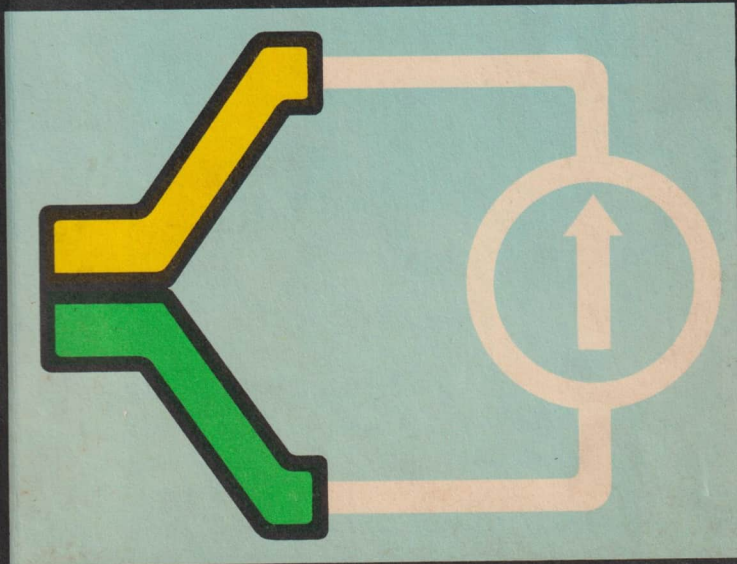


Elektrische Messung nichtelektrischer Größen



Elektrische Messung nichtelektrischer Größen

Richter Schreier Träger Wendt

2. Auflage



Volk und Wissen
Volkseigener Verlag Berlin
1978

Dieses Buch wurde im Forschungskollektiv „Methodik des Physikunterrichts“ der Pädagogischen Hochschule „Liselotte Herrmann“ Güstrow entwickelt.

Autoren:

Armin Richter	Kapitel 1.0.; 1.1.; 5.3.
Ursula Schreier	Kapitel 3.1.; 3.2.; 4.; 6.1.
Bringfried Träger	Kapitel 2.2.; 5.1.; 5.2.
Prof. Dr. Joachim Wendt	Kapitel 1.2.; 1.3.; 2.1.; 2.3.; 3.3.; 6.2

Redaktion: Günter Meyer

Dieses Buch kann für den fakultativen Unterricht an Erweiterten Oberschulen verwendet werden.

© Volk und Wissen Volkseigener Verlag Berlin 1975

2. Auflage

Lizenz-Nr. 203/1000/78 (DN 021705-2)

LSV 0681

Zeichnungen: Mechthild Estenfelder, Berlin

Einband und Typografie: Atelier VWV, Wolfgang Lorenz

Printed in the German Democratic Republic

Schrift: 10/11 p Gill Monotype

Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer“, Bad Langensalza

Redaktionsschluß 25. 11. 1977

Bestell-Nr. 7067413

DDR 3,65 M

1.	Die Bedeutung elektrischer Meßverfahren	9
1.1.	Die Anwendungsbereiche der elektrischen Messung nichtelektrischer Größen	13
1.2.	Einige Grundbegriffe der allgemeinen Meßtechnik	19
1.3.	Bedeutung der elektrischen Messung nichtelektrischer Größen für die Entwicklung der sozialistischen Produktion	21
2.	Grundlagen der elektrischen Messung nichtelektrischer Größen	23
2.1.	Einteilung der Meßfühler	23
2.2.	Messen durch Beeinflussung einer elektrischen Größe	23
2.2.1.	Meßfühler mit Beeinflussung des ohmschen Widerstandes	24
	Der Dehnungsmeßstreifen	24
	Das Widerstandsthermometer mit Metallwiderstand	31
	Das Widerstandsthermometer mit Halbleiterwiderstand	32
	Lichtmessung mit Fotowiderständen	34
2.2.2.	Meßfühler mit Beeinflussung der Induktivität	35
2.2.3.	Meßfühler mit Beeinflussung der Kapazität	39
2.3.	Unmittelbare Erzeugung einer elektrischen Spannung	41
2.3.1.	Das Fotoelement	42
2.3.2.	Das Thermoelement	46
2.3.3.	Der Hallgenerator	52
3.	Untersuchung der Empfindlichkeit und der Fehler bei Meßanordnungen	57
3.1.	Zusammenhang zwischen nichtelektrischer Eingangsgröße und elektrischer Ausgangsgröße	57
3.1.1.	Zusammenhang zwischen Temperatur und Spannung bei Thermoelementen	57
3.1.2.	Zusammenhang zwischen Verdrehungswinkel und Stromstärke bei einem Drehwiderstand	59

3.2.	Empfindlichkeit einer Meßanordnung	60
3.3.	Meßfehler und ihre Ursachen	61
3.3.1.	Arten von Meßfehlern	62
3.3.2.	Fehlergrenzen und Güteklassen	63
3.3.3.	Fehler bei Meßanordnungen	66
4.	Empfindlichkeitserhöhung bei Meßschaltungen	70
4.1.	Spannungsteilerschaltung	70
4.2.	Einsatz der Brückenschaltung	71
4.2.1.	Physikalische Grundlagen einer Brückenschaltung	71
4.2.2.	Der Thermistor in einer Meßbrückenschaltung	74
4.2.3.	Der Dehnungsmeßstreifen in einer Brückenschaltung	76
4.3.	Einsatz des Meßverstärkers	76
4.3.1.	Der lichtelektrische Verstärker	79
4.3.2.	Der Wechselspannungsverstärker	80
4.4.	Einsatz der Kompensationsschaltung	82
4.4.1.	Kompensator mit Spannungsteiler und Normalelement	83
4.4.2.	Kompensator mit veränderlichem Widerstand	84
5.	Meßschaltungen mit passiven Meßfühlern	86
5.1.	Meßschaltung mit ohmschen Meßfühlern	86
5.1.1.	Meßschaltungen mit Dehnungsmeßstreifen	86
5.1.2.	Messungen mit Fotowiderständen	86
5.1.3.	Elektrische Winkelmessung mit Hilfe eines Potentiometers	89
5.1.4.	Elektrische Füllstandsmessung	89
5.2.	Meßschaltungen mit induktiven Meßfühlern	91
5.2.1.	Induktive Kraft- und Wegmessungen	91
5.2.2.	Induktive Dickenmessung	92
5.3.	Meßschaltung mit kapazitiven Meßfühlern	94
5.3.1.	Füllstandsmessung	94
6.	Untersuchung einiger Meßschaltungen mit aktiven Meßfühlern.	97
6.1.	Meßschaltungen mit induktivem Geber	97
6.2.	Meßschaltungen mit Fotoelement und Fotodiode	98
7.	Anhang	103
7.1.	Experimentierhinweise	103
7.2.	Lösungen	113

Zur Benutzung des Buches

Dieses Lehrbuch enthält ausgewählt und systematisch geordnet Beispiele elektrischer Meßverfahren, die Beschreibung einzelner elektrischer Meßgeräte und Meßfühler und des Aufbaus von Meßschaltungen zum Messen nichtelektrischer Größen. Um auch ein selbständiges Erarbeiten dieses Teilgebietes der Meßtechnik zu ermöglichen, enthält das Buch neben vielen an den entsprechenden Stellen eingefügten Fragen zum Inhalt des dargestellten Bildungsgutes auch viele durchgerechnete Beispiele, Aufgaben mit Lösungen im Anhang, Informationstexte für die Ausarbeitung von Fachvorträgen, zahlreiche Literaturangaben und Anleitungen zu Experimenten. Alle diese Elemente wurden in den Text unter dem Gesichtspunkt eingefügt, daß dem Leser optimale Möglichkeiten des Kenntniserwerbs mit diesem Buch gegeben werden sollten. Deshalb sind in den Aufträgen und Aufgaben verschiedene Verfahren und Methoden der Erkenntnisgewinnung, so wie sie im Physikstudium angewendet werden, jeweils besonders deutlich gemacht.

Der Inhalt des Buches umfaßt etwa den Bereich der Meßtechnik, der im fakultativen Unterricht an der Erweiterten Oberschule in der DDR entsprechend dem Lehrgang „Elektrische Messung nichtelektrischer Größen“ studiert wird.

In diesem Buch werden folgende Symbole zur einheitlichen Kennzeichnung verwendet:

● Aufgaben und Fragen

① Aufgaben (fortlaufend numeriert), zu denen im Anhang eine Lösung angegeben ist

¹
▼ Experimente

↗ bedeutet Hinweis auf eine entsprechend genannte Textstelle oder ein Bild

| bedeutet Lesetext, der zur Erläuterung, zur weiteren Information und zur Vorbereitung auf die Durchführung von besonderen Aufträgen dienen soll

1. Die Bedeutung elektrischer Meßverfahren

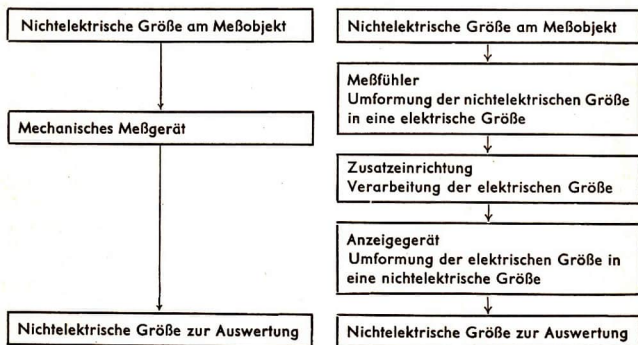
Ein Schüler führt ein physikalisches Experiment durch; ein Flugzeug fliegt auf seinem Kurs, gesteuert durch einen Autopiloten; auf automatischen Taktstraßen werden Motorenhäuser und Kugellager bearbeitet; durch Weltraumsonden werden automatisch physikalische Prozesse registriert. Bei allen diesen Vorgängen sind Meßaufgaben zu lösen.

Damit solche Prozesse ausgelöst werden und ablaufen können, müssen bestimmte Voraussetzungen gegeben sein. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist das Messen physikalischer, technischer oder anderer Größen. Viele der bisherigen Erkenntnisse über die Gesetze der Natur sind vom Menschen zu einem wesentlichen Teil durch Messungen erreicht worden. Es besteht eine enge Wechselbeziehung zwischen dem Entwicklungsstand der Meßtechnik und den Erkenntnissen der Naturgesetze. Die bewußte Ausnutzung der Naturgesetze durch den Menschen mit Hilfe der Wissenschaften (Naturwissenschaften, Technikwissenschaften) entsprechend den heutigen Bedingungen erfordert den Einsatz von Meßgeräten hoher Präzision. Die Effektivität der materiellen Produktion wie zum Beispiel in der chemischen Industrie, in der Optik, in der Feinmechanik, im Maschinenbau, im Bauwesen und in der Elektronik und Elektrotechnik ist in starkem Maße vom Entwicklungsstand der Meßtechnik abhängig. Jede Produktion erfordert die Einhaltung bestimmter Maße oder Zustandsgrößen in ihren Teilphasen. Erst aus dem Zusammenwirken der einzelnen Teilprozesse kann ein qualitätsgerechtes Produkt entstehen; das heißt, es kann nur so genau produziert werden, wie gemessen werden kann. Werden die Meßgeräte nach ihrer Wirkungsweise unterteilt, so kann folgende Einteilung vorgenommen werden: mechanische, optische, elektronische, pneumatische und elektrische Meßgeräte. Neue physikalische Erkenntnisse, wie z. B. die über das Laserprinzip, erfordern neue Meßtechniken. Die Erkenntnisse der Atomphysik führen zusammen mit der Weiterentwicklung der Elektronik zu neuen Meßverfahren.

Zur Messung von Größen, zum Beispiel der Länge, stehen meist verschiedene Meßgeräte zur Verfügung. Es gilt, das am besten geeignete für die konkrete Situation auszuwählen. Ein Tischler mißt die Längen einer Möbelplatte mit einem mechanischen Meßzeug in Form fester Strichmaße. Ein Werkzeugmacher oder ein Feinmechaniker mißt und prüft die Längen eines Arbeitsgegen-

standes, je nach verlangtem Genauigkeitsgrad und Art des Gegenstandes, zum Beispiel mit Meßschieber oder Feinmeßzeiger. Bei einer automatisierten Produktion von Möbelplatten oder Werkzeug- und Geräteteilen ist eine kontinuierliche Kontrolle der Abmessungen mit mechanischen Meßgeräten bei einem hohen Produktionsausstoß kaum möglich. Hier werden neue Meßverfahren benötigt, die dem Produktionsprozeß entsprechen, und die ihn zum Teil erst ermöglichen; das sind vielfach elektrische Meßverfahren. Bei diesen Meßverfahren wird eine zu messende nichtelektrische Größe in eine elektrische Größe umgeformt. Elektrische Größen wie zum Beispiel der elektrische Widerstand, die elektrische Feldstärke, die Stromstärke und die Spannung lassen sich mit hoher Genauigkeit messen. Die in Form von elektrischen Größen erhaltenen Meßwertinformationen können über längere Strecken zu einer zentralen Erfassungsstelle übertragen werden.

Vergleicht man das Prinzip der mechanischen Messung einer nichtelektrischen Größe mit dem Prinzip der elektrischen Messung einer nichtelektrischen Größe, so erhält man folgende Gegenüberstellung.



Bei der mechanischen Messung wird die gemessene (nichtelektrische) Größe durch das Meßgerät sofort als mechanische Größe wiedergegeben. Bei der elektrischen Messung wird die gemessene (nichtelektrische) Größe durch den Meßfühler in eine elektrische Größe umgewandelt. Durch Verstärkung und Übertragung wird diese elektrische Größe weiterverarbeitet und im Anzeigegerät in eine mechanische Größe, den Zeiger ausschlag des Anzeigegerätes, umgewandelt.

Aus dieser Gegenüberstellung ist ersichtlich, daß die elektrische Messung einer nichtelektrischen Größe einen komplizierten Aufbau des Meßmittels verlangt. Der kompliziertere Aufbau des Meßmittels ist mit hohen Anschaffungskosten und teilweise mit einer größeren Störanfälligkeit und entsprechenden Wartungs-

kosten verbunden. Das sind Nachteile des elektrischen Messens. Bevor elektrische Meßmittel eingesetzt werden, sind deshalb genaue ökonomische Berechnungen erforderlich.

In der Medizin, der Biologie, der Meeresforschung, der Weltraumforschung, der Militärtechnik, der landwirtschaftlichen und industriellen Produktion gibt es meßtechnische Anforderungen, die nur durch die elektrische Messung nicht-elektrischer Größen zu erfüllen sind. Analog verhält es sich bei der Rationalisierung und Automatisierung industrieller Prozesse. Zusammengefaßt kann festgestellt werden: elektrische Meßverfahren haben einen weitreichenden Einfluß auf das Niveau von Wissenschaft und Produktion.

Vor uns steht die Aufgabe der weiteren Gestaltung der entwickelten sozialistischen Gesellschaft. Dazu ist eine Intensivierung der Produktion erforderlich. Ein hohes Entwicklungstempo der Produktion, die Steigerung der Effektivität des wissenschaftlich-technischen Fortschritts und die Erhöhung des Wachstums der Arbeitsproduktivität erfordern den rationellsten Einsatz aller Wissenschaften und der Produktionstechnik und damit unter anderem die Anwendung elektrischer Meßverfahren in diesen Bereichen. Die Verbesserung der Arbeits- und Lebensbedingungen im Produktionsprozeß wird unter anderem durch dessen Teilautomatisierung und Automatisierung erreicht. Dabei wird der Anteil der manuellen Arbeit schrittweise verringert. Gleichzeitig werden höhere Anforderungen an Wissen und Können des Werk tätigen gestellt.

Für die effektive Lenkung der Produktion eines Betriebes sind Informationen aus allen Betriebsbereichen notwendig. Diese Informationen werden mit Hilfe der Meßtechnik geliefert. Durch eine Verbindung mit der Datenverarbeitung ermöglicht die Meßtechnik die Bilanzierung der erforderlichen Arbeitskräfte und des Stoff-, Energie- und Zeitbedarfs eines Betriebes. Ursachen einer Ausschußproduktion oder eines zu hohen Materialverbrauchs können mit Hilfe der Meßtechnik sichtbar gemacht werden.

Auf Grund der Bedeutung der Meßtechnik wurde innerhalb des RGW ein komplexes System der Meßwerterfassung und -aufbereitung geschaffen (Universelles Regelungs- und Steuersystem, URS). Damit wurden auf dem Gebiet des Meßwesens die Grundlagen zur Vereinheitlichung der Meßmethoden und Meßmittel gelegt. Als ein Ergebnis kann zum Beispiel die 1972 gegründete internationale Wirtschaftsvereinigung für den Bau von kerntechnischen Geräten „Interatom-instrument“ (IAI) angesehen werden.

Durch den Einsatz des komplexen Systems URS wurde die Möglichkeit geschaffen, daß mehrere sozialistische Staaten gemeinsam am Aufbau und an der Ausrüstung großer Industriewerke in verschiedenen sozialistischen Ländern teilnehmen. So ist die DDR unter anderem an der Ausrüstung des Zellulosekombinates in Ust-Ilimsk, des Kraftwagenwerkes an der Kama und des Chemiekombinates in Nowopolozk in der Sowjetunion beteiligt. Auch an wichtigen Bauvorhaben der DDR arbeiten andere sozialistische Länder mit.

● *Geben Sie RGW-Komplexe an, die in der DDR errichtet werden!*

Durch weitere Abkommen im RGW wird eine möglichst vollständige Befriedigung des Bedarfs der Mitgliedstaaten an meßelektronischen Geräten

und Einrichtungen gewährleistet. Wissenschaftliche Forschungs-, Experimental-, Entwurfs- und Konstruktionsarbeiten werden durch Koordinierung konzentriert, und damit wird eine effektivere Produktionstätigkeit auf dem Gebiet der Meßelektronik ermöglicht.

Als Teil des Systems URS arbeitet das in der DDR entwickelte System Ursamat. Das Ursamat-System umfaßt Baugruppen, Geräte und Einrichtungen zur Gewinnung, Übertragung, Verarbeitung und Nutzung von Informationen für die Automatisierung technologischer Prozesse.

Die fortschreitende Entwicklung der Technik in allen Zweigen der Wirtschaft führt zu immer neuen Anforderungen an die gerätetechnischen Mittel der Meß-, Steuer- und Regeltechnik. Forderungen nach erweiterten Meßbereichen, größerer Genauigkeit, höherer Zuverlässigkeit, nach Anwendung der Geräte unter schwierigen Einsatzbedingungen und nach funktioneller Anpassung des Einsatzes der Rechentechnik entstehen ständig bei der Rationalisierung und Automatisierung industrieller Prozesse.

Die höchstentwickelte Stufe der Informationsgewinnung, Informationsübertragung und Informationsnutzung in der Produktion ist die Steuerung des Produktionsprozesses durch elektronische Datenverarbeitungsanlagen (Prozeßrechner).

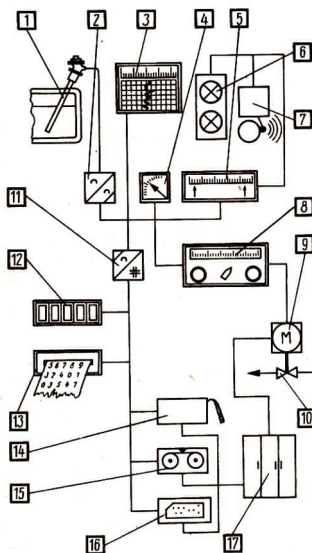


Bild 12/1
Gewinnung und Weiterverarbeitung von Meßwerten

- 1 — Meßfühler
- 2 — Meßwertumformer
- 3 — registrierendes Anzeigergerät
- 4 — analoges Anzeigergerät
- 5 — Anzeigergerät mit Grenzkontakten
- 6 — Leuchtmelder
- 7 — Hörmelder
- 8 — Regler
- 9 — Stellglied
- 10 — Ventil
- 11 — Analog-Digital-Umsetzer
- 12 — digitales Anzeigergerät
- 13 — Zifferndrucker
- 14 — Lochbandgerät
- 15 — Magnetbandgerät
- 16 — Kartenlocher
- 17 — Datenverarbeitungsanlage

1.1. Die Anwendungsbereiche der elektrischen Messung nichtelektrischer Größen

An der Tabelle 1 läßt sich die Vielfalt der Anwendungsbereiche der elektrischen Messung nichtelektrischer Größen erkennen.

Tabelle 1 Nichtelektrische Größen, die elektrisch meßbar sind

Längen	Zeiten	Kräfte	Mengen	verschiedene Größen
Dehnung, Weg, Winkelstellung, Schichtdicke, Füllstand	Zeit, Frequenz, Geschwindigkeit, Drehzahl, Beschleunigung	Kraft, Druck, Drehmoment	Durchflußmenge, Anzahl	Masse, Temperatur, Lautstärke, Beleuchtungsstärke, Strahlung (allgemein), Magnetische Feldstärke

- Wiederholen Sie für die in der Tabelle 1 angegebenen Größen die Definitionsgleichungen und Meßvorschriften an Hand von naturwissenschaftlichen Nachschlagewerken (z. B. Brockhaus abc Physik und Wissensspeicher Physik)!

Der Einsatz der elektrischen Messung nichtelektrischer Größen ist nicht nur für die bereits erwähnten Bereiche der landwirtschaftlichen und industriellen Produktion von Bedeutung, sondern auch für die Medizin, die Landesverteidigung, das Verkehrswesen und zunehmend für die Lösung von Fragen des Umweltschutzes.

Die verantwortungsvolle Arbeit der Ärzte, Schwestern und der medizinisch-technischen Fachkräfte im Dienste der Gesundheit wird durch den Einsatz elektronischer Meßgeräte unterstützt; damit kann zeitraubende Routinearbeit verringert werden. Eine kontinuierliche Kontrolle der Lebensfunktionen gefährdeter Patienten ist mit Hilfe elektrischer Messungen durchführbar. Durch den Einsatz elektrischer Messungen wird die Voraussetzung geschaffen, lebensbedrohliche Situationen rechtzeitig zu signalisieren. Die Ärzte erhalten darüber hinaus bessere Möglichkeiten zur Ermittlung der Ursachen für die Störung der Lebensfunktionen. Zu den Größen, die am Patienten elektrisch meßbar sind, gehören unter anderem die Temperatur, der Puls, der Blutdruck und die Atmung. Für die Temperaturmessung wird die Temperaturabhängigkeit von elektrischen Leitern und Halbleitern in Widerstandsthermometern und Thermoelementen bzw. Thermistoren genutzt. Für die äußere Pulsmessung können Dehnungsmeßstreifen (↗ Abschnitt 2.2.1., S. 24) als Meßfühler verwendet werden, die auf den Pulsdruck ansprechen. Eine andere Möglichkeit besteht in der Nutzung der Eigenschaften des Fotowiderstandes (↗ Abschnitt 2.2.1., S. 34).

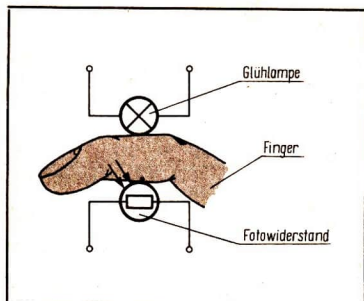


Bild 14/1

Fotoelektrische Durchlichtabnahme
Die kurzzeitige Änderung des Füllungsstandes des Gewebes, wie z. B. am Finger oder am Ohr, mit Blut entspricht der Pulsfrequenz.

Von einer Glühlampe wird Licht durch das Gewebe geschickt. Der Lichtanteil, der auf den Fotowiderstand trifft, ist abhängig von der Pulsfrequenz.

Im Stromkreis mit dem Fotowiderstand wird eine entsprechende Änderung der elektrischen Stromstärke bewirkt.

In der Chirurgie, Gynäkologie, Urologie, Anästhesie (in der Wachstation) und Hals-Nasen-Ohrenklinik wird mit Erfolg das Biometer, ein in unserer Republik entwickeltes komplexes Gerät zur elektrischen Messung von Herzfrequenz, Temperatur und Blutdruck, mit Erfolg eingesetzt.

Die Überwachung der Atmung von Patienten ist besonders bei künstlicher Beatmung sowie bei Kopfverletzungen und Vergiftungen von größter Bedeutung, da in solchen Fällen mit einem Atemstillstand zu rechnen ist. Als Meßfühler werden Thermistoren verwendet, die auf den Temperaturwechsel der Ein- und Ausatemluft ansprechen. Eine Verbindung der Anzeigergeräte mit einer Alarmanlage, die beim Erreichen bestimmter Grenzwerte optische oder akustische Signale auslöst, erhöht den Sicherheitsgrad für die Überwachung des Patienten.

Elektrische Messungen nichtelektrischer Größen in der Landesverteidigung werden zum Teil durch die militärtechnischen Geräte selbst, bei der technischen Diagnose für die Wartung und Instandsetzung der Militärtechnik und bei der Ausbildung der Soldaten und Offiziere zur Anwendung gebracht. Vielseitig ist der Einsatz der Funkmeßtechnik zur Bestimmung von Richtung, Entfernung und Geschwindigkeit bewegter Ziele.

- *Lesen Sie dazu wiederholend den Abschnitt Anwendung Hertzscher Wellen in Lehrbuch Physik für Klasse 10!*

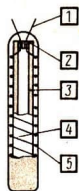
In Flugzeugen, Schiffen, Panzern und Lastkraftwagen werden zur Kontrolle und Sicherung von Betriebszuständen der Haupt- und Nebenaggregate unter anderem die Temperaturen elektrisch gemessen. Widerstandsthermometer verschiedener Bauarten werden u. a. für die Messung der Temperaturen des Kühlwassers bzw. der Kühlluft, der Schmierstoffe, des Strömungsgetriebeöles, der Abgase eingesetzt.

Bei der Wartung der Militärtechnik kommen einzelne Meßgeräte und komplexe Meßstationen zum Einsatz.

Junge Neuerer der Nationalen Volksarmee sind mit Erfolg bemüht, den Anteil der elektrischen Meßmethoden zu erhöhen und zu verbessern.



a)



b)

Bild 15/1

Widerstandsthermometer

a) Einschraubausführung

b) Aufbau des Meßwiderstandes

- 1 — Anschlußdrähte
- 2 — Isolierkern
- 3 — Trägerkörper
- 4 — Meßwicklung
- 5 — Deckglasur

Im Ausbildungsprozeß der Soldaten und Offiziere der Nationalen Volksarmee benutzt man u. a. als wertvolles Trainingsgerät für Schützen die Lichtblitzpistole.¹ Der Abzug des Gewehrs oder der Pistole ist mit einem Lichtblitzgeber kombiniert. Beim Durchziehen des Abzugs wird ein kräftiger, gebündelter Lichtblitz auf die Zielscheibe geworfen. Hinter der Scheibe ist ein Empfänger angeordnet, in welchem der Lichtblitz auf einen Fotowiderstand trifft.

Im Verkehrswesen werden in den Bereichen Schifffahrt, Eisenbahn und Kraftverkehr z. B. Temperaturen, Drehzahlen und Drücke an Dieselmotoren gemessen. Die Maschinenanlage eines 10000 t-Schiffes besitzt 200 bis 300 Meßstellen, die mit Meßgeräten ausgerüstet sind. Durch den Einsatz elektrischer Meßgeräte und die Verarbeitung der Meßwerte in elektronischen Anlagen

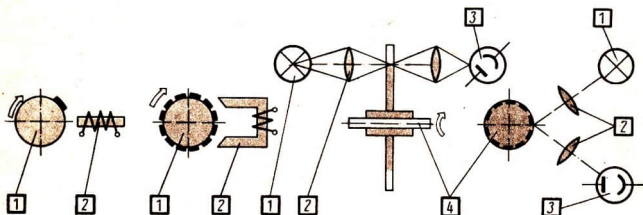


Bild 15/2

Elektromagnetische Umlaufzählung

1 — rotierender Körper

aus magnetfeldbeeinflussenden Stoffen

2 — Permanentmagnet

mit Spule oder Elektromagnet

Der bewegende Teil bewirkt eine

Änderung des Magnetflusses eines

Elektromagneten oder Permanentmagneten

Lichtelektrische Umlaufzählung

1 — Lichtgeber

2 — Linse

3 — Lichtempfänger

4 — rotierender Körper mit unterschiedlicher äußerer Formgebung (Zahnrad) oder Farbgebung.

¹ Jakubaschk, Hagen: Das große Elektronikbastelbuch. Berlin: Militärverlag 1974, 4. Auflage, S. 85 ff.

konnte die Maschinenraumbesetzung reduziert und ihre Arbeit erleichtert werden. Moderne elektronische Anlagen der Datenerfassung und Datenverarbeitung ermöglichen auf den Schiffen der Reedereien unserer Republik eine effektivere Fahrweise der Hauptmaschinen. So kann zum Beispiel eine optimale Zuordnung von Kühlwassertemperatur, Kraftstoffzufuhr, Abgastemperatur und Maschinendrehzahl ermittelt und eingestellt werden.

Die Dieselftriebfahrzeuge der Reichsbahn sind mit Sicherheitsfahrerschaltungen ausgerüstet. Meldet ein Meßfühler unzulässige Betriebszustände, so wird der gefährdete Teil selektiv abgeschaltet oder das Fahrzeug außer Betrieb gesetzt und ein optisches bzw. akustisches Signal ausgelöst. Die Temperatur der einzelnen Bereiche der Maschinenanlage werden mit Widerstandsthermometern gemessen.

Die Erhöhung der Lebensdauer und der Verkehrssicherheit der Verkehrsmittel erfordern ihre ständige Wartung und Instandsetzung.

Die zunehmende Anzahl von Kraftfahrzeugen verlangt zur Bewältigung der notwendigen Serviceleistungen elektrische Meßeinrichtungen. So ist zum Beispiel für die korrekte Einstellung des Zündzeitpunktes von Otto-Motoren ein Lichtblitzstroboskop notwendig.

Um Maßnahmen zur Verbesserung des Umweltschutzes ergreifen zu können, werden Gas- und Staubanteile in der Atmosphäre und die Lärmdichte in Werkhallen und Wohngebieten elektrisch gemessen und registriert. Die langfristige Zielstellung im Bauwesen unserer Republik, bis zum Jahre 1990 allen Familien ausreichenden Wohnraum zur Verfügung zu stellen, die Anzahl der jährlich zu errichtenden Industrie- und Gesellschaftsbauten zu erhöhen, stellt hohe Anforderungen an den rationellsten Baustoffeinsatz. Die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit verlangt die Verfeinerung der Berechnungsverfahren und erfordert die Überprüfung der Ergebnisse durch das Experiment. Damit gewinnen meßtechnische Aufgaben im Bauwesen an Bedeutung. In vielen Fällen sind Messungen die Voraussetzung für eine sichere Einschätzung der Festigkeit, Stabilität und Dauerhaftigkeit der Konstruktion. Bedeutend, aber mühevoll und kostspielig, sind langzeitige meßtechnische Überwachungen mittels mechanischer, mechanisch-optischer Geräte von Modellkörpern, Bauteilen und Bauwerken für wissenschaftliche Untersuchungen. Neben Urteilen über die Qualität und Standsicherheit ermöglichen diese auch Aussagen zu Problemen praktischer, statischer und konstruktiver Art. Durch die Anwendung elektrischer Meßverfahren können derartige Aufgaben ohne besonderen Aufwand an Arbeitskraft in beliebig großen Zeitabständen durchgeführt werden.

In der nachfolgenden Aufzählung weiterer Anwendungsbeispiele der elektrischen Messung nichtelektrischer Größen wird auf eine Zuordnung zu speziellen Produktionsbereichen verzichtet, da die zu messenden Größen oft in mehreren Bereichen auftreten.

Auf Prüfständen sowie an Kraft- und Arbeitsmaschinen werden die verschiedenartigsten mechanischen Größen elektrisch gemessen. Dabei werden Bewegungsvorgänge an den Maschinen untersucht und Kraft-Weg-Messungen an Federn und kombinierte Kraft-Druck-Wegmessungen an hydraulischen Systemen vorgenommen. Messungen des Druckverlaufs werden in Verbren-

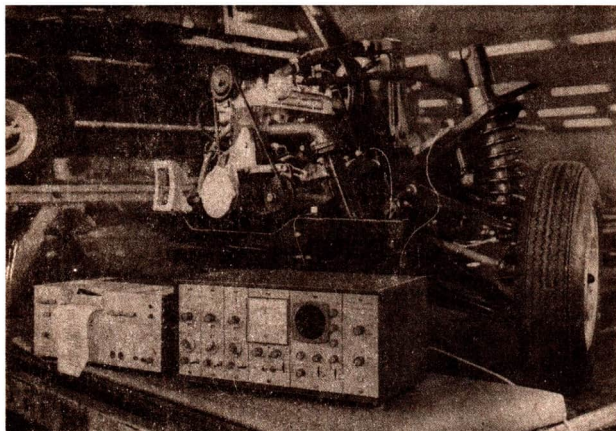


Bild 17/1 Elektrisches Meßgerät zum Messen und Registrieren der Schwingungen

nungsmotoren, Kompressoren und ähnlichen Aggregaten durchgeführt. Die Ermittlung von Schwingungsursachen, die Bestimmung der Eigenfrequenz, die Untersuchung von Lärmentstehung, -ausbreitung und -abstrahlung, das Auffinden von Schwachstellen und von Stellen mit Festigkeitsreserven von Bauteilen, die Ermittlung der Spannungsverteilung bei Belastung mechanischer Anordnungen (Brücken, Kräne, Maschinenteile), die Vielstellenüberwachung belasteter Bauteile als Sicherheitsmaßnahme und die Ermittlung von zulässigen Grenzbelastungen oder von Konstruktionsrichtwerten für Bauteile und Konstruktionen sind weitere Anwendungsbeispiele für elektrische Meßverfahren.

