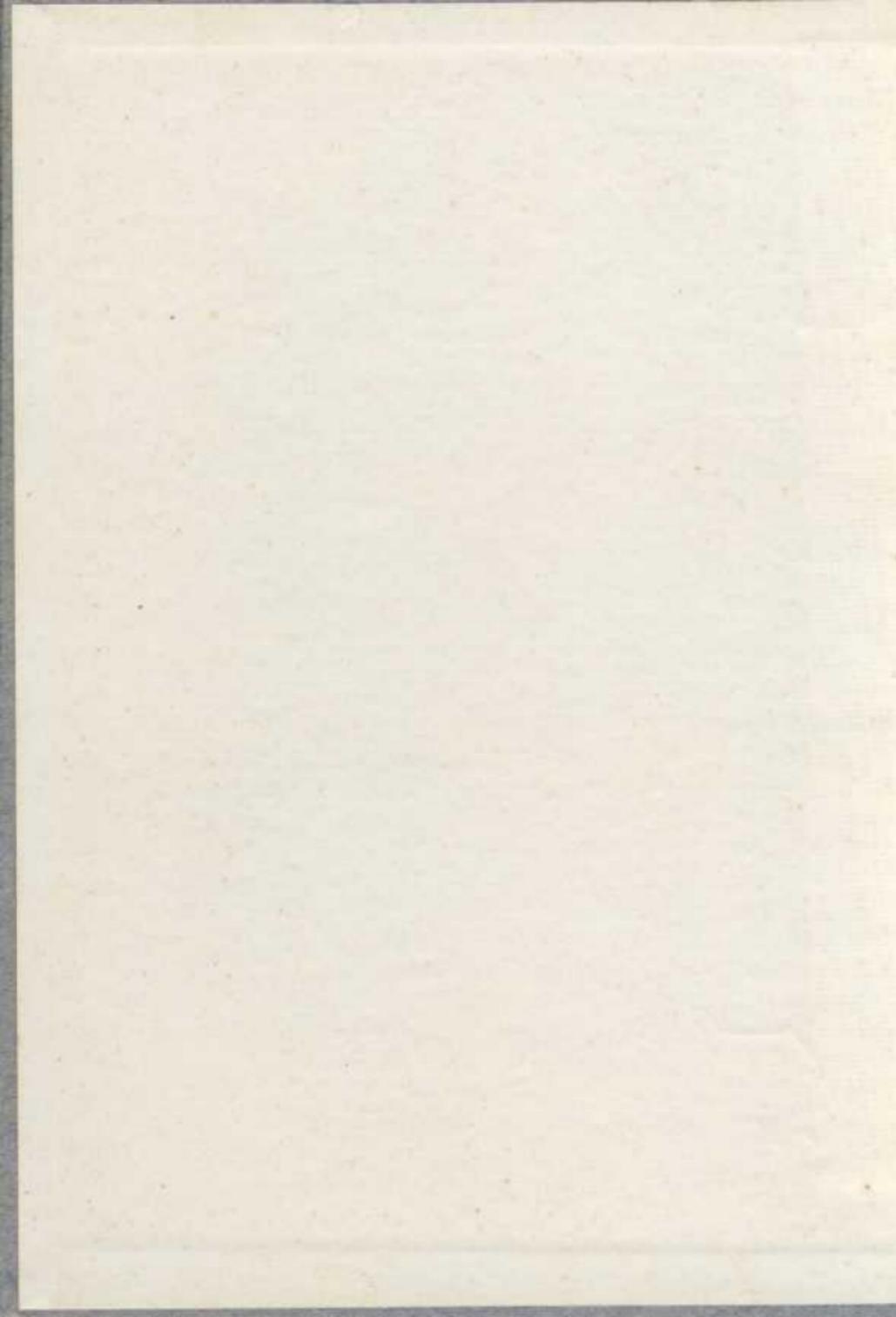


ELEKTRISCHE UND
WÄRMETECHNISCHE
MESSUNGEN



ELEKTRISCHE UND WÄRMETECHNISCHE MESSUNGEN

Dipl.-Ing. Franz Heinen
Heidelberg



HARTMANN & BRAUN AG FRANKFURT/MAIN
ELEKTRISCHE UND WÄRMETECHNISCHE MESSGERÄTE

Zweite, erweiterte Auflage

Nachdruck und Übersetzung in fremde Sprachen ohne Genehmigung
nicht gestattet.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Drehzahl	1
Druck	3
Fehlerort	5
Fernübertragung von Meßwerten	10
Feuchtigkeit	12
Frequenz	14
Gaskonzentration	16
Kapazität	20
Leistung	23
Leistungsfaktor	29
Leitfähigkeit	30
Menge	31
pH-Wert	40
Selbstinduktion	48
Spannung	49
Strom	53
Temperatur	57
Übersetzungsverhältnis	69
Vakuum	71
Widerstand	72
Anhang	
Skalen und Zeiger der Meßgeräte	78
Elektrischer Teil, Ferraris- und Hitzdraht-Meßwerk	80
Ausführungsbeispiele von elektrischen Meßgeräten	81
Fehlergrenzen der elektrischen Meßgeräte	85
Eigenverbrauch der elektrischen Meßgeräte	88
Sinnbilder für elektrische Meßgeräte	91
Schaltzeichen, Dielektrizitätskonstante und Verlustfaktor	92
Spez. Widerstand versch. Metalle, Widerstand von Cu- u. Al-Leit. Elektrotechnische Formeln	93 94
Wärmetechnischer Teil, Ausführungsbeispiele	96
Widerst. d. Thermom.-Wickl., Thermospänn., genormte Meßber. Widerstand der Thermolemente, Ausgleich- und Cu-Leitungen Außenschutzrohre für Thermolemente Thermospänn. d. Pyrradio, Umrechnung v. Temperatureinheiten Rauminhalt von Wasserdampf Gesättigter Wasserdampf Temperatur, Dichte und Rauminhalt des Wassers Psychrometertafel Dampfgehalt gesättigter Luft Schmelz- u. Siedetemperaturen, Schmelz- u. Verdampfungswärme Spez. Wärme von Gasen, Dämpfen, festen und flüssigen Stoffen Heizwerte	101 102 103 104 105 107 108 109 112 113 114 115
Allgemeiner Teil, Zahlenwerte, griech. Alphabet, dekad. Vielfache Spez. Gewichte Elemente und Atomgewichte	116 117 119
Sach- und Namensverzeichnis	120

Dipl.-Ing. Franz Heinen

Heidelberg

Drehzahl

Die Messung der Drehzahl umlaufender Teile einer Maschine kann nach verschiedenen Methoden erfolgen. Von diesen hat die nachstehend beschriebene elektrische Messung besondere Bedeutung, da bei ihr die Anzeige der Drehzahl in praktisch beliebiger Entfernung von der umlaufenden Welle erfolgen kann; die Drehzahlmesser können also zusammen mit anderen Fern-Meßgeräten (z. B. für Temperatur, Druck usw.) und den Steuer- und Schaltgeräten in einer zentralen Meßwarte auf einer gemeinsamen Schalttafel angeordnet werden, so daß jederzeit übersichtliche und bequeme Überwachung und Beeinflussung aller Vorgänge von einer Stelle aus möglich ist.

Wirkungsweise der Fern-Drehzahlmessung (Bild 1)

Von der Welle, deren Drehzahl gemessen werden soll, wird ein kleiner Magnetinduktor angetrieben, der Wechselstrom erzeugt. Spannung und Frequenz des Wechselstromes sind der Drehzahl der Welle verhältnismäßig und somit ein Maß für die Drehzahl. Sie werden mit Spannungs- bzw. Frequenzmessern gemessen, deren Skalen direkt in Umdrehung pro Minute, Meter pro Sekunde usw. geeicht sind.

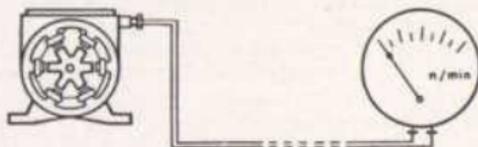


Bild 1

Der elektrische Ferndrehzahlmesser besteht also aus Geber und Anzeigegerät, die durch zwei beliebig lange Drähte miteinander verbunden sind.

Der Geber (Magnetinduktor) hat eine feststehende Wicklung und einen Anker aus hochkoerzitivem Magnetstahl. Die geringe Schwungmasse des Gebers läßt Umdrehungszahlen bis 30000/min zu. Bei niedrigen Drehzahlen erhalten die Geber zur Erzielung einer hinreichenden Meßspannung und Frequenz mehrere Polpaare (3, 6 oder 12). Bei entsprechender Größe des Gebers können mehrere Anzeigegeräte angeschlossen werden.

Anzeigegeräte. Zur Messung kann die Spannung oder die Frequenz des vom Geber erzeugten Wechselstromes herangezogen werden, da beide verhältnismäßig der Drehzahl sind.

Im ersten Falle werden wegen des geringen Eigenverbrauches **Drehspul-Spannungsmesser** mit eingebautem Trockengleichrichter verwendet (siehe S. 56), die auch als Schreiber ausgebildet sein können, seltener die billigeren Weicheisengeräte (S. 53). Die Skalenteilung beginnt stets bei Null. Die Meßgenauigkeit beträgt etwa $\pm 1,5\%$ des Skalenendwertes.

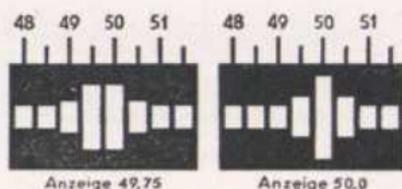


Bild 2

ein Gleichfeld überlagerten Elektromagneten (vergl. S. 14) kann jedoch auch über eine Oktave gemessen werden. Der Skalenbeginn kann also höchstens etwas mehr als die Hälfte des Höchstmeßbereiches betragen; ein Beginn bei Null ist ausgeschlossen. — Das günstigste Intervall zwischen je zwei Zungen liegt bei etwa 1% des Skalenmittelwertes. In diesem Fall schwingen außer der in Vollresonanz schwingenden Zunge noch die benachbarten Zungen mit kleinerem Ausschlag mit, so daß auch die Zwischenfrequenzen gut geschätzt werden können (Bild 2).

Durch **Zusammenfassung von Zeiger- und Zungenmeßwerk in einem einzigen Gerät** werden die Vorteile beider Systeme, nämlich große Skalenausdehnung und hohe, stets gleichbleibende Genauigkeit miteinander vereinigt. Dabei genügt für das Zungenmeßwerk eine kleinere Anzahl Zungen für die Betriebsdrehzahl. Auf diese Weise kann das Zeiger-Meßwerk durch die Zungenanzeige, die immer als die unbedingt richtige anzusehen ist, kontrolliert und gegebenenfalls berichtigt werden.

Als **Verbindungsleitungen** zwischen Geber und Anzeigegerät werden zweckmäßig Starkstromleitungen oder -kabel verlegt, damit Isolationsfehler vermieden werden. Bei größeren Leitungslängen (von etwa über 1 Ohm Widerstand) ist der Widerstand bei der Eichung des Anzeigeegerätes zu berücksichtigen.

