682
1090	5.682	5.692	5.702	5.711	5.721	5.731	5.740	5.750	5.760	5.770	5.780
1100	5.780	5.789	5.799	5.809	5.819	5.828	5.838	5.848	5.858	5.868	5.878
1110	5.878	5.887	5.897	5.907	5.917	5.927	5.937	5.947	5.956	5.966	5.976
1120	5.976	5.986	5.996	6.006	6.016	6.026	6.036	6.046	6.056	6.066	6.076
1130	6.076	6.085	6.095	6.105	6.115	6.125	6.135	6.145	6.155	6.165	6.175
1140	6.175	6.185	6.195	6.205	6.215	6.225	6.235	6.245	6.255	6.266	6.276
1150	6.276	6.286	6.296	6.306	6.316	6.326	6.336	6.346	6.356	6.367	6.377
1160	6.377	6.387	6.397	6.407	6.417	6.427	6.438	6.448	6.458	6.468	6.478
1170	6.478	6.488	6.499	6.509	6.519	6.529	6.539	6.550	6.560	6.570	6.580
1180	6.580	6.591	6.601	6.611	6.621	6.632	6.642	6.652	6.663	6.673	6.683
1190	6.683	6.693	6.704	6.714	6.724	6.735	6.745	6.755	6.766	6.776	6.786
1200	6.786	6.797	6.807	6.818	6.828	6.838	6.849	6.859	6.869	6.880	6.890
1210	6.890	6.901	6.911	6.922	6.932	6.942	6.953	6.963	6.974	6.984	6.995
1220	6.995	7.005	7.016	7.026	7.037	7.047	7.058	7.068	7.079	7.089	7.100
1230	7.100	7.110	7.121	7.131	7.142	7.152	7.163	7.173	7.184	7.194	7.205
1240	7.205	7.216	7.226	7.237	7.247	7.258	7.269	7.279	7.290	7.300	7.311
1250	7.311	7.322	7.332	7.343	7.353	7.364	7.375	7.385	7.396	7.407	7.417
1260	7.417	7.428	7.439	7.449	7.460	7.471	7.482	7.492	7.503	7.514	7.524
1270	7.524	7.535	7.546	7.557	7.567	7.578	7.589	7.600	7.610	7.621	7.632
1280	7.632	7.643	7.653	7.664	7.675	7.686	7.697	7.707	7.718	7.729	7.740
1290	7.740	7.751	7.761	7.772	7.783	7.794	7.805	7.816	7.827	7.837	7.848
1300	7.848	7.859	7.870	7.881	7.892	7.903	7.914	7.924	7.935	7.946	7.957
1310	7.957	7.968	7.979	7.990	8.001	8.012	8.023	8.034	8.045	8.056	8.066
1320	8.066	8.077	8.088	8.099	8.110	8.121	8.132	8.143	8.154	8.165	8.176
1330	8.176	8.187	8.198	8.209	8.220	8.231	8.242	8.253	8.264	8.275	8.286
1340	8.286	8.298	8.309	8.320	8.331	8.342	8.353	8.364	8.375	8.386	8.397
1350	8.397	8.408	8.419	8.430	8.441	8.453	8.464	8.475	8.486	8.497	8.508
1360	8.508	8.519	8.530	8.542	8.553	8.564	8.575	8.586	8.597	8.608	8.620
1370	8.620	8.631	8.642	8.653	8.664	8.675	8.687	8.698	8.709	8.720	8.731
1380	8.731	8.743	8.754	8.765	8.776	8.787	8.799	8.810	8.821	8.832	8.844
1390	8.844	8.856	8.866	8.877	8.889	8.900	8.911	8.922	8.934	8.946	8.956
1400	8.956	8.967	8.979	8.990	9.001	9.013	9.024	9.035	9.047	9.058	9.069
1410	9.069	9.080	9.092	9.103	9.114	9.126	9.137	9.148	9.160	9.171	9.182
1420	9.182	9.194	9.205	9.216	9.228	9.239	9.251	9.262	9.273	9.285	9.296
1430	9.296	9.307	9.319	9.330	9.342	9.353	9.364	9.376	9.387	9.398	9.410
1440	9.410	9.421	9.433	9.444	9.456	9.467	9.478	9.490	9.501	9.513	9.524
1450	9.524	9.536	9.547	9.558	9.570	9.581	9.593	9.604	9.616	9.627	9.639
1460	9.639	9.650	9.662	9.673	9.684	9.696	9.707	9.719	9.730	9.742	9.753
1470	9.753	9.765	9.776	9.788	9.799	9.811	9.822	9.834	9.845	9.857	9.868
1480	9.868	9.880	9.891	9.903	9.914	9.926	9.937	9.949	9.961	9.972	9.984
1490	9.984	9.995	10.007	10.018	10.030	10.041	10.053	10.064	10.076	10.088	10.099