Das Wirbelstromtachometer wird als Meßfühler (\nearrow Abschnitt 2.2.2.) für Drehzahlen benutzt. Ein umlaufender Ringmagnet erzeugt in einem Kurzschlußanker (Aluminiumtrommel) ein Wirbelfeld, das eine drehzahlproportionale Auslenkung des Ankers verursacht. Die Wirbelstromtachometer werden als anzeigende Meßgeräte für die Drehzahlmessung in Kraftfahrzeugen, bei Werkzeugmaschinen, Motoren und Turbinen eingesetzt.

Bei der Automatisierung der chemischen Industrie werden ebenfalls nichtelektrische Größen elektrisch gemessen.

- *Geben Sie Meßgrößen an, die beim Ablauf chemischer Reaktionen kontrolliert werden müssen!*

Die Ermittlung der Eigenschaften und Zusammensetzung der eingesetzten und

erzeugten Stoffe ist für die Qualitätsüberwachung bedeutsam. Es sind ferner Weg- und Drehzahlmessungen, Dickenmessungen und Schwingungsmessungen für die Überwachung der Arbeitsmittel und Maschinen notwendig.

Tabelle 2 Meßgrößen

Reaktionstemperatur: Temperaturdifferenz	Reaktionsdruck: Differenzdruck	Stoffmenge: Durchfluß in Volumeneinheiten Durchfluß in Masseinheiten Füllstand Füllmasse
Stoffeigenschaften: Dichte Viskosität Trübung Wasserstoffionenaktivität	Stoffzusammensetzung: Konzentration	Hilfsgrößen: Drehzahl Lineare Verschiebung Dicke

Besondere Anforderungen an den Einsatz elektrischer Einrichtungen in der chemischen Industrie sind durch den meist erforderlichen Explosionsschutz bedingt.

In der Landwirtschaft fordert der Übergang zur industriemäßigen Produktion den Einsatz der Betriebs-, Meß-, Steuer- und Regeltechnik (BMSR-Technik). Die Einhaltung bestimmter Temperaturen und Feuchtigkeitswerte sind wichtig für die Lagerung landwirtschaftlicher Produkte. Für ein maximales Wachstum der Pflanzen in Gewächshauskomplexen sind bestimmte Temperaturen und Feuchtigkeitswerte eine wesentliche Voraussetzung.

In Gewächshäusern zum Beispiel werden strahlungsgeschützte Widerstandsthermometer eingesetzt, um die Lufttemperatur im Gewächshaus unabhängig von der Sonnenstrahlung zu messen und mit Hilfe des elektrischen Signals Luftheizgeräte ein- oder auszuschalten. Der Anteil am Betrag der möglichen Luftfeuchtigkeit hängt von der Lufttemperatur und der Beregnungsanlage ab. Die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit werden von der Lüftungsanlage beeinflußt. Deshalb ist zur Steuerung der Temperatur eine Verbindung mit der Regelanlage für die Lüftung vorhanden.

Die Auswirkungen von Helligkeitsschwankungen während des Tagesablaufs werden durch einstellbare Sollwerte für hell, trüb und dunkel an der Temperaturregeleinrichtung berücksichtigt. Die Messung der Helligkeitswerte erfolgt mit Fotowiderständen (↗ Abschnitt 2.2.1.) oder Fotoelementen.

Zur Sturmsicherung in Gewächshäusern werden Windfühler eingesetzt. Die von den Windfühlern gemessenen Windgeschwindigkeitswerte werden in elektrische Signale umgewandelt. Diese setzen dann eine Steuerungseinrichtung in Tätigkeit, welche die Lüftungsklappen schließt. Alle anderen Regelanlagen eines Gewächshauskomplexes sind diesem Schaltsignal untergeordnet.

1.2. Einige Grundbegriffe der allgemeinen Meßtechnik

In Produktion und Wissenschaft gewinnt wegen zunehmender Komplexität und Geschwindigkeit vieler Prozesse die automatische Steuerung und Regelung an Bedeutung. Ein typisches Beispiel ist die Beherrschung der Vorgänge in einem Atomkraftwerk. Außer einer regelmäßigen Kontrolle der radioaktiven Strahlung in verschiedenen Bereichen des Kraftwerkes sind die Temperaturen der Flüssigkeiten in den Kreisläufen des Reaktors und des Kraftwerkes, die Druckverhältnisse im Reaktorraum, die Drehzahlen der Pumpen und der elektrischen Generatoren kontinuierlich zu überwachen. Gleichzeitig müssen die genannten Größen gesteuert oder geregelt werden. Es ist nicht möglich, diese Größen an allen Stellen eines Kernkraftwerkes durch Menschen feststellen zu lassen, da zum Teil die Gefährdung für die Gesundheit zu groß wäre. Außerdem müssen aus der Vielzahl der gewonnenen Daten Schlußfolgerungen über den Gesamtverlauf der Prozesse im Kraftwerk gezogen werden. Daher werden die an verschiedenen Stellen gewonnenen Daten an eine zentrale Stelle, die Meßwarte, geleitet.

Während früher viele Größen in der Produktion durch direkte Kontrolle des Menschen ermittelt wurden, geschieht dies heute häufig automatisch. Voraussetzung jeder Datenerfassung in Produktionsabläufen und in der Wissenschaft ist die Durchführung einer oder mehrerer Messungen. Messungen führen zum quantitativen Erfassen einer Größe. Dabei wird zwischen dem **Meßobjekt**, an dem die Größe ermittelt werden soll (Kühlkreislauf des Kraftwerkes) und einem **Meßfühler** (Flüssigkeitsthermometer oder Thermoelement) eine Wechselwirkung hergestellt. Der Meßvorgang liefert einen **Meßwert**. Er entsteht dadurch, daß die zu messende Größe mit einer als Grundeinheit festgelegten Größe gleicher Art verglichen wird. Der Meßwert gibt somit an, wie oft die unbekannte Größe, **Meßgröße** genannt, die Einheit oder Teile dieser Einheit enthält. Der Meßwert besteht damit aus einem Zahlenwert und einer Einheit. Hierdurch ist die Eindeutigkeit jeder Messung gegeben. An eine Messung muß außerdem die Forderung nach ihrer **Reproduzierbarkeit** gestellt werden. Das heißt, die Messung muß, unter gleichen Bedingungen wiederholt, zu demselben Meßwert führen. Es dürfen also keine Veränderungen an dem Meßfühler oder den Meßgeräten im Verlauf der Zeit eintreten, die eine Abweichung des Meßwertes bewirken.

Durch **Meßgeräte** kann die Erfassung von Meßgrößen über die Sinnesorgane des Menschen verbessert werden. Der Mensch ist dadurch in der Lage, auch Meßgrößen zu messen, die den Sinnesorganen nicht direkt zugänglich sind, wie beispielsweise die elektrische Stromstärke oder Drücke. Entscheidend ist, daß das Meßgerät **Signale** liefert, die die entsprechende Information über die Meßgrößen enthalten. Diese Signale können dann vom Menschen oder von elektronischen Geräten erfaßt werden. Sie können den Menschen veranlassen, den Lauf einer Maschine mit der Hand zu steuern. Andererseits können elektronische Datenverarbeitungsanlagen auf Grund der eingehenden Signale ganze Produktionsabläufe regeln (Prozeßrechner).

Zur Gewinnung der Signale werden **Meßverfahren** angewendet, bei denen das Meßobjekt berührt wird oder bei denen berührungslos Informationen aufgenommen werden. Berührende Meßverfahren sind beispielsweise die Messung von Temperaturen mit Thermoelementen oder die Kraftmessung mit Dehnungsmeßstreifen (↗ Abschnitt 2.2., S. 24). Berührungslose Meßverfahren werden angewendet, wenn man die Drehzahl einer Maschine mit Hilfe von Lichtsignalen ermittelt (↗ Abschnitt 2.2., S. 35) oder Dickenmessungen mit Hilfe radioaktiver Strahlen vornimmt. Bei den Meßverfahren mit Berühren des Meßobjektes besteht die Möglichkeit, daß das Meßobjekt durch den Meßfühler beeinflusst werden kann. So kann beispielsweise die Temperatur eines Meßobjektes durch eine zu große Wärmekapazität eines Meßfühlers (Thermoelement) verändert werden. Durch das Anbringen von Meßfühlern zur Kraftmessung können bei Präzisionsmessungen Verformungen des Meßobjektes eintreten. Beim Einsatz von Meßfühlern muß deshalb immer kontrolliert werden, in welchem Umfang derartige Rückwirkungen auf das Meßobjekt vorkommen. Bild 20/1 gibt noch einmal vereinfacht die Zusammenhänge zwischen Meßfühler, Meßwerk und Anzeige am Beispiel einer thermoelektrischen Temperaturmessung wieder.

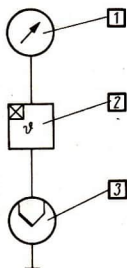


Bild 20/1

Prinzipielle Anordnung einer Meßeinrichtung für thermoelektrische Temperaturmessung

- 1 — Anzeige (Zeiger und Skale)
- 2 — Meßwerk (Teile, die eine Bewegung im Meßgerät erzeugen)
- 3 — Meßfühler (Gerät, das die nichtelektrische Größe in eine elektrische Größe umwandelt)

Gegenüber der direkten Messung von Größen (Längenmessung mit einem Meßschieber, Zeitmessung mit einer Uhr oder Massenvergleich mit einer Balkenwaage) haben die elektrischen Messungen von nichtelektrischen Größen den Vorteil, daß die Meßwerte über größere Entfernungen übertragen werden können. Außerdem ermöglichen elektrische Messungen die unmittelbare Steuerung mit Hilfe der durch die Meßfühler gewonnenen Signale. Sind diese elektrischen Signale zu gering, so lassen sie sich elektronisch verstärken. In vielen Fällen der Meßpraxis benutzt man **Meßketten**. In diesen wird zunächst durch einen Meßfühler ein Signal gewonnen. Dieses wird verstärkt und unter Umständen einer Brückenschaltung zugeführt (↗ Abschnitt 4.2., S. 71). Mit letzterer ist eine Empfindlichkeitserhöhung für die Messung möglich (↗ Abschnitt 4.1., S. 70). Das Signal der Brückenschaltung wird in einem Anzeige-

gerät erneut in ein auswertbares Signal umgeformt. Je mehr Umformungen innerhalb einer Meßkette erfolgen, desto häufiger werden die Möglichkeiten für das Auftreten von Meßfehlern (→ Abschnitt 3.3., S. 61). Es muß deshalb beim Einsatz von Meßketten überprüft werden, ob die benutzten Bausteine für die gestellte Meßaufgabe unbedingt erforderlich sind oder ob mit einem geringeren Aufwand gleich gute Resultate möglich wären. Insbesondere ist beim Zusammenschalten der verschiedenen Elemente einer Meßkette darauf zu achten, daß die Bausteine hinsichtlich ihrer Genauigkeit aufeinander abgestimmt sind. So wäre es verfehlt, einen Präzisionsmeßverstärker mit einem wesentlich ungenaueren Meßfühler zu koppeln.

1.3. Bedeutung der elektrischen Messung nichtelektrischer Größen für die Entwicklung der sozialistischen Produktion

Welcher Zusammenhang besteht zwischen der auf dem VIII. Parteitag der SED im Jahre 1972 gestellten Hauptaufgabe und der Intensivierung der sozialistischen Produktion?

Für die Intensivierung der sozialistischen Produktion werden viele Maschinen und Geräte in den Betrieben mit den Mitteln der Meß-, Steuer- und Regeltechnik ausgestattet. Dadurch werden immer mehr Menschen von schwerer körperlicher Arbeit befreit, und geistig eintönige Arbeiten werden schrittweise in den Produktionsabläufen vermindert.

Dieser Prozeß des Übergangs zu teilautomatisierten und automatisierten Betrieben erfordert eine immer breitere Anwendung des elektrischen Messens nichtelektrischer Größen. Die gemessenen Daten lassen sich in Form elektrischer Signale zu Meßwarten leiten. Dadurch wird eine sichere Kontrolle des Produktionsablaufs ermöglicht. Pflegemaßnahmen und Reparaturen lassen sich zentral gesteuert schneller durchführen.

In den Betrieben werden beim Einsatz der elektrischen Meßtechnik für die Messung verschiedenartiger Größen gleiche Anzeigegeräte und teilweise gleiche Geräte für die Weiterverarbeitung einsetzbar. Dadurch kann eine einfachere Ersatzteillagerhaltung in Großbetrieben eingeführt werden.

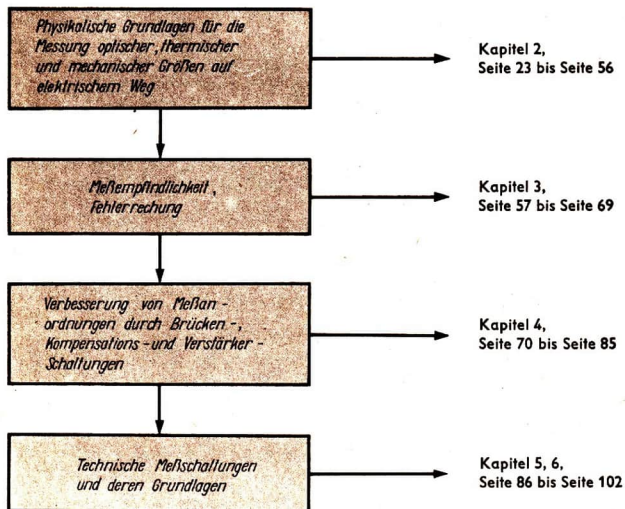
Der zunehmende Einsatz teilautomatisierter und vollautomatisierter Maschinen stellt an die Datenerfassung für die Prozeßsteuerung hohe Anforderungen. Im Zusammenhang mit der sozialistischen ökonomischen Integration ist es erforderlich, die Meßwerterfassung und die Datenerfassung und -verarbeitung zu vereinheitlichen.

So wurde von 20000 Wissenschaftlern, Konstrukteuren und Technikern aus sechs sozialistischen Ländern das einheitliche System elektronischer Rechen-technik (ESER) geschaffen. Es ermöglicht eine einheitliche Anwendungskonzeption der Auswertung von Meßwerten, und darüber hinaus automatisierte Leitungssysteme.

Die elektrischen Meßverfahren — in der Produktion eingesetzt — zeichnen sich vor allem durch einen geringen Energiebedarf, hohe Meßgeschwindigkeit und große Meßgenauigkeit aus. Sie sind daher ein wirksames Mittel, eine hohe Qualität der Erzeugnisse zu gewährleisten.

- Geben Sie Beispiele für die elektrische Messung nichtelektrischer Größen in sozialistischen Betrieben Ihrer näheren Umgebung an!

Das vorliegende Buch enthält Darstellungen zu einigen Grundlagen des elektrischen Messens nichtelektrischer Größen; es ist nach folgendem System gegliedert:



2. Grundlagen der elektrischen Messung nichtelektrischer Größen

2.1. Einteilung der Meßfühler

Die elektrische Messung nichtelektrischer Größen beruht auf der Anwendung verschiedener physikalischer Gesetze. In der Regel wird im Meßfühler eine Energieform in eine elektrische Energie umgewandelt. So erfolgt beispielsweise bei optischen Messungen, wie in Beleuchtungsstärkemeßgeräten, eine Umwandlung elektromagnetischer Energie in elektrische Energie.

Im folgenden werden zwei prinzipiell voneinander verschiedene Meßfühlerarten erläutert.

Aktiver Meßfühler. Der Meßfühler wandelt eine Energieform in elektrische Energie um, ohne daß hierfür Hilfsenergie benötigt wird. Die Signale des Meßfühlers werden aus der Energie des Meßobjekts oder der eine Veränderung des Meßobjektes bewirkenden Energie gebildet.

Passiver Meßfühler. Der Meßfühler bildet die Signale mit einer Hilfsenergie. Die vom Meßobjekt bzw. der Veränderung des Meßobjekts stammende Energie wird lediglich zum Auslösen eines Signals benutzt.

Eine Entscheidung darüber, für welche Meßaufgaben besser ein aktiver Meßfühler oder ein passiver Meßfühler eingesetzt werden kann, muß von Fall zu Fall getroffen werden. Eine allgemeingültige Regel dafür gibt es nicht. Die Betriebsbedingungen und die erforderliche Empfindlichkeit der Meßapparatur sind in jedem einzelnen Fall von Bedeutung.

2.2. Messen durch Beeinflussung einer elektrischen Größe

Die elektrische Messung nichtelektrischer Größen wird zum Beispiel erreicht durch die Beeinflussung der elektrischen Größen:

- ohmscher Widerstand,
- Induktivität,
- Kapazität.

Zum Messen werden Meßfühler eingesetzt, die optische, thermische, mechanische, akustische und strahlungstechnische Größen durch Beeinflussung der genannten elektrischen Parameter meßbar machen. Solche Meßfühler nennt man **passive Meßfühler**.

Der Meßprozeß wird durch das folgende Wirkungsschema verdeutlicht.



Eine nichtelektrische Größe beeinflusst den elektrischen Meßfühler. In ihm wird eine elektrische Größe geändert. Diese bewirkt eine Veränderung der Größe am Anzeigegerät. Auf der Grundlage dieses Wirkungsschemas kann die Beeinflussung verschiedener Meßfühler in Schemata, Programmen u. a. diskutiert werden.

2.2.1. Meßfühler mit Beeinflussung des ohmschen Widerstandes

Die Beeinflussung des ohmschen Widerstandes eines elektrischen Leiters erfolgt über die Veränderung der Bestimmungsgrößen des Widerstandes. Diese sind im Widerstandsgesetz zusammengefaßt.

- Geben Sie die Definitionsgleichung für den ohmschen Widerstand an!
- Nennen Sie das Widerstandsgesetz! Welche Größen müssen geändert werden, um den ohmschen Widerstand eines Leiters zu beeinflussen? Wie können die betreffenden Größen geändert werden?
- Bereiten Sie einen Experimentalvortrag zu folgendem Thema vor: „Die Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes eines metallischen Leiters von Länge und Querschnitt.“ Benutzen Sie dazu: Lehrbuch Physik, Kl. 8, S. 74, und Wissensspeicher Physik, S. 182!
Überprüfen Sie, ob die Merkmale der experimentellen Methode, wie sie im Wissensspeicher Physik, S. 32 und 33, angegeben sind, für diesen Fall zutreffen!

Der Dehnungsmeßstreifen. Eine Möglichkeit der Änderung des ohmschen Widerstandes eines Körpers liegt in der Veränderung von Länge oder Querschnitt dieses Körpers. Benutzt man hierzu einen Widerstandsdraht, so erhält man ein Bauelement, mit dessen Hilfe Längenänderungen und Verdrillungen und damit die diese Veränderungen herbeiführenden Kräfte gemessen werden können. Ein solches Bauelement ist der passive Meßfühler **Dehnungsmeßstreifen** (Bild 25/1).

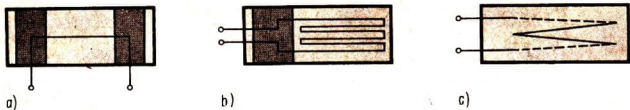


Bild 25/1 Meßdrahtformen für Dehnungsmeßstreifen
 a) Eindrahtmeßstreifen b) Mäanderform c) Spulenform

Dehnungsmeßstreifen dienen zum Erfassen der mechanischen Beanspruchung und Verformung an bestimmten Stellen von Maschinen und Anlagen infolge mechanischer Kräfteinwirkungen. Sie bestehen aus einer dehnbaren Unterlage, auf der ein Meßdraht befestigt ist. Bei der mechanischen Beanspruchung werden Länge und Querschnittsfläche des Meßdrahtes verändert. Dadurch ändert sich sein leicht meßbarer elektrischer Widerstand.

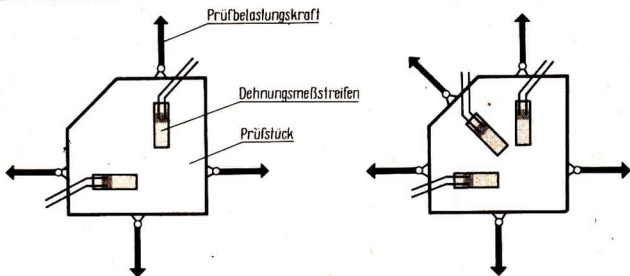
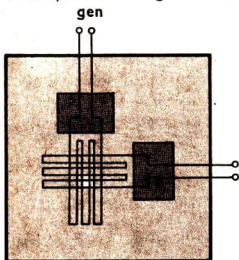
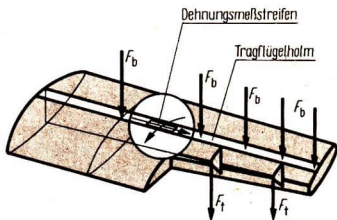


Bild 25/2 Anordnung mehrerer Dehnungsmeßstreifen zum Messen verschiedener Dehnungen



a)



b)

- a) Dehnungsmeßstreifen zum Messen mehrerer Dehnungen an einer Stelle
 b) Gruppenehnungsmeßstreifen zum Messen von Biege- und Torsionsdehnung an einem Tragflügelholm

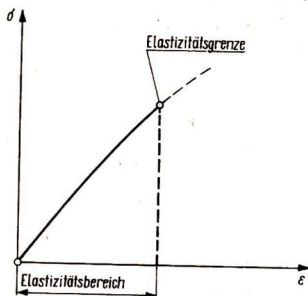


Bild 26/1
Spannungs-Dehnungs-Diagramm

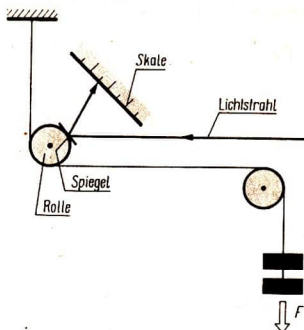


Bild 26/2
Versuchsaufbau zur Bestimmung der Dehnung eines Drahtes

Die Dehnung ist gleich dem Quotienten aus der Längenänderung eines Körpers infolge einer Zugkraft und der ursprünglichen Länge dieses Körpers.

Es gilt für die Dehnung die Beziehung

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

Die Dehnung eines Drahtes läßt sich experimentell mit der in Bild 26/2 angegebenen Anordnung bestimmen.

Der Versuchsaufbau zeigt, daß die Dehnung eines Drahtes wegen der geringen Längenänderung zweckmäßigerweise mit Hilfe eines Lichtzeigers beobachtet und gemessen wird. Bei Belastung des Drahtes ist in einem bestimmten Bereich der Dehnung *elastisches Verhalten* feststellbar. Der Draht nimmt nach Fortfall der Belastung seine ursprüngliche Länge wieder ein. Diesen Bereich nennt man **Elastizitätsbereich**. In ihm wird die Längenänderung durch die folgenden Zusammenhänge dargestellt:

1. Die Längenänderung Δl ist der Zugkraft F direkt proportional.
2. Die Längenänderung Δl ist bei gleichbleibender Zugkraft der ursprünglichen Länge direkt proportional.
3. Die Längenänderung Δl ist bei gleichbleibender Zugkraft dem Querschnitt A umgekehrt proportional.
4. Die Längenänderung ist auch bei homogenem Material des Drahtes materialabhängig.

Daraus ergibt sich die folgende Beziehung für die Längenänderung

$$\Delta l = \frac{\alpha \cdot F \cdot l}{A} \quad (2)$$

Für die Dehnung ε gilt:

$$\varepsilon = \alpha \cdot \frac{F}{A} \quad (3)$$

Es ist üblich, den Proportionalitätsfaktor α als Dehnungskoeffizienten, den reziproken Wert des Proportionalitätsfaktors als Elastizitätsmodul E und den Quotienten $\frac{F}{A}$ als mechanische Spannung σ zu bezeichnen. Mit diesen Festlegungen erhält die Gleichung (3) die Form

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (4)$$

Im Elastizitätsbereich eines festen Körpers gilt die vorliegende Spannungs-Dehnungsbeziehung, die auch als **Hookesches Gesetz** bezeichnet wird.

- ① Bestimmen Sie die Einheit für den Elastizitätsmodul!
- ② Bei der Dehnung eines Drahtes vom Querschnitt $A = 0,07 \text{ mm}^2$ und einer Länge von $l = 80 \text{ cm}$ wird durch eine Zugkraft von $F = 0,1 \text{ kp}$ eine Verlängerung von $\Delta l = 0,091 \text{ mm}$ hervorgerufen. Aus welchem Material kann der Draht bestehen?
- Geben Sie die Definitionsgleichung für den Druck an! Worin unterscheiden sich Druck und mechanische Spannung voneinander?
- Durch welche Art von Kräften wird ein Draht nach Verringerung einer mechanischen Spannung in seinen ursprünglichen Zustand gebracht?
- Studieren Sie den folgenden Text so, daß Sie vor Ihren Mitschülern einen Vortrag zum Thema „Aufbau und Wirkungsweise eines Dehnungsmeßstreifens“ halten können! Überprüfen Sie, welche Vortragsform in Ihrem Falle Anwendung finden kann! Benutzen Sie dazu die Hinweise in Smitmans, H. „Studieren, aber wie?“ Berlin: Verlag Tribüne 1969, S. 108 bis 111!

Lesetext zum Erarbeiten des Schülervortrages: Aufbau und Wirkungsweise eines Dehnungsmeßstreifens.

Mit Hilfe von Dehnungsmeßstreifen können Dehnungen, Biegungen, elastische Spannungen, Drücke und Kräfte im zu untersuchenden Material gemessen werden.

Als Grundmaterial des Dehnungsmeßstreifens wird je nach den auftretenden Temperaturen verwendet:

bis zu 70°C Papier, bis zu 200°C Plastfolie, bis zu 400°C Asbest.

Auf diesen Grund- oder Trägermaterialien ist ein sehr dünner Widerstandsdraht aufgebracht. Der Durchmesser beträgt etwa $0,03 \text{ mm}$, das Grundmaterial ist etwa $0,02$ bis $0,05 \text{ mm}$ dick. Der Dehnungs-

meßstreifen wird auf das zu untersuchende Objekt aufgeklebt, gelötet oder geschweißt. Die höchsten erreichbaren Dehnungsmeßwerte liegen bei 3 bis $5^0/_{00}$, die entsprechenden relativen Widerstandswerte bei 6 bis $10^0/_{00}$.

Gebräuchliche Meßdrahtformen und -anordnungen zeigen die Bilder 25/1 und 25/2.

Die Meßdrähte müssen folgenden Anforderungen gerecht werden, damit eine hohe Meßgenauigkeit mit Hilfe des Dehnungsmeßstreifens erreicht wird:

- lineare Abhängigkeit zwischen relativer Widerstandsänderung und Dehnung,
- großer k -Faktor (\nearrow S. 29) im gesamten Meßbereich ohne Einschränkung,
- kleiner Temperaturkoeffizient,
- kleine Thermospannung gegenüber Kupfer,
- gute mechanische Bearbeitungsmöglichkeiten und Möglichkeiten einer guten Löt- und Schweißbarkeit,
- kleine Hysteresis,
- großer Temperaturbereich.

Es gibt kein Material, das alle diese Forderungen in gleicher Weise erfüllt. Ein möglichst guter Kompromiß bietet sich mit Konstantan an. Der Dehnungsmeßstreifen reagiert nicht nur auf mechanische Dehnung sondern auch auf Wärmeausdehnung. Es kommt deshalb darauf an, beide Effekte voneinander zu trennen und die Wärmeausdehnung zu kompensieren. Dazu bedarf es der genauen Kenntnis der Einwirkung der Wärme auf die Ausdehnung der Streifen.

Auf die eingesetzten Dehnungsmeßstreifen wirken im wesentlichen 3 Temperaturfaktoren:

- die Wärmeausdehnung a des Werkstoffes, auf dem sich der Dehnungsmeßstreifen befindet,
- die Wärmeausdehnung b des Meßdrahtes,
- die Widerstandsänderung c des Meßdrahtes auf Grund der wirkenden Temperaturänderung.

Die gesamte Widerstandsänderung ergibt sich bei Berücksichtigung dieser 3 Temperaturgrößen entsprechend dem Ausdruck

$$\frac{\Delta R}{R} = c + k(a - b).$$

Sie täuscht eine scheinbare Dehnung von

$$s = \frac{c + k(a - b)}{k} = \frac{c}{k} + a - b$$

bei einer Temperaturänderung um 1 grad vor.

Unter der Voraussetzung, daß der Wärmeausdehnungskoeffizient des Meßdrahtes gleich dem des Meßobjektes ist, gilt

$$s = \frac{c}{k}.$$

Es besteht dann nur noch die Notwendigkeit, die Widerstandsänderung als Funktion des Widerstands-Temperatur-Koeffizienten zu untersuchen und zu kompensieren.

Zur elektrischen Messung einer Dehnung wird der Dehnungsmeßstreifen auf das zu untersuchende Objekt geklebt. Damit nimmt er an der Dehnung des Körpers teil und verändert seine Länge, seinen Querschnitt und somit seinen elektrischen Widerstand.

Ein Maß für die Empfindlichkeit des Widerstandsdrahtes von Dehnungsmeßstreifen ist der **k-Faktor**, der materialabhängig ist. Für die relative Widerstandsänderung eines Dehnungsmeßstreifens gilt

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon. \quad (5)$$

Entsprechend der Gleichung (5) kann der k-Faktor aus dem Anstieg der Graphen im $\Delta R/R$ - ε -Koordinatensystem bestimmt werden. Die folgende Tabelle gibt k-Faktoren einiger Widerstandsmaterialien von Dehnungsmeßstreifen an.

Tabelle 3 k-Faktoren verschiedener Widerstandsmaterialien

Material des Dehnungsmeßstreifens	Zusammensetzung des Materials	k-Faktor
Konstantan	60% Cu, 40% Ni	2,0
Chromnickel	65% Ni, 15% Cr, 20% Fe	2,5
Platin	100% Pt	6,0
p-Silizium		100

Dehnungsmeßstreifen mit Drahtwiderständen auf Halbleiterbasis haben eine weitaus größere Empfindlichkeit als Drahtwiderstände aus Metallegierungen, wie aus der Tabelle ersichtlich ist.

Besonders in letzter Zeit gewinnen die Halbleiterdehnungsmeßstreifen eine größere Bedeutung. Zur Herstellung werden hierbei p- und n-dotierte Silizium-Einkristalle verwendet. Diese werden in 0,5 bis 12,5 mm lange Streifen von nur 10 μ m Dicke zerschnitten und auf Träger aus Epoxydharz geklebt. Solche Halbleiterdehnungsmeßstreifen liefern k-Faktoren bis etwa $k = 200$. Halbleiterdehnungsmeßstreifen haben eine sehr kleine Querempfindlichkeit, die praktisch vernachlässigt werden kann. Für den Meßprozeß nachteilig wirkt sich eine starke Temperaturempfindlichkeit und eine merkliche Nicht-linearität in der $\Delta R/R$ - ε -Kennlinie aus.

- Bestimmen Sie die Widerstandsänderung eines Dehnungsmeßstreifens mit $R = 250 \Omega$ und $k = 2,5$ bei einer Dehnung von 1‰ !

Gegeben: $R = 250 \Omega$
 $k = 2,5$
 $\varepsilon = 1\text{‰}$

Gesucht: ΔR

Lösung:

Aus der Gleichung $\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon$ folgt nach Auflösung nach ΔR :

$$\Delta R = R \cdot k \cdot \varepsilon.$$

Nach Einsetzung der gegebenen Werte erhält man für ΔR :

$$\Delta R = 250 \Omega \cdot 2,5 \cdot 0,001$$

$$\underline{\Delta R = 0,625 \Omega}$$

Die Widerstandsänderung des benutzten Dehnungsmeßstreifens beträgt $\Delta R = 0,625 \Omega$

1

- ▼ Messen Sie die Dehnung einer Schraubenfeder! Verwenden Sie dazu die Anleitung auf S. 103! Beachten Sie bei der Anlage des Meßprotokolls und der Auswertung der Messungen die Hinweise im „Wissensspeicher Physik“, Berlin: Volkseigener Verlag Volk und Wissen 1974, S 34 bis 36!