Vibrations-Tachometer

Eine Folge von Stahlzungen auf einem gemeinsamen Träger ist in gleichen Intervallen fortschreitend auf bestimmte Schwingungszahlen abgestimmt. Wird der Zungenträger an den festen Teil einer umlaufenden Maschine gelegt, so wird die durch die umlaufende Welle verursachte Schwingung auf die Stahlzungen übertragen; es gerät diejenige Zunge in Schwingung, deren Eigenschwingungszahl mit der Drehzahl der umlaufenden Welle übereinstimmt. Der umlaufenden Welle wird also keinerlei

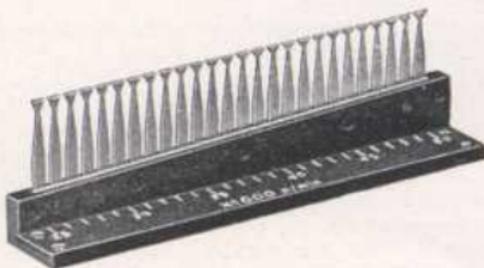


Bild 3

Bei Ausnutzung der Frequenz des vom Geber erzeugten Wechselstromes werden in der Regel **Zungenfrequenzmesser** verwendet (siehe Seite 14). Der Vorteil dieser Geräte liegt in der robusten Bauart und der hohen, stets gleichbleibenden Genauigkeit (etwa $\pm 0,3\%$). Der Meßbereich-Umfang kann bei dem einfachen Meßwerk eine Oktave nicht überschreiten, weil die Zungen auch auf ihre Obertöne ansprechen. Bei Verwendung eines durch

nutzbare Leistung entnommen, sondern es werden lediglich die unvermeidbaren Schwingungen zur Drehzahlmessung ausgenutzt. Das Vibrations-Tachometer ist deshalb auch verwendbar bei kleinen Antriebskräften, wo der Eigenverbrauch jede andere Art der Drehzahlbestimmung fälschen würde. Der Meßbereichumfang ist auf eine Oktave beschränkt. Die Geräte werden ortsfest und tragbar gebaut. Sie eignen sich für $1000 \cdots 100\,000$ U/min.

Druck

Gebräuchliche Einheiten: kg/cm^2 ; für kleinere Drücke: mm QS (Quecksilbersäule), für kleinste Drücke: mm WS (Wassersäule).

$1 \text{ kg}/\text{cm}^2 = 735,6 \text{ mm QS} = 10\,000 \text{ mm WS}$.

Es ist genau voneinander zu unterscheiden: 1. Über- bzw. Unterdruck, 2. Differenzdruck (= Druckgefälle zwischen zwei Punkten einer Anlage), 3. Absoluter Druck (= Barometerstand + Über- bzw. Unterdruck). Ferner ist zu beachten: Die technische Atmosphäre entspricht $735,6 \text{ mm QS} = 1 \text{ kg}/\text{cm}^2$, die physikalische Atmosphäre 760 mm QS .

Für die Druckmessung im praktischen Betrieb stehen im wesentlichen zwei grundsätzlich verschiedene Geräte zur Verfügung, nämlich Ringwaage und Federdruckmesser.

Die Ringwaage

eignet sich zur genauen Messung niedriger Drücke und Differenzdrücke bei Luft und Gasen. Kleinster praktisch ausgeführter Meßbereich etwa $0 \cdot \cdot \cdot 15 \text{ mm WS}$, größter $0 \cdot \cdot \cdot 6000 \text{ mm WS}$.

Das Ringwaage-Meßwerk (Bild 4) besteht aus einem drehbar gelagerten Hohlring, der zur Hälfte mit Flüssigkeit gefüllt ist. Der Raum über der Flüssigkeit ist durch eine Trennwand in zwei Kammern geteilt, die mit den Meßleitungen verbunden sind. Durch die Wirkung der Druckdifferenz auf die Trennwand wird ein Drehmoment am Waagerring erzeugt. Der Waagerring dreht sich, bis er durch das Gegen-Drehmoment des Gewichtes in die Gleichgewichtslage kommt. Der Drehwinkel ist ein Maß für die Druckdifferenz. Soll mit der Ringwaage Über- oder Unterdruck gemessen werden, so wird der Meßdruck nur einer der Kammern zugeführt, während die andere Kammer offen nach der Atmosphäre bleibt

Als Flüssigkeit werden bei Ringwaagen für niedrige Drücke Wasser oder in besonderen Fällen Öl usw. gewählt. Bei einem mittleren Ringdurchmesser von etwa 150 mm beträgt dann der Höchst-Meßbereich etwa $0 \cdot \cdot \cdot 150 \text{ mm WS}$, der niedrigste etwa $0 \cdot \cdot \cdot 15 \text{ mm WS}$. Bei Geräten für höhere Drücke wird das spezifisch schwerere Quecksilber verwendet; der Höchst-Meßbereich liegt bei etwa $0 \cdot \cdot \cdot 2000 \text{ mm WS}$. Werden mehrere Ringe zu einer Ringspirale verbunden, so vervielfacht sich der Höchst-Meßbereich entsprechend der Ringzahl; er beträgt z. B. bei einer Dreiringspirale mit Quecksilberfüllung etwa 6000 mm WS .

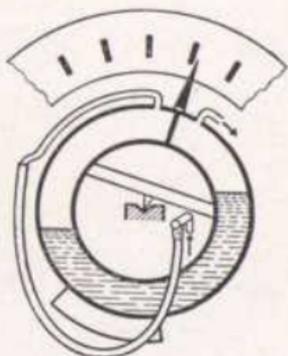


Bild 4

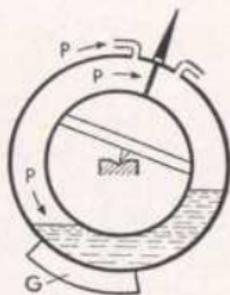


Bild 5

Auf die Meßgenauigkeit haben die Menge und das spezifische Gewicht der Flüssigkeit keinen Einfluß. Ist z. B. die Wasserfüllung zum Teil verdunstet (Bild 5), so wird nach wie vor durch den Druck P auf die Trennwand der Waagering gedreht, bis er durch das Gegengewicht in die Gleichgewichtslage kommt. Jedoch kann gegebenenfalls der obere Teil des Meßbereiches nicht mehr erfaßt werden, weil die Flüssigkeit, auf die der gleiche Druck P wirkt, vor Erreichen des Endausschlages durchgedrückt werden kann, so daß die Luft zur anderen Kammer durchströmt.



Bild 6

Wird die Ringwaage zur Messung von Differenzdrücken verwendet, so ist stets zu prüfen, ob der statische Druck die zulässige Höchstgrenze nicht überschreitet.

Feder-Druckmesser

sind zur Messung von Über- und Unterdrücken geeignet. Der Höchstmeßbereich liegt etwa bei 1000 kg/cm^2 .

Die üblichen Meßwerke sind:

Das Kapselfeder-Meßwerk (Bild 6) zur Messung kleinster Drücke und Unterdrücke, hauptsächlich von Luft und nichtaggressiven Gasen. Der Meßdruck wirkt auf die Innenwände der Kapselmembran. Die durch Druckänderung erzeugten Hubbewegungen der Kapsel sind ein Maß für den Druck.



Bild 7

Das Plattenfeder-Meßwerk (Bild 7) zur Messung kleinerer und größerer Drücke und Unterdrücke bei Luft, Gasen, Dampf und Flüssigkeiten. Es besteht aus einer gewellten, zwischen zwei Flanschen eingespannten Metallmembran. Die vom Meßdruck hervorgerufene Durchbiegung ist ein Maß für den Druck.

Das Rohrfeder-Meßwerk (Bild 8) zur Messung hoher und höchster Drücke bei Luft, Gasen, Dampf und Flüssigkeiten. Es besteht aus einem ringförmig gebogenen, einseitig geschlossenen Rohr. Die offene Seite zur Zuführung des Druckes ist fest eingespannt, die geschlossene beweglich. Die durch Druckänderung bewirkte Streckung der Rohrfeder ist ein Maß für den Druck.



Bild 8

Fernübertragung der Meßwerte

kann bei Ringwaage- und Federdruckmessern durch Elektro-Fernsender erfolgen. Dieser enthält eine Widerstandswalze, auf der sich eine mit dem Zeiger des Druckmessers mechanisch gekuppelte Schleifbürste bewegt und dadurch zwei veränderliche Stromkreise bildet. Das in beliebiger Entfernung angebrachte Kreuzspul-Empfangsgerät stellt sich ohne Verzögerung auf das Verhältnis der Teilströme ein. Näheres siehe Seite 10.

Fehlerort

An Kabeln können folgende grundsätzliche Fehler auftreten:

1. Eine oder mehrere Adern des Kabels haben Erdschluß oder Nebenschluß (Berührung).
2. Alle Adern haben Erdschluß.
3. Eine oder mehrere Adern sind unterbrochen.
4. Alle Adern sind unterbrochen.

In der Praxis treten diese vier grundsätzlichen Fehlermöglichkeiten leider oft nicht rein auf, sondern sind vermengt. Die Bestimmung des Fehlerorts erfordert deshalb in jedem einzelnen Fall reifliche Überlegung und gesunden Menschenverstand, vor allem aber Erfahrung und Vertrautheit mit der vorhandenen Kabelmeßeinrichtung. Die letzte Forderung wird am besten durch häufigen Gebrauch der Meßeinrichtung, auch für nebensächliche Meßaufgaben, erworben.

Häufig ist es zweckmäßig, zur Kontrolle mehrere Messungen vorzunehmen, sei es nach verschiedenen Methoden oder, wie z. B. bei der Schleifenmethode, unter Verwendung verschiedener gesunder Hilfsadern oder auch von zwei verschiedenen Stellen aus usw. Die Auswertung der Meßergebnisse muß mit Sorgfalt und Überlegung vorgenommen werden.

Feststellung der Art des Fehlers

Die Ermittlung des Fehlerorts erfordert je nach der Art des Fehlers eine besondere Methode. Um überhaupt feststellen zu können welcher Fehler vorliegt, ist vor der Messung der Kabelzustand festzustellen, was etwa folgendermaßen geschehen kann:

a) Prüfung auf Kabelbruch

Alle Adern des Kabels werden bei A geerdet (Bild 9). Der Reihe nach werden sie mit einem Isolationsprüfer, z. B. mit einem Kurbelinduktor (Seite 75) auf Stromdurchgang geprüft. Ist der Widerstand einer Ader ∞ oder sehr hoch, so ist mit Sicherheit Aderbruch vorhanden.

b) Prüfung der einzelnen Adern auf Erdschluß

Der Isolationswert der einzelnen Adern gegen Erde ist der Reihe nach festzustellen. Erdschluß ist bei sehr niedrigem Isolationswert gegeben.

c) Prüfung der einzelnen Adern auf Nebenschluß (Berührung)

Der Isolationswert jeder Ader gegen sämtliche anderen Adern ist festzustellen. Bei sehr niedrigem Isolationswert ist Nebenschluß (Berührung) vorhanden.

d) Widerstandsmessung

Mit Hilfe einer Widerstands-Meßbrücke ist der Widerstand sämtlicher Kabelschleifen zu bestimmen. Diese Messung dient gleichzeitig als Kontrollmessung.