1500	10.099	10.111	10.122	10.134	10.145	10.157	10.168	10.180	10.192	10.203	10.215	1500
1510	10.215	10.226	10.238	10.249	10.261	10.273	10.284	10.296	10.307	10.319	10.331	1510
1520	10.331	10.342	10.354	10.365	10.377	10.389	10.400	10.412	10.423	10.435	10.447	1520
1530	10.447	10.458	10.470	10.482	10.493	10.505	10.516	10.528	10.540	10.551	10.563	1530
1540	10.563	10.575	10.586	10.598	10.609	10.621	10.633	10.644	10.656	10.668	10.679	1540
1550	10.679	10.691	10.703	10.714	10.726	10.738	10.749	10.761	10.773	10.784	10.796	1550
1560	10.796	10.808	10.819	10.831	10.843	10.854	10.866	10.877	10.889	10.901	10.913	1560
1570	10.913	10.924	10.936	10.948	10.959	10.971	10.983	10.994	11.006	11.018	11.029	1570
1580	11.029	11.041	11.053	11.064	11.076	11.088	11.099	11.111	11.123	11.134	11.146	1580
1590	11.146	11.158	11.169	11.181	11.193	11.205	11.216	11.228	11.240	11.251	11.263	1590
1600	11.263	11.275	11.286	11.298	11.310	11.321	11.333	11.345	11.357	11.368	11.380	1600
1610	11.380	11.392	11.403	11.415	11.427	11.438	11.450	11.462	11.474	11.485	11.497	1610
1620	11.497	11.509	11.520	11.532	11.544	11.555	11.567	11.579	11.591	11.602	11.614	1620
1630	11.614	11.626	11.637	11.649	11.661	11.673	11.684	11.696	11.708	11.719	11.731	1630
1640	11.731	11.743	11.754	11.766	11.778	11.790	11.801	11.813	11.825	11.836	11.848	1640
1650	11.848	11.860	11.871	11.883	11.895	11.907	11.918	11.930	11.942	11.953	11.965	1650
1660	11.965	11.977	11.988	12.000	12.012	12.024	12.035	12.047	12.059	12.070	12.082	1660
1670	12.082	12.094	12.105	12.117	12.129	12.141	12.152	12.164	12.176	12.187	12.199	1670
1680	12.199	12.211	12.222	12.234	12.246	12.257	12.269	12.281	12.292	12.304	12.316	1680
1690	12.316	12.327	12.339	12.351	12.363	12.374	12.386	12.398	12.409	12.421	12.433	1690
1700	12.433	12.444	12.456	12.468	12.479	12.491	12.503	12.514	12.526	12.538	12.549	1700
1710	12.549	12.561	12.572	12.584	12.596	12.607	12.619	12.631	12.642	12.654	12.666	1710
1720	12.666	12.677	12.689	12.701	12.712	12.724	12.736	12.747	12.759	12.770	12.782	1720
1730	12.782	12.794	12.805	12.817	12.829	12.840	12.852	12.863	12.875	12.887	12.898	1730
1740	12.898	12.910	12.921	12.933	12.945	12.956	12.968	12.980	12.991	13.003	13.014	1740
1750	13.014	13.026	13.037	13.049	13.061	13.072	13.084	13.095	13.107	13.119	13.130	1750
1760	13.130	13.142	13.153	13.165	13.176	13.188	13.200	13.211	13.223	13.234	13.246	1760
1770	13.246	13.257	13.269	13.280	13.292	13.304	13.315	13.327	13.338	13.350	13.361	1770
1780	13.361	13.373	13.384	13.396	13.407	13.419	13.430	13.442	13.453	13.465	13.476	1780
1790	13.476	13.488	13.499	13.511	13.522	13.534	13.545	13.557	13.568	13.580	13.591	1790
1800	13.591	13.603	13.614	13.626	13.637	13.649	13.660	13.672	13.683	13.694	13.706	1800
1810	13.706	13.717	13.729	13.740	13.752	13.763	13.775	13.786	13.797	13.809	13.820	1810
1820	13.820											1820

FOR AUTHOR USE ONLY

**More  
Books!**



yes  
**I want morebooks!**

Buy your books fast and straightforward online - at one of world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at  
**[www.morebooks.shop](http://www.morebooks.shop)**

Kaufen Sie Ihre Bücher schnell und unkompliziert online – auf einer der am schnellsten wachsenden Buchhandelsplattformen weltweit! Dank Print-On-Demand umwelt- und ressourcenschonend produziert.

Bücher schneller online kaufen  
**[www.morebooks.shop](http://www.morebooks.shop)**



[info@omniscryptum.com](mailto:info@omniscryptum.com)  
[www.omniscryptum.com](http://www.omniscryptum.com)

OMNIScriptum