- ③ Bestimmen Sie die Dehnung eines Platin-Dehnungsmeßstreifens mit einem Ausgangswiderstand von $R = 300 \Omega$ und einer Widerstandsänderung in folge der Dehnung von 1Ω !
- ④ Ermitteln Sie aus dem Diagramm des Bildes 30/1 die k -Faktoren! Um welches Material für die Dehnungsmeßstreifen kann es sich handeln?

Hinweise auf technische Daten und Anforderungen an Dehnungsmeßstreifen finden Sie im Lesetext zum Schülervortrag „Aufbau eines Dehnungsmeßstreifens“ (→ S. 27).

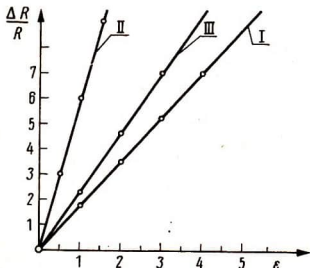


Bild 30/1
 Abhängigkeit der relativen Widerstandsänderung von der Dehnung ($\Delta R/R$ und ε in ‰)

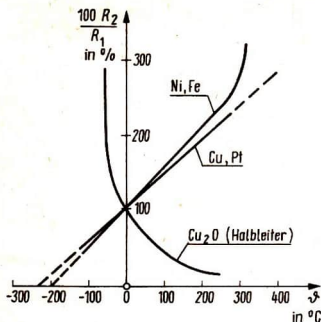


Bild 31/1
Widerstands-Temperatur-Verlauf
einiger Leiter- und Halbleitermaterialien

Das Widerstandsthermometer mit Metallwiderstand. Wird die Temperatur eines elektrischen Leiters erhöht, dann ändert sich die Wechselwirkung zwischen den Gitterbausteinen und den freien Leitungselektronen.

- *Erläutern Sie mit Hilfe des elektrischen Leitungsmodells, wie sich der Widerstand eines Metalls bei Temperaturerhöhung ändert!*

Die Änderung des ohmschen Widerstandes bei Veränderung der Temperatur wird zur Temperaturmessung ausgenutzt. Die für Meßzwecke am häufigsten verwendeten Metallwiderstände sind aus Nickel und Platin hergestellt. Die Widerstands-Temperatur-Kennlinien sind keine Geraden. Sie können aber annähernd durch solche dargestellt werden. Das Bild 31/1 zeigt den Zusammenhang zwischen Widerstand und Temperatur für einige Leiter- und Halbleitermaterialien.

Für die Widerstandsänderung eines metallischen Leiters bei einer Temperaturänderung $\Delta\vartheta$ gilt die folgende Beziehung:

$$R_{\vartheta} = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta). \quad (6)$$

α heißt Widerstands-Temperatur-Koeffizient. Er hat für die meisten unlegierten Metalle einen Wert von etwa $1/250 \text{ K}^{-1}$. Aus der Gleichung ist ersichtlich, daß die Widerstandsänderung $\Delta R = R_{\vartheta} - R_0$ proportional der Temperaturänderung ist. Die dargestellte Gleichung ist somit eine Näherung, die für die vorliegenden Meßzwecke ausreichend ist.

Für die Metalle Nickel und Platin werden die folgenden Widerstands-Temperatur-Koeffizienten angegeben:

$$\alpha_{\text{Ni}} = 6,17 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1},$$

$$\alpha_{\text{Pt}} = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

Am besten eignet sich für ein Widerstandsthermometer Platin als Widerstandsmaterial. Es kann für den gesamten Temperaturbereich von -200 °C bis

+850 °C eingesetzt werden. Der Einsatzbereich von Nickelwiderständen endet bereits bei 150 °C. Da Platin ein sehr seltenes Edelmetall ist, wird der Einsatz von Platin-Widerstandsthermometern nur in seltenen Fällen möglich sein. Es ist bei der Projektierung von Anlagen diese wichtige ökonomische Seite zu berücksichtigen.

- ⑤ Der Widerstand eines Platin-Gebers erhöht sich durch Temperatureinfluß von 60 Ω auf 150 Ω . Um wieviel Grad ist die Temperatur angestiegen? ($\alpha_{Pt} = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$)
- ⑥ Der Widerstand eines Nickelgebers beträgt bei $\vartheta_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $R_1 = 120 \Omega$. Durch Erhöhung der Temperatur auf $\vartheta_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ wird der ohmsche Widerstand des Gebers verändert. Welchen Wert hat er nach der Erwärmung erreicht? ($\alpha_{Ni} = 6,17 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$)

2
▼

Untersuchen Sie verschiedene Widerstandsdrähte bei Erwärmung! Verwenden Sie dazu die Anleitung auf Seite 104! Im Zusammenhang mit der Durchführung des Experiments stellen Sie die Schritte bei der experimentellen Erarbeitung einer Erkenntnis dar, indem Sie die Hinweise im „Wissenspeicher Physik“, S. 27 bis 30, benutzen!

3
▼

Untersuchen Sie die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von Kohle, und stellen Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede gegenüber dem Experiment 2 dar! Erklären Sie die Unterschiede mit Hilfe des theoretischen Modells der elektrischen Leitfähigkeit! Benutzen Sie dazu Lindner, H. „Das Bild der modernen Physik“, Leipzig: Urania Verlag 1973, Seiten 163 bis 167!

Das Widerstandsthermometer mit Halbleiterwiderstand. Für Halbleiterwiderstände ist die in Bild 31/1 angegebene Widerstands-Temperatur-Charakteristik gültig. Der Widerstands-Temperatur-Koeffizient eines Halbleiters ist negativ, da mit zunehmender Temperatur der elektrische Widerstand infolge des Freiwerdens von Valenzelektronen abnimmt. Sie werden durch Energiezufuhr zu freien Leitungselektronen. Gleichzeitig entstehen an den Stellen, wo die Valenzelektronen in den freien Zustand übergegangen sind, positive Ladungsträger, die man auch als positive Löcher bezeichnet; auch diese können bei Anlegung einer Spannung verschoben werden und somit zur elektrischen Leitung im Halbleiter beitragen.

Bei einer Temperaturerhöhung eines Halbleiters ist eine Erhöhung der Leitfähigkeit festzustellen.

Halbleiterwiderstände, die besonders auf Temperaturänderungen reagieren, werden als **Heißeleiter** oder **Thermistoren** bezeichnet. Wegen ihrer negativen Temperaturcharakteristik werden sie auch mit der Bezeichnung **NTC-Widerstand** (NTC-Negative Temperature Coefficient) geführt.

Der Widerstandsverlauf eines Thermistors kann annähernd durch die Funktion

$$R_T = a \cdot e^{\frac{b}{T}} \quad (7)$$

beschrieben werden. Hierbei bedeuten

a : Widerstandsgröße, die von den Abmessungen des Thermistors und der Ladungsträgerkonzentration abhängt,

b : Energiekonstante, die von der Form und dem Material des Thermistors abhängt,

T : absolute Temperatur.

Der Widerstands-Temperatur-Koeffizient ergibt sich zu

$$\alpha = \frac{R_1 - R_2}{R_2 \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$$

Nach Grenzübergang für $T_1 \rightarrow T_2$ (vgl. Lehrbuch Mathematik Kl. 11) wird

$$\alpha = \frac{dR_T}{R_T \cdot dT} \quad (8)$$

Durch Differentiation der Funktion (7) nach der Temperatur T und Einsetzen in Gleichung (8) erhält man für den Widerstands-Temperatur-Koeffizienten eines Thermistors den Wert

$$\alpha = -\frac{b}{T^2} \quad (9)$$

Der Widerstands-Temperatur-Koeffizient ist bei Halbleitern eine temperaturabhängige Größe.

Betrachtet man die U - I -Kennlinie eines Thermistors im Bild 33/2, so erkennt man zwei Bereiche, in denen Temperaturmessungen erfolgen können.

Diese liegen im geraden Anfangsteil der Kennlinie bzw. im abfallenden Teil der Kennlinie.

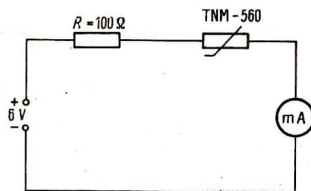
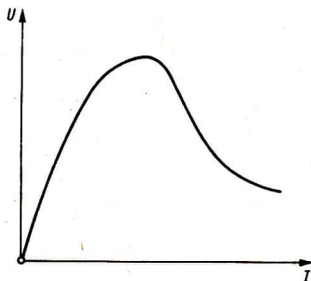


Bild 33/1
Schaltungsbeispiel eines Thermistors
Bild 33/2

U - I - Kennlinie eines Thermistors ▶



Im Anfangsbereich der U - I -Kennlinie kann eine Proportionalität zwischen Stromstärke und Spannung festgestellt werden, da keine Stromwärme auftritt. Halbleiter-Widerstandsthermometer bestehen aus reinem Germanium oder aus einer Oxid-Keramikmasse. Sie gestatten, Temperaturen im Bereich von $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $+450\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu messen. Sie werden als Stab oder Scheibe hergestellt. Dadurch wird es möglich, die Temperaturmessung an bestimmten Punkten vorzunehmen. Halbleiterwiderstandsthermometer sind mit hohen Widerstandswerten herstellbar.

Gegenüber metallischen Widerstandsthermometern bieten Halbleiterthermometer folgende Vorteile:

- Es können auf Grund des höheren Temperaturkoeffizienten unempfindlichere Meßgeräte zum Einsatz kommen.
- Die Halbleiterwiderstände können so hochohmig ausgeführt werden, daß der Widerstand der Übertragungsleitung vernachlässigbar klein wird.
- Halbleiter-Widerstandsthermometer haben infolge der kleinen Abmessungen und der damit verbundenen geringen zu erwärmenden Masse eine sehr kurze Einstellzeit. Nach etwa 5 s ist beim Eintauchen in Wasser und nach etwa 9 s beim Anbringen an Metalloberflächen die Messung möglich.

Andererseits müssen auch beim Einsatz der Halbleiterwiderstände folgende Nachteile beachtet werden:

- Halbleiterwiderstände weisen große Abweichungen im Widerstandsennwert bei einer Temperatur von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und im Temperaturkoeffizienten auf. Diese Streuung bezeichnet man als **Exemplarstreuung**. Der Einsatz von Halbleiterwiderständen erfordert somit eine genaue Bestimmung der genannten Parameter.
- Der Temperaturverlauf des Halbleiterwiderstandes ist im Gegensatz zum Metallwiderstand nicht linear.
- Die Alterung der Bauelemente führt zur Veränderung der Widerstandsennwerte und Temperaturkoeffizienten.



Bauen Sie ein Halbleiter-Widerstandsthermometer auf und eichen Sie dieses! Benutzen Sie dazu die Anleitung auf Seite A 104! Nehmen Sie schaltungstechnische Hinweise aus der „Anleitung zum Schüler-Experimentier-Gerät SEG-Halbleiter-Hochfrequenz (SEG-HH) VEB Polytechnik Karl-Marx-Stadt“, S. 18!

Lichtmessung mit Fotowiderständen. Im Fotowiderstand wird der **innere lichtelektrische Effekt** zur Umwandlung des Lichtes in elektrischen Strom ausgenutzt. Es werden durch den Lichteinfall Valenzelektronen zu freien Leitungselektronen. Diese ermöglichen eine dem Lichteinfall entsprechende Stromstärke. Das Bild 35/1 zeigt den schematischen Aufbau eines Fotowiderstandes. Eine Glasplatte (4) trägt eine Halbleiterschicht (3), auf die Metallelektroden (1), (2) aufgedampft sind. Im unbeleuchteten Zustand ist die Leitfähigkeit sehr gering, da die Elektronen vorwiegend an die Atome gebunden sind. Der Dunkelwiderstand beträgt bei hochohmigen Typen mehr als $10^8\ \Omega$, der bei Be-

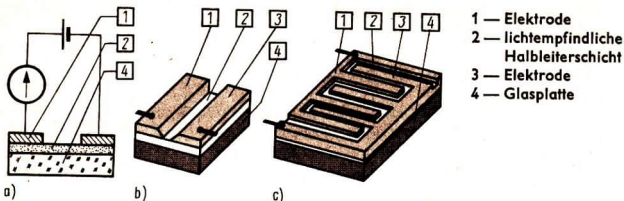


Bild 35/1 Schematischer Aufbau eines Fotowiderstandes

a) Einfachste Schaltungsmöglichkeit eines Fotowiderstandes b) Spaltform c) Mäanderform

leuchtung auf etwa $10^5 \Omega$ zurückgeht, niederohmige Typen ändern ihren Widerstand von $10^4 \Omega$ im unbeleuchteten Zustand auf etwa 10Ω im beleuchteten Zustand.

Die Vorteile der Fotowiderstände können durch

- eine hohe Lichtempfindlichkeit,
 - eine günstige spektrale Empfindlichkeit (zwischen 550 nm und 750 nm)
- gekennzeichnet werden.

Die Nachteile von Fotowiderständen liegen in

- einer hohen Temperaturempfindlichkeit,
- einer großen Trägheit,
- einer relativ starken Alterung.

Fotowiderstände arbeiten um so stabiler, je niedriger die angelegte Spannung ist. Die verwendeten Materialien für Fotowiderstände sind unter anderem Kadmiumsulfid, Kadmiumselenid und Bleisulfid.

Der Einsatz von Fotowiderständen erfolgt oft in Steuerschaltungen, beispielsweise in Dämmerungsschaltungen; sie werden weiterhin bei Arbeiten mit Lichtimpulsen geringer Frequenz und in Lichtschrankenschaltungen eingesetzt.

2.2.2. Meßfühler mit Beeinflussung der Induktivität

Um zu klären, wie die Induktivität einer Spule durch nichtelektrische Größen beeinflusst werden kann, ist es erforderlich, den Vorgang der elektromagnetischen Induktion zu wiederholen und im folgenden quantitativ zu fassen.

- Bereiten Sie einen Vortrag mit Experimenten zum Thema „Die elektromagnetische Induktion“ vor! Benutzen Sie das Lehrbuch Physik Kl. 12 und H. Lindner „Das Bild der modernen Physik“, Leipzig: Urania Verlag 1973, Seiten 103 bis 108, zu Ihrer Vorbereitung! Verwenden Sie weiterhin W. Schulz „Michael Faraday“, Leipzig: B. G. Teubner Verlagsgesellschaft

1972, und Biographien bedeutender Chemiker, Berlin: Volk und Wissen Volkseigener Verlag 1970! Nutzen Sie im Vortrag besonders die historischen Fakten, um den Entwicklungsstand des wissenschaftlichen Arbeitens in der Physik zur Zeit M. Faradays zu charakterisieren!

Bringt man eine bewegte elektrische Ladung in ein magnetisches Feld, so wird auf sie eine Kraft ausgeübt. Diese Kraft wirkt senkrecht zur Richtung des magnetischen Feldes und zur Bewegungsrichtung der Ladung. Der Betrag der Kraft ist abhängig vom Betrag der Ladungsgeschwindigkeit, vom Betrag der Ladung und vom Betrag der magnetischen Feldgröße. Diese Kraft wird bezeichnet als **Lorentzkraft** $F = Q \cdot v \cdot B$. (10)

Hierin bedeuten

F : Lorentzkraft, v : Ladungsgeschwindigkeit,
 Q : elektrische Ladung, B : magnetische Induktion.

Die Feldgröße B heißt **magnetische Induktion**. Sie kann aus der Lorentzgleichung gewonnen werden. Es gilt dann

$$B = \frac{F}{Q \cdot v}. \quad (11)$$

Berücksichtigt man, daß $Q = I \cdot t$ und $v = \frac{l}{t}$ ist, wird aus Gleichung (11)

$$B = \frac{F}{I \cdot l}. \quad (12)$$

Die Einheit der magnetischen Induktion ergibt sich durch das Einsetzen der Einheiten für Kraft, Stromstärke und Länge zu

$$[B] = 1 \text{ N} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}.$$

Durch Umrechnung dieser Einheiten unter Beachtung, daß $1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws}$ ist, erhält man für $[B]$:

$$[B] = 1 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2} = 1 \text{ Wb} \cdot \text{m}^{-2} = 1 \text{ T}.$$

$$(1 \text{ Wb} = 1 \text{ Weber} = 1 \text{ Vs})$$

$$(1 \text{ T} = 1 \text{ Tesla} = 1 \text{ Wb m}^{-2})$$

Die elektromagnetische Induktionsspannung U_{ind} kann durch das Induktionsgesetz dargestellt werden. Dieses hat die Form (Lehrbuch Physik Kl. 12)

$$U_{\text{ind}} = -N \frac{\Delta(B \cdot A)}{\Delta t}. \quad (13)$$

Für den Fall einer langen Spule (Spulenlänge ist sehr viel größer als der Spulendurchmesser) ist die magnetische Induktion B von der Länge l der Spule, der Windungszahl N der Spule und der Stromstärke I_{err} des durch die Spule fließenden Stromes abhängig. Diese Abhängigkeiten werden in folgender Gleichung dargestellt:

$$B = \frac{\mu \cdot I_{\text{err}} \cdot N}{l}. \quad (14)$$

Damit erhält das Induktionsgesetz die Form:

$$U_{\text{ind}} = -\mu \cdot N \cdot A \cdot \frac{N}{l} \cdot \frac{\Delta I_{\text{err}}}{\Delta t} \quad (15)$$

μ ist die Permeabilität der Spule, die über den Stoff innerhalb der Spule Auskunft gibt.

Die Größen μ , N , A und l faßt man zu einer neuen Größe L zusammen und bezeichnet sie als die

$$\text{Induktivität der Spule } L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot A}{l} \quad (16)$$

Die Größe L ist für eine bestimmte Spule eine Konstante. Sie ist von den geometrischen Abmessungen der Spule und von dem zwischen der Spule befindlichen Material abhängig.

Die Einheit der Induktivität ergibt sich durch Einsetzen von Einheiten in die Gleichung (16).

$$[L] = 1 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1} = 1 \text{ Henry.}$$

Eine Spule besitzt die Induktivität 1 Henry (1 H), wenn bei einer Änderung der Stromstärke von 1 Ampere in einer Sekunde eine Spannung von 1 Volt induziert wird.

Aus der Definitionsgleichung (16) für die Induktivität einer Spule folgt, daß die Messung physikalischer Größen auf induktivem Wege dann möglich ist, wenn durch sie

- die Windungsanzahl der Spule oder
 - die Spulenlänge oder
 - der Spulenquerschnitt oder
 - die Permeabilität der Spule oder
- mehrere dieser Größen

verändert werden.

Wenn es gelingt, eine dieser vier Parameter der Spule durch eine nichtelektrische Größe zu verändern, dann kann eine Widerstandsänderung und damit eine Stromstärke-Spannungsänderung erreicht werden. Die elektrische Messung einer nichtelektrischen Größe ist damit möglich.

Ein Beispiel für die induktive Längenmessung findet man im **Querankergeber**. Er dient zur Messung kleiner Wege und Wegänderungen.

Der Querankergeber wird als Doppeldrossel mit vier Luftspalten ausgebildet. Dadurch erreicht man eine möglichst große Empfindlichkeit des Meßfühlers. Zwischen den Spulen 1 und 2 mit den Induktivitäten L_1 und L_2 ist der Queranker, ein Eisenkern, angeordnet. Das magnetische Feld einer jeden Spule ist in sich geschlossen und nicht mit der anderen Spule verkettet. Jedes Magnetfeld durchsetzt Eisen und Luft. Demzufolge wird die Induktivität der Spulen durch den Luft- und Eisenweg des Magnetfeldes beeinflusst. Wird der Queranker in Pfeilrichtung bewegt, so verändern sich die Induktivitäten der beiden Spulen und damit der elektrische Widerstand. Die mechanische Verschiebung des Querankers ist in eine Induktivitätsänderung und damit in eine Stromstärke-

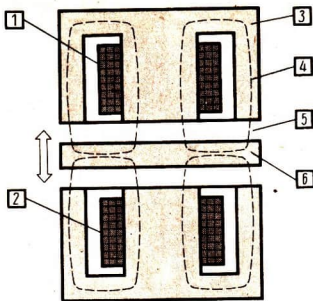


Bild 38/1
Aufbau eines Querankergebers

- 1 — Spule 1
- 2 — Spule 2
- 3 — Eisenkern
- 4 — Magnetfeld im Eisenkern
- 5 — Luftspalt
- 6 — Anker

und Spannungsänderung umgewandelt worden. Queranker werden auch in Kraftmeßdosen zum Messen von Kräften verwendet. Zum Betrieb des Querankergebers werden Wechselspannungen verschiedener Frequenz benutzt. Die Betriebsfrequenzen derartiger Geber liegen zwischen 50 Hz und 1000 Hz. Auf dem Querankerprinzip sind auch **Schichtdickenmeßgeber** aufgebaut. An Stelle des Querankers wird eine Eisenplatte verwendet. Das Bild 38/2 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Schichtdickenmessers. Das Verfahren kann nur bei dia- und paramagnetischen Stoffen Anwendung finden. Das zu prüfende Material wird auf eine Weicheisenplatte gebracht und darauf der Meßkopf gesetzt. Das magnetische Wechselfeld und damit die Induktivität werden besonders durch die Schichtdicke beeinflußt. Veränderungen derselben werden in Stromstärke- und Spannungsänderungen umgewandelt.

- Zur Festigung Ihrer Kenntnisse lösen Sie Beispiele aus dem Lehrbuch Physik, Kl. 12, Lehrbuch Physik Kl. 9, Lindner, H. „Physikalische Aufgaben“, Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1962, S. 143 bis 145, und Hajko, V. „Physik in Beispielen“ Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1969!

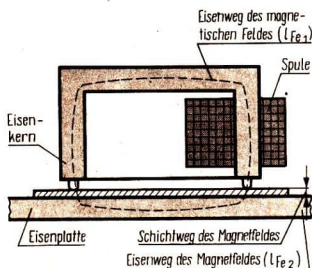


Bild 38/2
Prinzip des induktiven Schichtdickenmeßgebers

2.2.3. Meßfühler mit Beeinflussung der Kapazität

Die Beeinflussung eines kapazitiven Widerstandes durch nichtelektrische Größen soll im folgenden Abschnitt diskutiert werden. Dazu muß die Abhängigkeit der Kapazität eines Kondensators von den geometrischen Abmessungen und vom Dielektrikum untersucht werden.

- Bereiten Sie einen Vortrag zum folgenden Thema vor:
Die elektrische Kapazität und ihre Bestimmungsgrößen! Überprüfen Sie dabei, welche physikalischen Größen zur Messung nichtelektrischer Größen verwendet werden können! Benutzen Sie dazu das Lehrbuch Physik Kl. 9, S. 77 bis 80!

Die Abhängigkeit der Kapazität eines Kondensators von seinen Abmessungen und vom Dielektrikum wird bei der Konstruktion kapazitiver Geberelemente ausgenutzt. Man unterscheidet Meßkondensatoren mit

- Belagänderung,
- Abstandsänderung,
- Änderung des Dielektrikums.

Meßkondensator mit Belagänderung. Meßkondensatoren zur Weg- oder Winkelmessung arbeiten mit Belagänderung. Die Belagfläche ist der Kapazität des Kondensators direkt proportional. Ein Beispiel für einen Meßkondensator mit Belagänderung findet man im Drehkondensator. Mit Hilfe des Drehkondensators kann eine Winkelgröße direkt in eine Kapazitätsänderung und damit in eine Stromstärke- und Spannungsänderung überführt werden. Wegmessungen

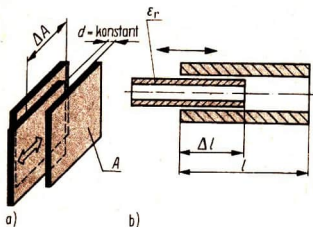


Bild 39/1
Meßkondensator mit Belagänderung
a) Plattenkondensator
b) Zylinderkondensator

werden dagegen vorwiegend mit Zylinderkondensatoren ausgeführt. Hier ist die Zylinderlänge der Kapazität direkt proportional. Längenänderungen werden in Kapazitätsänderungen umgewandelt. In Bild 39/1 wird das Prinzip eines Platten- und eines Zylinderkondensators mit Belagänderung dargestellt.

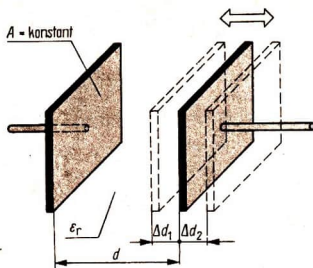


Bild 40/1
Meßkondensator mit Abstandsänderung

Meßkondensator mit Abstandsänderung. Meßkondensatoren mit Abstandsänderung dienen zum Messen kleiner Längen und Längenänderungen. Darüber hinaus werden sie zum Messen elastischer Verformungen und Dehnungen und zum Messen der Größen, die diese hervorrufen, oder die sich auf solche zurückführen lassen, genutzt. Dazu gehören Kraft, Beschleunigung, Druck, Temperatur, Drehmoment und andere. Wirkt eine Kraft auf die Platte eines solchen Meßkondensators, so kann der Plattenabstand verändert werden. Die Änderung des Plattenabstandes bewirkt eine Veränderung der Kapazität des Meßkondensators und damit die Möglichkeit des elektrischen Messens der Größe, die die Änderung des Plattenabstandes verursacht hat, im Beispiel die elektrische Messung der Kraft.

Der bekannteste kapazitive Geber mit Abstandsänderung ist das Kondensatormikrofon. Hier werden Sprachschwingungen durch Einwirkungen des Schalls auf eine Membran (veränderliche Kondensatorplatte) in Kapazitätsänderungen und somit in elektrische Schwingungen umgewandelt. Im Bild 40/1 ist das Prinzip eines Meßkondensators mit Abstandsänderung dargestellt.

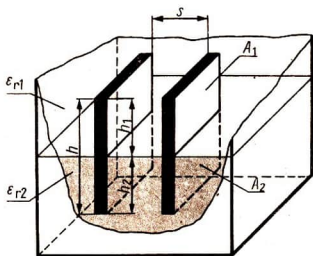


Bild 40/2
Meßkondensator mit Dielektrikumsänderung — Füllstandsmessung mit Querfüllung
 s — Plattenabstand
 h — Plattenhöhe
 h_1 — Plattenhöhe in Luft
 h_2 — Plattenhöhe in der Flüssigkeit
 ϵ_{r1} — Dielektrikum der Luft
 ϵ_{r2} — Dielektrikum der Flüssigkeit
 A_1 — Plattenfläche in der Luft
 A_2 — Eingetauchte Plattenfläche

Meßkondensator mit Dielektrikumsänderung. Die Abhängigkeit der Kapazität eines Kondensators vom Dielektrikum wird zur Messung von Füllständen in Flüssigkeitsbehältern ausgenutzt. Die Flüssigkeit (mit großer Dielektrizitätskonstante) befindet sich zwischen den Kondensatorplatten. Dabei ist es möglich, daß der Flüssigkeitsspiegel parallel und quer zu den Kondensatorplatten auftreten kann. In Bild 40/2 wird ein Meßkondensator mit Querfüllung dargestellt. Eine Flüssigkeit erreicht zwischen den Kondensatorplatten die Höhe h_2 . Der verwendete Plattenkondensator wird somit in 2 Teilkondensatoren mit unterschiedlicher Kapazität geteilt. Die Gesamtkapazität ist die Summe der beiden Teilkapazitäten. Verändert sich der Füllstand, so ändern sich die Teilkapazitäten. Die Gesamtkapazität ist vom Füllstand abhängig.

Zusammenfassung

Die elektrische Messung nichtelektrischer Größen läßt sich durch Beeinflussung eines ohmschen Widerstandes, einer Induktivität oder einer Kapazität durchführen. Als ohmsche Widerstände können Dehnungsmeßstreifen, Fotowiderstände und Thermowiderstände, als induktive Fühler gegeneinander verschiebbare Induktionsspulen, verschiebbare Eisenkerne in Spulen und als kapazitive Fühler Platten- und Zylinderkondensatoren Anwendung finden.

2.3. Unmittelbare Erzeugung einer elektrischen Spannung

Es gibt viele Geräte mit elektrischen Bauelementen, in denen durch eine nichtelektrische Größe unmittelbar eine elektrische Spannung entsteht. Am bekanntesten ist das Fotoelement, das in elektrischen Belichtungsmessern ange-

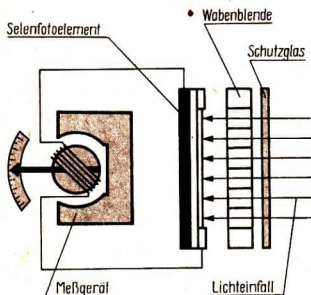


Bild 41/1
Aufbau eines elektrischen Belichtungsmessers mit aktivem Meßfühler

wendet wird. Im Fotoelement wird eine Energieart (Lichtenergie) in eine andere Energieart (elektrische Energie) direkt umgewandelt (Bild 41/1).

- Geben Sie verschiedene Energiearten und deren Berechnungsgrundlage an!
- Nennen Sie Beispiele für die Umwandlung einer Energieart in eine andere Energieart!

Die direkte Umwandlung einer Energieart in elektrische Energie kann zur Messung nichtelektrischer Größen benutzt werden. Der entsprechende Meßfühler, der die nichtelektrische Energie aufnimmt (z. B. Fotoelement) und dann direkt in elektrische Energie wandelt, ist im Gegensatz zu den im Abschnitt 2.2. beschriebenen Meßfühlern **aktiv** wirksam.

Aktive Meßfühler sind:

Fotoelement

Thermoelement

Piezoelektrischer Geber

Tachometergenerator

Hallgenerator

Es wird umgewandelt:

Lichtenergie direkt in elektrische Energie

Wärmeenergie direkt in elektrische Energie

mechanische Energie direkt in elektrische Energie

mechanische Energie direkt in elektrische Energie

elektromagnetische Energie direkt in elektrische Energie

2.3.1. Das Fotoelement

- Wiederholen Sie den Aufbau und die Wirkungsweise eines Halbleitergleichrichters (Lehrbuch Physik Kl. 9, S. 130/131)!
- Wodurch entsteht die Ladungsverteilung in der Grenzschicht eines p-n-Halbleiter-Gleichrichters?
- Welche Modellvorstellung über das Licht wird zur Erklärung des äußeren lichtelektrischen Effektes genutzt?

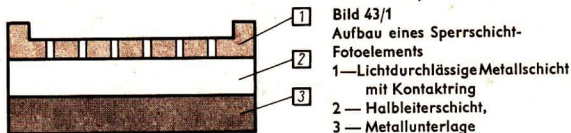
Wird ein Ende eines Selenstäbchens beleuchtet, so kann ein elektrischer Strom zwischen dem beleuchteten und dem unbeleuchteten Ende des Stäbchens nachgewiesen werden (Adams und Day 1876). Die Lichteinwirkung verursacht eine elektrische Spannung. Wenn eine Seite eines Kupfer-1-oxid-Gleichrichters beleuchtet wird, so läßt sich der gleiche Effekt feststellen. Vielfältige experimentelle Untersuchungen an Halbleitern, die, ausgelöst durch die Erkenntnisse der Quantentheorie, in der Folgezeit durchgeführt wurden, führten zu Teilerkenntnissen über die Entstehung von Fotospannungen an Halbleiter-Metall-Schichten oder an Halbleiter-Halbleiter-Schichten. Die entscheidende Fest-

stellung, daß für die Wirkungsweise eines Fotoelements eine Sperrschicht zwischen einem Halbleiter und einem Leiter und zwischen zwei Halbleitern vorhanden sein muß, konnte 1928 getroffen werden (Schottky und Lange).

- Arbeiten Sie den folgenden Text mit dem Ziel durch, Ihren Mitschülern an einem übersichtlichen Schema die Funktion eines Fotoelements zu erklären! Setzen Sie dabei die hier gegebenen Tatsachen in Beziehung zu den Tatsachen des äußeren Photoeffektes (Literatur: Lindner, H. „Das Bild der modernen Physik“, Leipzig: Urania-Verlag 1973, S. 115 bis 121)!

Aufbau und Wirkungsweise eines Fotoelements

Der grundsätzliche Aufbau eines Sperrschicht-Fotoelements ist im Bild 43/1 dargestellt. Eine Halbleiterschicht (2) (Se, Cu_2O , Si, Ge) ist auf eine Metallunterlage (3) aufgetragen (Kontaktplatte). Auf der Halbleiterschicht befindet sich eine lichtdurchlässige zweite Metallschicht, die durch einen Kontakttring (1) eingefaßt ist.



Will man die Funktion eines derartigen Sperrschicht-Fotoelements erklären, so sind zwei unterschiedliche physikalische Vorgänge zu unterscheiden:

- Herausbildung von Sperrschichten zwischen Metall und Halbleiter.
- Innerer lichtelektrischer Effekt bei Belichtung der Grenzschicht.