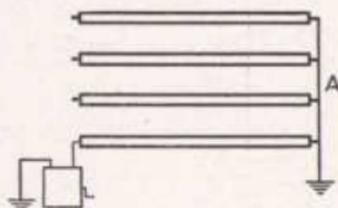


Bild 9

1. Eine oder mehrere Adern haben Erdschluß

Der Fehlerort wird durch eine Widerstandsverhältnis-Messung gefunden. Der Einfachheit halber wird im Nachstehenden eine Fehlerorts-Meßbrücke mit kreisförmig angeordnetem Schleifdraht mit Hundertteilung der Meßdrahtlänge angenommen.

a) Schleifen-Methode (vorwiegend für Schwachstromkabel)

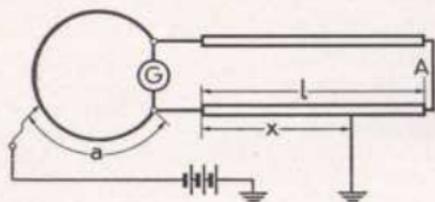


Bild 10

Die Ader mit Erdschluß wird bei A mit einer gesunden Ader verbunden. Die Meßbrücke wird an die beiden offenen Enden angeschlossen (Bild 10). Bei Stromlosigkeit des Galvanometers ergibt sich bei einer Hundertteilung der Meßdrahtlänge:

$$a : 100 = x : 2 l$$

$$x = 2 l \cdot \frac{a}{100}$$

Die Ablesung am Schleifdraht ergibt also unmittelbar den Fehlerort in Prozenten der Schleifenlänge (= doppelte Kabellänge).

Bei dieser Messung geht der Widerstand der Kabelzuführungen (Zuleitungen zur Meßbrücke und Verbindung bei A) in die Rechnung ein. Der dadurch entstehende Meßfehler wird also um so geringer, je kleiner der Widerstand der Kabelzuführungen ist. Bei dünnen, langen Kabeln (z. B. Fernsprechkabeln) wird der Meßfehler bei Verwendung entsprechend dicker Zuleitungen vernachlässigbar klein; bei dicken Kabeln kann er durch Verwendung entsprechend dickerer Kabelzuführungen, die außerdem zur Vermeidung von Übergangswiderständen gut verklemmt werden müssen, verringert werden.

b) Drei-Punkte-Messung nach Graf (vorwiegend für Starkstromkabel)

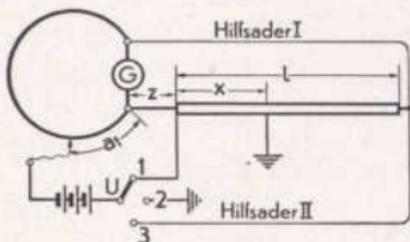


Bild 11

Diese Schaltung (Bild 11) gewährleistet höchste Genauigkeit, da der Querschnitt und die Länge der Hilfsleitungen (Zuleitung z, Hilfsader I und II) ohne Einfluß sind. Es können also als Hilfsadern I und II entweder gesunde Adern des Kabels oder fremde Leitungen beliebigen Querschnitts verwendet werden.

Bei der Messung ist der Umschalter U der Reihe nach auf die Stellen 1, 2, 3 zu schalten, wobei jedesmal auf dem Schleifdraht die Stelle festzustellen ist, bei der das Galvanometer stromlos wird. Sind die drei Ablesungen am Schleifdraht a_1 , a_2 und a_3 , und ist l die einfache Kabellänge, so wird der Fehlerort errechnet:

$$x = l \cdot \frac{a_2 - a_1}{a_3 - a_1}$$

2. Alle Adern haben Erdschluß

Der Messung liegt eine besondere Stromverzweigungs-Schaltung nach Graf zugrunde. Die Methode kann nur dann angewendet werden, wenn mindestens vier Adern mit Erdschluß vorhanden sind.

In die zwei Adern b und c (Bild 12) wird Gleichstrom geschickt, von dem ein Teil über die Erdwiderstände in die beiden Adern a und d eindringt und sich in diesen nach beiden Seiten im umgekehrten Verhältnis ihrer Widerstände verzweigt. Der eine Zweigstrom fließt durch das Galvanometer G_1 , der andere durch G_2 . Haben beide Galvanometer gleiche Empfindlichkeit, und sind α_1 und α_2 die Zeigeraus-schläge, so ergibt sich, wenn l die Gesamtlänge des Kabels ist:

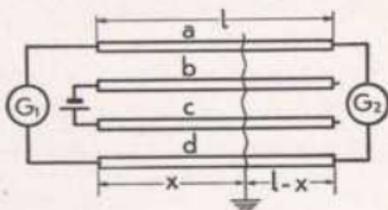


Bild 12

$$\alpha_1 : \alpha_2 = (l - x) : x$$

$$x = l \cdot \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}$$

In der Praxis wird die Meßanordnung nach Bild 13 ausgeführt. Parallel zum Galvanometer G_1 wird ein Schleifdraht geschaltet, dessen Schleife bei der Messung so eingeregelt wird, daß beide Galvanometer gleichen Ausschlag zeigen. An einer geeichten Schleifdrahtskala kann das Meßergebnis in Prozenten der Schleifdrahtlänge unmittelbar abgelesen werden.

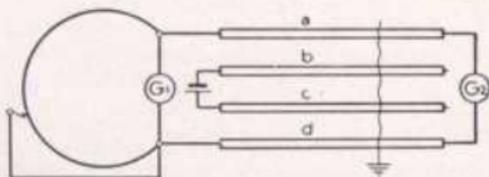


Bild 13

3. Eine oder mehrere Adern sind unterbrochen

Der Fehlerort wird durch Vergleichen der Kapazitäten der beiden Leitungslängen x und $2l - x$ gegen Erde ermittelt.

a) Messung mit Gleichstrom nach Graf (vorwiegend für lange Kabel)

Die gebrochene Ader wird mit einer gesunden Ader bei A verbunden, die Meßbrücke an die beiden offenen Enden angeschlossen (Bild 14). Auf Stellung 1 des Umschalters U werden die beiden Kabelstücke x und $2l - x$ geladen, auf Stellung 2 entladen. Der Schleifer wird auf dem Meßdraht so lange verschoben, bis das Galvanometer bei der Ladung bzw. Entladung keinen Ausschlag mehr zeigt.

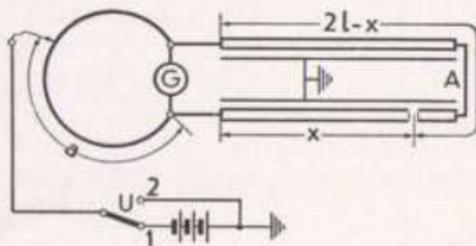


Bild 14

Ist C_1 die Kapazität von x und C_2 von $2l - x$, so gilt bei einer Hunderteilung der Meßdrahtlänge:

$$a : (100 - a) = C_2 : C_1$$

Da die Kapazitäten bei gleicher Leiteranordnung verhältnismäßig den Längen sind, so können diese an Stelle von C_1 und C_2 eingesetzt werden:

$$a : (100 - a) = (2l - x) : x$$

$$x = 2l \cdot \frac{100 - a}{100};$$

Der Vorteil dieser Methode liegt darin, daß die Messung mit einem gewöhnlichen Galvanometer ausgeführt werden kann. Ein ballistisches Galvanometer ist also nicht erforderlich. Im Gegensatz zu den bisher aufgeführten Methoden wird eine höhere Meßspannung (etwa 100 V) benötigt.

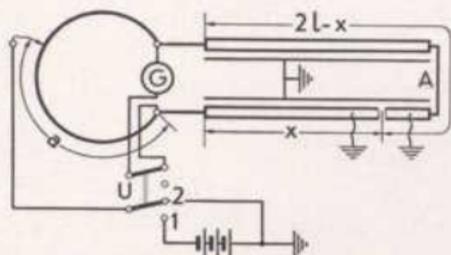


Bild 15

Die Umschaltung von 1 auf 2 hat möglichst schnell zu erfolgen, am besten mit Telefonrelais und Taster.

b) Messung mit Wechselstrom (vorwiegend für kürzere Kabel)

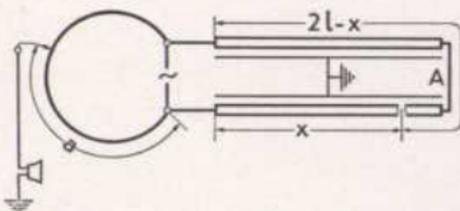


Bild 16

Die gebrochene Ader wird mit einer gesunden Ader bei A verbunden, die Meßbrücke an die beiden offenen Enden angeschlossen. Der Wechselstrom wird mit Batterie und Summer erzeugt. An Stelle des Galvanometers wird ein Kopfhörer verwendet. Bei Tonstille bzw. Tonminimum im Kopfhörer ergibt sich bei einer Hunderteilung der Meßdrahtlänge, wenn C_1 die Kapazität von x und C_2 von $2l - x$ ist:

$$a : (100 - a) = C_2 : C_1$$

oder, da die Kapazitäten verhältnismäßig den Längen sind:

$$a : (100 - a) = (2l - x) : x$$

$$x = 2l \cdot \frac{100 - a}{100};$$

c) Messung mit Kapazitätsmeßbrücke (vergleiche auch Seite 21)

Die gebrochene Ader wird mit einer gesunden Ader bei A verbunden (Bild 17). Gemessen werden die Kapazitäten gegen Erde von $x (= C_1)$ und von $2l - x (= C_2)$. Da die Leitungslängen verhältnismäßig den Kapazitäten sind, ergibt sich:

$$x : (2l - x) = C_1 : C_2$$

$$x = 2l \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2};$$

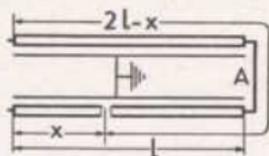


Bild 17

Mit der Kapazitäts-Meßbrücke läßt sich auch bei weniger guter Isolation hohe Meßgenauigkeit erzielen, da der Fehlwinkel durch einen Phasen-Abgleichwiderstand ausgeglichen und scharfes Tonminimum im Kopfhörer erzielt werden kann.

d) Messung mit ballistischem Galvanometer

Der Reihe nach werden die Kabellängen x und $2l - x$ mit der Spannung U geladen und über das ballistische Galvanometer entladen. Die ballistischen Ausschläge α_1 und α_2 verhalten sich wie die Längen der entsprechenden Kabelstücke (vergl. auch Seite 20).

Diese Methode kann nur bei reinem Aderbruch angewendet werden, d. h. wenn kein Isolationsfehler vorliegt. Die erzielbare Meßgenauigkeit wird beeinflusst durch den unvermeidlichen subjektiven Ablesefehler bei der Bestimmung des ballistischen Ausschlages.

In jedem Falle verdient die Messung nach 3a den Vorzug, weil dort einerseits ein gewöhnliches Galvanometer verwendet werden kann, das genaue Ablesung ermöglicht, andererseits auch genaue Messung bei Vorliegen von Isolationsfehlern möglich ist.