Bildung einer Sperrschicht. Werden zwei elektrische Leiter mit unterschiedlicher Elektronenkonzentration innig miteinander zur Berührung gebracht, so treten durch die entstandene Grenzschicht Ladungsträger aus dem Stoff mit der geringeren Austrittsarbeit für Elektronen in den Stoff mit der größeren Austrittsarbeit über. Im vorliegenden Fall ist im Metall die Austrittsarbeit geringer als im Halbleiter. Damit wandern (diffundieren) Elektronen vom Metall in den Halbleiter. Im Metall entsteht ein Elektronenmangel und im Halbleiter ein Elektronenüberschuß; die dadurch gebildete Diffusionsspannung verhindert einen weiteren Austausch von Elektronen. Dringen nun in die Grenzschicht Ladungsträger ein, so erfolgt eine Rekombination mit entgegengesetzt geladenen Ladungsträgern (Elektronen und Defektelektronen vereinigen sich). In der Grenzschicht ist eine Ladungsträgerverarmung eingetreten. Damit wirkt diese Grenzschicht für den elektrischen Strom als Sperrschicht. In den beiden Sperr-

schichten zwischen Metall (1 und 5) und Halbleiterschicht (3) ist eine gleich große Diffusionsspannung entstanden. Damit ist bei der Anordnung Metall-Halbleiter (Cu_2O -Metall) keine elektrische Spannung nachweisbar.

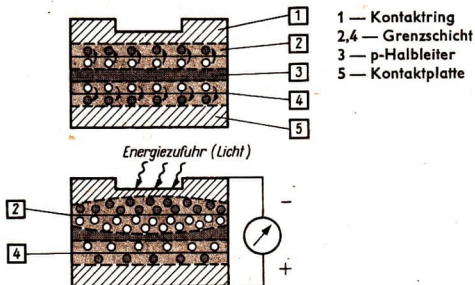


Bild 44/1 Vorgänge in der Grenzschicht eines Fotoelements

An beiden Grenzschichten bildet sich eine gleich große Diffusionsspannung U_d aus. Zwischen den Grenzschichten besteht ein elektrisches Gleichgewicht.

Durch Energiezufuhr entstehen Ladungsträgerpaare, die dieses Gleichgewicht stören. Es ist eine Fotospannung entstanden.

Lichtelektrischer Effekt. Wird nun eine der beiden Grenzschichten beleuchtet, so werden in ihr entsprechend der aufgenommenen Energie Elektronen freigesetzt. Gleichzeitig entstehen entsprechend viele Elektronenmangelstellen (Defektelektronen). Bei der Absorption von Lichtenergie durch das Kristallgitter (Gitterabsorption) werden also Ladungsträgerpaare gebildet. Die Ladungsträger werden durch die Diffusionsspannung in das p-Gebiet und in das n-Gebiet der Grenzschicht beschleunigt. Es entsteht eine der Diffusionsspannung entgegengesetzte Spannung, durch die das vorher vorhandene Gleichgewicht zwischen den beiden Grenzschichten gestört wird. Es kann im äußeren Stromkreis an dem Fotoelement eine Fotospannung nachgewiesen werden.

Die Fotoelemente besitzen für verschiedene Wellenlängen eine unterschiedlich gute Empfindlichkeit. Die Energieabsorption durch das Kristallgitter erfolgt entsprechend der Beziehung

$$W = h \cdot f. \quad (17)$$

Während Selenfotoelemente ihre größte Empfindlichkeit bei etwa $0,57 \mu\text{m}$ besitzen, haben Germaniumfotoelemente ihre größte Empfindlichkeit bei etwa $1,5 \mu\text{m}$. Zwischen der Beleuchtungsstärke und der Fotostromstärke besteht nur bei geringen Beleuchtungsstärken eine lineare Ab-

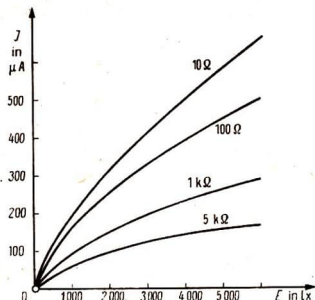


Bild 45/1
Abhängigkeit
der Fotostromstärke
von der Beleuchtungsstärke
bei verschiedenen
Außenwiderständen
für ein Selenfotoelement

hängigkeit. Für ein Selenfotoelement ist diese Abhängigkeit bei verschiedenen Außenwiderständen R_e im Bild 45/1 dargestellt.

Die Fotostromstärke und auch die Fotospannung streben mit zunehmender Beleuchtungsstärke einem Grenzwert zu. Dieser liegt für Kupferdioxidfotoelemente bei 0,4 V und für Selenfotoelemente bei 0,6 V.

• Geben Sie eine Erklärung für das Auftreten eines Grenzwertes der Fotospannung mit zunehmender Beleuchtungsstärke!

Für einige Meßaufgaben, vor allem aber in der Schaltungstechnik bei Regelungsanlagen, werden Fotodioden verwendet. Die Funktion einer Fotodiode beruht auf einem analogen Prinzip wie die eines Fotoelementes. Ihr Aufbau ist der gleiche wie der von Halbleitergleichrichtern.

Auf die durch unterschiedliche Dotierung in einem Halbleiter-Einkristall erzeugte nahezu punktförmige Grenzschicht wird mit Hilfe einer Linse das einfallende Licht konzentriert. Fotodioden bedürfen gegenüber großflächigen Fotoelementen einer stärkeren Lichtbündelung. Andererseits sind sie für Seitenlicht nicht so empfindlich wie die Fotoelemente.

Fotodioden benötigen eine, zwar relativ niedrige, Betriebsspannung; sie sind also im eigentlichen Sinne des Wortes keine Elemente. Gegenüber Fotowiderständen arbeiten die Fotodioden mit geringerer Zeitverzögerung. Berücksichtigt man, daß beim Betrieb einer Fotodiode mit einer Spannung von nur wenigen Volt ein Außenwiderstand von 110 $\text{k}\Omega$ bis 1 $\text{M}\Omega$ angeschlossen werden kann, so ergeben sich gegenüber Fotoelementen wesentlich größere Leistungsverstärkungen.

Bild 46/1 zeigt eine einfache Lichtschrankenschaltung mit einer Fotodiode.

Beim Einsatz von Fotoelementen und Fotodioden muß darauf geachtet werden, daß in der Regel durch die Belichtung nur kleine elektrische

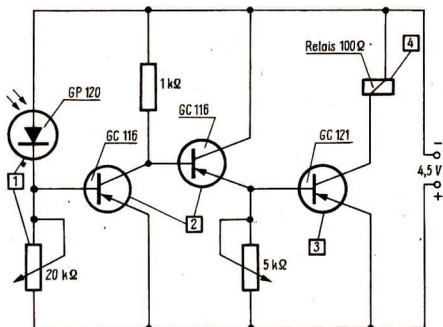


Bild 46/1 Lichtschrankenschaltung mit einer Fotodiode
 1 — Fotodiode mit Widerstand als Spannungsteiler
 2 — zweistufiger Transistorverstärker
 3 — Leistungsverstärkerstufe
 4 — Anzeigewerk (Zählwerk oder Relais)

Spannungen erzeugt werden. Es kann daher durch thermische Einflüsse zu einer Widerstandsänderung kommen, die zur Verfälschung der fotoelektrischen Messung führt.

Die Wirkungsweise eines Fotoelements beruht auf dem inneren lichtelektrischen Effekt und dem Sperrschichteffekt. Durch die bei Lichteinfall erzeugten Elektronen und positiven Löcher im Bereich der Sperrschicht wird das Ladungsgleichgewicht geändert. Es können Elektronen die Sperrschicht überwinden, so daß eine Fotospannung ausgebildet wird. Für Fotoelemente in der Meßtechnik wird heute meistens Kadmiumselenid auf einer Grundplatte aus Eisen verwendet. In Solarbatterien (Raumfahrzeuge) wird in der Regel eine Kombination von Silizium unterschiedlichen Leistungstyps verwendet (p-n-Si).

▼ Führen Sie ein Experiment zum Nachweis der Abhängigkeit des Fotostromes bei einem Selenfotoelement SeH 13×26 von der Beleuchtungsstärke durch!

2.3.2. Das Thermoelement

Um das Jahr 1825 waren die Wissenschaftler noch der Auffassung, daß das Licht des Mondes keine Wärmestrahlung darstellt. Um so überraschter war man, als mit einem kleinen Gerät, das der Physiker T. J. Seebeck entwickelt hatte,

im durch einen Hohlspiegel gesammelten Mondlicht ultrarotes Licht (Wärmestrahlung) nachgewiesen werden konnte. Seebeck hatte 1822 festgestellt, daß in einem elektrischen Leiterkreis, in welchem zwei verschiedene Metalle miteinander verbunden waren, immer dann ein elektrischer Strom fließt, wenn zwischen den Verbindungsstellen eine Temperaturdifferenz bestand. Solch ein als Meßfühler geeignetes Bauelement bezeichnet man als **Thermoelement**.

Die direkte Umwandlung der Wärmeenergie in elektrische Energie in einem Thermoelement ist auf folgenden Vorgang zurückzuführen. Die Atome eines einwertigen Metalls stellen jeweils ein Valenzelektron als freies Elektron für den elektrischen Leitungsvorgang zur Verfügung. Dabei ergibt sich die Elektronenkonzentration aus der Konzentration der Atome.

⁵
▼ Es sind Aufbau und Eichung eines Thermoelements vorzunehmen (↗ S. 105, Experiment 5)!

Um die Eigenschaften eines Thermoelements untersuchen zu können, wird ein Thermoelement aufgebaut. Außer der Experimentieranleitung auf Seite 105 können die Hinweise in Girke-Sprockhoff „Physikalische Schulversuche“ Neunter Teil, Berlin: Volk und Wissen Volkseigener Verlag 1969, S. 303, genutzt werden, um den Aufbau und die übersichtliche Anordnung der Geräte kennenzulernen.

Nachdem Sie die Thermoelemente hergestellt und mit den übrigen Geräten zu einer Experimentieranordnung zusammengefügt haben, bereiten Sie eine Meßtabelle vor.

Stellen Sie die Eichkurven für einzelne Thermoelemente mit unterschiedlicher Farbe graphisch dar!

Werden zwei Metalle mit unterschiedlicher Elektronenkonzentration miteinander verbunden, so erfolgt zwischen ihnen durch Diffusion ein Elektronenausgleich. Dieser Elektronenausgleich hält solange an, bis sich an der Berührungsstelle eine Gegenspannung ausgebildet hat, die ein weiteres Diffundieren der Elektronen verhindert (Bild 47/1). Manchmal wird zur Erklärung

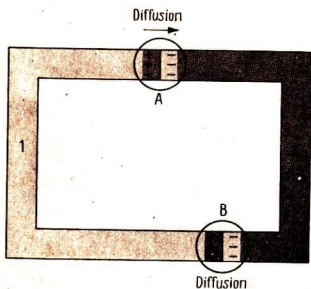


Bild 47/1

Verbindung von Metallen mit verschiedener Elektronenkonzentration

- 1 — Metall mit Verarmung an negativen Ladungsträgern
- 2 — Metall mit Überschuß an negativen Ladungsträgern

dieses Vorgangs auch das Modellbild eines Elektronengases verwendet. Mit dieser Modellvorstellung ist der Vorgang bei Berührung unterschiedlicher Metalle so zu erklären, daß sich auf Grund des unterschiedlichen „Elektronengasdrucks“ in den Metallen bei einer Berührung ein Ausgleich der Elektronen einstellt. Es tritt in dem einen Metall (1) eine Verarmung an negativen Ladungsträgern auf und in dem anderen Metall (2) eine Zunahme an negativen Ladungsträgern. Zwischen beiden Metallen besteht damit eine Spannung, die **Berührungsspannung**.

Da die Anzahl der Leitungselektronen in den verschiedenen Metallen sehr stark von der Temperatur der Leiter abhängt, so bildet sich bei unterschiedlicher Temperatur zwischen zwei Lötstellen zweier Metalle eine unterschiedliche Berührungsspannung aus. Zwischen den Punkten A und B im Bild 48/1 entsteht bei unterschiedlicher Erwärmung eine Spannung. Diese wird **Thermospannung** genannt.

In Thermoelementen erfolgt eine direkte Umwandlung der Wärmeenergie in elektrische Energie. Mit Thermoelementen kann die Temperatur elektrisch gemessen werden. Außerdem gewinnen Thermoelemente auf Halbleiterbasis zunehmend Bedeutung bei der direkten Energieumwandlung in kleinen Radio-nuklid-Batterien.

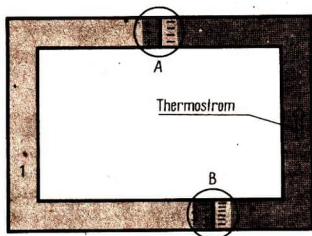


Bild 48/1

Die Erwärmung einer Kontaktstelle zwischen zwei verschiedenen Metallen führt zur Ausbildung einer Thermospannung zwischen den Punkten A und B

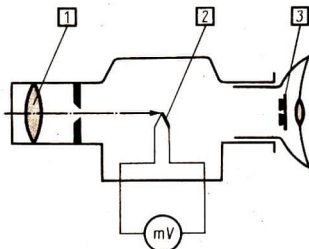


Bild 48/2

Strahlungspyrometer zur Bestimmung von Hochofentemperaturen. Die Strahlungsenergie wird durch Quarzlinse (1) auf ein Thermoelement (2) gelenkt. Mit dem Fernrohr (3) ist eine genaue Justierung möglich.

Mit Thermoelementen lassen sich z. B. sowohl geringe Temperaturen an einzelnen Stellen des menschlichen Körpers genau messen sowie über eine Strahlungsmessung die Temperatur an Hochöfen bestimmen.

▼ Entwerfen Sie eine Experimentieranordnung, mit der Sie in einer Entfernung von 1 m bis 2 m die Wärmestrahlung einer Kerzenflamme nachweisen können!

Für derartige Aufgabenstellungen ist es erforderlich, im Zusammenhang mit den konstruktiven Einzelheiten des Thermoelements eine Mittelanalyse durchzuführen. Dabei ist zu überprüfen, wo die Grenzen für den Einsatz der Mittel liegen! Im vorliegenden Fall sind folgende Fragen zu stellen:

1. Mit welchen Mitteln gelingt es, die Wärmestrahlen auf die kleine Fläche der Kontaktstelle zu konzentrieren? (Sammellinse)
2. Wird durch die Sammellinse keine Wärmestrahlung absorbiert?
3. Welche andere Möglichkeit gibt es, um die Wärmestrahlung auf die Kontaktstelle zu konzentrieren?
4. Wie erreicht man, daß die von der Kerzenflamme allseitig ausgehende Wärmestrahlung für den Meßprozeß nicht verloren geht?

Das Ergebnis der Überlegungen besteht in diesem Fall darin, daß Sie zwei Hohlspiegel zum Aufbau der Experimentieranordnung benutzen.

Die beiden Metalle, die zu einem Thermoelement miteinander verbunden sind, werden in der Technik **Thermopaar** genannt. Entsprechend den Eigenschaften der Metalle werden für verschiedene Einsatzgebiete (Temperaturbereiche) unterschiedliche Thermopaare verwendet. Bild 49/1 gibt die Schaltung eines Thermoelements wieder.

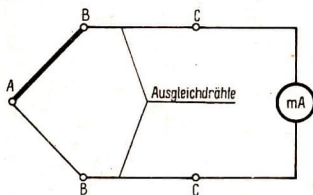


Bild 49/1
Schaltung einer Meßanordnung mit einem Thermoelement. Die freien Enden des Thermopaars sind an den Punkten B mit Ausgleichsdrahten verbunden, die zur Vergleichsstelle C führen. Dieser Punkt wird durch eine normale Doppelleitung mit einem Drehspulmeßgerät verbunden.

Der Betrag der erzeugten Thermospannung hängt nur vom Material und der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Verbindungsstellen ab (↗ Bild 58/1). Die Dicke der Drähte oder deren elektrischer Widerstand ist für die Thermospannung nicht von Bedeutung. Es gilt für eine Temperaturdifferenz von $\Delta\theta$:

$$U_{th} = k \cdot \Delta\theta, \quad (18)$$

k: Materialkonstante...

Für praktische Meßaufgaben werden die Thermoelemente in Schutzhüllen unterschiedlichster Art eingesetzt. Sie sollen eine vorzeitige Zerstörung (Messung sehr hoher Temperaturen) und eine Veränderung der Meßdaten durch Diffusionsprozesse verhindern. In der Praxis finden folgende Thermopaare Anwendung:

Thermopaar	Temperaturbereich	Besonderheiten für den Einsatz
Kupfer-Konstantan	-200 °C bis +400 °C	Geringe Beständigkeit gegen Verzunderung in reduzierende Atmosphäre einsetzbar in oxydierender Atmosphäre einsetzbar
Eisen-Konstantan	-100 °C bis +700 °C	
Nickelchrom-Nickel	bis +1000 °C	
Platinrhodium-Platin	bis +1600 °C	

In der technischen Anwendung wird die bei einem Temperaturunterschied von 1 °K erzeugte Spannung als thermoelektrische Spannung bezeichnet. Für die angegebenen Thermopaare ergibt sich bei einem Temperaturunterschied von 100 °K etwa folgende Thermospannung:

Kupfer-Konstantan: 4,15 mV,
 Nickelchrom-Nickel: 3,9 mV,
 Eisen-Konstantan: 5 mV,
 Platinrhodium-Platin: 0,9 mV.

Für einen Temperaturunterschied von 1 °K konnte die bisher höchste thermoelektrische Spannung von 520 µV bei dem Thermopaar Silizium-Wismut erreicht werden.

- Werden mit einem Thermoelement absolute Temperaturwerte gemessen?
- Wie kann die Vergleichsstelle CC (im Bild 49:1) auf konstanter Temperatur gehalten werden?

Vor der Bearbeitung der folgenden Fragen wiederholen Sie zunächst die Grundbegriffe über die thermischen Eigenschaften von Festkörpern und über den Wärmeausgleich zwischen verschiedenen temperierten Körpern¹.

- Welchen Einfluß kann eine große Wärmekapazität eines Thermoelements auf seine Einsatzmöglichkeiten haben?

¹ Wissensspeicher Physik

Berlin: Volk und Wissen Volkseigener Verlag 1974, S. 149 bis 155

Lindner, H., Lehrbuch der Physik. Leipzig: Fachbuchverlag 1967, S. 201 ff.

- Geben Sie an, unter welcher Voraussetzung mit einem Thermoelement Wärmemengen gemessen werden können?
- Welche Bedeutung hat der Querschnitt der in Thermoelementen verwendeten Drähte (Thermodrähte) für deren Einsatz?

Für die Energieversorgung in der Sowjetunion gestarteter automatischer Wetterstationen wurden thermoelektrische Energiewandler in Radionuklidbatterien eingesetzt. Die Energiequelle besteht bei den Batterien BETA 2 und BETA 3 aus Strontium 90. Die von dieser Energiequelle abgegebene radioaktive Strahlung

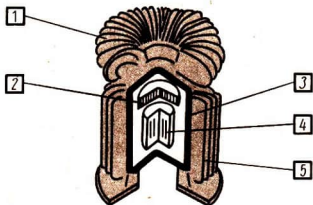


Bild 51/1
Sowjetische Radionuklidbatterie vom Typ BETA
1,5 — Wärmeaustausch
2 — Thermobatterie
3 — Abschirmung
4 — Radioaktives Strontium

wird von Thermoelementen absorbiert und in elektrische Energie umgewandelt. Um den erforderlichen Betriebstemperaturunterschied herzustellen, werden die Gegenseiten der Thermoelemente gekühlt. Da der Wirkungsgrad von Thermoelementen von der Ladungsträgerkonzentration abhängt, werden in Radionuklidbatterien Halbleiterthermoelemente verwendet, die einen hohen Wirkungsgrad haben.

Bild 51/2 zeigt das Prinzip eines Halbleiter-Thermoelements. Es ist jeweils ein n-leitender mit einem p-leitenden Halbleiter verbunden. Auf einer Seite

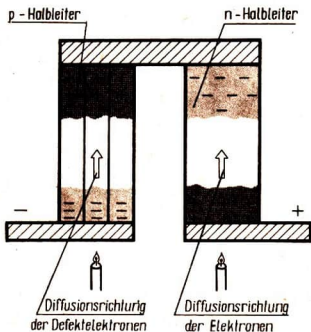


Bild 51/2
Halbleiter-Thermoelement

erfolgt eine Erwärmung der Verbindungsstellen der Halbleiter mit dem Metall. Dadurch entstehen im n-leitenden Material mehr Elektronen, die zum kalten Ende des n-Halbleiters diffundieren. Ein analoger Prozeß erfolgt für die Defektelektronen (positive Löcher) im p-Halbleiter. Beide Prozesse überlagern sich und liefern eine Thermospannung. Durch Hintereinanderschalten mehrerer p-Halbleiter und n-Halbleiter erhält man die in Radionuklidbatterien eingesetzten „Thermobatterien“. Nach dem sowjetischen Physiker A. F. Joffe (1880 bis 1960) wird als n-leitender Halbleiter eine Legierung von Bleiselenid und Bleitellurid und für den p-Halbleiter eine Antimon-Tellur-Legierung verwendet. Trotz der verhältnismäßig hohen Herstellungskosten derartiger Thermobatterien lohnt deren Einsatz wegen ihrer Wartungsfreiheit und langen Lebensdauer.

2.3.3. Der Hallgenerator

Es wurde bereits im Physikunterricht der Klasse 9 wie auch im Abschnitt 2.1.2. dargestellt, daß bei der Bewegung eines elektrischen Leiters im Magnetfeld auf die Leitungselektronen im Metall eine Kraft ausgeübt wird. Infolge dieser Kraft bewegen sich Elektronen zu dem einen Ende des Leiters (Bild 52/1). Das

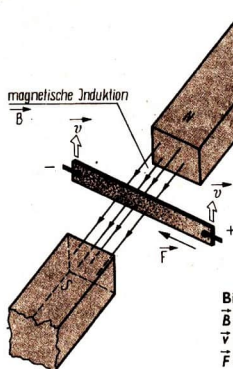


Bild 52/1 Vorgang der elektromagnetische Induktion
 \vec{B} — Richtung des Magnetfeldes
 \vec{v} — Bewegungsrichtung des Leiters im Magnetfeld
 \vec{F} — Krafterrichtung auf die Elektronen

führt zur Ausbildung eines elektrischen Feldes im Leiter. Zwischen den Enden des Leiters kann eine elektrische Spannung U_{ind} nachgewiesen werden. Sie ist durch die elektromagnetische Induktion entstanden.

- Von welchen Größen hängt die erzeugte Induktionsspannung in einer Spule mit der Windungszahl N und einem Eisenkern ab?
- Geben Sie Beispiele für die Umwandlung elektrischer Energie in mechanische Energie!

Bei der elektromagnetischen Induktion erfolgt eine Kraftwirkung auf Elektronen durch eine Änderung der Stärke des Magnetfeldes in der Umgebung des Leiters.

Führen dagegen in einem stromdurchflossenen Leiter die Elektronen eine Bewegung in einem homogenen Magnetfeld aus, so tritt das Magnetfeld dieses elektrischen Stromes mit dem homogenen Magnetfeld in Wechselwirkung. Auf Grund dieser Wechselwirkung entsteht eine Kraft auf die Elektronen, die senkrecht zur Magnetfeldrichtung und senkrecht zur Stromrichtung wirkt. Es tritt ein Konzentrationsunterschied an Elektronen zwischen beiden Seiten des Leiters quer zur Stromrichtung auf. Die entstandene Spannung wurde erstmals 1879 von E. H. Hall (1855 bis 1938) beobachtet. Sie wird Hall-Spannung U_H genannt. Bild 53/1 zeigt die Entstehung der Hall-Spannung in einer schematischen Darstellung.

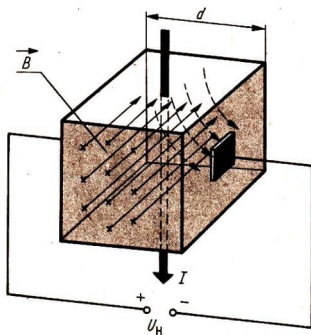


Bild 53/1 Entstehung der Hallspannung U_H

\vec{B} — Richtung des magnetischen Feldes

I — Richtung des elektrischen Stromes

\vec{F} — Krafterichtung auf die Elektronen

d — Breite des Leiters

Die als **Hall-Effekt** bezeichnete Ablenkung der Elektronen im Leiter hängt von der Stärke B des Magnetfeldes, der elektrischen Stromstärke I und der Breite d des Leiters ab. Es gilt:

$$U_H = R_H \cdot \frac{B \cdot I}{d} \quad (19)$$

Die Konstante R_H (Hall-Konstante) ist eine Materialkonstante. In ihr ist die Abhängigkeit des Effektes von der Ladungsträgerkonzentration ausgedrückt ($R_H = 1/e \cdot n$). Durch Messung der Hallspannungen wurde experimentell

untersucht, ob die Leitfähigkeit eines Materials vorwiegend auf Elektronenleitung oder auf Ionenleitung zurückgeführt werden kann. Durch Hallspannungsmessungen konnte auch experimentell nachgewiesen werden, daß im Kupfer die Elektronenkonzentration $n_{Cu} = 8 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ und in Halbleitern $n_{\text{Halb}} = 10^{14}$ bis 10^{18} cm^{-3} beträgt. Dadurch wurde erkannt, daß die Leitungselektronen in Halbleitern auf andere Weise entstehen als in Metallen.

Schaltelemente, in denen mit Hilfe des Hall-Effektes eine Energieumwandlung (elektromagnetische Energie in elektrische Energie) vorgenommen wird, heißen **Hall-Generatoren**. Mit Hilfe von Hall-Generatoren läßt sich die Stärke magnetischer Felder ausmessen. In die Größe der Hall-Spannung sind multiplikativ die Stärke des magnetischen Feldes B und der sogenannte Steuerstrom I eingegangen. Da die Stärke des magnetischen Feldes ebenfalls durch die Änderung eines elektrischen Stromes verändert wird, läßt sich mit Hilfe eines Hall-Generators eine elektronische Multiplikation vornehmen. Daher werden Hall-Generatoren nicht nur in der Meßtechnik, sondern auch in elektronischen Rechenanlagen eingesetzt. Besonders gute Effekte hat man infolge der großen Elektronenbeweglichkeit mit Hall-Generatoren aus Indiumantimonid und Indiumarsenid erhalten.

Tabelle 4 Hall-Konstanten einiger Stoffe

Stoff	Hall-Konstante R_H in $\text{cm}^3 \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Kupfer	$-5,3 \cdot 10^{-5}$
Wismut	$-0,5$
Silizium	-10^8
Indiumantimonid	$-6 \cdot 10^2$
Indiumarsenid	$-9 \cdot 10^3$

- Studieren Sie den folgenden Text so, daß Sie einen Vortrag zum Thema „Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten von Hallsonden“ halten können! Gehen Sie dabei in folgenden Arbeitsschritten vor:
 1. Lesen Sie den folgenden Text einmal durch und werden Sie sich dabei über den Umfang des Vortrages klar!
 2. Sammeln Sie Fakten und Begriffe aus dem vorliegenden Text und fertigen Sie über die physikalischen Zusammenhänge Skizzen an!
 3. Fertigen Sie eine Gliederung an und notieren Sie, zu welchem Teilaspekt Sie weitere Information benötigen!
 4. Nutzen Sie zum weiteren Informationsgewinn:
 - Piesker, A. P.; „Hallgeneratoren in der Automatisierungstechnik“, Berlin; VEB Verlag Technik 1965.
 - Kuntsch, R.; „Elektrische Meßtechnik zur Messung nichtelektrischer Größen, Berlin: VEB Verlag Technik 1967!
 5. Fertigen Sie sich entsprechend der Gliederung einen Stichpunktzettel an!
 6. Überprüfen Sie, welche Fakten und Vorgänge Sie an der Tafel festhalten müssen, um einen Überblick bei Ihren Mitschülern zu erreichen!
 7. Fertigen Sie sich Skizzen für die Tafel an!

Hallsonden, ihre Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten

Der Hall-Effekt beruht auf der Ablenkung der Elektronen in Leitern oder Halbleitern infolge Kraftwirkung, wenn sich solch ein Stoff in einem Magnetfeld befindet. Ein Beispiel für diese Kraftwirkung ist das Entstehen einer elektrischen Spannung an den Enden eines im Magnetfeld bewegten Leiters (elektromagnetische Induktion). Eine andere Möglichkeit, eine derartige Kraftwirkung auszulösen, liegt dann vor, wenn sich der Leiter in Ruhe befindet, aber statt dessen die Elektronen eine Bewegung ausführen (elektrischer Strom, vgl. Bild 53/1). Die Ablenkung der Elektronen wird um so größer sein, je beweglicher die Elektronen sind, das heißt, Stoffe mit einer hohen Beweglichkeit der Ladungsträger liefern eine hohe Hallspannung. Für die technische Anwendung von Hallsonden ist ferner die Unabhängigkeit des spezifischen Widerstandes von der Temperatur und ausreichende Festigkeit des Werkstoffs der Hallsonde zu fordern.

Ein *normaler Halleffekt* liegt dann vor, wenn die Elektronenleitung im Leiter überwiegt. Als *anomaler Halleffekt* wird der Vorgang bezeichnet, wenn die Defektelektronenleitung vorherrschend ist. Bei diesem ist die Hallkonstante R_H (vgl. Seite 54) positiv.

Bis vor wenigen Jahren wurden Hallgeneratoren (Bezeichnung für technisch einsetzbare Hallsonden) aus Wismut hergestellt. Bei Wismut waren die genannten Bedingungen gut erfüllt. Wismut besitzt eine Hallkonstante von

$$R_H = - 5,0 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^3 \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Aus der Tabelle auf Seite 54 ist ersichtlich, daß metallische Hallsonden kaum Bedeutung haben. Für empfindliche Hallsonden werden heute Halbleiterwerkstoffe verwendet. Es sind zwei verschiedene Herstellungsverfahren bekannt. Für kristalline Hallsonden werden von einem Halbleiterblock Scheiben mit einer Dicke von 0,1 mm bis 0,2 mm abgetrennt. Zum Schutz vor äußeren Beschädigungen werden diese mit Kunstharzgießmasse umgeben. Bei einem anderen Verfahren wird auf Glimmerplättchen eine Halbleiterschicht von 1 μm bis 10 μm aufgedampft. Zur Erhöhung der mechanischen Festigkeit wird das Glimmerplättchen auf einer Kunststoffplatte von 1 mm Dicke angeordnet. Die Halbleiterschicht auf dem Glimmer wird mit einer Polystyrolschicht überzogen.

● *Vergleichen Sie die Vor- und Nachteile von kristallinen Hallsonden mit denen von Dünnschichtsonden, die durch Aufdampfen hergestellt werden. (Nutzen Sie die Gleichung (19) auf Seite 53).*

Für den Betrieb einer Hallsonde muß in Längsrichtung ein elektrischer Strom fließen. Dieser wird Steuerstrom genannt. Damit sich die Meßresultate wenig ändern, muß die Steuerstromstärke sehr konstant gehalten werden. Dazu sind gesonderte Stromversorgungsgeräte er-

forderlich. Mit Steuerstromstärken von $I_s = 10$ mA bis 150 mA lassen sich bei einer magnetischen Induktion von $B = 10^{-1} \text{ Wb} \cdot \text{m}^{-2}$ Hallspannungen von 10 mV bis 500 mV erzeugen.

Ein großes Anwendungsgebiet für Hallsonden liegt neben ihrem bereits erwähnten Einsatz (Seite 55) in der elektronischen Rechentechnik und in der Ausmessung von magnetischen Feldern. So läßt sich die magnetische Induktion B in Luftspalten von Spulen, Motoren, Generatoren und Transformatoren mit Hilfe kleiner Hallsonden bestimmen. Da für die Herstellung der magnetischen Felder Gleichstrom als Erregerstrom verwendet wird, läßt sich ein sehr großer Gleichstrom über die Ausmessung eines magnetischen Feldes bestimmen.

- Beschreiben Sie die Messung eines Gleichstromes mit einem Hallgenerator!
- Geben Sie an, wie eine Hallsonde zur magnetischen Feldstärkemessung zwischen zwei Ferritplatten im Abspielkopf eines Tonbandgerätes angeordnet sein müßte und wie das Magnetfeld in diesem Fall verläuft!

Durch ungleichmäßige Erwärmung der Hallgeneratoren können in Folge auftretender Thermospannungen Fehler bei Messungen auftreten. Auch besteht die Möglichkeit, daß zwischen den Anschlußelektroden und dem Halbleiterwerkstoff ein Gleichrichtereffekt auftritt. Dies wird besonders bedeutungsvoll, wenn Messungen in magnetischen Wechselfeldern vorgenommen werden sollen.

Der Halleffekt wird außer in der Meßtechnik auch im MHD-Generator ausgenutzt.¹

- ⑦ Durch einen Leiter mit dem Durchmesser $d = 0,5$ mm fließt ein elektrischer Strom der Stärke $I = 20$ A. Die Leiterfläche wird senkrecht zum Strom und zur langen Seite von einem magnetischen Feld mit der magnetischen Induktion $B = 1 \text{ Wb} \cdot \text{m}^{-2}$ durchflutet. Die entstehende Hall-Spannung beträgt $U_H = 3,1 \cdot 10^{-6}$ V. Aus welchem Material kann der elektrische Leiter bestehen?
- ⑧ Ein elektrischer Strom der Stärke $I = 5$ A fließt durch ein Indiumantimonidplättchen der Dicke $d = 0,1$ mm. Das Plättchen ist in einem magnetischen Feld, welches senkrecht zur Stromrichtung und zu d verläuft, angeordnet. Es ist die Hall-Spannung zu bestimmen, wenn die magnetische Induktion $B = 0,5 \text{ Wb} \cdot \text{m}^{-2}$ beträgt.
- ⑨ Ein elektrischer Leiter von 10 cm Länge wird in einem homogenen Magnetfeld senkrecht zur Feldrichtung mit der Geschwindigkeit $v = 10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ bewegt. Die magnetische Induktion des Feldes beträgt $B = 0,4 \text{ Wb} \cdot \text{m}^{-2}$. Wie groß ist die induzierte elektrische Spannung?

¹ Naumann, H. und B.
Energie ohne Umwege
Leipzig: Fachbuchverlag 1970

3. Untersuchung der Empfindlichkeit und der Fehler bei Meßanordnungen

3.1. Zusammenhang zwischen nichtelektrischer Eingangsgröße und elektrischer Ausgangsgröße

Bei der Aufnahme der Kennlinien eines Widerstandsthermometers, eines Thermoelements oder eines Photoelements wurden elektrische Größen in Abhängigkeit von der Temperatur bzw. der Lichtstärke dargestellt. Je nach der Art des Meßfühlers entsteht eine unterschiedliche Abhängigkeit der elektrischen Ausgangsgröße von der nichtelektrischen Eingangsgröße. Ursache für diese Unterschiede sind die physikalischen Prozesse, die im Meßfühler durch die Einwirkung der nichtelektrischen Größen ausgelöst werden. Die Qualität der Ausgangsgröße hängt außerdem von der Zusammenstellung der Meßfühler mit Zusatzgeräten und Meßgeräten ab. Diese Zusammenstellung von Meßfühlern, Zusatzgeräten und Meßgeräten wird **Meßanordnung** genannt. Vor dem Einsatz einer elektrischen Meßanordnung in der Praxis ist eine Untersuchung des Zusammenhangs von Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen erforderlich, um die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes festzulegen.

- ⑩ *Stellen Sie in einer Tabelle Eingangsgröße, Meßfühler, Ausgangsgröße und die physikalischen Grundlagen der Meßanordnungen zusammen, die Sie bisher benutzt haben!*

Als Beispiel für die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen einer Eingangsgröße und der Ausgangsgröße wird ein Thermoelement betrachtet.

3.1.1. Zusammenhang zwischen Temperatur und Spannung bei Thermoelementen

- *Wiederholen Sie Aufbau und Wirkungsweise eines Thermoelementes an Hand des Abschnittes 2.3.!*

Die Abhängigkeit der Thermospannung von der Temperaturdifferenz kann bei Thermoelementen nicht durch einfache Gleichungen ausgedrückt werden (siehe auch S. 50). In der Praxis ist man darauf angewiesen, die Temperatur aus Diagrammen bzw. Tabellen zu entnehmen.

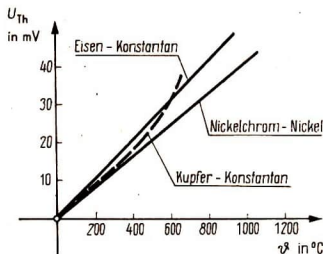


Bild 58/1
Thermospannungs-Temperaturkurven
für einige Thermoopaare

Wie aus Bild 58/1 zu entnehmen ist, ergeben sich bei den einzelnen Thermoopaaren unterschiedliche Abhängigkeiten der Spannung von der Temperatur. Aus dieser grafischen Darstellung läßt sich das Verhältnis der erzeugten Spannung zur erzeugenden Temperaturdifferenz bestimmen. Dieses Verhältnis der Ausgangs- und Eingangsgröße bezeichnet man als **Übertragungsfaktor**. Solche Übertragungsfaktoren treten auch bei mechanischen Umformungen, zum Beispiel als Übersetzungsverhältnis, oder bei elektrischen Verstärkern als Verstärkungsfaktor auf.

- Geben Sie den Unterschied zwischen dem Übertragungsfaktor des Thermoelements und dem Übersetzungsverhältnis an!

Mit einem Silizium-Wismut-Thermoelement konnte bisher der größte Übertragungsfaktor von $520 \mu V \cdot K^{-1}$ erreicht werden.

Besteht zwischen verschiedenen Beträgen der Ausgangs- und der Eingangsgröße keine Proportionalität, so versucht man, für einzelne Bereiche der beiden betrachteten Größen, mehrere, in diesem Falle dann unterschiedliche Übertragungsfaktoren anzugeben.

Beispiel:

Kupfer-Konstantan-Thermoelement

bei $0^{\circ}C$ $0,040 mV \cdot K^{-1}$

bei $500^{\circ}C$ $0,070 mV \cdot K^{-1}$

- Stellen Sie die Abhängigkeit der Ausgangsgröße von der Eingangsgröße bei einem Eisen-Konstantan-Thermoelement nach der Tabelle 5 grafisch dar und berechnen Sie den Übertragungsfaktor bei $10^{\circ}C$ und $80^{\circ}C$!

Tabelle 5

ϑ in °C	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80
U_{Th} in mV	-0,60	0	0,45	0,99	1,5	2	2,58	3,15	3,73	4,30

3.1.2. Zusammenhang zwischen Verdrehungswinkel und Stromstärke bei einem Drehwiderstand

Befindet sich ein Drehwiderstand mit linearem Widerstandsverlauf in einem Stromkreis mit konstanter Spannung, so ist die Änderung der Stromstärke im Stromkreis ein Maß für die am Drehwiderstand herbeigeführte Veränderung des Verdrehungswinkels.

Es gilt:

$$\begin{aligned} \frac{\alpha}{\alpha_G} &= \frac{R}{R_G} \\ \alpha &= \frac{R \cdot \alpha_G}{R_G} && \alpha_G: \text{Winkelendstellung} \\ &&& R_G: \text{Gesamtwiderstand des Drehwiderstandes} \\ \alpha &= \frac{U \cdot \alpha_G}{I \cdot R_G} \\ \alpha &= \frac{1}{I} \cdot \frac{U \cdot \alpha_G}{R_G} \end{aligned} \quad (20)$$

Die Ausgangsgröße I ist von der Eingangsgröße α abhängig.

Unter bestimmten produktionstechnischen Bedingungen läßt sich eine logarithmische Abhängigkeit zwischen Drehwinkel und Widerstand erreichen, was besonders für den Einsatz des Drehwiderstandes als Lautstärkeregler auf Grund der Hörempfindlichkeit des menschlichen Ohres von Bedeutung ist. Drehwiderstände mit logarithmischer Abhängigkeit zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße werden als Schichtdrehwiderstände ausgeführt.

- Worin unterscheidet sich ein Drahtdrehwiderstand von einem Schichtdrehwiderstand?
 Analysieren Sie den folgenden Text mit dem Ziel, einen Vortrag zu halten!
 Vergleichen Sie die Eigenschaften der Bauelemente! Suchen Sie zu jedem Bauelement ein Einsatzbeispiel!
 Literatur: Semrad, Otto, Grundlagen der Elektrotechnik, Verlag Technik Berlin.

Drehwiderstände

Drahtdrehwiderstand. Bei einem Drahtdrehwiderstand wird das Widerstandsmaterial auf einen isolierten Grundkörper gewickelt. Der dazu verwendete Widerstandsdraht ist im allgemeinen wegen der geringen Temperaturabhängigkeit Konstantan- oder Chromnickel-

draht. Ein beweglicher Abgriff (Schleifer) ist so angebracht, daß er die einzelnen Windungen überstreicht. Mit Ausnahme der Schleiferbahn sind die Windungen durch einen Lacküberzug geschützt. Da der Drehwiderstand 3 Anschlüsse besitzt, kann man ihn als Potentiometer oder verstellbaren Widerstand einsetzen.

Drahtdrehwiderstände werden mit Widerstandswerten zwischen 25 Ω und 25 k Ω hergestellt. Es gibt Drahtdrehwiderstände, die bis zu einer Leistung von 250 W belastet werden können.

Schichtdrehwiderstand. Bei einem Schichtdrehwiderstand wird die leitende Schicht auf einen nichtleitenden Träger in Form eines an einer Stelle unterbrochenen Kreisringes aufgebracht. Die Widerstandsbahn besteht aus einem Lack-Kohlenstoff-Gemisch. Die Kontaktabnahme wird durch einen Schleifer, der sich auf der gut geglätteten Widerstandsschicht bewegt, vorgenommen. Die Kennlinie (Abhängigkeit des Widerstands vom Drehwinkel) kann linear oder logarithmisch sein. Die Widerstandswerte liegen zwischen 100 Ω und 1 M Ω . Die Kennlinie eines logarithmischen Schichtdrehwiderstandes zeigt Bild 60/1.

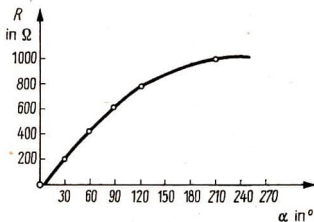


Bild 60/1 Kennlinie eines logarithmischen Schichtdrehwiderstandes

3.2. Empfindlichkeit einer Meßanordnung

Wenn in einer Anlage zum Pasteurisieren von Milch die Temperatur (72 $^\circ\text{C}$) um mehr als 1 grad unter den vorgeschriebenen Wert sinkt, wird der Durchlauf der Milch so geregelt, daß sie wieder in den Ausgangsbehälter zurückfließt. Erst wenn die Milchttemperatur auf 72 $^\circ\text{C}$ gestiegen ist, erfolgt die Weiterverarbeitung. Bei solch einer automatischen Anlage wird durch das entsprechende Meßgerät die Temperatur elektrisch kontrolliert.

Die Temperaturmessung in Metallschmelzen erfolgt ebenfalls elektrisch. In Siemens-Martin-Öfen verwendet man für einen Meßbereich von 1000 bis 1600 $^\circ\text{C}$ hierzu Pt/Rh-Pt-Thermoelemente. Mit solch einem Meßfühler in der Meßan-

ordnung wird allerdings bei einer Temperaturdifferenz von 1 K keine Veränderung des Zeigerausschlages am Meßgerät sichtbar. Auf der Skale des Meßgerätes in der Milchverarbeitungsanlage ist bei einer Temperaturdifferenz von z. B. 1 K die Länge des vom Zeiger durchlaufenen Weges größer als bei der Anlage für die Temperaturmessung im Siemens-Martin-Ofen bei der gleichen Temperaturdifferenz.

Das Verhältnis der Verschiebung der Marke am Meßgerät ΔL zur Veränderung der Meßgröße ΔM bezeichnet man als

$$\text{Empfindlichkeit } E = \frac{\Delta L}{\Delta M}. \quad (21)$$

Eine Meßanordnung wird um so empfindlicher, je weniger man die Meßgröße ändern muß, um am Meßgerät eine Anzeigeänderung zu erreichen. Meßgeräte mit einer hohen Empfindlichkeit haben daher auch eine hohe Ablesegenauigkeit. Die Einheit der Empfindlichkeit ergibt sich aus der Einheit der beobachteten Längenänderung und der Änderung der Meßgröße (z. B. $\text{mm} \cdot \text{K}^{-1}$).

▼ *Bauen Sie eine Meßanordnung zur Temperaturmessung mit einem Eisen-Konstantan-Thermoelement und einem Lichtmarkengalvanometer (oder Spiegelgalvanometer) auf und bestimmen Sie die Empfindlichkeit dieser Anordnung! Benutzen Sie die Experimentierhinweise aus Kapitel 2!*

▼ *Ersetzen Sie das Lichtmarkengalvanometer durch ein Vielfachmeßgerät und bestimmen Sie erneut die Empfindlichkeit! Vergleichen Sie beide Ergebnisse!*

In der Industrie, der Landwirtschaft, dem Militärwesen und der Wissenschaft werden bestimmte Anforderungen an eine Meßanordnung gestellt. Von wesentlicher Bedeutung für den Einsatz der Meßanordnung ist die für die Meßaufgabe notwendige Empfindlichkeit.

3.3. Meßfehler und ihre Ursachen

Bereits 1809 wurde bei der Auswertung von Beobachtungen des Planetoiden Pallas durch C. F. Gauß (1777 bis 1855) begründet, wie die durch menschliche Unzulänglichkeiten bei Beobachtungen der Gestirne entstehenden Meßfehler auf ein Minimum reduziert werden können. Damit war jene Richtung der Mathematik in den theoretischen Grundlagen entwickelt, die als Fehlerrechnung bezeichnet wird. In allen Wissenschaften und technischen Disziplinen ist es erforderlich, bei Messungen neben dem **Meßgerät**, dem **Meßort**, der **Zeit der Messung** und der **Person des Messenden**, die bei der Messung **aufgetretenen Fehler** anzugeben. Dadurch ist es auch nach längerer Zeit noch möglich, Messungen unter gleichen Bedingungen zu wiederholen und über die Verwendbarkeit der Meßergebnisse Aussagen zu machen. Für die Verwendbarkeit von Meßergebnissen ist das Anwendungsgebiet entscheidend.

Eine Abweichung um 0,5 mm ist bei einer Längenmessung des Klassenzimmers noch vertretbar, wenn es sich darum handelt, den Rauminhalt in Kubikmeter zu bestimmen. Tritt diese Abweichung aber bei einem Experiment zur exakten Bestimmung der Brennweite einer Linse auf, so kann dies bereits zu erheblichen Fehlern bei der Konstruktion eines Mikroskops führen.

- *Geben Sie an, wie genau Sie mit Ihrem Lineal Längenmessungen durchführen können!*
- *Warum sind beim Messen einer physikalischen Größe mehrere Messungen erforderlich?*
- *Können Sie durch eine Mittelwertberechnung, die durch die ungenaue Teilung auf Ihrem Lineal verursachte Fehlmessung beseitigen?*

3.3.1. Arten von Meßfehlern

Eine Messung besteht in der experimentellen Bestimmung eines Meßwertes x unter Benutzung einer vorgegebenen Meßapparatur. Es kann bei Messungen in der Makrophysik vorausgesetzt werden, daß es einen wahren Wert x_w der Meßgröße X gibt. Der experimentell bestimmte Meßwert weicht in der Regel von diesem wahren Wert ab. Für die Abweichungen gibt es verschiedene Ursachen. Nach ihnen werden die Meßfehler unterschieden:

<p>systematische Fehler entstehen durch falsche Nullstellung eines Meßgerätezeigers oder Nichtberücksichtigung der Umwelteinflüsse (Druck, Temperatur)</p>	<p>zufällige Fehler entstehen durch Unzulänglichkeit der Sinnesorgane oder durch die Versuchsbedingungen (wechselnde Anzeigerichtung, Umkehrspanne)</p>
<p>können durch Korrekturrechnung gemildert werden</p>	<p>lassen sich durch Fehlerrechnung erfassen und berechnen</p>

Außerdem treten manchmal **grobe Fehler** bei Messungen auf. Sie sind daran zu erkennen, daß in der Meßtabelle oder in der grafischen Darstellung einer der Meßwerte eine sehr große Abweichung von den übrigen Meßwerten aufweist. Das bedeutet, dieser Meßwert weicht sehr stark vom wahren Wert x_w ab. Meßwerte, die einen groben Fehler aufweisen, können aus dem Meßprotokoll gestrichen werden, da sie eine Ausnahmerecheinung darstellen und prinzipiell vermeidbar sind. Mit Hilfe mathematischer Berechnungen lassen sie sich nicht beseitigen.

Systematische Fehler. Ein falscher Meßwert für die elektrische Stromstärke I kann dadurch entstehen, daß der Zeiger des Meßinstruments vor Beginn der

Messungen keine Nullstellung hatte. Damit besteht zwischen den gemessenen Werten x und dem wahren Wert x_w eine um diesen Skalenteil stets gleich große Abweichung. Derartige Fehler heißen **systematische Fehler**. Sie können auch dadurch auftreten, daß ein Meßgerät in falscher Lage, bei nichtzulässiger Außentemperatur (Meßverstärker auf Transistorbasis) oder bei Überschreiten des Gültigkeitsbereiches eines physikalischen Gesetzes benutzt wurde. Systematische Fehler haben einen konstanten Wert und verändern das Meßergebnis in eine Richtung. Daher lassen sie sich durch zusätzliche Messungen und anschließende Rechnungen (Korrekturrechnung) mildern.

- ⑪ Können systematische Fehler durch Verdopplung der Anzahl der registrierten Meßwerte beseitigt werden?
- ⑫ Welche Möglichkeit gibt es, einen systematischen Fehler, der durch die Nichtbeachtung der Raumtemperatur während des Meßvorgangs entstand, zu korrigieren?

Zufällige Fehler. Schwankungen der Zeiger eines Meßgerätes, ungenügende Beachtung der Parallaxe oder ungenaues Schätzen eines Zwischenwertes auf der Skala eines Meßgerätes führen zu statistisch verteilten Fehlern. Sie sind nicht immer von gleicher Größe und auch nicht immer mit dem gleichen Vorzeichen versehen. Solche Fehler werden **zufällige Fehler** genannt.

Da es sich bei den zufälligen Fehlern um statistisch verteilte Fehler handelt, sind sie mit Mitteln der Wahrscheinlichkeitsrechnung erfaßbar und lassen sich damit ausgleichen. Die Fehlerrechnung gestattet es, unter der Voraussetzung, daß die Meßwerte von derselben Person und mit der gleichen Versuchsanordnung gewonnen werden, die Genauigkeit eines Meßergebnisses anzugeben.

Über die Durchführung einer Fehlerrechnung gibt folgende Literatur Auskunft:

1. Lehrbuch Physik, Kl. 11, Berlin: Volk und Wissen Volkseigener Verlag 1973, S. 156.
2. Kretschmar, Mende, Wollmann, Physikalisches Praktikum, VEB Fachbuchverlag Leipzig 1974.
3. Ilberg, W., Physikalisches Praktikum für Anfänger, Leipzig: B. G. Teubner Verlagsgesellschaft 1967, S. 14 ff.
4. Hänsel H., Grundzüge der Fehlerrechnung, Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1967.

3.3.2. Fehlergrenzen und Güteklassen

Beim Einsatz von Meßgeräten und Meßanordnungen ist von vornherein der Fehler für alle Messungen durch die Fehlergrenzen festgelegt. Diese hängen

konstruktiv bedingt von den Meßgeräten oder -anordnungen ab. Nach der TGL 0-1319 werden Fehlergrenzen wie folgt definiert:

„Die Fehlergrenze in der praktischen Meßtechnik sind die vereinbarten oder garantierten, zugelassenen äußersten Abweichungen nach oben oder unten von der Sollanzeige oder vom Sollmaß oder von einem sonst vorgeschriebenen Wert der Meßgröße.“

Wenn beispielsweise der wahre Meßwert bei einer Spannungsmessung 200 V beträgt, so müßte das Meßgerät diesen Betrag (Sollanzeige) anzeigen. Er hat aber eine Abweichung von 2 V: es werden nur 198 V angezeigt. Diese Abweichung wird nicht auf den Meßwert, d. h. auf die 200 V, sondern auf den Endausschlag des Gerätes bezogen. Im vorliegenden Fall liegt der Vollausschlag bei 300 V. Dann beträgt der Fehler des Meßgerätes

$$\frac{-2 \text{ V}}{300 \text{ V}} \cdot 100\% = -0,66\%$$

Die Fehlergrenze gibt die höchstzulässige Abweichung des Meßwertes vom wahren Wert an. Sie ist immer auf den Vollausschlag des Gerätes bezogen und gilt für jeden Skalenteil. Ist beispielsweise für ein Spannungsmeßgerät mit einem Meßbereich von 260 V eine Fehlergrenze von 1,5% angegeben, so dürfen an jeder Stelle der Skale

$$\frac{260 \text{ V} \cdot 1,5\%}{100\%} = 3,9 \text{ V}$$

Abweichung auftreten. Der relative Fehler bei einer Messung gibt das Verhältnis des Fehlers zum wahren Wert an. Unter der vorliegenden Annahme würden damit folgende relative Fehler auftreten:

Meßbereich 260 V Fehlergrenze 1,5%	Abweichung bei der Messung $\pm 3,9 \text{ V}$
39 V	relativer Fehler $\frac{3,9 \text{ V}}{39 \text{ V}} \cdot 100\% = 10\%$
78 V	relativer Fehler $\frac{3,9 \text{ V}}{78} \cdot 100\% = 5\%$
156 V	relativer Fehler $\frac{3,9 \text{ V}}{156 \text{ V}} \cdot 100\% = 2,5\%$

Es wird deutlich, der relative Fehler ist bei kleinerem Zeigerausschlag größer. Es ist deshalb stets rechtzeitig auf den empfindlicheren Meßbereich umzuschalten.

Mit den Fehlergrenzen eines Meßgerätes sind jene Abweichungen vom Hersteller des Gerätes angegeben, die zum Beispiel durch Reibung in Achslagern, durch die Alterung von Bauteilen oder auch durch unvermeidbare Ungleichmäßigkeiten bei der Fertigung der Geräteteile bedingt sind.

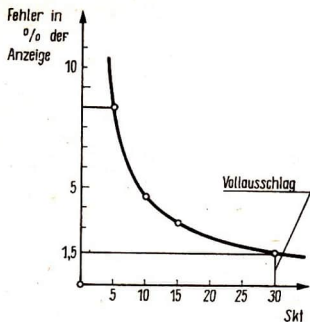


Bild 65/1 Anzeigefehler eines Meßgerätes der Güteklasse 1,5

Die Fehlergrenzen spielen bei der Qualitätskontrolle im Produktionsprozeß als Unterscheidungsmerkmal für fehlerfreie Arbeit von Ausschubarbeit eine entscheidende Rolle.

Die elektrischen Meßgeräte sind in **Güteklassen** eingeteilt. Diese ist auf jedem elektrischen Meßgerät durch eine Ziffer auf der Skale angegeben. Da man vor der Durchführung von Messungen den zulässigen Fehler (entsprechend dem Verwendungszweck der Messung) festlegt, läßt sich ein Meßgerät mit entsprechender Güteklasse wählen. Die Güteklassenangabe bezieht sich stets auf den Endausschlag des elektrischen Meßgerätes und auf die festgelegten Bedingungen für die Verwendung (Lage des Gerätes, Temperatur, Fremdfelder).

Es gelten folgende Güteklasseneinteilungen für elektrische Meßgeräte:

Feinmeßgeräte	Klasse 0,1	Fehlergrenze $\pm 0,1\%$
	Klasse 0,5	Fehlergrenze $\pm 0,5\%$
Betriebsmeßgeräte	Klasse 1	Fehlergrenze $\pm 1\%$
	Klasse 1,5	Fehlergrenze $\pm 1,5\%$
	Klasse 2	Fehlergrenze $\pm 2\%$

Außer den Güteklassen werden auf elektrischen Meßgeräten noch die Betriebslage und die Prüfspannung angegeben (\nearrow Physik in Übersichten, S. 246).

Die Prüfspannung der Meßgeräte liegt sehr viel höher als die Betriebsspannung, damit die nötige Betriebssicherheit beim Gebrauch gewährleistet ist. So ist bei einer Betriebsspannung bis 40 V eine Prüfspannung von 500 V vorgeschrieben.

- ⑬ Geben Sie für das von Ihnen benutzte Meßgerät die Güteklasse an!
- ⑭ Berechnen Sie den Fehler für einen Meßbereich von 20 V (Vollausschlag 1,0) wenn der Zeiger Ihres Meßgerätes auf die Skalenteile 0,8 bzw. 0,3 zeigt!
- ⑮ Geben Sie für verschiedene elektrische Demonstrationsmeßgeräte Ihrer Schulsammlung die Güteklasse und die Meßbedingungen an!

Ein Hauptvorteil der elektrischen Messung nichtelektrischer Größen besteht darin, daß die Meßwerte über größere Entfernungen übermittelt werden können. Allerdings sind infolge der Fehler bei elektrischer Messung einer Größe durch die Fehlergrenzen der verwendeten Meßgeräte Grenzen vorgegeben. Durch geeignete Meßschaltungen (Brückenschaltung, Kompensationsschaltung) lassen sich jedoch verhältnismäßig exakte Meßergebnisse erreichen. Dabei wird der gerätetechnische Aufwand größer (↗ Kapitel 4).

3.3.3. Fehler bei Meßanordnungen

In einer Meßanordnung zur elektrischen Messung der Beleuchtungsstärke ist der Meßfühler Fotoelement mit einem Drehspulmeßgerät zusammengesaltet. Das Fotoelement besitzt einen Fehler von 2,5%, und das Meßgerät einen Fehler von 1,5%. Der Gesamtfehler der Meßanordnung wird entsprechend den Gesetzen der Gaußschen Fehlerfortpflanzung in Näherungsform ermittelt:

$$x_M = \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \% \quad (22)$$

x_M : Fehler der Meßanordnung

x_1 : Fehler des Fotoelements

x_2 : Fehler des Drehspulmeßgerätes

$$x_M = \sqrt{2,5^2 + 1,5^2} \%$$

$$x_M = \sqrt{8,5} \%$$

$$x_M = 2,9 \%$$

Der Fehler der Meßanordnung ist also größer als der Fehler jedes einzelnen Elements der Meßanordnung.

Beim Aufbau von Meßanordnungen kann durch Einordnung eines Elements mit sehr kleinem Fehler in ein System von Elementen mit großen Fehlern keine wesentliche Verbesserung der Meßanordnung erreicht werden.

Für die Erhöhung der Qualität einer Meßanordnung (im vorliegenden Fall Fotoelement – Drehspulmeßgerät) kommt es darauf an, den Fehler jenes Elements in der „Kette“ zu erniedrigen, das den größten Fehler aufweist.

Für die Durchführung einer Fehlerbetrachtung beim Auswerten von experimentell gewonnenen Daten wird folgendes Beispiel angegeben:

Die experimentelle Aufgabe bestand darin, den Elastizitätsmodul E für Messingdraht zu bestimmen. Wenn auch Messingdraht wegen seines geringen k -Faktors (↗ Abschnitt 2.2., S. 29) nicht für die Herstellung von Dehnungsmeßstreifen benutzt wird, so ist die Längenänderung eines solchen Drahtes bei Kraftereinwirkung für die Funktion eines Dehnungsmeßstreifens charakteristisch.

Nach Gleichung 4, S. 27 gilt für den Elastizitätsmodul

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

$$\text{Mit } \sigma = \frac{F_x}{A} \text{ und } \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \text{ ergibt sich: } E = \frac{F_x \cdot l_0}{\Delta l \cdot A} \text{ oder } E = \frac{4F_x \cdot l_0}{\pi \cdot \Delta l \cdot d^2} \quad (23)$$

Nach den Regeln der Fehlerfortpflanzung gilt für den relativen Fehler

$$\frac{\Delta E}{\bar{E}} = \frac{\Delta(\Delta l)}{\Delta l} + \frac{\Delta l_0}{l_0} + 2 \frac{\Delta d}{d} \quad (24)$$

Δl : Längenänderung des Drahtes

l_0 : ursprüngliche Länge

d : Durchmesser des Drahtes

Bereits an diesem Beispiel wird deutlich, daß die Dickenmessung mit besonderer Sorgfalt durchgeführt werden muß, da Meßfehler für den Durchmesser mit dem Faktor 2 in das Meßergebnis eingehen (Fehlervorbetrachtung).

Aus den Meßwerten (Meßreihen) werden folgende Werte für die Meßgrößen bestimmt:

$$\bar{d} = 0,499 \text{ mm,}$$

$$l_0 = 2700 \text{ mm mit einem geschätzten Fehler von 1\%,}$$

$$\Delta l = 0,161 \text{ mm,}$$

$$F_z = 0,120 \text{ kp.}$$

Es ergibt sich:

$$\bar{A} = \frac{\pi \cdot \bar{d}^2}{4} = 0,196 \text{ mm}^2,$$

$$\bar{E} = \frac{F_z \cdot l_0}{\Delta l \cdot \bar{A}} = 10300 \text{ kp mm}^{-2}.$$

Sind die Meßwerte x_i und der Mittelwert \bar{x} , so ergibt sich nach den Regeln der Fehlerrechnung der absolute Fehler aus den quadratischen Abweichungen vom Mittelwert $(\bar{x} - x_i)^2$

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (25)$$

n : Anzahl der Messungen.

Aus den Wertetabellen können ermittelt werden für das Streuungsquadrat von d

$$\sum (\bar{d} - d_i)^2 = 28 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2 \text{ bei 10 Messungen,}$$

und von Δl

$$\sum (\Delta l - \Delta l_i)^2 = 42 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2 \text{ bei 5 Messungen.}$$

Daraus folgt

$$\Delta(\Delta l) = \sqrt{\frac{42 \cdot 10^{-6}}{20}} \text{ mm} = 1,45 \cdot 10^{-3} \text{ mm,}$$

$$\frac{\Delta(\Delta l)}{\Delta l} = \frac{1,45 \cdot 10^{-3} \text{ mm}}{0,161 \text{ mm}} = 0,009 \text{ oder } \underline{0,9\%},$$

Tabelle 6

Messung von d			
Nr.	d in mm	$d - d_i$ in mm	$(d - d_i)^2 \cdot 10^{-6}$ in mm^2
1	0,499	0,000	0
2	0,495	0,004	16
3	0,499	0,000	0
4	0,501	0,002	4
5	0,448	0,001	1
6	0,497	0,002	4
7	0,500	0,001	1
8	0,500	0,001	1
9	0,498	0,001	1
10	0,499	0,000	0
$\Sigma d = 4,986 \text{ mm}$ $\bar{d} = 0,499 \text{ mm}$		$\Sigma (d - d_i)^2 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2 = 28 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2$	

Tabelle 7

Messung von l					
Nr.	F_z in kp	l in mm	Δl in mm	$(\Delta l - \Delta l_i) \cdot 10^{-3}$ in mm	$(\Delta l - \Delta l_i)^2 \cdot 10^{-6}$ in mm^2
1	0,120	0,160	0,160	1	1
2	0,240	0,325	0,165	4	16
3	0,360	0,486	0,161	0	0
4	0,480	0,650	0,164	3	9
5	0,600	0,807	0,157	4	16
$\Sigma \Delta l = 0,805 \text{ mm}$ $\bar{\Delta l} = 0,161 \text{ mm}$				$\Sigma (\Delta l - \Delta l_i)^2 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2 = 42 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2$	

und

$$\Delta \bar{d} = \sqrt{\frac{28 \cdot 10^{-6}}{90}} \text{ mm} = 0,559 \cdot 10^{-3} \text{ mm},$$

$$\frac{\Delta \bar{d}}{\bar{d}} = \frac{0,559 \cdot 10^{-3} \text{ mm}}{0,499 \text{ mm}} = 1,12 \cdot 10^{-3},$$

$$\frac{\Delta d}{d} = 0,011\%.$$

Daraus folgt für den relativen Fehler von E

$$\frac{\Delta E}{E} = 1\% + 1\% + 0\%$$

$$\frac{\Delta E}{E} = 2\%.$$

Das Ergebnis des Experimentes ist dann

$$E = \bar{E} \pm \Delta E$$

$$E = (10300 \pm 206) \text{ kp} \cdot \text{mm}^{-2}$$

- Bereiten Sie sich an Hand der angegebenen Literatur auf einen Vortrag zum Thema: „Die Meßfehlerberechnung bei der Bestimmung der Erdbeschleunigung mit einem Fadenpendel“ vor!
Lehrbuch Physik Kl. 11, Berlin: Volk und Wissen Volkseigener Verlag 1974, S. 157 ff,
Ihlberg, W., Physikalisches Praktikum, Leipzig: B. G. Teubner Verlagsgesellschaft 1967, S. 19 bis 21; S. 69, .
Wissenspeicher Physik, Berlin: Volk und Wissen Volkseigener Verlag 1974, S. 37 bis 40.

4. Empfindlichkeitserhöhung bei Meßschaltungen

Bei der Herstellung von Werkstücken muß regelmäßig kontrolliert werden, ob die Fertigteile die geforderten Maße besitzen. Besteht zum Beispiel die Forderung, daß die Dickenabweichung bei Stahlblechen vom festgelegten Betrag $\pm 0,1$ mm nicht übersteigen darf, so ist die Meßeinrichtung so zu konstruieren, daß eine Dickenänderung von 0,1 mm zu einer auswertbaren Veränderung der Ausgangsgröße führt.

Um diese Forderung zu erfüllen, ist es notwendig, eine Meßanordnung aufzubauen, die die geforderte Empfindlichkeit besitzt. Deshalb werden im folgenden einige Möglichkeiten zur Erhöhung der Empfindlichkeit einer Meßanordnung dargestellt.