4. Alle Adern sind unterbrochen

Zur Bestimmung des Fehlerorts wird die Kapazität am Anfang und am Ende einer Ader gegen Erde gemessen, d. h. die Kapazität der Kabellängen x und $l - x$.

Die Kapazitäten sind verhältnismäßig den Aderlängen. Ist l die Gesamtlänge des Kabels, C_1 die Kapazität des einen Teiles der Ader von der Länge x und C_2 die Kapazität des anderen Teiles von der Länge $l - x$, so kann der Fehlerort ermittelt werden:

$$x : (l - x) = C_1 : C_2$$

$$x = l \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

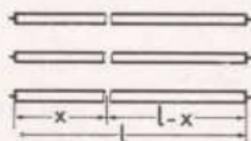


Bild 18

Zur Erzielung größerer Sicherheit wird die Messung zweckmäßig an mehreren Adern durchgeführt.

Fernübertragung von Meßwerten

In Meßzentralen erfolgt die Anzeige der Meßgrößen in der Regel weit entfernt von der Meßstelle. Für Geräte mit elektrischem Meßwerk (z. B. elektrische Temperatur-Meßgeräte) spielt diese Entfernung keine Rolle. Bei mechanischen Meßgeräten jedoch, wie bei Druck- und Mengennessern ist eine Fernanzeige nur beschränkt möglich, nämlich bis etwa 50 m. Die Zeigerstellungen der Meßgeräte werden deshalb durch Elektro-Fernsender auf elektrische Anzeigergeräte (Schreiber, Regler) übertragen.

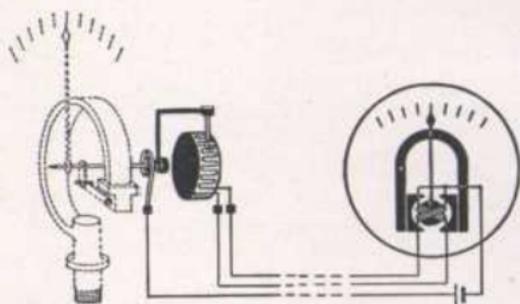


Bild 19

Die Wicklung wird dadurch in zwei Widerstandszweige geteilt, die sich entsprechend der jeweiligen Zeigerstellung ändern. Als Empfangsgerät wird ein Kreuzspulgerät angeschlossen, das auf das Verhältnis der Teilströme in den beiden Widerstandszweigen anspricht. Jede Drehung der antreibenden Achse wird so praktisch ohne Verzögerung genau übertragen. Die Übertragung kann über große Entfernungen (bis etwa 50 km) erfolgen.

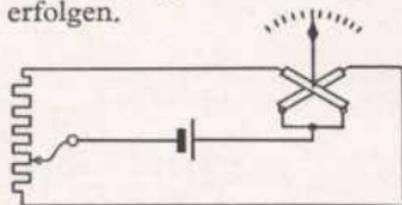


Bild 20

Der Stromverlauf ist aus Bild 20 ersichtlich. Der Meßstrom fließt von der Batterie zur Schleifbürste, teilt sich dort in die beiden Widerstandsabschnitte der Fernsenderwalze und fließt durch die beiden Fernleitungen zu den beiden Spulen des Kreuzspulgerätes; eine gemeinsame Rückleitung führt zurück zur Batterie.

grunde gelegt und auf der Skala vermerkt. Mit dem Gerät wird ein Abgleichwiderstand (z. B. 5 Ohm) geliefert, der in die Leitung eingebaut wird. Nach der Verlegung wird von diesem soviel abgenommen, bis der Gesamtwiderstand im Meßkreis den angegebenen Wert (z. B. 20 Ohm) hat.

Als Stromquelle dient meistens ein kleiner Trockengleichrichter zum Anschluß an das Wechselstromnetz oder auch ein Sammler. Je nach der zu überbrückenden Entfernung beträgt die benötigte Spannung 4..36 V. Spannungsschwankungen beeinflussen die Anzeigegenauigkeit nicht, da sie sich in gleicher Weise auf die beiden Spulen des Kreuzspulmeßwerks auswirken. Der Stromverbrauch liegt unter 100 mA.

Isolationsfehler sowie Übergangswiderstände an den Klemmstellen können die Messung fälschen. Es ist deshalb erforderlich, daß die Leitungen sehr sorgfältig in gleicher Weise wie Starkstromleitungen verlegt und ordentlich verklemmt werden.

Das für die Betätigung des Fernsenders erforderliche Drehmoment beträgt im günstigsten Fall etwa 1,5 cmg. Bei der Übertragung von Zeigerstellungen ist also stets vorher zu untersuchen, ob durch dieses zusätzliche Drehmoment die Anzeigegenauigkeit nicht beeinträchtigt wird.

Soll die Zeigerstellung auf zwei oder mehr Fernempfangsgeräte übertragen werden, z. B. auf ein Anzeige- und ein Schreibgerät, so wird ein Mehrfach-Fernsender verwendet, d. h. ein Fernsender mit zwei oder mehr Widerstandswalzen.

Vielseitige Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich für den Widerstands-Fernsender bei der **Übertragung von Winkelstellungen**, z. B. der Stellung von Ventilen, Schiebern, Waagebalken, Turbinen-Leitschaufeln, Schiffs- und Flugzeugrudern, Schleusentoren usw., ferner bei der Fernmessung des Standes von Wasserbehältern, Tanks und Gasometern sowie des Pegelstandes von Flüssen und Stauseen.

Bei der Fernübertragung des Flüssigkeitsstandes ist eine Schwimmervorrichtung erforderlich, durch die die Änderungen des Standes in eine Drehbewegung umgesetzt werden. Bild 21 zeigt eine solche Vorrichtung zur Vorratsmessung explosibler Flüssigkeiten, z. B. des Brennstoffes in Flugzeugen. Der Schwimmer im Tauchrohr gleitet, je nach der Höhe des Flüssigkeitsspiegels, auf und ab. Bei dieser Bewegung wird er durch eine seitliche Führungsrolle gedreht, die in einen spiralförmig verlaufenden Schlitz des Tauchrohres geführt ist. Die Drehung des Schwimmers überträgt sich auf die Mittelachse, die am oberen Ende den treibenden Teil einer magnetischen Kupplung trägt. Darüber liegt, durch eine unmagnetische Wand vollkommen abgedichtet, der getriebene Teil der magnetischen Kupplung, mit dem der Fernsender starr gekuppelt ist.

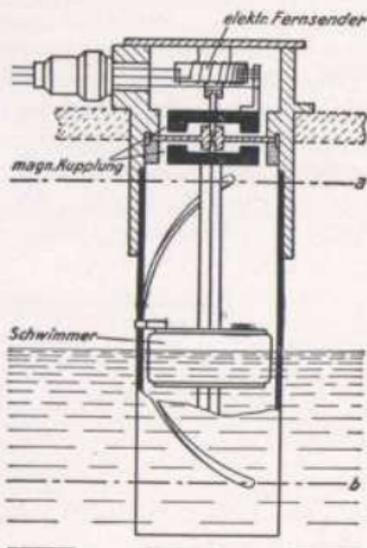


Bild 21

Feuchtigkeit

Der Wassergehalt der Luft in Prozenten der möglichen Höchstmenge wird als rel. Feuchtigkeit bezeichnet. Die Höchstmenge von Wasser, die von der Luft aufgenommen werden kann, ist in starkem Maße von der Temperatur abhängig. Sie ist bei höherer Lufttemperatur größer als bei niedriger. Wird also eine Luftmenge, die z. B. zu 80% mit Wasser gesättigt ist (rel. Feuchtigkeit 80%), allmählich abgekühlt, so wird bei einer bestimmten Temperatur der Sättigungspunkt oder Taupunkt erreicht (100% rel. Feuchtigkeit). Bei weiterer Abkühlung schlägt sich die ursprünglich als Wasserdampf vorhandene Feuchtigkeit in Form von Wasser (Tau) nieder.

Zur Messung der rel. Feuchtigkeit werden bei Temperaturen über 10° C neben den bekannten Haar-Hygrometern hauptsächlich Meßeinrichtungen verwendet, die nach psychrometrischen Verfahren arbeiten. Die zu messende Luft streicht an zwei Thermometern vorbei, von denen das eine mit einem feuchten Saugstrumpf überzogen ist. An diesem bewirkt die Luft je nach ihrem eigenen Feuchtigkeitsgehalt eine mehr oder minder große Verdunstungskälte. Zwischen den beiden Thermometern entsteht eine Temperaturdifferenz, die sog. psychrometrische Differenz. Die absolute Größe der psychrometrischen Differenz, die einem bestimmten Feuchtigkeitswert entspricht, ist in starkem Maße von der Raumtemperatur abhängig. Sie ist z. B. für 70% rel. Feuchtigkeit bei 30° C 4,5° C, während sie bei 20° C nur noch 3,5° C beträgt. Die entstehende Verdunstungskälte ist am größten, wenn in der Luft gar kein Wasser enthalten ist (rel. Feuchtigkeit ist = 0%) und am kleinsten, wenn die Luft mit Wasser gesättigt ist, wenn also nichts mehr verdunsten kann (rel. Feuchtigkeit = 100%). Vergl. auch Psychrometertafel Seite 109...111.

Die psychrometrische Differenz wird mit Sicherheit erreicht, wenn die Geschwindigkeit der vorbeistreichenden Luft größer ist als 2,5 m/s. In Räumen ohne Luftströmung muß deshalb die zu messende Luft künstlich an den beiden Thermometern vorbeigesaugt werden.

Die elektrischen Fern-Feuchtigkeitsmesser beruhen auf dem psychrometrischen Verfahren. An Stelle der Thermometer werden elektrische Fühlorgane verwendet; zur Anzeige dienen ebenfalls elektrische Meßgeräte. Es kommen hauptsächlich zwei Meßverfahren in Frage:

1. Feuchtigkeitsmessung bei konstanter Temperatur

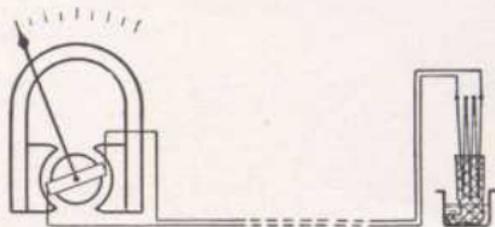


Bild 22

Ist die Raumtemperatur konstant, oder schwankt sie nur in engen Grenzen, so ist die psychrometrische Differenz ohne weiteres verhältnismäßig der rel. Feuchtigkeit. Für die elektrische Ermittlung der psychrometri-

schen Differenz wird eine Thermo-Batterie benutzt, deren eine Lötstellenreihe der Raumtemperatur ausgesetzt ist, während die mit einem Strumpf überzogene die „feuchte Temperatur“ erfäßt. Die infolge der Temperaturdifferenz entstehende Thermospannung zwischen den beiden Lötstellenreihen wird mit einem hinreichend empfindlichen Drehspulgerät gemessen, das in Prozent rel. Feuchtigkeit geeicht ist.