4.1. Spannungsteilerschaltung

Die Beispiele im Lehrbuch Physik Klasse 8 (S. 90 bis 92) zeigen den Spannungsteiler als *passiven Meßfühler*.

Der Spannungsteiler wird in der Elektrotechnik und Elektronik häufig als Teil einer Schaltung verwendet (siehe z. B. Bild 73/1).

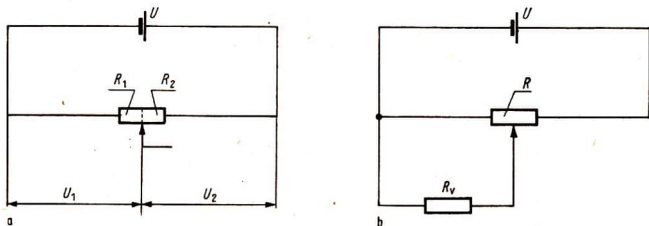


Bild 70/1 a) Spannungsteilung und Teilwiderstände
b) Spannungsteilerschaltung

- Wiederholen Sie die physikalischen Grundlagen einer Spannungsteilerschaltung und erläutern Sie deren Einsatz bei der elektrischen Messung einer Länge, eines Winkels und eines Flüssigkeitsstandes (Lehrbuch Physik, Klasse 8, Berlin: Volk und Wissen Volkseigener Verlag 1969, S. 90 bis 92)! Kennzeichnen Sie durch farbliche Gestaltung der Skizzen, worin das Gemeinsame der 3 Schaltungen besteht!
- ⑩ Geben Sie für die 3 Beispiele die Wirkungskette an!
- ⑪ Worin besteht der Unterschied zwischen einem Potentiometer und einem verstellbaren Widerstand?
- Geben Sie die entsprechenden Schaltzeichen an!
- ⑫ Über dem Widerstand R_1 soll eine Spannung U_1 von 5 V abfallen. Die Gesamtspannung beträgt 12 V und der Gesamtwiderstand $R_1 + R_2 = 100 \Omega$.
 - a) Wie groß müssen R_1 und R_2 sein?
 - b) Wie verändert sich U_1 , wenn ein elektrisches Gerät mit $R_L = 2 \Omega$ parallel zu R_1 geschaltet wird?

4.2. Einsatz der Brückenschaltung

Beim Einsatz des Dehnungsmeßstreifens oder eines Widerstandsthermometers wird durch die Änderung einer nichtelektrischen Größe der Widerstand des Bauelementes beeinflusst. Die Widerstandsänderung führt bei konstanter Betriebsspannung zu einer Stromstärkeänderung. Diese ist dann ein Maß für die nichtelektrische Eingangsgröße.

Wird ein Widerstandsthermometer oder ein Fotowiderstand als Meßfühler verwendet, so erhält man auch bei großen Temperatur- bzw. Lichtstärkeänderungen nur einen geringen Ausschlag am Stromstärkemeßgerät.

Die Empfindlichkeit (↗ Kapitel 3) der Meßanordnung ist für viele Aufgaben zu gering, da zum Beispiel der Zeigerausschlag nicht ablesbar ist oder keine Steuerungswirkung ausgelöst werden kann. Eine Möglichkeit, die Empfindlichkeit einer Meßanordnung zu erhöhen, bietet die Brückenschaltung.

4.2.1. Physikalische Grundlagen einer Brückenschaltung

Das Prinzip der Brückenschaltung besteht darin, einen unbekanntem Widerstand durch Vergleiche mit bekannten Widerständen zu ermitteln.

Dazu wird folgende Schaltung (Bild 72/1) benutzt:

Die Brückenschaltung besteht aus einem verzweigten Stromkreis zwischen A und B. In jedem Zweig sind zwei Widerstände (R_x und R_3 , R_1 und R_2) in Reihe

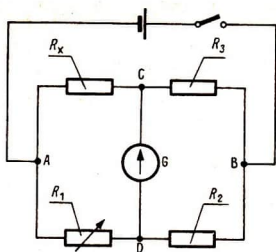


Bild 72/1
Schaltskizze einer Brückenschaltung

geschaltet. Beide Zweige der Schaltung werden an den Punkten C und D durch ein Meßgerät (Galvanometer) **überbrückt**.

Durch unterschiedliche Spannungsabfälle an den Teilwiderständen kann sich zwischen C und D eine Spannung ausbilden. Es fließt ein Strom durch das Meßgerät G. Sind die Spannungen

$$U_{AC} = U_{AD} \text{ und}$$

$$U_{CB} = U_{DB} ,$$

dann tritt zwischen den Punkten C und D keine Spannung auf. Die Brücke ist stromlos.

Für diesen Fall gilt:

$$\frac{U_{AC}}{U_{CB}} = \frac{U_{AD}}{U_{DB}} \quad (26)$$

⑩ Welche Beziehung besteht zwischen den Stromstärken in den Teilabschnitten AC, AD, CB, DB für die stromlose Brücke?

● Geben Sie die Definitionsgleichung des elektrischen Widerstandes an!

Aus dem Stromstärkeverhältnis und der Widerstandsdefinition folgt:

$$U_{AC} = R_x \cdot I_1;$$

$$U_{CB} = R_3 \cdot I_1;$$

$$U_{AD} = R_1 \cdot I_2;$$

$$U_{DB} = R_2 \cdot I_2 .$$

Daraus ergibt sich

$$R_x = R_3 \frac{R_1}{R_2} . \quad (27)$$

Aus dieser Beziehung folgt, daß durch das Meßgerät G kein Strom fließt, wenn das Verhältnis der Widerstände R_x zu R_3 gleich dem Verhältnis der Widerstände R_1 zu R_2 ist. Es ist möglich, an Stelle von R_1 den Widerstand R_2 oder R_3 zu ver-

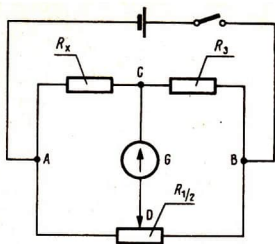


Bild 73/1
Brückenschaltung mit einem Potentiometer

ändern. Es können aber auch R_1 und R_2 durch ein Potentiometer ersetzt werden (Bild 73/1).

- 6
- ▼ **Untersuchen Sie das elektrische Verhalten einer Brückenschaltung! Benutzen Sie die Anleitung im Anhang (S. 107)!**
 - **Bereiten Sie einen Experimentalvortrag über die physikalischen Grundlagen einer Brückenschaltung vor! Achten Sie dabei besonders auf die logische Gliederung und die exakte Verwendung der physikalischen Begriffe!**
Literatur: Lehrbuch Physik, Klasse 8, Berlin: Volk und Wissen Volkseigener Verlag 1969, S. 94 bis 95. Anleitungsheft zum Elektronikbuckasten V.
 - **Übertragen Sie die in Bild 72/1 angegebenen Punkte A, B, C, D auf den Schaltplan der Meßbrücke in Bild 73/2!**

Bei Messungen mit Brückenschaltungen wird eine Veränderung des Widerstandes ($R_1 + R_2$) (↗ Bild 73/1) so vorgenommen, daß das Galvanometer keine

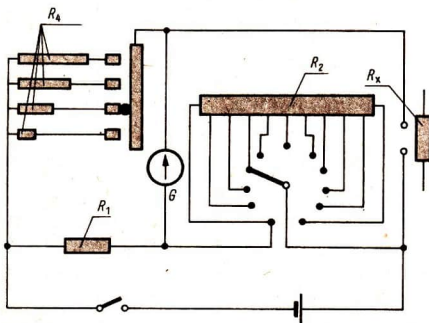


Bild 73/2
Vereinfachter Schaltplan einer Meßbrücke
 R_1 — Vergleichswiderstand
 R_2 — Drehwiderstand
 R_4 — Stöpselwiderstand
 R_x — unbekannter Widerstand (Meßstrecke)

Spannung mehr anzeigt. Der Zeiger wird auf Null eingeregelt. Dieses Meßverfahren heißt daher **Nullabgleichverfahren**. Ein Ablesen der Meßgröße kann auf einer entsprechend geeichten Skale des Potentiometers erfolgen.

Wird nun bei Beginn der Messung ein Nullabgleich durchgeführt, so wird der Strom durch G , der bei einer Änderung des Widerstandes R_x auftritt, zu einem Maß für die Widerstandsänderung. Damit wird der Ausschlag des Zeigers an G aber zum Maß für die zu messende nichtelektrische Größe. Die Skale kann in Einheiten dieser Größe (z. B. $^{\circ}\text{C}$, cm) geeicht werden.

Werden Meßdaten auf diesem Wege gewonnen, so spricht man von einem **Ausschlagverfahren**.

In der Meßtechnik sind zwei verschiedene Arten von Messungen zu unterscheiden:

statische Messung	Bestimmen des Momentanzustandes einer Meßgröße
dynamische Messung	Bestimmung des zeitlichen Verlaufes einer Meßgröße

- *Nennen Sie je zwei Beispiele, bei denen eine dynamische und eine statische Messung erforderlich ist! Begründen Sie die Antwort!*

Zusammenfassung

Die Brückenschaltung ist eine Zusatzeinrichtung, die im Nullabgleichverfahren beziehungsweise im Ausschlagverfahren arbeitet. Mit ihr kann die Empfindlichkeit einer Meßanordnung erhöht werden.

Der durch das Meßinstrument angezeigte Brückenstrom und der Strom durch den Meßfühler sind nicht identisch.

Neben der Widerstandsbestimmung in der Gleichstrommeßbrücke können mit Hilfe einer Wechselstrommeßbrücke Induktivitäts- und Kapazitätsänderungen bestimmt werden.

4.2.2. Der Thermistor in einer Meßbrückenschaltung

- ▼ *Bauen Sie eine Schaltung zur Untersuchung der Abhängigkeit des Widerstandes eines Thermistors von der Temperatur ohne Meßbrücke auf (Bild 33/1)! Berechnen Sie die Empfindlichkeit im Bereich von 30°C bis 60°C !*

Soll mit einer Meßbrücke der Widerstandswert oder die Widerstandsänderung eines Meßfühlers bestimmt werden, so ist es zur Dimensionierung der Meß-

brücke notwendig, den größten bzw. kleinsten Widerstand des Meßfühlers durch Stromstärke- und Spannungsmessung oder mit einem anderen geeigneten Widerstandsmeßverfahren zu ermitteln.

Bezogen auf Bild 72/1 sei $R_x = R_4$ der Meßfühler, R_3 ist dann in gleicher Größenordnung zu wählen. Das Verhältnis $\frac{R_{4\max}}{R_3}$ bzw. $\frac{R_{4\min}}{R_3}$ ist bestimmend für die Verhältnisse $\frac{R_{1\max}}{R_2}$ bzw. $\frac{R_{1\min}}{R_2}$.

Beispiel:

Größter Widerstand des Meßfühlers $R_{4\max} = 500 \Omega$

kleinster Widerstand des Meßfühlers $R_{4\min} = 380 \Omega$

$R_3 = 300 \Omega$

Wenn man schreibt:

$$\frac{R_{4\max}}{R_3} = \frac{5}{3}; \quad \frac{R_{4\min}}{R_3} = \frac{3,8}{3},$$

so muß

$$\frac{R_{1\max}}{R_2} \geq \frac{R_{4\max}}{R_3} \quad \text{und} \quad \frac{R_{1\min}}{R_2} \leq \frac{R_{4\min}}{R_3} \quad \text{sein.}$$

Wählt man für $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ (regelbar) und für $R_2 = 500 \Omega$, dann ist die Bedingung erfüllt.

▼ **Bestimmen Sie die Empfindlichkeit eines Thermistors mit Brückenschaltung! Dimensionieren Sie eine Meßbrückenschaltung, mit der Sie im Nullabgleich und Ausschlagverfahren die Änderung bzw. den statischen Wert einer Temperatur messen können!**

Gehen Sie dabei wie im oben genannten Beispiel vor!

Beachten Sie dabei, daß die Empfindlichkeit einer Gleichstrommeßbrücke fast unbegrenzt durch hochempfindliche Meßgeräte (Galvanometer / Abschnitt 4.3.), größere Betriebsspannungen und Präzisionswiderstände gesteigert werden kann!

Vergleichen Sie mit der Empfindlichkeit einer Meßanordnung mit Thermistor ohne Brückenschaltung!

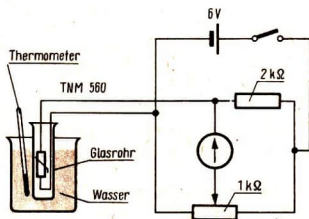


Bild 75/1
Thermistor
in einer Brückenschaltung

4.2.3. Der Dehnungsmeßstreifen in einer Brückenschaltung

Da die Empfindlichkeit des Dehnungsmeßstreifens gegenüber geringen Dehnungen sehr groß ist, wird er zur Überwachung vieler mechanisch beanspruchter Objekte benutzt. Dazu werden Vorrichtungen benötigt, mit denen sowohl statische als auch dynamische Messungen möglich sind. Da die relative Widerstandsänderung des Dehnungsmeßstreifens 6‰ bis 10‰ beträgt, ist es notwendig, empfindliche Meßanordnungen zu benutzen. Deshalb verwendet man Meßbrücken. Um den Temperatureinfluß auf den Meßfühler auszugleichen, schaltet man einen zweiten gleichartigen unbelasteten Dehnungsmeßstreifen in die Brücke.

② *Unter welcher Bedingung kann durch Anordnung eines zweiten Dehnungsmeßstreifens die Temperaturabhängigkeit des Meßfühlers kompensiert werden (↗ Abschnitt 2.2.)?*

7
▼ *Bauen Sie eine Meßanordnung zur dynamischen Kraftmessung mit einem Dehnungsmeßstreifen auf!*

4.3. Einsatz des Meßverstärkers

Sind elektrische Größen sehr klein, so daß sie an einem Vielfachmeßgerät oder Schuldemonstrationsmeßgerät keine Anzeige ergeben, dann müßte man empfindliche, direkt anzeigende Geräte wie Lichtmarken- oder Spiegelgalvanometer verwenden.

Für viele Meßaufgaben wirkt sich aber die Empfindlichkeit dieser Geräte gegenüber mechanischen Erschütterungen nachteilig aus. Deshalb werden häufig die elektrischen Signale über einen Meßverstärker einem Drehspulmeßgerät zugeführt.

● *Bereiten Sie sich auf einen Vortrag zum Thema „Aufbau und Wirkungsweise des Lichtmarken- und Spiegelgalvanometers“ vor! Gestalten Sie die Zusammenfassung in Form einer Gegenüberstellung!*

Galvanometer

Galvanometer sind empfindliche Drehspulinstrumente, die zum Messen kleinster Stromstärken und Spannungen oder zum Nachweis der Stromlosigkeit eines Stromkreises (z. B. bei Brücken- und Kompensationschaltungen, ↗ Abschnitt 4.2. und 4.4.) benutzt werden. Ihrem Aufbau nach werden Zeiger-, Spiegel- und Lichtmarkengalvanometer unterschieden.

Spiegelgalvanometer. Es besteht aus einer Lichtquelle, dem Meßwerk mit Spiegel und der Skale. Auf Grund der Wirkungsweise des

Bild 77/1 Aufbau eines Spiegelgalvanometers

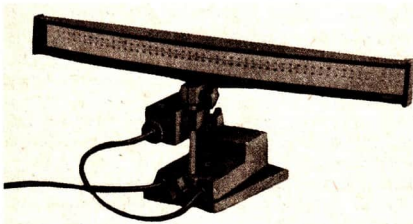
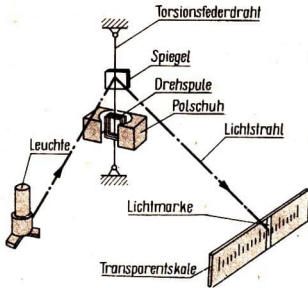


Bild 77/2 Spiegelgalvanometer

Drehspulmeßwerk wird die Drehspule und damit auch der Spiegel bei Stromstärke- oder Spannungsmessungen ausgelenkt. Einfallswinkel und Reflexionswinkel des Lichtstrahls verändern sich und damit auch die Lage des Lichtflecks auf der Skale.

Das Spiegelgalvanometer ist nicht geeicht. Für dieses Meßgerät wird die Stromstärkeempfindlichkeit E_i in $\frac{\text{Skalenteile}}{\text{Ampere}}$ oder die Instrumentenkonstante C_i in $\frac{\text{Ampere}}{\text{Skalenteile}}$ angegeben, d. h. $E_i = \frac{1}{C_i}$.

Mit dem Spiegelgalvanometer werden Stromstärkekonstanten von etwa $4 \cdot 10^{-9} \frac{\text{A}}{\text{Skt}}$ oder Spannungskonstanten von etwa $2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{V}}{\text{Skt}}$, bezogen auf 1 m Abstand zwischen Galvanometerspiegel und Skale, erreicht.

Lichtmarkengalvanometer. Es vereinigt die Vorzüge der Zeiger- und Spiegelgalvanometer in sich. Meßwerk, Skale und Lampe sind in einem Gerät enthalten. Der Lichtweg des Zeigers ist durch mehrfache Reflexion im Gerät entsprechend verlängert worden.

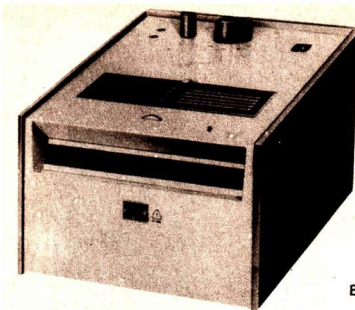


Bild 78/1 Lichtmarkengalvanometer

Stromstärke- und Spannungskonstanten liegen in der Größenordnung wie beim Spiegelgalvanometer. Besondere Ausführungen besitzen geeichte Skalen und umschaltbare Meßbereiche.

Bei beiden Galvanometertypen besteht zwischen der Meßgröße und der Anzeige über die ganze Skale Proportionalität.

Beim Meßvorgang wird die Drehspule vom Meßstrom durchflossen. Das hat eine Kraftwirkung zwischen dem entstandenen Feld der Spule und dem des Dauermagneten zur Folge. Die Spule dreht sich aus der ursprünglichen Lage heraus, bis die resultierende Kraft der Magnetfelder und die rücktreibende Kraft der Aufhängebänder gleich ist. Durch die Bewegung der Drehspule im Magnetfeld des Dauermagneten wird in dieser eine Spannung induziert. Die induzierte Spannung bewirkt einen Strom durch die Meßwerkspule, dessen Betrag durch den Widerstand des Meßkreises (äußerer Widerstand) bestimmt wird. Durch den Strom wird um die Spule ein weiteres Magnetfeld aufgebaut, das dem auslenkenden entgegengerichtet ist. Je nach Dimension des äußeren Widerstandes wird die Stromstärke größer oder kleiner und demzufolge auch die Kraftwirkung des Gegenfeldes entsprechend stärker oder schwächer sein. Das heißt, die Drehspule wird in ihrer Bewegung mehr oder weniger gedämpft. Die günstigste Einstellbewegung wird erreicht, wenn der äußere Widerstand einen für das Meßwerk angegebenen Wert, den Grenzwiderstandswert hat.

Zwischen der Spannungskonstanten C_v , der Stromstärkekonstanten C_i , dem Grenzwiderstand R_{agr} und dem Innenwiderstand R_i des Meßgerätes besteht folgende Beziehung:

$$C_v = C_i(R_i + R_{agr})$$

In der Meßtechnik sind neben den Wechselstromgrößen Spannung und Stromstärke vor allem Gleichspannungen und Gleichströme zu verstärken.

Dies ist möglich, wenn

a) ein Gleichspannungs- bzw. Gleichstromverstärker benutzt wird,

- b) die Gleichspannung durch elektrische Schaltungen in eine zeitlich veränderliche Spannungsgröße umgewandelt wird, die einem Wechselspannungsverstärker zugeführt werden kann.

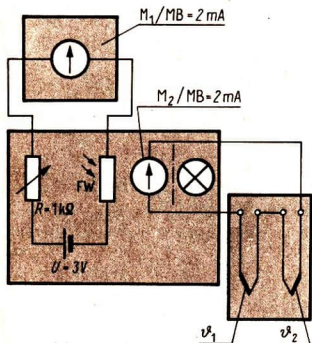
4.3.1. Der lichtelektrische Verstärker

Dem Verstärkungsprinzip liegt die Wirkungsweise des lichtelektrischen Bauelementes *Fotowiderstand* zugrunde. An Hand der folgenden Meßeinrichtung soll die Wirkungsweise eines einfachen lichtelektrischen Verstärkers untersucht werden.

Eine Temperaturdifferenz ($\vartheta_1 - \vartheta_2$) an den beiden Meßpunkten eines Thermoelements ruft eine Thermospannung U_{Th} hervor (\nearrow Kapitel 2.3.).

- ②) Wie groß ist U_{Th} bei einem Eisen-Konstantan-Thermoelement bei 100 K Temperaturunterschied?

Eine Thermospannung von 10 mV bewirkt an einem Demonstrationsdrehspulmeßgerät im kleinsten Meßbereich (100 mV) einen Ausschlag von wenigen Millimetern. Die Empfindlichkeit der Meßanordnung für eine quantitative Messung ist unzureichend. Wird jedoch diese geringe Zeigerbewegung zur Lichteinfall- und damit zur Widerstandsänderung in einem Fotowiderstand ausgenutzt, so wird das geringe Ausgangssignal des Meßfühlers verstärkt.



Meßgerät: Strommesser	Zusatz-einrichtung: Verstärker	Meßfühler: Thermo-element
--------------------------	-----------------------------------	------------------------------

Bild 79/1
Meßanordnung zur Temperaturmessung

Der Zeiger des Meßgerätes verdeckt die lichtempfindliche Kadmiumsulfid-Schicht des Fotowiderstandes so, daß erst bei der Auslenkung des Zeigers das Licht einer Lampe mit Lochblende auf den Fotowiderstand fällt und damit den Widerstand im 2. Stromkreis verändert. Die daraus folgende Stromstärkeänderung wird durch das Anzeige- und Meßgerät angezeigt.

4.3.2. Der Wechselspannungsverstärker

- Wiederholen Sie Aufbau und die Wirkungsweise einer Triode (Lehrbuch Physik, Kl. 9, Berlin: Volk und Wissen Volkseigener Verlag 1972, S. 124 bis 126; Wissensspeicher Physik, Berlin: Volk und Wissen Volkseigener Verlag 1974, S. 229 bis 233)!

Die Triode ist eine Dreielektrodenröhre. Sie besitzt neben der Katode und Anode ein Steuergitter, welches zwischen den beiden anderen Elektroden angeordnet ist.

Legt man an das Gitter eine (gegenüber der Katode) negative veränderliche Spannung, so ändert sich die Anodenstromstärke im Rhythmus der Gitterspannungsänderung. Die Änderung der Anodenstromstärke hat eine Änderung des Spannungsabfalls am Arbeitswiderstand zur Folge. Auf Grund der konstanten Betriebsspannung ergibt sich daraus eine Änderung der Spannung zwischen Katode und Anode.

$$U_b = U_a + U_{Ra} \quad U_b : \text{Betriebsspannung,} \quad I_a : \text{Anodenstromstärke,}$$

$$U_b = U_a + I_a \cdot R_a \quad U_a : \text{Anodenspannung,} \quad R_a : \text{Arbeitswiderstand.}$$

$$U_{Ra} : \text{Spannungsabfall am Arbeitswiderstand,}$$

Die Abhängigkeit des Anodenstromes von der Gitterspannung wird durch die I_a - U_g -Kennlinie dargestellt.

- Nehmen Sie die I_a - U_g -Kennlinie einer Triode auf! Benutzen Sie dazu das Anleitungsheft zum SEG „Halbleiter-Hochfrequenz“!

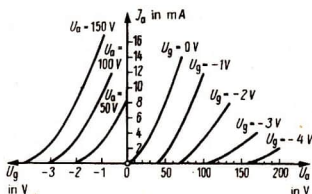


Bild 80/1
Kennlinienfeld einer Triode

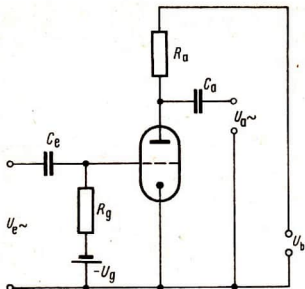


Bild 81/1
Einfache Röhrenverstärkerstufe

Die Dimensionierung der Betriebsspannung, des Arbeitswiderstandes, der Gitterspannung und die eingesetzte Röhre haben Einfluß auf die Eigenschaften des Verstärkers.

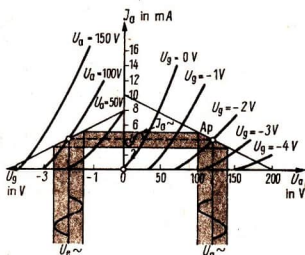


Bild 81/2
Kennlinienfeld einer Triodenverstärkerstufe

Der Verstärkungsfaktor einer Triodenverstärkerstufe kann mit Hilfe des Kennlinienfeldes ermittelt werden. Es wird berechnet:

$$V = \frac{U_{a\sim}}{U_{e\sim}}$$

② Berechnen Sie die Spannungsverstärkung einer Triode aus dem Kennlinienfeld (Bild 81/2)!

Die Verstärkerwirkung eines Transistors beruht darauf, daß durch eine kleine Änderung der Basisstromstärke eine große Änderung der Kollektorstromstärke erzielt wird.



Bauen Sie einen Wechselspannungsverstärker mit einer Triode oder einem Transistor auf und bestimmen Sie den Verstärkungsfaktor! Benutzen Sie dafür die Angaben auf Seite 108!

(Anwendungsbeispiele für Meßeinrichtungen mit Verstärkern
 ↗ Kapitel 5 und 6).

4.4. Einsatz der Kompensationsschaltung

Ist die Spannung einer Spannungsquelle mit einem direkt anzeigenden Meßinstrument zu messen, so wird nicht die Urspannung U_0 , sondern ein kleinerer Wert, die Klemmenspannung U_k erfaßt. Ist R_i der Innenwiderstand der Spannungsquelle und der Zuleitung, so ist $U_k = U_0 - R_i \cdot I$.

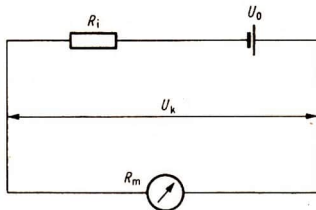


Bild 82/1
 Urspannung und Klemmenspannung
 in einem Stromkreis

Es bestehen folgende Beziehungen:

$$\frac{U_k}{U_0} = \frac{R_m}{R_m + R_i}; \quad U_k = \frac{R_m \cdot U_0}{R_m + R_i};$$

$$U_k = \frac{U_0}{\frac{R_m + R_i}{R_m}}; \quad U_k = \frac{U_0}{1 + \frac{R_i}{R_m}} \quad (28)$$

R_m : Widerstand des Spannungsmessers.

Daraus folgt, daß der Unterschied zwischen U_k und U_0 sehr klein wird, wenn $R_m \gg R_i$ ist.

Bei Spannungsquellen mit einem hohen Innenwiderstand muß nach der Bedingung $R_m \gg R_i$ der Innenwiderstand des Spannungsmessers (R_m) bedeutend größer sein, da sonst die am Meßgerät abgegebene Spannung von der Urspannung zu stark abweicht.

Eine andere Möglichkeit, die Urspannung U_0 des aktiven Meßfühlers zu bestimmen, bietet der Einsatz einer Kompensationsschaltung¹.

¹ Kompensation: Ausgleichung

Das Prinzip des Meßverfahrens besteht darin, daß mit Hilfe einer Gegenspannung die Wirkung der Ursprungung **ausgeglichen** wird. In der Meßtechnik finden neben anderen der Poggendorf- und der Lindeck-Rothe-Kompensator Verwendung.

4.4.1. Kompensator mit Spannungsteiler und Normalelement (Poggendorf-Kompensator)

Die zu messende Spannung U_x wird durch die Spannung eines Normalelementes U_N ausgeglichen (U_N ist ein galvanisches Element mit genormter Spannung). Um U_x zu messen, verstellt man den Spannungsteiler R so lange, bis im Stromkreis kein Strom mehr fließt, d. h.

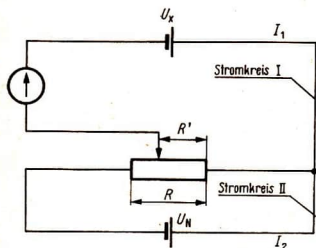


Bild 83/1
Schaltbild des Kompensators
mit Spannungsteiler
und Normalelement

$$\begin{aligned} I_1 &= 0, \\ U_x &= I_2 \cdot R' \end{aligned} \quad (29)$$

Für den Stromkreis 2 gilt:

$$\begin{aligned} U_N &= I_2 \cdot R, \\ I_2 &= \frac{U_N}{R} \text{ und} \end{aligned} \quad (30)$$

aus (29) und (30) folgt

$$U_x = U_N \frac{R'}{R}.$$

- Warum ist bei dieser Schaltung eine Spannungsquelle mit konstant bleibender Spannung notwendig?

Da $I_1 = 0$ ist, tritt am Innenwiderstand der Spannungsquelle U_x kein Spannungsabfall auf. Es ist möglich, die Ursprungung von U_x mit der angegebenen Gleichung zu berechnen.

- ▼ **Bauen Sie eine Prinzipschaltung zur Spannungskompensation auf und bestimmen Sie damit unbekannte Spannungen!**
Achten Sie dabei auf eine günstige Wahl von U_N und R ! (Greif, Heinz: Messen, Steuern und Regeln für den Amateur, Berlin: Deutscher Militärverlag 1971)

Da die Normalelemente im Laufe der Zeit ihre Spannung ändern, benutzt man in der Technik häufig elektronisch stabilisierte Spannungen, d. h. Spannungen, die durch ein vorgeschaltetes Bauelement (z. B. Zenerdiode) in einem bestimmten Bereich frei von Schwankungen sind.

Für genaue Messungen der Spannung eines Thermoelementes findet dieser Kompensator Anwendung (Bild 84/1).

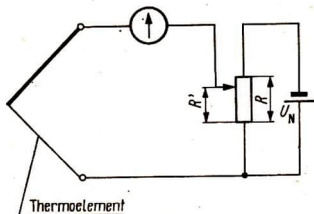


Bild 84/1
 Thermoelement
 mit Kompensationsschaltung

Ist der Stromkreis, in dem das Thermoelement liegt, stromlos, dann ist die Thermospannung durch folgende Gleichung zu berechnen:

$$U_{Th} = \frac{U_N \cdot R'}{R} \quad (31)$$

4.4.2. Kompensator mit veränderlichem Widerstand (Lindeck-Rothe-Kompensator)

Bei dieser Kompensationsschaltung wird der Strom im Stromkreis II durch R_a so geregelt, daß der Spannungsabfall über R gleich U_x ist. Diese Bedingung ist erreicht, wenn $I_1 = 0$ ist.

$$U_x = I_2 \cdot R$$

- **Warum ist beim Lindeck-Rothe-Kompensator mit veränderlichem Widerstand keine stabilisierte Gleichspannung notwendig?**

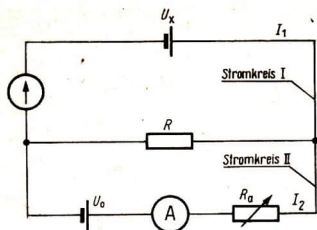


Bild 85/1
Schaltbild eines Kompensators
mit veränderlichem Widerstand

- ▼ Messen Sie mit dem Lindeck-Rothe-Kompensator die Spannungen eines Thermoelementes (\nearrow Abschnitt 2.3.)!
(Greif, Heinz: Messen, Steuern und Regeln für den Amateur, Berlin: Deutscher Militärverlag 1971)

Zusammenfassung

Ein elektrischer Spannungskompensator erlaubt das Messen einer unbekanntem Spannung im stromlosen Zustand. Die Messung wird genauer als mit direktanzeigenden Meßgeräten, da bei $I = 0$ kein Spannungsabfall an der Zuleitung und dem Innenwiderstand der Spannungsquelle auftritt.

5. Meßschaltungen mit passiven Meßfühlern

5.1. Meßschaltungen mit ohmschen Meßfühlern

5.1.1. Meßschaltungen mit Dehnungsmeßstreifen

Der Aufbau und die Wirkungsweise eines Dehnungsmeßstreifens wurde im Kapitel 2 beschrieben. Die Widerstandsänderungen sind gering, so daß es sich erforderlich macht, Zusatzeinrichtungen zu benutzen, um nichtelektrische Größen messen zu können. Für statische Dehnungsmessungen empfiehlt es sich, den Dehnungsmeßstreifen in einer Gleichstrommeßbrücke anzuordnen, wie sie in Bild 108/1 gezeigt wird. Dort ist R_1 der Dehnungsmeßstreifen, der auf das zu untersuchende Werkstück geklebt wird. R_2 wird als stufenweise veränderlicher Widerstand oder als Kompensationsdehnungsmeßstreifen eingesetzt, um Temperatureinflüsse auszuschalten. Da relativ kleine Widerstandsänderungen auftreten, nimmt man den Abgleich mit dem Schleifdraht R_4 vor, dessen Widerstand klein gegenüber den Festwiderständen R_3 und R_5 ist. Am Meßgerät kann entweder die Widerstandsänderung oder unmittelbar die Dehnung abgelesen werden. Die kleinste noch meßbare Dehnung kann mit $\Delta l = 10^{-4}$ l bei Verwendung eines Zeigergalvanometers angegeben werden. Mit einer solchen Meßanordnung können Dehnungen und dadurch auch die sie verursachenden Kräfte, Drücke und Drehmomente gemessen werden.

5.1.2. Messungen mit Fotowiderständen

Zur elektrischen Messung von Beleuchtungsstärken werden Fotowiderstände benutzt. Ihr Einsatz erfolgt meist in Steuerschaltungen, wie Dämmerungs- und Lichtschrankenschaltungen. Darüber hinaus wird bei Hinzuschaltung elektronischer Zählrichtungen das Zählen von Stückgütern ermöglicht. Mit Fotowiderständen und anderen fotoelektrischen Bauelementen (Fotozelle,

Fotoelement, Fotodiode) kann der von einer Lampe ausgesandte Lichtstrom elektrisch gemessen werden. Diese Messungen stellen Energiemessungen ohne Einbeziehung des menschlichen Auges dar. Man nennt sie **objektive** Verfahren. Daneben sind in der Physik und Technik auch **subjektive** fotometrische Verfahren gebräuchlich. Dazu lesen Sie im folgenden Text und bereiten sich auf einen Schülervortrag vor!

- *Vergleichen Sie in einem Vortrag Meßgrößen und Meßmethoden der subjektiven Fotometrie mit Möglichkeiten der objektiven Lichtmessung! Verwenden Sie zur Vorbereitung den nachstehenden Lesetext und die Textstellen über den Fotowiderstand und das Fotoelement in den Abschnitten 2.1. und 2.2! Beachten Sie dabei auch, daß in populärwissenschaftlicher Literatur Hinweise zu diesem Problem vorhanden sind (Jugend und Technik, Urania, technikus)! Erläutern Sie die Anwendungsmöglichkeiten der Lichtmessung nach subjektivem und objektivem Verfahren in Wissenschaft und Technik!*

Lesetext zur Vorbereitung eines Vortrages:

„Übersichtliche Darstellung der Größen und Meßmethoden in der subjektiven Fotometrie (subjektives Verfahren)“.

Die von einer Lichtquelle in den Raum je Zeiteinheit ausgesandte Energie heißt **Lichtstrom Φ** .

Die Einheit des Lichtstromes ist 1 Lumen (lm).

Werden die objektiven physikalischen Größen zugrunde gelegt, so handelt es sich um eine Leistung.

Die Einheit des Raumwinkels gewinnt man durch folgende Überlegung: Der volle Raumwinkel entspricht der ganzen Kugeloberfläche einer Einheitskugel ($r = 1 \text{ m}$, $\omega = 4\pi$). Der Raumwinkel 1 wird erhalten, wenn ein Kreiskegel, der mit seiner Spitze im Kugelmittelpunkt liegt, auf der Oberfläche der Einheitskugel die Einheitsfläche ($A = 1 \text{ m}^2$) ausschneidet.

Die abgestrahlte Leistung je Raumwinkel (Lichtstrom je Raumwinkel) heißt

$$\text{Lichtstärke } I = \frac{\Phi}{\omega}.$$

Die Einheit der Lichtstärke ist die Candela (cd).

Die Candela ist die fotometrische Grundeinheit.

1 cd ist die Lichtstärke, die ein Schwarzer Strahler beim Erstarrungspunkt des Platins (2042°K) unter Atmosphärendruck von $1/60 \text{ cm}^2$ seiner Oberfläche senkrecht abstrahlt.

Wird die Lichtstärke von 1 cd in die Einheit des Raumwinkels abgestrahlt, so beträgt die abgestrahlte Strahlungsleistung (Lichtstrom) 1 Lumen (lm). Der Lichtstrom einer 100-W-Glühlampe beträgt etwa 220 lm.

Wird die Lichtleistung auf die beleuchtete Fläche A bezogen, dann spricht man von der

$$\text{Beleuchtungsstärke } E = \frac{\Phi}{A} = \frac{I \cdot \omega}{A}.$$

Da $\omega = \frac{A}{r^2}$ ist, ergibt sich bei senkrechtem Lichteinfall:

$$E = \frac{I \cdot A}{A \cdot r^2} = \frac{I}{r^2}.$$

Die Einheit der Beleuchtungsstärke (Leistung/Fläche) ist 1 Lux (lx),

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm} \cdot \text{m}^{-2}.$$

Die Beleuchtungsstärke ist von großer Bedeutung für die Arbeitsplatzgestaltung. Die Feinheit der auszuführenden Arbeiten erfordert unterschiedliche Beleuchtungsstärken. Während beim Lesen und Schreiben 200 lx bis 300 lx ausreichend sind, erfordert das Anfertigen einer technischen Zeichnung eine Beleuchtungsstärke von 300 lx bis 600 lx. Das Sonnenlicht bei wolkenlosem Himmel hat eine Beleuchtungsstärke von etwa 100000 lx, währenddessen der Vollmond bei klarem Himmel mit einer Beleuchtungsstärke von 0,2 lx wirksam wird. Zur Messung von Beleuchtungsstärken werden Luxmeter verwendet. Diese finden als Belichtungsmesser Anwendung. Entsprechend der Definition der Beleuchtungsstärke gilt für den Vergleich von Beleuchtungsstärken die folgende Proportion:

$$E_1 : E_2 = r_2^2 : r_1^2.$$

Damit gilt für die Lichtstärken:

$$I_1 : I_2 = r_1^2 : r_2^2.$$

Für den Lichtstärkenvergleich werden häufig visuelle Verfahren angewandt. Bei ihnen spielt die Farbempfindlichkeit des Auges eine große Rolle. Ein Fotometer dieser Art ist das von Robert Bunsen eingeführte Fettfleckfotometer. In ihm wird mit Hilfe des Kontrastes, den zwei Lichtquellen auf einem Fettfleck hervorbringen, der Vergleich einer Lichtquelle unbekannter mit einer Lichtquelle bekannter Lichtstärke vorgenommen.

Die objektiven Meßverfahren zur Lichtmessung bieten den Vorteil, daß auch Lichtmessungen und Meßwertwandlungen in Gebieten des elektromagnetischen Spektrums vorgenommen werden können, die vom menschlichen Auge nicht wahrgenommen werden (Infrarot- und Ultraviolettbereich).

Die fotoelektrischen Bauelemente und damit auch der Fotowiderstand erzeugen ein Maximum des Fotostromes bei einer ganz bestimmten Wellenlänge.

Die Messung des Lichtes mit dem Fotowiderstand kann in folgender Wirkungskette dargestellt werden:.



- 23) Geben Sie an, welche Energieumwandlungen in der angegebenen Wirkungskette stattfinden!
- 24) Eine kugelförmige Lichtquelle strahlt einen Lichtstrom von 3000 lm ab. Wie groß ist ihre Lichtstärke?
- 25) Eine Lampe von 20 cd erzeugt bei einem Abstand von $r_1 = 40$ cm dieselbe Beleuchtungsstärke auf einem Schirm wie eine Lampe von 200 cd. In welchem Abstand vom Schirm befindet sich die zweite Lampe?

5.1.3. Elektrische Winkelmessung mit Hilfe eines Potentiometers

Die elektrische Messung von Winkeln kann mit induktivem, kapazitivem und ohmschem Meßfühler erfolgen. In jedem Falle wird die nichtelektrische Größe Winkel in eine elektrische Spannung oder Stromstärke umgewandelt. Die Winkelmessung mit ohmschem Widerstand wird mit Potentiometern durchgeführt.

9



Bauen Sie ein Experiment zur elektrischen Winkelmessung mit Hilfe eines Potentiometers nach Anleitung 9 (Anhang S. 110) auf! Informieren Sie sich im Wissensspeicher Physik, welche Schritte der experimentellen Methode bei Ihrem Experiment zur Anwendung kommen können!

5.1.4. Elektrische Füllstandsmessung

Die Messung von Füllständen auf elektrischem Wege kann in unterschiedlicher Art und Weise erfolgen. Zunächst wird als Beispiel die Messung des Füllstandes in einem Benzintank mit Hilfe eines Kraftstoffanzeigers betrachtet (Bild 90/1).

Im Benzintank (5) eines Kraftfahrzeuges wird ein Schwimmer (4) angebracht, der über einen Hebelarm (3) an den Mittelabgriff eines veränderlichen Drahtwiderstandes (2) angegriffen. Die dabei abfallende elektrische Spannung des in

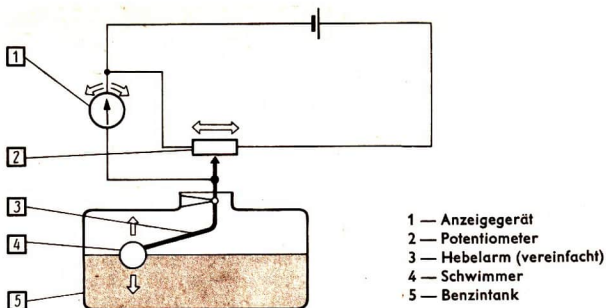


Bild 90/1
 Prinzip der elektrischen Messung des Füllstandes (Treibstoffvorratsanzeige in Kfz)

Potentiometerschaltung montierten Widerstandes ist ein Maß für den Füllstand im Kraftstofftank. Durch ein Meßgerät (Spannungsmeßgerät) kann der Füllstand am Armaturenbrett angezeigt, beobachtet und abgelesen (1) werden.

- *Diskutieren Sie in Ihrem Kollektiv die Möglichkeiten für die Entwicklung einer Füllstandsanzeige für Kraftstofftanks von Moped und Motorrad! Beachten Sie hierbei die technischen Möglichkeiten zur Verwirklichung!*

Neben der Füllstandsmessung mit Hilfe der Potentiometerschaltung ist es möglich, auch die Leitfähigkeit der Flüssigkeiten (Elektrolyte) auszunutzen. Bei konstanter Leitfähigkeit kann die Höhenänderung des Flüssigkeitsspiegels in eine Widerstandsänderung umgewandelt werden. In der Praxis sind dieser Form von Füllstandsmessungen insofern Grenzen gesetzt, als der elektrochemische Prozeß schnell zur Verschmutzung der Elektroden führt und die Meßergebnisse in hohem Grade von geringen Konzentrations- und Temperaturänderungen beeinflusst werden. Außerdem darf dieses Meßverfahren nicht für brennbare und explosive Gase bildende Flüssigkeiten angewendet werden.

Eine weitere Möglichkeit der elektrischen Füllstandsmessung mit den zuvor genannten Einschränkungen ist die Schaltung mehrerer Elektroden unterschiedlicher Länge in eine Widerstandskette. Durch die Höhenänderung einer leitenden Flüssigkeit werden die Elektroden kurzgeschlossen und bewirken eine Veränderung des Widerstandes (Bild 91/1).

Signale für ganz bestimmte Füllstandshöhen oder für das Über- oder Unterschreiten des Füllstandes eines Behälters werden unter Verwendung des gleichen Prinzips gewonnen.

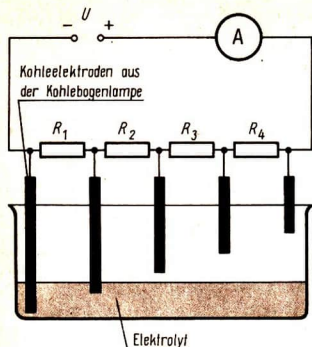


Bild 91/1
Elektrische Füllstandsmessung
Die Dimensionierung der Widerstände soll nach dem Dissoziationsgrad des Elektrolyten erfolgen.

5.2. Meßschaltungen mit induktiven Meßfühlern

5.2.1. Induktive Kraft- und Wegmessungen

Die Veränderung der Induktivität einer Spule kann durch Änderung der Windungsanzahl, der Windungsfläche, der Spulenlänge und der Permeabilität der Spule erreicht werden. Wirkt zum Beispiel auf eine Feder (Energiespeicher) eine Kraft, so ist die Verschiebung oder Verformung ein Maß für die einwirkende Kraft. Diese Verformung oder Verschiebung wird als eine Wegänderung sichtbar, die durch die mechanische Kopplung mit dem Eisenkern einer Spule zu einer Änderung der Induktivität und somit zur Stromstärke- und Spannungsänderung führt.

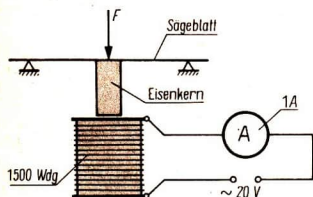


Bild 91/2
Induktive Messung einer Kraft oder eines Weges

- ▼ Bauen Sie ein Experiment nach Bild 91/2 auf! Stellen Sie die Abhängigkeit der Stromstärke von der Durchbiegung des Sägeblattes bei konstanter Spannung fest! Wie kann diese Anordnung zur Kraftmessung genutzt werden? Führen Sie eine Kraftmessung aus!

Die induktive Kraft- und Wegmessung wird in der Technik unter anderem durch Längs- und Querankergeber verwirklicht. Der Aufbau des Querankergebers wurde im Abschnitt 2.1. erläutert.

5.2.2. Induktive Dickenmessung

Die induktive Dickenmessung beruht auf der Anwendung des induktiven Schichtdickengebers, der in Abwandlung des Querankergebers entwickelt worden ist. Zwischen einer Spule mit Eisenkern und einer Eisenplatte wird das zu untersuchende Material (Bänder, Folien u. a.) hindurchgezogen; das führt zu Veränderungen des Abstandes zwischen Geber und Eisenplatte infolge der unterschiedlichen Schichtdicke. Diese Abstandsänderung bewirkt eine Veränderung der Permeabilität und der Induktivität. Die Induktivitätsänderung hat im Meßfühler eine Veränderung der Stromstärke in Abhängigkeit von der Schichtdicke bei konstanter Spannung zur Folge.

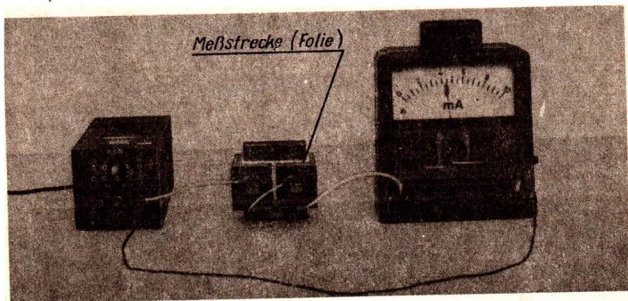


Bild 92/2
Versuchsaufbau zur induktiven Dickenmessung auf direktem Wege

Die experimentelle Darstellung einer induktiven Schichtdickenmessung sei durch folgenden Versuchsaufbau beschrieben. Führen Sie hierzu das Experiment 10 durch! Berichten Sie über die experimentell gefundenen Ergebnisse vor dem gesamten Lehrgang!

10
▼

Bauen Sie ein Experiment zur induktiven Dickenmessung durch Veränderung der Induktivität einer Spule nach der Anleitung Nr. 10 im Anhang auf! Führen Sie mit dieser Experimentieranordnung Dickenmessungen an 3 verschiedenen Materialien aus! Verändern Sie den Versuchsaufbau nach der folgenden Beschreibung und der Schaltung im Bild 93/1! Vergleichen Sie

die beiden Verfahren zur Messung der Dicke, indem Sie die gleichen Materialien mit der neuen Versuchsanordnung untersuchen:

- hinsichtlich der Genauigkeit und Empfindlichkeit der Meßanordnung,
- hinsichtlich des apparativen Aufwandes der Meßanordnungen,
- hinsichtlich der verwendeten Meßverfahren!

Diskutieren Sie weitere Möglichkeiten, um Dickenmessungen verschiedener Stoffe auf elektrischem Wege auszuführen!

Während im Experiment 10 die induktive Dickenmessung mit einem experimentellen Aufbau sehr einfacher Art ausgeführt wurde, wird nun versucht, das Messen mit einer Vergleichsanordnung zu beschreiben.

Die induktive Dickenmessung durch Vergleichsanordnung erfolgt mit zwei Spulen in einem gemeinsamen Primär- und zwei Spulen in einem gemeinsamen Sekundärstromkreis. In den Sekundärstromkreis ist ein Strommesser geschaltet. Die Windungszahlen der Sekundärspulen sind unterschiedlich. Wird am Meßtransformator der Abstand des Eisenkernes geändert, so verändert sich die Induktivität und der induktive Widerstand gegenüber den Vergleichsspulen, und der Betrag der transformierten Spannung wird verändert. Das hat eine Veränderung der Stromstärke im Sekundärkreis zur Folge. Der veränderte Ausschlag am Meßgerät kann als Maß für die Dickenänderung im Meßtransformator aufgefaßt werden.

Im Falle einer gleichen Windungszahl der beiden Sekundärspulen fließt zunächst im Sekundärstromkreis kein Strom. Erst bei der Änderung des Abstandes des I-Kernes des Meßtransformators erfolgt eine Induktivitätsänderung und damit die Ausbildung eines Spannungsunterschiedes, der einen Strom zur Folge hat, welcher mit dem Strommesser nachgewiesen werden kann. Eine Eichung des Strommeßgerätes in Millimeter empfiehlt sich für diese Anordnung. Die Schaltung und die Abbildung des Versuchsaufbaues sind in den Bildern 93/1 und 94 /1 dargestellt.

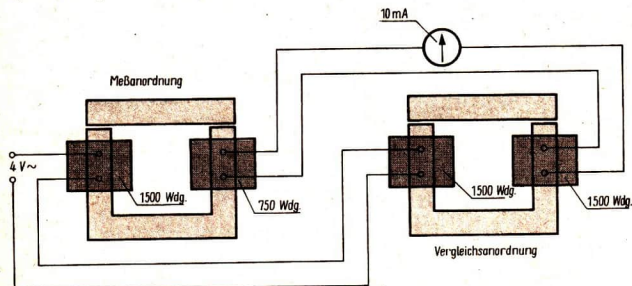


Bild 93/1

Schaltung zur induktiven Dickenmessung als Vergleichsmessung

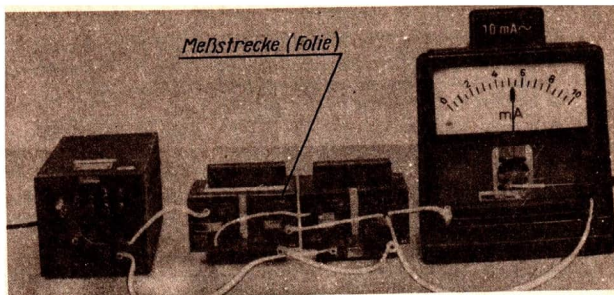
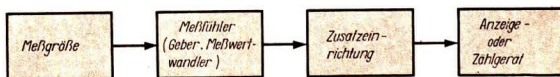


Bild 94/1 Aufbau der Versuchsanordnung zur induktiven Dickenmessung

Zusammenfassung

Meßschaltungen mit passiven Meßfühlern dienen der Messung nicht-elektrischer Größen auf elektrischem Wege. Es wird im Meßfühler eine Widerstands-, Induktivitäts- oder Kapazitätsänderung hervorgerufen. Dadurch wird die elektrische Stromstärke oder die elektrische Spannung verändert. Diese Änderung wird über Zusatzeinrichtungen (Brücken-, Meßverstärker-, Kompensations- oder Potentiometerschaltungen) einem Meß- oder Anzeigergerät bzw. einem Zählwerk zugeführt. In vielen Fällen gilt die folgende Kausalkette:



Auf Zusatzeinrichtungen kann dann verzichtet werden, wenn die elektrische Größe durch die nichtelektrische Größe in meßbaren Unterschieden beeinflusst wird.

5.3. Meßschaltungen mit kapazitiven Meßfühlern

5.3.1. Füllstandsmessung

Füllstandsmessungen von Schüttgütern und Flüssigkeiten können mit Hilfe von kapazitiven Sonden durchgeführt werden. Man benutzt dazu die Abhängigkeit der Kapazität C eines Plattenkondensators von seinen geometrischen

Größen Fläche A und Abstand d und von dem zwischen den Platten befindlichen Dielektrikum ε .

$$C = \frac{A \cdot \varepsilon}{d} \quad (32)$$

Ist eine der Größen auf mechanischem Wege veränderbar, so wird der Kondensator zum passiven Kapazitätswandler. Für Füllstandsmessungen eignet sich die Veränderung der Fläche A . Wird die Fläche A als Produkt von a und b dargestellt und b als Breite der Fläche als Konstante betrachtet, folgt aus Gleichung (32)

$$C = \varepsilon \frac{a \cdot b}{d}, \quad (33)$$

$$\frac{C}{C_0} = \frac{a}{a_0}. \quad (34)$$

Füllstands- und Kapazitätsänderung sind einander proportional, da der Abstand d und die Dielektrizitätskonstante ε des Füllgutes in diesem Beispiel konstante Größen sind.

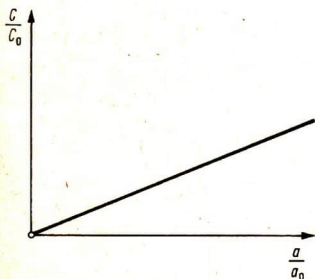


Bild 95/1
Kapazitäts-Füllstandsdiagramm

Zu beachten ist, daß bei elektrisch nichtleitendem Füllgut die Elektroden metallisch blank gehalten und bei elektrisch leitenden Füllgütern die Elektroden isoliert werden müssen.

Kapazitive Wandler mit veränderlicher Fläche besitzen eine sehr hohe Querempfindlichkeit. Dieses kommt durch ungewollte Abstandsänderungen der Flächen zustande, die durch Druck auf die Kondensatorplatten hervorgerufen werden.

Verringert wird diese hohe Empfindlichkeit durch den Einsatz von Zylinderkondensatoren. Weitere Schwierigkeiten bereitet die Länge der Meßleitung, denn der Isolationswiderstand R_i und die Kapazität der Meßleitung C_L sind dem Meßwandler parallel geschaltet. Deshalb sind kapazitätsarme und kurze Leitungen als Verbindung notwendig.

Vereinfachungen werden dadurch erzielt, daß die beiden Elektroden des Kondensators aus der Behälterwandung und einem Stab gebildet werden. Die geometrischen Größen der Anordnungen sind oftmals nur schwer zu erfassen. Berechnungen der Kapazität sind im voraus nicht einfach, und die genauen Werte für die relativen Dielektrizitätskonstanten sind kaum bekannt. So ist man auch in der Praxis durch die unterschiedlichen konkreten Gegebenheiten auf das Experiment angewiesen und kann noch nicht mit fest vorgegebenen Werten arbeiten. Beim Aufbau einer solchen Anlage ist besonders darauf zu achten, daß zwischen der Kapazität bei leerem und vollem Behälter ein hinreichend großer Unterschied vorhanden ist. In der Praxis werden für Überschlagsrechnungen von Kapazitätsänderungen von „leer“ auf „voll“ folgende Gleichungen benutzt:

$$\begin{array}{ll} \text{Elektrisch nichtleitende Flüssigkeit} & \text{Elektrisch leitendes Füllgut} \\ \Delta C \approx C_0(\epsilon_{r,Fl} - 1) h & \Delta C \approx \left(C_0 - 10 \frac{\text{pF}}{\text{m}} \right) h. \end{array} \quad (35)$$

h in m,

Erfahrungswerte:

$C_0 \approx 10 \frac{\text{pF}}{\text{m}}$ Kapazität der blanken Sonde im leeren Behälter.

$C'_0 \approx 100 \frac{\text{pF}}{\text{m}}$ Kapazität der isolierten Sonde im leeren Behälter.

Bei zylindrischen Sonden (Bild 40/2) sind die geometrischen Größen leicht überschaubar. Flüssigkeitskondensator und Luftkondensator sind parallel geschaltet.

Unter Beachtung der Gesetzmäßigkeiten beim Kondensator erhält man folgende Gleichung, in der die Kapazität C in pF ermittelt wird.

$$C = 0,24 \frac{\epsilon_{r,Fl} \cdot h + \epsilon_{r,L} \cdot (H - h)}{\lg \frac{D}{d}} \quad (36)$$

- Berechnen Sie unter Verwendung der Gleichung (36) die Kapazität eines Ölbehälters im leeren und im vollen Zustand! Im Ölbehälter befindet sich eine Zylindersonde mit den Durchmessern $D = 10$ cm und $d = 5$ cm. Die Sondenhöhe sei $H = 2$ m und die relative Dielektrizitätskonstante $\epsilon_{r,Fl} = 2,35$.

Zusammenfassung

Kapazitätsänderungen infolge der Veränderung der Kondensatorfläche ermöglichen das Messen der Füllstände von Flüssigkeiten und Schüttgütern.

6. Untersuchung einiger Meßschaltungen mit aktiven Meßfühlern

6.1. Meßschaltungen mit induktivem Geber

Die Messung der Drehzahl von Maschinen, wie Motoren, Generatoren, Pumpen, Verdichter und Zentrifugen, ist eine notwendige Voraussetzung für die Lösung vieler Steuerungs- und Regelungsaufgaben.

Bei einer Kreiselpumpe ist diese Überwachung z. B. wichtig, weil sich die Drehzahl auf Förderhöhe und Förderleistung auswirkt.

Die Drehzahl kann mit aktiven oder passiven Meßfühlern erfaßt werden.

- *Worin unterscheiden sich aktive von passiven Meßfühlern? (s. Abschnitt 2.)*

Es gilt für die Drehzahl n

$$n = \frac{U}{t} \quad \begin{array}{l} U: \text{Umläufe} \\ t: \text{Zeit} \end{array} \quad (37)$$

Zur Drehzahlbestimmung genügt es demzufolge, die Anzahl der Umläufe U in einer bestimmten Zeit t zu zählen (Bild 15/2).

Hierzu benutzt man ein Wirbelstromtachometer. Das Wirbelstrommeßwerk ist zur Drehzahl- und Geschwindigkeitsmessung geeignet. Die Geschwindigkeitsanzeige in den Kraftfahrzeugen beruht auf diesem Prinzip.

- *Wodurch werden Wirbelströme hervorgerufen, und worin unterscheiden sie sich von den Induktionsströmen?
(vgl. Lehrbuch Physik Kl. 9, Berlin: Volk und Wissen Volkseigener Verlag 1972)*

Der mehrpolige Dauermagnet des Wirbelstromtachometers ist mit dem Meßobjekt verbunden und wird in Rotation versetzt. Auf Grund der Bewegung wird in der drehbar gelagerten Aluminiumtrommel, die den Dauermagneten umschließt, eine Spannung induziert. In der Trommel treten Wirbelströme auf. Die daraus resultierende Kraftwirkung zwischen Dauermagneten und Trommel bringt den Zeiger, der fest mit der Trommel verbunden ist, zum Ausschlag.

Diese Drehzahlmessung unterscheidet sich gegenüber der elektromagnetischen Umlaufzählung auch darin, daß eine kontinuierliche Angabe erreicht wird. Weitere aktive Meßfühler zur Drehzahlmessung sind der Gleichspannungs- und der Wechselspannungsmeßgenerator.

- Welche Energieumwandlung findet im Generator auf Grund der elektromagnetischen Induktion statt?

11

▼ Bauen Sie einen Wechselspannungsgenerator auf (↗ S. 111)

Will man dem Generator eine Gleichspannung entnehmen, so ist an Stelle der Schleifringe eine andere Vorrichtung zu benutzen, durch die bei Richtungsänderung der induzierten Spannung auch die Abnehmeranschlüsse wechseln. Solche Vorrichtungen können Stromwender, Kollektoren oder Kommutatoren sein.

Zusammenfassung

Zur kontinuierlichen Drehzahlmessung können folgende aktive Meßfühler benutzt werden:

- Wirbelstromtachometer,
- Meßgenerator (Gleichspannungsmeßgenerator, Wechselspannungsmeßgenerator).

Bei dieser Art der Drehzahlmessung tritt eine Energieumwandlung (kinetische Energie → elektrische Energie) auf, die die Drehzahl beeinflusst. Für die Messung an Kleinstmotoren werden deshalb häufig berührungslose Meßverfahren benutzt. Hinweise über optoelektrische Meßanordnungen zur Drehzahlmessung finden Sie im Abschnitt 6.2.

6.2. Meßschaltung mit Fotoelement und Fotodiode

Beim derzeitigen Stand der Entwicklung von Halbleiterbauelementen treten zwar die Selenfotoelemente bei der technischen Anwendung in den Hintergrund, dennoch sollen im folgenden Meßschaltungen mit Fotoelementen besprochen werden. Fotoelemente sind gegenüber Fotodioden billiger in der Anschaffung.

Bei Meßaufgaben mit Fotoelementen besteht allerdings die Gefahr, daß die elektrische Messung einer optischen Größe durch Temperatureinflüsse stärker gestört wird, als dies bei Fotodioden der Fall ist. Dies hat seine Ursache darin, daß Fotoelemente bei Einwirkung von Licht nur eine verhältnismäßig niedrige Fotospannung von 0,1 bis 0,5 V liefern. Die Verarmung an Ladungsträgern

in der Sperrschicht kann aber außer durch Lichtenergie auch durch Wärmeenergie aufgehoben werden (Freisetzung von Elektronen). Bei Fotoelementen kann der letztgenannte Effekt die Erzeugung der Fotospannung durch Lichtwirkung überlagern und damit das optische Meßresultat fälschen. Auch beim Einsatz von Fotodioden wird in technischen Schaltungen eine Temperaturkompensation durchgeführt, damit eine möglichst große Unempfindlichkeit gegenüber Temperatureinflüssen gewährleistet ist. Sehr weit verbreitet ist die Anwendung der Selen-Fotoelemente in elektrischen Belichtungsmessern (z. B. Weimarlux).

Der Unterschied im Einsatz von Fotoelementen und Fotodioden wird unter anderem durch folgende Eigenschaften bedingt:

Fotoelemente besitzen eine verhältnismäßig große Fläche zur Aufnahme der Lichtenergie. Diese muß möglichst vollständig ausgeleuchtet werden. Fotodioden hingegen haben eine sehr kleine lichtempfindliche Fläche. Bei ihnen muß das Licht daher mit Hilfe einer Linse oder eines Linsensystems gebündelt werden. Dadurch wird beim Einsatz von Fotodioden der Aufwand an optischen Bauteilen größer als bei Verwendung von Selenfotoelementen.

Bei Schaltungen, in denen es auf die Erfassung veränderlicher Lichtsignale ankommt, spielt die Trägheit, mit der das fotoelektrische Bauelement reagiert, eine Rolle. Entscheidend für diese Trägheit ist die Kapazität, die zwischen den Grenzschichten auftritt, weil diese bei jedem Lichtwechsel immer erneut entladen werden müssen, bevor ein neuer Lichtblitz eine Spannung erzeugt. Da die Kapazität von der Fläche abhängig ist, muß bei Fotoelementen wegen ihrer großen Fläche mit einer Kapazität von annähernd $0,1 \mu\text{F}$ gerechnet werden. Für den Auflade- und Entladeprozeß spielt außer der Kapazität in der Grenzschicht auch noch der verwendete Außenwiderstand eine Rolle.

Fotodioden haben dagegen wegen ihrer kleinen Fläche eine geringe Kapazität. Sie können auch bei schnell verlaufenden Lichtwechseln eingesetzt werden. Fotoelemente werden daher als langsame und Fotodioden als schnelle optoelektronische Bauelemente bezeichnet. Bedeutungsvoll wird dieser Unterschied im Verhalten von Fotoelementen und Fotodioden, wenn die Bauelemente in Meßschaltungen zur Messung von Drehzahlen eingesetzt werden sollen.

▼ *Setzen Sie zwischen Lichtquelle und Selenfotoelement $\text{SeH } 13 \times 26$ (Röhrenwerk Rudolstadt), das an ein Drehpulmeßgerät angeschlossen ist, eine in der Drehzahl steuerbare Lochblende! Bestimmen Sie die Abhängigkeit der angezeigten Fotospannung von der Frequenz der Lichtunterbrechungen!*

In der Produktionspraxis sind häufig die Drehzahlen laufender Maschinen zu überwachen. Durch Unterbrechen eines Lichtstrahles und mit einem auf Drehzahlen geeichten elektrischen Meßgerät kann die Überwachung in einer von der Maschine entfernt gelegenen Schaltwarte erfolgen. Die Grundschialtung, die hierbei angewendet wird, ist die elektronische Zähl-schialtung. Da es sich immer nur um eine Entscheidung „hell“ oder „dunkel“ handelt, wird dieses Verfahren als digitale Messung bezeichnet; sie wird ebenfalls bei der Stück-

zahlbestimmung angewendet (Flaschenzählung in Molkereien oder Brauereien; Abzählen von Schrauben oder von Tabletten in Abfüllautomaten). Mit den Zählanlagen läßt sich eine Steueranlage koppeln. Diese kann dann die Abfüllautomaten so abschalten, daß beispielsweise ein nächstes Auffanggefäß eingeschoben wird, wenn das vorhergehende gefüllt ist.