2. Feuchtigkeitsmessung bei schwankender Temperatur

Da die psychrometrische Differenz mit zunehmender Raumtemperatur für ein und dieselbe rel. Feuchtigkeit größer wird, wird ihr Einfluß durch eine Spezialschaltung berichtigt. Als Fühlorgan werden zwei Widerstands - Thermometer verwendet, von denen das eine mit einem feuchten Strumpf überzogen ist. Die

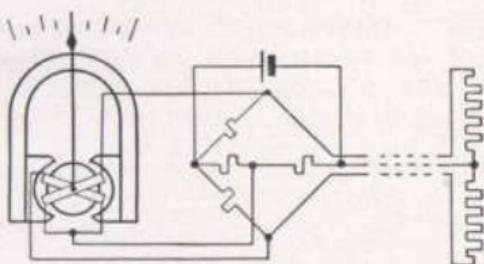


Bild 23

psychrometrische Differenz ruft eine Widerstandsdifferenz hervor, die sich in der Brückenschaltung auf ein Spezial-Kreuzspulgerät auswirkt, das unmittelbar in Prozent rel. Feuchtigkeit geeicht wird. Die Unabhängigkeit von der Raumtemperatur ist infolge des unregelmäßigen Verlaufes der Psychrometerkurve an gewisse Grenzen gebunden. Als normale Temperatur-Gültigkeitsbereiche werden $1 \cdots 20^{\circ}\text{C}$ oder $10 \cdots 40^{\circ}\text{C}$ oder $30 \cdots 90^{\circ}\text{C}$ angegeben. Als Stromquelle werden $4 \cdots 6\text{ V}$ benötigt, der Stromverbrauch beträgt etwa 120 mA.

Feuchtigkeitsmessung bei tiefer Raumtemperatur

Im allgemeinen sind die Messungen nach dem psychrometrischen Verfahren auf den Temperaturbereich zwischen $+1$ und $+90^{\circ}\text{C}$ beschränkt. Eine Messung bis zu einigen Graden unter Null ist möglich, wenn dem Wasser, in das der Saugstrumpf taucht, Zusätze beigemischt werden, die den Gefrierpunkt um einige Grade herabsetzen. Für die Feuchtigkeitsmessung unter 4°C kommen nur noch Haar-Hygrometer in Frage, die gegebenenfalls mit einem Elektro-Fernsender (siehe Seite 10) ausgerüstet werden können, wenn der Meßwert entfernt vom Gerät abgelesen werden soll.

Frequenz

Einheit: Hertz (Hz); $10^3 \text{ Hz} = 1 \text{ kHz}$ (Kilohertz).

Die Frequenz in Wechselstromanlagen beträgt: $f = \frac{n}{60} p$, wenn n die Umdrehungszahl in der Minute und p die Polpaarzahl eines Stromerzeugers oder Synchronmotors ist.

Zungen-Frequenzmesser

Diese werden wegen ihrer hohen, stets gleichbleibenden Meßgenauigkeit und ihrer robusten Bauart am meisten für die Frequenzmessung (zwischen etwa 7 und 1500 Hz) verwendet. Mit besonderen Hilfsmitteln ist es möglich, Frequenzen bis herab zu 1 Hz zu messen.

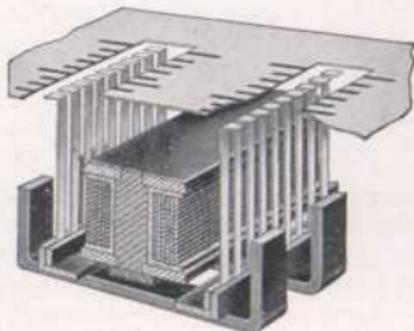


Bild 24

dann mit der Frequenz des Wechselstromes überein. Dieser Kunstgriff wird allgemein bei mittleren und höheren Frequenzen angewendet, weil auf diese Weise längere Zungen mit größerer Schwingungsweite verwendet werden können und der Eigenverbrauch des Gerätes kleiner wird.

Die Ablesung eines Zungenfrequenzmessers wird durch Bild 25 erläutert. Im rechten Bild ist die Frequenz des Wechselstromes genau 50 Hz; die beiden benachbarten Zungen schwingen nur wenig mit und zwar mit gleicher Amplitude. Im linken Bild schwingen die beiden Zungen 49,5 und 50 mit gleicher Schwingungsweite; der gesuchte Wert liegt also genau in der Mitte bei 49,75. Durch entsprechende Überlegung lassen sich alle Zwischenwerte gut schätzen.

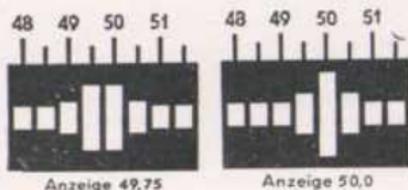


Bild 25

Das Intervall von Zunge zu Zunge darf nicht zu eng gewählt werden, da sich sonst die Zungen gegenseitig beeinflussen. Am günstigsten ist ein Abstand von etwa 1%.

Spannungsänderungen um $\pm 10\%$ haben keinen Einfluß auf die Frequenz-Anzeige. — Die Fehlergrenze der Zungenfrequenzmesser liegt bei den unteren und mittleren Meßbereichen bei 0,3%, bei den höheren bei 0,5%.

In Verbindung mit einem kleinen Wechselstrom-Induktor können Zungenfrequenzmesser auch für Drehzahl-Fernmessung benutzt werden (Seite 2).

Werden die abgestimmten Stahlzungen ohne den Elektromagneten an den feststehenden Teil einer umlaufenden Maschine gelegt, so wird die durch die umlaufende Welle erzeugte Erschütterung auf die Stahlzungen übertragen; es gerät dann diejenige Zunge in Schwingung, deren Eigenschwingungszahl mit der Drehzahl der Welle übereinstimmt (**Vibrationstachometer** Seite 2).

Zeiger-Frequenzmesser

Für Niederfrequenzmessungen wird ein Gerät verwendet, das grundsätzlich die Resonanzeigenschaften eines elektrischen Schwingungskreises benutzt. In der praktischen Ausführung dient zur Anzeige ein Elektrodynamometer besonderer Bauart. Die Anzeige des Gerätes ist von Spannungsschwankungen um $\pm 10\%$ unabhängig. Nach diesem Prinzip wird z. B. ein Frequenzschreiber von besonders hoher Meßgenauigkeit gebaut, dessen Meßbereich zwischen ± 1 Hz (z. B. 49..51 Hz) und ± 5 Hz (z. B. 45..55 Hz) liegt. Die nutzbare Papierstreifenbreite beträgt 120 mm. Die Fehlergrenze liegt bei $\pm 0,1\%$. Das Gerät ist weitgehend spannungs- und temperaturunabhängig.

In Bild 26 ist das Grundprinzip dargestellt, nach dem ein Gerät für Frequenzen bis etwa 100 kHz arbeitet. An die Wechselstromquelle, deren Frequenz gemessen werden soll, wird der Gegentakt-Transformator T angeschlossen. Die Spannungen der beiden Sekundärwicklungen sind an die negativ vorgespannten Gitter zweier Laderöhren I und II gelegt. Da Wicklung 2 in umgekehrter Polung wie I angeschlossen ist, wird z. B. in einem Augenblick an Gitter I durch die obere Halbwelle des Wechselstromes eine positive und an Gitter II eine negative Vorspannung sein; Röhre I wird leitend, der Kondensator C erhält von der Batterie eine positive Ladung. Bei der nächsten Halbwelle wird Röhre II leitend und lädt den Kondensator auf eine negative Spannung um. So wird C in jeder Periode einmal umgeladen. Das Drehspul-Anzeigegerät Hz bildet den zeitlichen Mittelwert der Ladestromstöße von Röhre I, der der Frequenz des Wechselstromes verhältnismäßig ist.

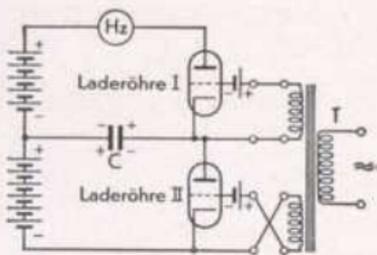


Bild 26

Die für die praktischen Anforderungen umgeänderte Schaltung dieses Frequenzzeigers ergibt für die Frequenzen bis etwa 10 kHz einen Meßfehler von $\pm 0,5\%$ und für Frequenzen von 10..60 kHz einen solchen von $\pm 1\%$.

Noch höhere Frequenzen werden mit dem sog. Wellenmesser gemessen, der im wesentlichen aus einem abgestimmten Schwingungskreis besteht.

Gaskonzentration

Bei der rein chemischen Analyse von Gasgemischen wird jeweils in größeren Zeitabständen ein Meßwert erzielt. Im Gegensatz dazu ermöglichen die elektrischen Gaskonzentrationsmesser fortlaufende Anzeige und Registrierung, in vielen Fällen auch Betätigung von Alarmsignalen oder Reglern. Da diese Geräte ohne merkliche Verzögerung und außerdem selbsttätig und praktisch wartungsfrei arbeiten, haben sie für die gasverarbeitende, chemische und verwandte Industrie große Bedeutung gewonnen.

Für die Messung wird die Wärmeleitfähigkeits-Methode verwendet. Wird ein Edelmetall-Draht von einem konstanten Strom durchflossen und dadurch erwärmt, so erhöht sich sein elektrischer Widerstand entsprechend seiner Temperaturzunahme. Die Temperaturerhöhung hängt ferner davon ab, in welchem Maße das den Draht umspülende Gas die Wärme ableitet. So ist z. B. die Wärmeleitfähigkeit von Luft besser als von Kohlensäure (CO_2). Ein von einer bestimmten Stromstärke durchflossener Draht wird also in CO_2 eine höhere Temperatur annehmen und eine höhere Widerstandszunahme aufweisen als in reiner Luft, d. h. die Widerstandszunahme ist ein Maß für den CO_2 -Gehalt des Gases.

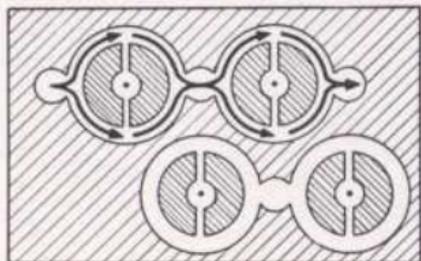


Bild 27

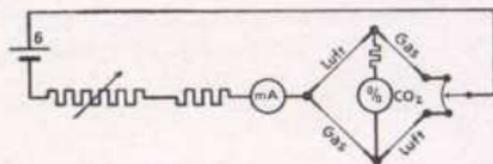


Bild 28

In der praktischen Ausführung sind in einem Metallklotz vier Drähte ausgespannt, durch die der gleiche konstante Strom fließt (Bild 27). Zwei Drähte sind vom Meßgas und zwei von reiner Luft umspült. Die vier Drähte werden zu einer Wheatstone - Brücke geschaltet (Bild 28); jede Differenz in der Wärmeleitfähigkeit der Luft und des Meßgases wirkt sich in einer Widerstandsdifferenz zwischen den Drahtpaaren aus. Diese

wird mit einem Drehspulgerät gemessen, das unmittelbar in Prozent Meßgas geeicht ist. Das Drehspulgerät kann als Anzeige-, Registrier- oder Regelgerät ausgebildet werden.