In der Regel liefern die Meßfühler für die elektrische Messung nichtelektrischer Größen Gleichspannungen. Diese reichen häufig nicht aus, um über größere Entfernungen einen meßbaren Ausschlag an einem Meßgerät zu erzeugen. Deshalb wird die durch den Meßfühler erzeugte Spannung mit einem Gleichspannungsverstärker verstärkt (Bild 100/1). An den Eingang kann entweder ein Thermoelement oder ein Selenfotoelement geschaltet werden.

Die Anwendung derartiger Gleichspannungsverstärker bietet wegen der Anpassung der Meßfühler und vor allem wegen der Arbeitspunkteinstellung stets schaltungstechnische Schwierigkeiten. In der Praxis wird deshalb bei der elek-

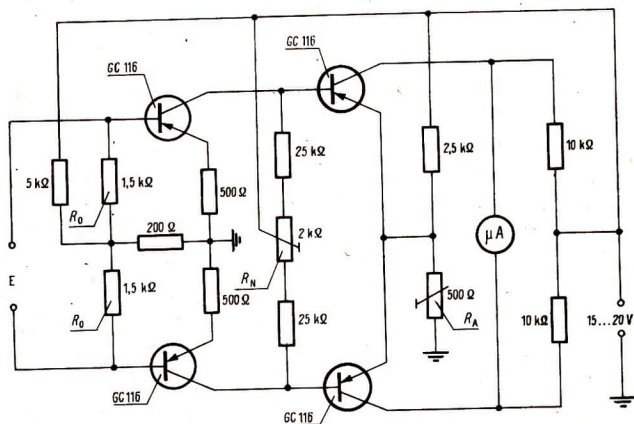


Bild 100/1

Gleichspannungsmeßverstärker

E — Eingang des Verstärkers

Die vom Meßfühler erzeugte Spannung liefert einen kleinen Strom, der durch die Eingangswiderstände R_0 fließt und dort einen Spannungsabfall hervorruft. Dieser wird über die galvanisch miteinander gekoppelten Gegentaktverstärkerstufen verstärkt. Die Gegentaktschaltung wird gewählt, um eine möglichst gute Temperaturstabilisierung zu erreichen. Die Transistoren GC 116 sind paarweise ausgewählt und angeordnet. Mit dem Regelwiderstand R_N wird die Nullage des Meßgerätes eingeregelt. Mit dem Regelwiderstand R_A läßt sich der Arbeitspunkt des Verstärkers einstellen.

trischen Messung optischer Signale häufig mit Wechselspannungsverstärkern gearbeitet. Die vom Fotoelement oder von der Fotodiode gewonnene elektrische Eingangsgröße muß dann für den Verstärker eine Wechselspannung sein. Diese kann auf verschiedene Art und Weise gewonnen werden.

1. Die Fotogleichspannung wird einem elektronischen Zerhacker zugeführt.
2. Der optische Strahlengang wird wie im Experiment auf Seite 99 mechanisch unterbrochen. Es entsteht eine Fotowechselspannung im Rhythmus der Unterbrechungen.
3. Die Lichtquelle gibt modulierte Lichtstrahlen ab. Dies trifft zum Beispiel für eine mit Wechselspannung betriebene Glimmlampe oder andere Gasentladungslampen zu.

▼ *Bauen Sie einen dreistufigen Transistorwechselspannungsverstärker auf und schalten Sie in den Eingang ein Selenfotoelement und in den Ausgang ein Stromstärkemeßgerät (5 mA oder 50 mA)!
Gewinnen Sie die Fotowechselspannung nach Variante 2 und 3!*

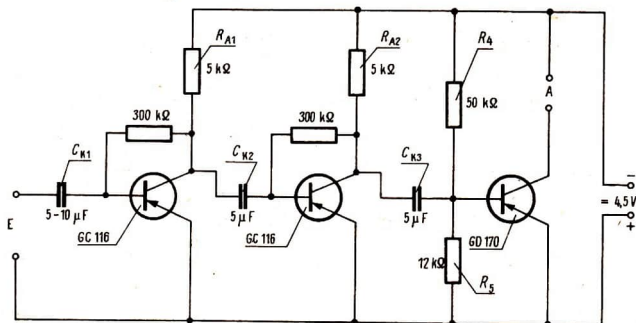


Bild 101/1

Schaltbild eines Transistorwechselspannungsverstärkers

Die auf den Eingang gelangende Wechselspannung wird über den Kondensator C_{K1} an den ersten Transistor gelegt. Dieser erhält seine Basisvorspannung durch den Widerstand zwischen Kollektor und Basis. Der Spannungsabfall am Außenwiderstand R_{A1} wird der zweiten analog aufgebauten Stufe zugeführt und gelangt nach Verstärkung auf den Endstufentransistor. Dieser erhält seine Basisvorspannung über den Spannungsteiler R_4 und R_5 . An den Ausgang A der letzten Stufe kann wahlweise ein Meßinstrument, der Transformator eines Lautsprechers oder ein Wechselstromrelais angeschlossen werden.

▼ *Bauen Sie eine Drehzahlmeßeinrichtung auf und eichen Sie das Meßgerät in Umlaufzahlen!
Bauen Sie eine fotoelektrisch arbeitende Stückzahlzähleinrichtung auf!*

2. Versuchsdurchführung

- Wählen Sie drei verschiedene Widerstandsdrähte aus (Eisen, Konstantan, Kupfer)!
- Erwärmen Sie die Widerstandsdrähte und beobachten Sie an einem Strommesser die Änderung der Stromstärke!
- Wählen Sie ein Meßverfahren zur Temperaturmessung aus und versuchen Sie, den Zusammenhang zwischen Temperatur und Stromstärke bzw. Widerstand grafisch darzustellen!

Experiment 3

Untersuchung der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von Kohle

1. Vorbetrachtungen

- Entwerfen Sie eine Schaltung zum Nachweis der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes!

2. Versuchsdurchführung

- Bauen Sie die entworfenen Schaltung zum Nachweis der Temperaturabhängigkeit von Kohle auf! Verwenden Sie dazu als geeignetes Untersuchungsmaterial eine Kohleelektrode aus einer Kohlebogenlampe oder eine Bleistiftmine!
- Untersuchen Sie den Zusammenhang zwischen Temperaturerhöhung und elektrischem Widerstand! Führen Sie Messungen aus und stellen Sie die Meßwerte grafisch dar!
- Vergleichen Sie diese Ergebnisse mit denen aus dem Experiment 2!

Experiment 4

Aufbau und Eichung eines Halbleiterwiderstandsthermometers

1. Vorbetrachtungen

- Entwerfen Sie eine Schaltung für die elektrische Temperaturmessung mit Hilfe eines Thermistors!

2. Versuchsdurchführung

- Bauen Sie die entworfenen Schaltung auf! Verwenden Sie als Meßgerät ein Drehspuldemonstrationsinstrument!
- Entfernen Sie nach Öffnung des Instruments die Skale und ersetzen Sie diese durch eine selbstgefertigte unbeschriftete Pappskale!
- Führen Sie eine „Eichung“ des Thermometers durch Vergleich mit einem Flüssigkeitsthermometer durch Kontrollmessungen in einem Wasserbad durch! Beschriften Sie dabei die Pappskale (Einteilung in °C)!

Hinweis: Den Thermistor sollte man in ein Glasrohr einführen, das unten geschlossen ist.

Experiment 5

Bau und Einsatz von Thermoelementen

Es sind verschiedene Thermoelemente herzustellen, zu „eichen“ und für Temperaturmessungen einzusetzen.

Herstellung verschiedener Thermoelemente

Es werden jeweils zwei 30 cm lange Kupferdrähte oder Stahldrähte mit einem 30 cm langen Konstantandraht auf einer Länge von 2 cm miteinander fest verdrillt. Am verdrillten Ende werden die Drähte miteinander verlötet (Drahtdurchmesser 0,3 bis 0,5 mm). An die freien Enden wird ein Ausgleichsdraht von 0,5 bis 1 m Länge mit Lüsterklemmen angeklemt. (Als Ausgleichsdraht für Eisen-Konstantan-Elemente → Konstantandraht und für Kupfer-Konstantan-Elemente → Kupferdraht verwenden)

Von den Enden dieser Ausgleichsdrähte werden zweipolige Leitungen zum Meßgerät oder zum Gleichstromverstärker gelegt.

Meßgeräteinsatz

Thermoelemente aus den angegebenen Stoffen liefern bei Temperaturdifferenzen zwischen den beiden verdrillten Enden von 100 grd nur Spannungen von einigen Millivolt. Um eine Anzeige zu erhalten, wird diese Spannung häufig mit einem Gleichstrommeßverstärker verstärkt.

Der Selbstbau von Gleichstromverstärkern stößt meist auf einige Schwierigkeiten, die in der Anpassung von Eingangs- und Ausgangskreisen an den Meßfühler und die Meßgeräte ihre Ursache haben.

Aus diesem Grunde sollten Messungen mit Thermoelementen entweder mit einem Lichtmarkengalvanometer oder mit einem Spiegelgalvanometer durchgeführt werden.

Versuchsaufbau

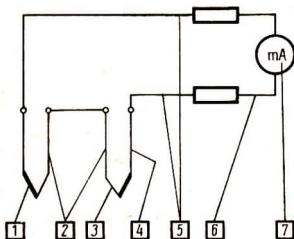


Bild 105/1 Anordnung der Drähte beim Thermoelement

- 1 — Meßstelle mit unbekannter Temperatur
- 2 — Konstantandraht
- 3 — Vergleichsstelle mit konstanter Temperatur
- 4 — Kupferdraht
- 5 — Ausgleichsdrähte
- 6 — Verbindungsleiter
- 7 — Meßgerät oder Verstärker

Versuchsdurchführung

„Eichen“ eines Thermoelements

Um die angefertigten Thermoelemente zu „eichen“, werden die Verbindungsstellen der beiden Metalle jeweils in ein Wassergefäß getaucht. Die beiden Verbindungsstellen mit dem Ausgleichsdraht werden auf gleicher Temperatur gehalten (Wassergefäß).

Während das Wasser in dem einen Gefäß langsam erwärmt wird, hält man das Wasser im anderen Gefäß durch Zugabe von Eisstückchen auf einer Temperatur von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Temperatur im ersten Gefäß wird mit einem Thermometer gemessen. Die zugehörigen Thermospannungswerte werden am elektrischen Meßgerät abgelesen und in eine Tabelle eingetragen. (Wird im ersten Gefäß Öl verwendet, so ist ein Thermometer mit einem Meßbereich von mindestens $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ erforderlich.)

Durch ständiges Umrühren der Meßflüssigkeit mit einem Rührer wird eine örtliche Überhitzung in der Flüssigkeit vermieden. Die erfaßten Meßwerte werden in eine grafische Darstellung übertragen $U_{\text{Th}} = f(\Delta\vartheta)$.

Die Meßwertkurve wird für verschiedene Thermoelemente aufgenommen.

Temperaturmessung mit Thermoelementen

Mit Hilfe eines Thermoelements ist die Temperatur einer Wassermenge zu bestimmen. Die eine Verbindungsstelle der beiden Metalle wird in Wasser der Temperatur $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ getaucht. Die andere Verbindungsstelle taucht in die Meßflüssigkeit. Die Thermospannung wird am elektrischen Meßgerät abgelesen. An Hand der Meßwertkurve wird die Temperatur bestimmt. In der Meßpraxis sind die elektrischen Meßgeräte gleich mit einer Temperaturskala versehen.

Messungen mit einer Thermokette (Thermosäule)

Thermoketten lassen sich herstellen, indem man mehrere Thermoelemente hintereinander schaltet. Jede zweite Verbindungsstelle wird so angeordnet, daß auf sie die Meßstrahlung fällt. Die anderen Verbindungsstellen werden auf eine Temperatur von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ gebracht. In einiger Entfernung von einer Glühlampe oder eines brennenden Streichholzes ist mit einer derartigen Thermokette eine Temperaturstrahlung feststellbar.

Fertigen Sie eine Thermokette aus Kupfer-Konstantan an und führen Sie qualitative und quantitative Strahlungsmessungen durch!

Experimente mit einem Thermomagnet

In einigen Schulsammlungen befinden sich noch die im Bild 107/1 abgebildeten Thermomagneten. Diese Thermomagnete bestehen aus einem dicken Kupferbügel (1), in den zwei Konstantanstücke (3) eingelötet sind. Der Kupferbügel liegt in einem Stahlblock (2). An diesem läßt sich ein Massstück befestigen. Wird das eine Ende des Kupferbügels in kaltes Wasser getaucht und das andere Ende mit einer Flamme erwärmt, dann fließt ein so starker Strom durch den Bügel, daß die Eisenstücke (2) auf Grund der Magnetfelder fest zusammengehalten werden. Die Stromstärke kann einen Betrag bis zu 50 A erreichen.

Führen Sie qualitative Experimente mit einem derartigen Thermomagnet durch!

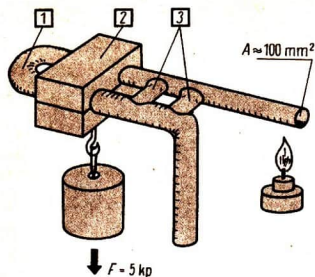


Bild 107/1 Thermomagnet

1 — Kupferbügel

2 — Eisenstück

3 — Konstantanbrücke

Experiment 6

Meßbrückenschaltungen

- Bestimmen Sie (Bild 73/1) die Spannung zwischen C und D, wenn der Schleifer am Potentiometer auf den rechten Anschlag, in die Mitte bzw. auf den linken Anschlag eingestellt ist! Entwerfen Sie einen Versuchsaufbau mit Schülerexperimentiergeräten!
- Für R_3 sind 100Ω einzusetzen.
 $R_{1/2}$ ist durch 2 Widerstände zu ersetzen.
 $R_1 = 1,5 \text{ k}\Omega$ (stellbar)
 $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$

Wie verändert sich die Spannung zwischen C und D, wenn R_1

- verkleinert
 - vergrößert
- wird?

Experiment 7

Meßanordnung mit Dehnungsmeßstreifen

Es ist eine Meßanordnung zur dynamischen Kraftmessung mit Hilfe eines Dehnungsmeßstreifens aufzubauen und zu „eichen“. Versuchsaufbau (↗ Bild 108/1)
 Vorbetrachtungen

Wiederholen Sie die physikalischen Grundlagen über die Messung mit Dehnungsmeßstreifen aus dem Kapitel 2.2.!

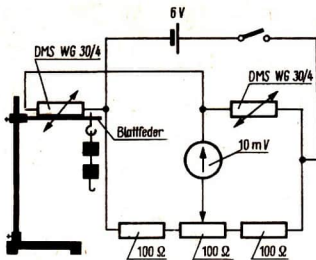


Bild 108/1
Dehnungsmeßstreifen
in einer Brückenschaltung

Erläutern Sie die Wirkungsweise der Schaltung in Bild 108/1!

Versuchsdurchführung

- Aufbau der Versuchsanordnung nach Bild 108/1!
- Der Dehnungsmeßstreifen ist auf das Stahlblech längs der Dehnungsrichtung aufzukleben! Es ist dabei notwendig, die Klebeanleitung genau einzuhalten.
- Bevor die Meßanordnung zur Kraftmessung benutzt werden kann, muß eine „Eichung“ in Bezug auf die Kraftmessung durchgeführt werden.

Experiment 8

Aufbau eines Wechselspannungsverstärkers

Bestimmen Sie den Verstärkungsfaktor!

Versuchsaufbau (Triodenverstärker)

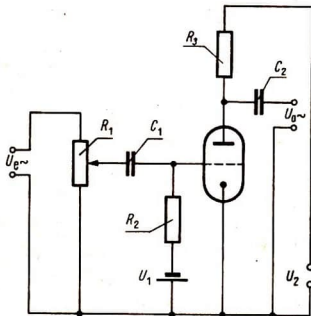


Bild 108/2
Verstärkerschaltung
mit einer Triode

Bauelemente $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$
 $R_2 = 500 \text{ k}\Omega$
 $R_3 = 5 \text{ k}\Omega$
 $C_1 = C_2 = 10 \text{ bis } 47 \text{ nF}$
 $U_1 = -2 \text{ V}$
 $U_2 = 40 \text{ V}$
 Röhre: EC 92

Versuchsdurchführung

Die sinusförmige Eingangswchelspannung soll 3 V nicht überschreiten. Sie kann mit R_1 entsprechend geregelt werden.

Die Verstärkerwirkung wird mit einem Oszillographen gezeigt. Man kann an der Form der Sinuskurve deutlich die richtige Einstellung des Arbeitspunktes erkennen. Mit einem Zweistrahloszillographen oder mit einem Einstrahlloszillographen in Verbindung mit einem elektronischen Schalter kann die Gegenphasigkeit der Ein- und Ausgangsspannung sichtbar gemacht werden.

Versuchsaufbau (Transistorverstärker)

Bauelemente $R_1 = 500 \text{ k}\Omega$ (regelbar)

$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$

$R_3 = 1 \text{ k}\Omega$

Bauelemente $C_1 = 50 \mu\text{F}$

$C_2 = 20 \mu\text{F}$

Transistor: GC 116

$U = 4 \text{ bis } 6 \text{ V}$

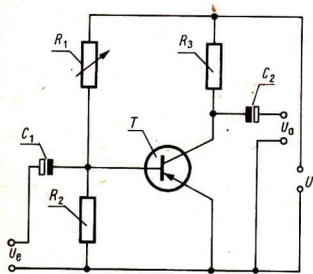


Bild 109/1
 Verstärkerschaltung
 mit einem Transistor

Versuchsdurchführung

Die Schaltung stellt einen einstufigen Transistorverstärker in Emitterschaltung dar. Der Basisspannungsteiler dient zur Arbeitspunkteinstellung. Die Ein- und Ausgangsspannungen können mit einem Oszillographen verglichen werden.

Experiment 9

Winkelmessung mit Potentiometer

1. Vorbemerkungen
 - Informieren Sie sich über die Potentiometerschaltungen und deren Einsatz!
 - Wiederholen Sie die mathematischen Beziehungen, die in Potentiometerschaltungen gelten! (Vgl. Lehrbuch Physik Kl. 8, Berlin: Volk und Wissen Volkseigener Verlag 1974)
2. Versuchsdurchführung
 - Legen Sie unter den Drehknopf des Potentiometers einen Winkelmesser (Vollwinkel)! Montieren Sie auf dem Drehknopf einen Zeiger!
 - Bauen Sie eine Potentiometerschaltung auf!
 - Nehmen Sie die Abhängigkeit der Ausgangsspannung vom Drehwinkel auf, wenn die Eingangsspannung des Potentiometers konstant bleibt!
 - Stellen sie den Zusammenhang zwischen Ausgangsspannung und Drehwinkel grafisch dar!
 - Wie kann diese Schaltung bei der elektrischen Messung eines Winkels in der Praxis genutzt werden? Geben Sie dafür Beispiele an!

Experiment 10

Elektrische Dickenmessung

1. Vorbetrachtungen
 - Informieren Sie sich über den Queranker- und den Schichtdickenmeßwertgeber!
2. Versuchsdurchführung
 - Bauen Sie die Schaltung nach Bild 110/1 auf!
 - Führen Sie zwischen dem U- und dem I-Kern ein Band unterschiedlicher Stärke hindurch! Notieren Sie Ihre Beobachtungen!
 - Benutzen Sie als Meßgerät ein Drehspul-Demonstrationsmeßgerät! Öffnen Sie das Gerät und ersetzen Sie die Skale durch eine Pappscheibe, auf der Sie eine Skale mit Millimeterteilung anbringen!

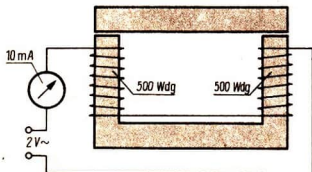


Bild 110/1
Schaltung zur induktiven Dickenmessung
auf direktem Wege
 $w_1 = w_2 = 500$ Windungen

Experiment 11

Wechselspannungsgenerator

Bauen Sie einen Wechselspannungsgenerator zur Drehzahlmessung auf!

Versuchsaufbau

— Benutzen Sie für diese Anordnung das Motor-Generatormodell!

Versuchsdurchführung

— Entwerfen Sie die Konstruktion der Versuchsanordnung!

— Stellen Sie für das Meßverfahren die Wirkungskette auf!

— Nehmen Sie die Abhängigkeit der erzeugten Spannung von der Drehzahl auf!

— Fertigen Sie eine grafische Darstellung an und diskutieren Sie diese Kennlinie!

Experiment 12

Aufbau einer Meßschaltung für Belichtungszeitermittlung

Selenfotoelemente vom Typ SeH 13 × 26 (VEB Röhrenwerke Rudolstadt) oder Fotodioden vom Typ GP 119 bis GP 122 (VEB Werk für Fernsehelektronik Ber-

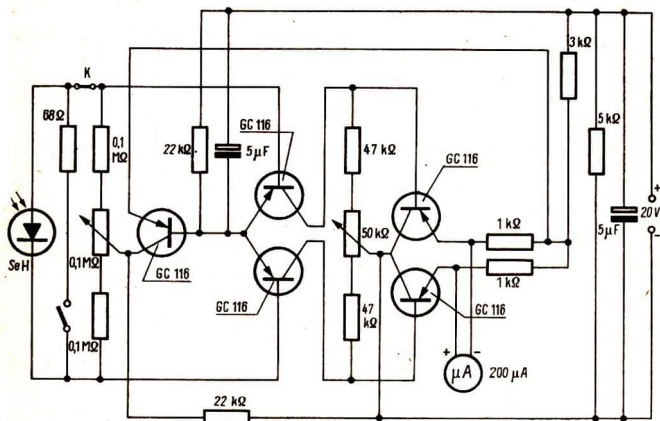


Bild 111/1 Meßschaltung mit einem Fotoelement SeH 13 × 26 zur Belichtungszeitermittlung (nach B. Magyani).

lin) sind geeignet, um belichtungsabhängige Meß- und Regelschaltungen aufzubauen. In der Schaltung (Bild 111/1) wird das Zusammenwirken eines Fotoelements mit einer Brücken- und Verstärkerschaltung deutlich.

Es ist die Schaltung aufzubauen und für Vergrößerungsarbeiten mit einem Vergrößerungsgerät zu „eichen“¹.

Experiment 13

Aufbau einer Brückenschaltung zum Helligkeitsvergleich von Papiersorten

Mit dieser Meßschaltung² sollen verschiedene Papiersorten mit Normalpapier hinsichtlich ihrer Oberflächenbeschaffenheit und ihrer Helligkeit verglichen werden. Es wird dem Fotoelement 1 gegenüber ein Blatt weißes Schreibmaschinenpapier (glänzend) als Normalpapier angeordnet. An dem Fotoelement 2 werden verschiedene Papiersorten, die zu einer langen Bahn zusammengeklebt sind, vorbeigezogen. Auf beide Papierbahnen wird Licht aus einer Glühlampe des Schülerexperimentiersatzes gerichtet. Die Lampen sind so einzurichten, daß die Beleuchtungsstärken auf beiden Papierbahnen gleich groß sind. Die Abstände zwischen den Fotoelementen 1 und 2 und dem jeweiligen Papier sind gleich groß zu wählen.

In der angegebenen Schaltung wirken die Fotoelemente als Fotowiderstände. Als T_1 und T_2 können die Transistoren GC 115 aus dem Schülerexperimentiersatz Verwendung finden. T_3 sollte ein Transistor GC 121 sein. (Transistoren mit hoher Kappe aus dem Halbleiterbastelbeutel). Vor dem Einsatz der Schaltung muß am Potentiometer P_1 ein Nullabgleich vorgenommen werden (gleiche Papiersorte vor beide Fotoelemente).

Je nach der Abweichung der Papierqualität vom Normal leuchtet die Lampe 1 oder 2 auf. Mit der Schaltung sind auch Färbungen in Flüssigkeiten mit einem Normal vergleichbar.

An Stelle der Lampen 1 und 2 können bei Benutzung eines entsprechenden Leistungstransistors bei T_3 auch Relais betrieben werden. Diese können Steuerungssignale für den Produktionsprozeß abgeben.

¹ Magyari, B.: Elektronik im Fotolabor
Berlin: Militärverlag 1970

² Jakubaschk, H.: Angewandte Elektronik
Berlin: Militärverlag 1972

7.2. Lösungen

1. $[E] = 1 \text{ kp} \cdot \text{mm}^{-2}$; weniger üblich ist $1 \text{ kp} \cdot \text{cm}^{-2}$
2. $E = 1,26 \cdot 10^4 \text{ kp} \cdot \text{mm}^{-2}$; das Material ist Kupfer
($E_{\text{tab}} = 1,25 \cdot 10^4 \text{ kp} \cdot \text{mm}^{-2}$)
3. $\varepsilon = 0,55\%$
4. Graph I $k = 1,75$ — Konstantan (2,0)
Graph II $k = 6,0$ — Platin
Graph III $k = 2,3$ — Chromnickel (2,5)
5. $\Delta\theta = 390 \text{ grad}$
6. $R_{\theta 2} = 180 \Omega$
7. Es gilt $U_H = R_H \cdot \frac{B \cdot I}{d}$,

$$\text{damit wird } R_H = \frac{U_H \cdot d}{B \cdot I} \text{ in } \frac{\text{V} \cdot \text{cm}}{\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^{-2}} \cdot \text{A} \cdot 10^4$$

Für den vorliegenden Fall gelten folgende Werte:

$$\begin{aligned} U_H &= 3,1 \cdot 10^{-6} \text{ V} & B &= 1 \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2} \\ d &= 0,5 \cdot 10^{-1} \text{ cm} & I &= 20 \text{ A} \\ R_H &= 7,7 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{A}^{-1} \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

Dieser Wert stimmt am besten mit dem Wert der Hall-Konstante Kupfer ($5,3 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{A}^{-1} \text{ s}^{-1}$) überein.

8. Es gilt $U_H = R_H \cdot \frac{B \cdot I}{d}$

Gegeben sind: $I = 5 \text{ A}$

$$d = 0,1 \text{ mm} = 0,1 \cdot 10^{-1} \text{ cm}$$

$$B = 0,5 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} = 0,5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Vs}}{\text{cm}^2}$$

$$R_H = -6 \cdot 10^3 \text{ cm}^2 \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

Damit wird $U_H = -15 \text{ V}$

9. Es gilt allgemein $U_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi}{dt}$ mit $\Phi = B \cdot A$.

$$d\Phi = B \cdot dA = B \cdot l \cdot dx$$

$$U_{\text{ind}} = -B \cdot l \cdot \frac{dx}{dt} = -B \cdot l \cdot v$$

Damit wird bei konstanter magnetischer Induktion B

$U_{\text{ind}} = -0,4 \cdot 10^{-2} \text{ V}$

10.

Eingangsgröße	Meßfühler	Ausgangsgröße	physikalische Grundlage
Länge, Winkel	regelbarer Widerstand	Stromstärke	Abhängigkeit des Widerstandes von der Länge
Dehnung, Kraft, Druck	Dehnungsmeßstreifen	Stromstärke	Abhängigkeit des Widerstandes metallischer Leiter vom mechanischen Spannungszustand
Temperatur	Widerstandsthermometer	Stromstärke	Temperaturabhängigkeit des Widerstandes von Leitern
Temperatur	Halbleiterdiode Transistor Thermistor	Stromstärke	Temperaturabhängigkeit des Widerstandes von Halbleitern
Länge, Kraft, Druck	Spule mit Eisenkern	Stromstärke	Induktionsgesetz
Temperaturdifferenz	Thermoelement	Spannung	Thermoelektrischer Effekt
Lichtstrom	Fotoelement	Spannung	Innerer fotoelektrischer Effekt
Lichtstrom	Fotowiderstand	Stromstärke	Innerer fotoelektrischer Effekt

11. Systematische Fehler entstehen durch Verwendung falsch geeichter Meßinstrumente oder wenn Gültigkeitsgrenzen des für das Experiment gültigen Gesetzes überschritten werden. Sie haben bei gleicher Versuchsbedingung einen konstanten Wert und ändern sich gesetzmäßig bei einer Änderung der Bedingungen. Sie lassen sich daher durch die Vergrößerung der Anzahl der Messungen nicht verringern. Sorgfältiges Beobachten der Versuchsbedingungen und Kontrolle der Meßgeräte dagegen läßt Korrekturen zur Verbesserung der Versuchsergebnisse zu.
12. Wird bei einem Experiment die Raumtemperatur nicht beachtet, so ist der dadurch entstandene systematische Fehler nicht korrigierbar. Wird während des Experiments die Raumtemperatur gemessen, so lassen sich Korrekturrechnungen für temperaturabhängige Größen durchführen.
Bei elektrischen Präzisionsmessungen kann durch Kompensationschaltungen eine Berücksichtigung der Raumtemperatur erfolgen.
13. Vergleichen Sie die auf dem Meßgerät angegebene Güteklasse mit den Angaben auf Seite 65!

14. Multiprüfer haben in der Regel eine Meßgenauigkeit von $\pm 5\%$. Das bedeutet für den Meßbereich von 20 V einen Fehler von $F = \frac{20 \text{ V} \cdot 5\%}{100\%} = 1 \text{ V}$.

Bezogen auf den bei 0,8 Skt zu erwartenden Wert von 16 V beträgt der prozentuale Fehler jetzt bereits

$$\frac{100\%}{16 \text{ V}} \cdot 1 \text{ V} = 6,25\%$$

Für die Zeigerstellung 0,3 = 6 V beträgt der prozentuale Fehler dann bereits 16,6%, d. h. es ist in diesem Fall richtiger, auf einen niedrigeren Meßbereich umzuschalten.

15. Vergleichen Sie die auf den Meßgeräten links auf der Skale angebrachten Symbole mit den Angaben auf S. 65!

16. Längenmessung

$$\Delta l \rightarrow \Delta U \rightarrow \Delta \alpha$$

α : Winkel des Zeigerausschlages am Meßgerät

Winkelmessung

$$\Delta \beta \rightarrow \Delta U \rightarrow \Delta \alpha$$

β : der zu messende Winkel

α : Winkel des Zeigerausschlages am Meßgerät

Flüssigkeitsstandsmessung

$$\Delta h \rightarrow \Delta \beta \rightarrow \Delta U \rightarrow \Delta \alpha$$

h : Höhe des Flüssigkeitsstandes

α : Winkel des Zeigerausschlages am Meßgerät

17. Das Potentiometer hat 3, der verstellbare Widerstand nur 2 Abgriffe. Beim Potentiometer kann man mit Hilfe des Gleitkontaktes die Teilwiderstände verändern, die Summe der Teilwiderstände bleibt dabei gleich.

Beim Anlegen einer Spannung U an die äußeren Anschlüsse erhält man zwei Teilspannungen U_1 und U_2 .

$$\text{Es gilt: } U = U_1 + U_2 \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$
$$R = R_1 + R_2$$

Während das Potentiometer zur Einstellung einer Teilspannung dient, werden beim verstellbaren Widerstand nur der Schleifkontakt und ein Ende der Widerstandsbahn angeschlossen. Er dient in der Regel zur Veränderung der Stromstärke im Stromkreis.

18. a) $R_1 = 42 \Omega$
 $R_2 = 58 \Omega$
- b) $U_1 \approx 0,38 \text{ V}$, da $R_1' = \frac{R_1 \cdot R_L}{R_1 + R_L} = 1,9 \Omega$.
19. $I_{AC} = I_{CB}$
 $I_{AD} = I_{DB}$
20. Der Widerstand des Dehnungsmeßstreifens ist temperaturabhängig, d. h. bei Temperaturänderung würde sich aus diesem Grund auch eine Änderung des Brückenstromes ergeben, ohne daß eine Längenänderung erfolgt.
 Deshalb wird in den anderen Zweig der Brücke ein zweiter, der Dehnung nicht ausgesetzter Dehnungsmeßstreifen, dessen Widerstand im gleichen Maße in Abhängigkeit von der Temperatur steigt oder sinkt, geschaltet (s. Bild 108/1).
21. $U_{Th} \approx 5 \text{ mV}$
22. $U_{a-} \approx 1 \text{ V}$
 $U_{a-} \approx 35 \text{ V}$ $V \approx 35$
23. Energieumwandlungen in der Kausalkette:
 Lichtenergie \rightarrow Elektrische Energie \rightarrow Mechanische Energie
 (Zeigerausschlag im Anzeigerät)
 bzw.
 Lichtenergie \rightarrow Elektrische Energie \rightarrow Mechanische Energie
 \searrow Elektrische Energie
 (Elektronisches Zählwerk)
24. $I = 24 \text{ cd}$
25. $r_s = 126 \text{ cm}$