Die Anzeigergeräte haben die bei elektrischen Geräten üblichen Formen.

Die Registrierung erfolgt gewöhnlich durch Punktschreiber; die von diesen in gleichmäßigen Zeitabständen aufgezeichneten Punkte reihen sich fast lückenlos zu einer Kurve aneinander. Die gleichzeitige Registrierung mehrerer Meßwerte erfolgt zweckmäßig durch Mehrfarben-Punktschreiber, die sich selbsttätig auf die einzelnen Meßstellen umschalten.

Anzeige- und Schreibgeräte können Kontakte für Signalgebung bei Über- oder Unterschreitung bestimmter Konzentrationswerte erhalten.

Die Regelung erfolgt durch „Fallbügelregler“, die mit kräftigen Quecksilber-Kippröhren zur direkten Steuerung von motorgetriebenen Schiebern oder Ventilen ausgerüstet sind. Aufbau und Arbeitsweise der Fallbügelregler siehe Seite 66.

Voraussetzung für genaue Meßergebnisse ist, daß der die Meßdrähte durchfließende Strom stets konstant ist. Das setzt eine Stromquelle mit konstanter Spannung voraus. Als solche kann ein Sammler verwendet werden, wobei jedoch der Strom von Zeit zu Zeit nachzuregeln ist. Zweckmäßiger ist jedoch ein Konstant-Transformator, der an das Wechselstromnetz angeschlossen wird. Durch eine besondere Kunstschaltung werden Spannungsschwankungen des Netzes bis etwa 15% ausgeglichen, so daß die mit Hilfe eines Trockengleichrichters erzeugte Gleichspannung praktisch konstant bleibt.

Das Anzeige-, Schreib- oder Regelgerät kann in praktisch beliebiger Entfernung von der Entnahmestelle angebracht werden. Die Geräte können also zusammen mit anderen Fernmeßgeräten (z. B. für Temperatur, Druck, Menge) und den Steuer- und Schaltgeräten auf einer gemeinsamen Tafel angeordnet werden, so daß jederzeit übersichtliche und bequeme Überwachung und Beeinflussung aller wichtiger Vorgänge von einer Stelle aus möglich ist.

Im allgemeinen wird ein Gaskonzentrationsmesser nur für ein bestimmtes Meßgas geeicht. Als Vergleichsgas wird in den meisten Fällen atmosphärische Luft verwendet. Weicht aber die Wärmeleitfähigkeit des Meßgases sehr stark von der der Luft ab, so wird an deren Stelle ein anderes Vergleichsgas gewählt, das etwa die Wärmeleitfähigkeit des Meßgases besitzt. In diesem Fall erhält die Meßkammer zwei weitere Zuleitungen für das Vergleichsgas. Es kann aber auch ein Vergleichsgas bestimmter Zusammensetzung vollkommen dicht in der Vergleichskammer abgeschlossen werden; dieses wird in eine Glaspatrone, die auch den Meßdraht enthält, gasdicht eingeschmolzen. Diese Anordnung ist stets

dann zu bevorzugen, wenn ein Vergleichsgas konstanter Zusammensetzung nicht oder nur in unzureichender Menge zur Verfügung steht. Auf diese Art läßt sich dann jeder Meßbereich mit höchster Genauigkeit erfassen.

Anwendungsgebiete der elektrischen Gaskonzentrationsmesser

Die Bestimmung erstreckt sich auf anorganische und organische Gase. Ebenso kann die Einrichtung als Gasspurprüfer bei explosiblen oder giftigen Gasen verwendet werden. Eine wichtige Aufgabe ist die Bestimmung der Konzentration von Vergasungsmitteln bei der Durchgasung von Getreide in Silos zur Vernichtung von Schädlingen, insbesondere des zählebigen Kornkäfers. Da das hier verwendete Cartox bzw. Areginal je nach dem Wassergehalt der Körner verschieden stark absorbiert wird, ist unterschiedliche Dosierung erforderlich, um die gewünschte Konzentration im Gas-Luftgemisch zu erreichen. Ähnlich sind die Verhältnisse bei der Durchgasung von Tabak, Baumwolle usw. Eine zuverlässige Kontrolle des Begasungsvorganges ist also notwendig, um einerseits den Erfolg nicht durch ungenügende Dosierung in Frage zu stellen und andererseits eine Überdosierung und damit Verluste zu vermeiden.

Nachweis anorganischer Gase:

CO₂ in Kalzinieröfen, bei Saturationsprozessen, in Gärgasen, Schutzgasen, Kohlensäurequellen, Obstlagern usw.

SO₂ in Röstgasen für die Schwefelsäure-Fabrikation, für die Sulfitlaugbereitung in der Papier-, Zellstoff-, Bleich- und Zuckerindustrie.

H₂ in Luft oder sonstigen Gasen (Gasspurprüfung).

H₂-Verunreinigungen bei Benzin-, NH₃- und sonstigen Synthesen.

NH₃ bei der Salpetersäure-Fabrikation usw.

O₂ in H₂, O₂ in N₂, N₂ in O₂, Cl₂ in Luft, O₃ in Luft, usw.

Organische Gase

Lösungsmitteldämpfe, Aceton-, Benzin-, Benzol-, Alkoholdämpfe in der Kunstseide-, Zellulose- und Filmfabrikation, in Destillations-, Extraktions- und Absorptionsanlagen, sowie als Spurenprüfer in der atmosphärischen Luft zur Vermeidung von Explosionen und Vergiftungen.

Vergasungsmittel

Areginal, Cartox, Äthylen-Oxyd, Blausäure bei der Durchgasung von Getreide, Tabak, Baumwolle usw. (Schädlingsbekämpfung), zur Einstellung der Mindestkonzentration zur Vermeidung von Explosionen und Vergiftungen.

Besonders ausgedehnte Verwendung finden die elektrischen Gaskonzentrationsmesser bei der Dampfkesselüberwachung als

Rauchgasprüfer

Die Rauchgase enthalten CO_2 (Kohlensäure) und $\text{CO} + \text{H}_2$ (Kohlenoxyd und Wasserstoff). Der CO_2 -Gehalt ist ein Maß für den vorhandenen Luftüberschuß einer Feuerung, $\text{CO} + \text{H}_2$ stellen den Anteil an unverbrannten Gasen, also Wärmeverluste dar. Die Wirtschaftlichkeit einer Feuerung ist dann am größten, wenn im Rauchgas möglichst viel CO_2 und möglichst wenig $\text{CO} + \text{H}_2$ enthalten sind, d. h. wenn mit geringstem Luftüberschuß eine möglichst vollkommene Verbrennung erzielt wird. Die größte Wirtschaftlichkeit und damit erhebliche Einsparungen an Feuerungsmaterial lassen sich nur durch eine fortlaufende Überwachung erzielen. Die Anzeigegeräte werden deshalb unmittelbar am Kessel gut sichtbar für die Heizer eingebaut.

Die CO_2 -Messung wird nach der oben beschriebenen Wärmeleitfähigkeits-Methode vorgenommen und der CO_2 -Gehalt am Drehspulgerät unmittelbar abgelesen.

Die Messung von $\text{CO} + \text{H}_2$ erfolgt nach einem ähnlichen Verfahren. $\text{CO} + \text{H}_2$ werden durch einen elektrisch vorbeheizten Meßdraht katalytisch verbrannt (Bild 29). Dadurch steigt die Temperatur und der Widerstand

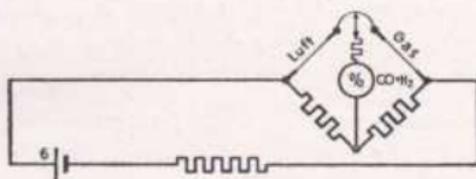


Bild 29

des Meßdrahtes. Ähnlich wie bei dem CO_2 -Messer ist auch hier der Meßdraht mit einem von Luft umspülten Vergleichsdraht und dem Drehspulgerät in Brückenschaltung verbunden, so daß die Widerstandserhöhung des Meßdrahtes als Prozent $\text{CO} + \text{H}_2$ abgelesen werden kann.

Tritt im Rauchgas reichlich Wasserstoff auf, so ist eine Wasserstoff-Verbrennungskammer zu verwenden, die den Wasserstoff vor Eintritt des Rauchgases in die CO_2 -Meßkammer katalytisch verbrennt. Die Wärmeleitfähigkeit des Wasserstoffes weicht nämlich stark von der des CO_2 ab und würde so die Messung fälschen.

Enthält das Feuerungsmaterial Schwefel oder sonstige aggressive Bestandteile, so wird das Gas vor Eintritt in den Geber gewaschen. Eine Fallrohrpumpe saugt das Rauchgas unabhängig vom Gegenzug in konstantem Strom an, wäscht mechanische Verunreinigungen und SO_2 aus und führt das Kondenswasser aus der Gasentnahmeleitung sowie der H_2 -Verbrennungskammer ab.

Kapazität

Einheit: Farad (F). 10^{-6} F = 1 μ F (Mikrofarad); 10^{-12} F = 1 pF (Picofarad); 1 F = $9 \cdot 10^{11}$ cm (elektrostatische Einheiten).

Messung der Kapazität durch Strom- und Spannungsmessung

Wird an die Kapazität C die Wechselspannung U von der Frequenz f angelegt, so beträgt der Ladestrom

$$I = U \cdot 2 \pi f \cdot C \text{ (Ampere)}$$

Wird I in Ampere, U in Volt und f in Hertz gemessen, so ist

$$C = \frac{I}{2 \pi f \cdot U} \text{ (Farad)}$$

Diese Beziehungen gelten exakt nur bei sinusförmigem Wechselstrom und bei reinen Kapazitäten (verlustfreien Kondensatoren).

Zur Messung der Spannung wird ein elektrostatischer Spannungsmesser verwendet, dessen Eigenkapazität jedoch sehr klein im Verhältnis zu C sein muß, damit das Meßergebnis genügend genau wird.

Messung der Kapazität durch ballistisches Galvanometer

Im Bild 30 ist C_x die unbekannte, zu messende Kapazität, G ein ballistisches Galvanometer, u ein Umschalter. Auf Stellung 1 des Umschalters wird die Kapazität bei einer Spannung U geladen. In Stellung 2 wird C_x über das ballistische Galvanometer entladen. Ist α der Zeigerausschlag des Galvanometers und c_b die ballistische Galvanometer-Konstante, so ist:

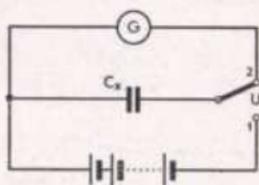


Bild 30

$$C_x = \frac{c_b \cdot \alpha}{U} \text{ (Farad)}$$

Die Messung der unbekanntenen Kapazität C_x kann auch durch Vergleich mit einer bekannten Kapazität C durchgeführt werden. Jede der beiden Kapazitäten wird wie oben bei der Spannung U geladen und über das ballistische Galvanometer entladen. Sind die beiden Zeigerausschläge α und α_x , so gilt:

$$C_x = C \cdot \frac{\alpha_x}{\alpha} \text{ (Farad)}$$

Kapazitäts-Meßbrücke

In Bild 31 sind R_1 und R_2 induktions- und kapazitätsfreie, regelbare Widerstände, C ist eine bekannte, C_x die unbekannte, zu messende Kapazität, G ein Wechselstrom-Nullgerät (Telefonhörer oder Vibrations-Galvanometer). Der regelbare Widerstand R_3 soll vorläufig unberücksichtigt bleiben. Die Messung wird mit Wechselstrom durchgeführt, der in der Regel aus einem Sammler oder einer Taschenlampen-Batterie über einen Summer erzeugt wird.

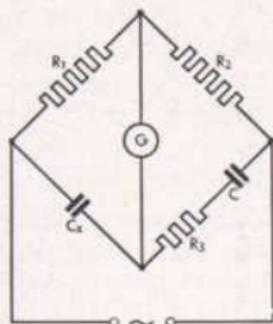


Bild 31

Werden die Widerstände R_1 und R_2 so eingeregelt, daß im Nullgerät kein Strom mehr fließt, so ist:

$$\frac{C_x}{C} = \frac{R_2}{R_1} \text{ oder } C_x = C \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Der regelbare Widerstand R_3 (Phasen-Abgleichwiderstand) dient dazu, scharfe Einstellung des Stromminimums im Nullgerät zu erzielen, wenn die zu messenden Kondensatoren verlustbehaftet sind.

Bei der praktischen Ausführung der Prüfung werden an Stelle des Widerstandes R_1 zur Erzielung mehrerer Meßbereiche mehrere dekadisch abgestufte, umschaltbare Widerstände verwendet, ebenso werden für C aus dem gleichen Grunde mehrere verschieden große umschaltbare Kondensatoren eingebaut.

Zeiger-Kapazitätsmesser

Dieser wird mit Vorteil dann verwendet, wenn größere Mengen gleichartiger Kondensatoren zu messen sind.

Nach Bild 32 erzeugt die an der Spannung U liegende Spule S_1 im Joch E ein Wechselfeld. In diesem bewegen sich die starr miteinander verbundenen Spulen S_2 und S_3 . Der zu messende Kondensator C_x ist in Reihe mit der Spule S_2 geschaltet, wodurch in der Spule S_3 ein Drehmoment im Uhrzeigersinn erzeugt wird. Werden jedoch die Spulen aus der Waagerechten herausgedreht, so wird in S_2 eine mit dem Drehwinkel wachsende Spannung induziert, die ein entgegengesetztes Drehmoment erzeugt („elektrische Feder“). Der resultierende Zeigerausschlag ist nur abhängig von der Größe des Kondensators C_x , nicht aber von der Höhe und Frequenz der Meßspannung.

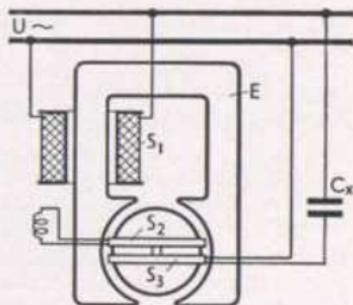


Bild 32

Leistung

Einheit: Watt (W);
 $10^3 \text{ W} = 1 \text{ kW}$ (Kilowatt),
 $10^6 \text{ W} = 1 \text{ MW}$ (Megawatt).

Ist U die Spannung in V, I der Strom in A und φ der Phasenwinkel zwischen U und I , so ist die Leistung N_w :

Bei Gleichstrom:
 $N_w = U \cdot I$ (Watt)

bei Wechselstrom:
 $N_w = U \cdot I \cdot \cos \varphi$

bei Drehstrom:
 $N_w = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$
(U = verkettete Spannung).

Für die nachstehenden Betrachtungen werden elektrodynamische Meßgeräte (Dynamometer) zugrundegelegt.

Das elektrodynamische Meßwerk. Die bewegliche Spannungsspule mit Zeiger dreht sich bei Stromdurchgang im Feld der Stromspule, bis die Gegenkraft der Spiralfeder dem Drehmoment das Gleichgewicht hält.

Bei Präzisions-Geräten für genaue Messungen wird das eisenlose Meßwerk bevorzugt (Bild 34), das bei Gleich- und Wechselstrom bis zu einigen hundert Hertz und bei allen Kurvenformen richtig zeigt. Das eisenlose Meßwerk in der einfachen Ausführung nach Bild 34 ist nicht unabhängig von fremden magnetischen Feldern; daher wird heute allgemein die astatische Ausführung nach Bild 36 bevorzugt (Seite 24).

Bei Betriebs-Geräten wird vorwiegend das eisengeschlossene

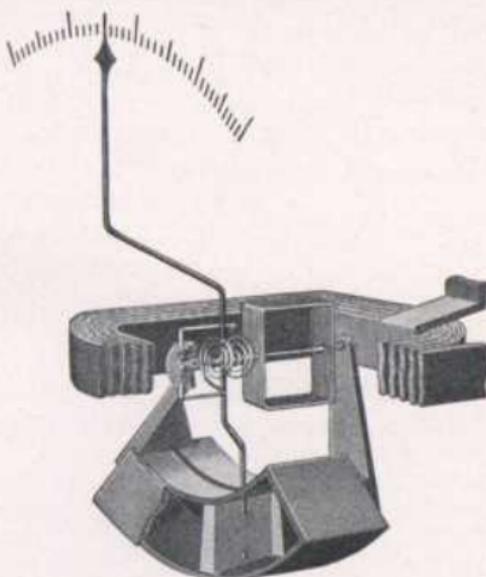


Bild 34

Eisenloses elektrodyn. Meßwerk

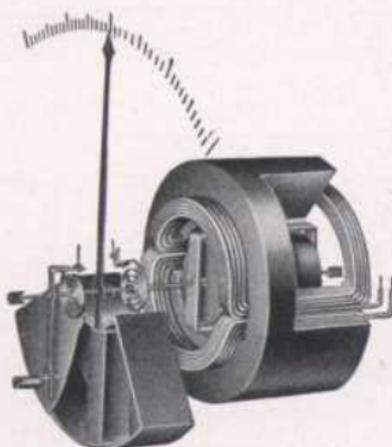


Bild 35

Eisengeschlossenes elektrodyn. Meßwerk

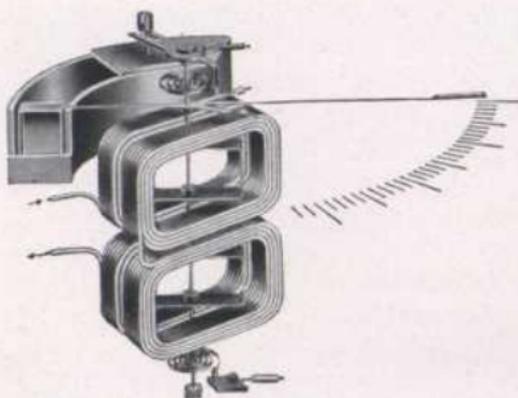


Bild 36
Astatisches eisenloses Meßwerk

werden so in Reihe geschaltet, daß die Fremdfeldfehler des oberen Meßwerks denen des unteren entgegengesetzt sind.

b) Zur Summierung von mehreren Einzel-Leistungen, hauptsächlich bei Drehstrom mit ungleich belasteten Phasen (meistens beim eisengeschlossenen Meßwerk).

Meßwerk verwendet (Bild 35). Der Eisenschluß bewirkt stärkeres Drehmoment des Zeigers und schützt gegen den Einfluß fremder Felder. Der Eisenfehler wird durch Wahl besonderer Eisensorten so niedrig gehalten, daß er bei technischen Messungen nicht ins Gewicht fällt.

Leistungsmesser mit mehreren Meßwerken

Die beweglichen (Spannungs-) Spulen sitzen auf gemeinsamer Achse, so daß sich ihr Drehmoment addiert. Verwendung: a) Beim eisenlosen Meßwerk, um den Fremdfeld-Einfluß auszuschalten (astatisches Meßwerk, Bild 36). Die Spulen

Die wichtigsten Fälle der Leistungsmessung:

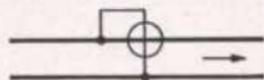


Bild 37

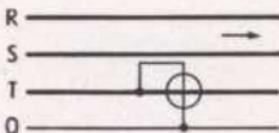


Bild 38

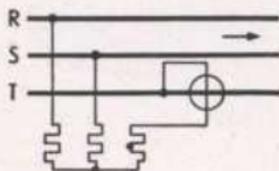


Bild 39

1. Gleichstrom (Bild 37). Die Leistungsmessung hat nur dann Interesse, wenn die Spannung stark schwankt.

2. Wechselstrom (Bild 37).

3. Drehstrom mit gleichbelasteten Phasen u. mit zugänglichem Nullpunkt (Bild 38). Es wird nur die Leistung einer Phase (Strom \times Sternspannung) gemessen und der abgelesene Wert mit 3 multipliziert.

4. Drehstrom mit gleichbelasteten Phasen ohne zugänglichem Nullpunkt (Bild 39). Durch drei in Stern geschaltete Widerstände wird ein künstlicher Spannungsnulldpunkt gebildet und dann wie unter 3. gemessen.

5. Drehstrom mit ungleich belasteten Phasen mit Nulleiter (Bild 40). Die Messung wird auf 3 Wechselstrom-Messungen zurückgeführt, die addiert die Gesamtleistung ergeben. Die drei Meßwerke können in einem einzigen Gerät so angeordnet sein, daß sich ihre Drehmomente mechanisch addieren.

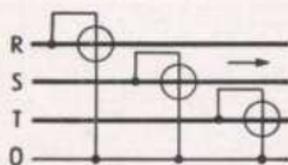


Bild 40

6. Drehstrom mit ungleich belasteten Phasen ohne Nulleiter (Bild 41). Die Messung erfolgt nach der Zwei-Leistungsmesser-Methode, bei der die Anzeigen der beiden Leistungsmesser zu addieren sind. Die zwei Meßwerke können in einem Gerät so angeordnet sein, daß sich die zwei Leistungen mechanisch addieren.

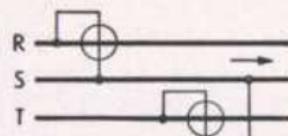


Bild 41

Bei Phasenverschiebung über 60° zeigt bei Schaltung nach Bild 41 (bei Verwendung von zwei Geräten) einer der beiden Leistungsmesser einen negativen Ausschlag. Durch Vertauschen der Spannungsanschlüsse wird dieser positiv und ist dann vom Ausschlag des anderen Gerätes zu subtrahieren. — Bei Messungen an Netzen mit Erdschluß verliert die Zwei-Leistungsmesser-Methode an Genauigkeit. Bei genauen Messungen ist deshalb in Zweifelsfällen die Messung mit drei Leistungsmessern nach Bild 10 vorzunehmen; die dort am Nulleiter angeschlossenen Spannungsleitungen werden hier zu einem künstlichen Nullpunkt zusammengeschlossen. Dabei ist Voraussetzung, daß die Widerstände der 3 Spannungspfade gleich groß und für die Sternspannung bemessen sind.

Leistungsmessung bei großen Strömen und hohen Spannungen

Bei Gleichstrom erfolgt die Erhöhung des Strommeßbereiches durch Nebenwiderstände, des Spannungsmebereiches durch Vorwiderstände (Bild 42).

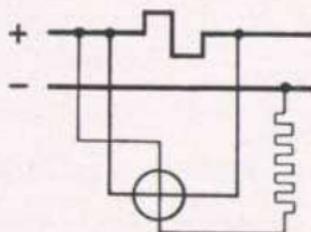


Bild 42

Bei Wechsel- und Drehstrom kommen für größere Ströme Stromwandler und für höhere Spannungen getrennte Vorwiderstände oder Spannungswandler in Frage. Hochspannungsmessungen in Wechsel- und Drehstrom sind nach Möglichkeit nur unter Verwendung von Strom- und Spannungswandlern vorzunehmen, damit die Hochspannung vom Messenden und vom Meßgerät ferngehalten wird.

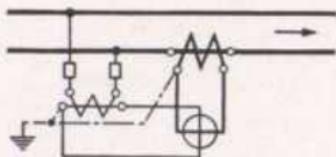


Bild 43

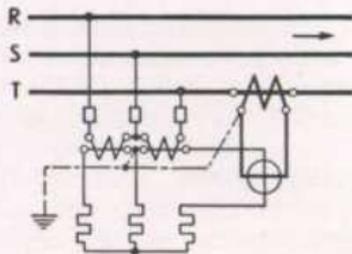


Bild 44

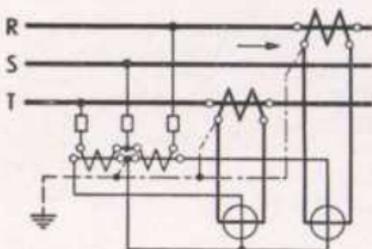


Bild 45

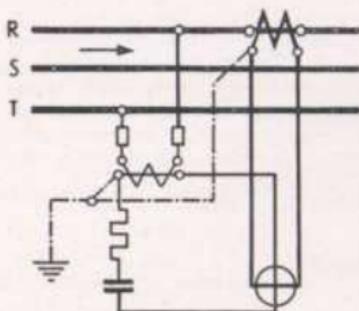


Bild 46

Die nebenstehenden Schaltbilder zeigen Hochspannungsmessung in Wechselstrom (Bild 43), in Drehstrom mit gleichbelasteten Phasen ohne Nulleiter (Bild 44), und in Drehstrom mit ungleich belasteten Phasen ohne Nulleiter (Bild 45).

Bei Drehstrom mit gleichbelasteten Phasen kann durch Schaffung einer Kunstphase im Meßgerät ein Wandler eingespart werden. Die Messung ist dann jedoch nur bei einer bestimmten Frequenz richtig (Bild 46).

Bei Verwendung von Strom- und Spannungswandlern werden beide Sekundärspulen auf Erd-Potential gebracht (s. Schaltbilder). Unterlassung der Erdung kann unzulässig hohe Spannungen zwischen den beiden Spulen und damit Beschädigung des Meßwerks zur Folge haben. Werden nur Strom- und keine Spannungswandler benutzt, so ist bei der Anbringung von etwaigen Erd- und Ausgleichverbindungen zur Vermeidung von Kurzschlüssen und Überschlügen Vorsicht geboten.

Stromwandler dürfen, solange durch die Primärwicklung Strom fließt, auf der Sekundärseite niemals geöffnet werden, da an den geöffneten Sekundärklemmen lebensgefährliche Spannungen entstehen können. Aus dem gleichen Grunde dürfen sie auf der Sekundärseite niemals gesichert werden.

Bei Verwendung von Strom- und Spannungswandlern ist weiter zu beachten, daß die Leistung des Wandlers mindestens ebenso groß ist wie der Eigenverbrauch des Meßgerätes, besonders wenn außer dem Leistungsmesser noch andere Meßgeräte z. B. Strommesser, Zähler usw. angeschlossen sind. Auch der Verbrauch in den Verbindungsleitungen ist bei Stromwandlern gegebenenfalls zu berücksichtigen. Ist die Leistung des Meßwandlers zu klein, so verringert sich vor allem die Meßgenauigkeit.

Bei Verwendung von Meßwandlern ist bei der Auswertung der Messung der Zeigerausschlag mit dem Übersetzungsverhältnis der Meßwandler zu multiplizieren, falls das noch nicht bei der Eichung berücksichtigt ist.

Beispiel: Ein Leistungsmesser für 5 A und 150 V, Skala 0...750 W, wird an Stromwandler 100/5 A und Spannungswandler 6000/100 V angeschlossen; der Zeiger stehe auf dem Teilstrich 450. Die gemessene Leistung ist:

$$450 \cdot \frac{100}{5} \cdot \frac{6000}{100} = 540\,000 \text{ W} = 540 \text{ kW.}$$

Bei der Auslegung der Skala von Leistungsmessern ist der voraussichtliche $\cos \varphi$ zu berücksichtigen, damit die Anzeige möglichst im oberen Teil der Skala erfolgt.

Beispiel: Spannung 10 000/100 V, Strom 500/5 A, $\cos \varphi = 0,78$. Die Leistung beträgt bei Drehstrom $10\,000 \cdot 500 \cdot 0,78 \cdot \sqrt{3} = 6630 \text{ kW}$; die Skala erhält eine Teilung 0...7000 kW. Bei $\cos \varphi = 1$ würde eine Teilung 0...9000 gewählt werden.

Für Messungen bei sehr kleinem Leistungsfaktor, z. B. $\cos \varphi = 0,1$, sind besondere Leistungsmesser entwickelt worden, bei denen die Stromspule um das Zehnfache und die Spannungsspule um das Doppelte dauernd überlastbar sind.

Bei genauen Messungen sowie bei Messungen von kleinen Leistungen ist der Eigenverbrauch des Spannungs- bzw. Strompfades zu der gemessenen Leistung zu addieren bzw. von ihr zu subtrahieren, je nachdem die von der Stromquelle abgegebene oder die vom Verbraucher aufgenommene Leistung festgestellt werden soll. Es sind die folgenden zwei Schaltungen zu unterscheiden:

a) Die Spannung wird *vor* dem Strompfad abgegriffen. Der Eigenverbrauch des Strompfades ist zu berücksichtigen (Bild 47).

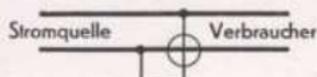


Bild 47

b) Die Spannung wird *hinter* dem Strompfad abgegriffen; der Eigenverbrauch des Spannungspfades ist zu berücksichtigen (Bild 48).

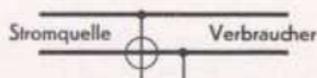


Bild 48

Blindleistung

Die Blindleistung wird dargestellt durch $U \cdot I \cdot \sin \varphi$ bei Wechselstrom und $\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$ bei Drehstrom.

Die Messung der Blindleistung unterscheidet sich von der Wirkleistungsmessung grundsätzlich dadurch, daß der Strom im Spannungspfad gegenüber der Wirkleistungsmessung um 90° phasenverschoben ist. Bei Blindleistungsmessern für Wechselstrom erfolgt die Phasenverschiebung künstlich, z. B. durch einen im Meßgerät eingebauten Kondensator; bei Blindleistungsmessung

von Drehstrom werden Wirkleistungsmesser verwendet, die an um 90° verschobene Spannungen angeschlossen werden.

Beispiele:

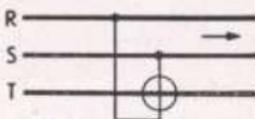


Bild 49

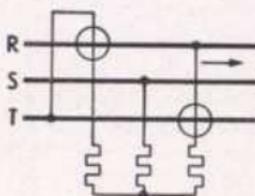


Bild 50

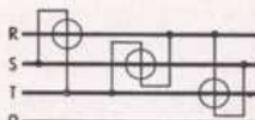


Bild 51

1. Gleichbelasteter Drehstrom mit oder ohne zugänglichen Nullpunkt (Bild 49). Bei der Auswertung der Ablesung ist zu berücksichtigen, daß die Spannungsspitze an der verketteten Spannung (= Sternspannung $\cdot \sqrt{3}$) liegt.

2. Ungleichbelasteter Drehstrom ohne Nulleiter (Bild 50). Die Messung ist bei dieser Schaltung nur dann richtig, wenn die drei Spannungen des Drehstromnetzes gleich sind. Im allgemeinen genügt die erreichbare Genauigkeit für Betriebsmessungen.

Bei genauen Messungen werden zwei Wechselstrom-Blindleistungsmesser in Schaltung ähnlich Bild 41 verwendet. Die Auswertung der Messung erfolgt wie Seite 25, unter 6.

3. Ungleichbelasteter Drehstrom mit Nulleiter (Bild 51). Die Anzeige der drei Leistungsmesser ist zu addieren und die Summe durch $\sqrt{3}$ zu dividieren, da die Spannungsspitzen an der verketteten Spannung (= Sternspannung $\cdot \sqrt{3}$) liegen. Die Messung ist nur dann richtig, wenn die drei Spannungen gleich sind. Im allgemeinen genügt die erreichbare Genauigkeit für Betriebsmessungen.

Bei genauen Messungen werden drei Wechselstrom-Blindleistungsmesser verwendet und die drei gemessenen Blindleistungen addiert.

Erweiterung des Meßbereiches wie Seite 25. Ausnahme: Bei Wechselstrom-Blindleistungsmessern kann der Spannungsbereich nur mit Spannungswandlern (nicht mit Vorwiderständen) erweitert werden.

Leistungsmeßkoffer (siehe auch Bild 126, Seite 82)

Eine wesentliche Vereinfachung der Leistungsmessung in Wechsel- und Drehstromnetzen bringen die sog. „Leistungsmeßkoffer“, bei denen die Geräte für Leistungs-, Strom- und Spannungsmessung zusammen mit den erforderlichen Wandlern, Vorwiderständen und Umschaltern in einem handlichen Tragkoffer zusammengebaut sind. Der Meßkoffer wird in den Zug der Leitungen gelegt, es brauchen also lediglich die ankommenden und abgehenden Leitungen

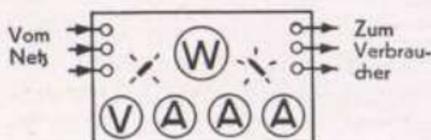


Bild 52

angeschlossen zu werden, wobei die Phasenfolge beliebig ist. Fehlschlüsse sind also praktisch ausgeschlossen. Die Strom- und Spannungs-Meßbereiche werden durch Umschalter gewählt. Die Auswertung der Messung ist ebenfalls einfach, da die Ablesung lediglich mit einem aus einer Tabelle entnommenen Faktor multipliziert werden braucht.

Leistungsfaktor

Aus den Formeln S. 23 ergibt sich für Wechsel- bzw. Drehstrom:

$$\cos \varphi = \frac{N}{U \cdot I} \quad \text{bzw.} \quad \cos \varphi = \frac{N}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}$$

Der Wert für $\cos \varphi$ heißt Leistungsfaktor. Er kann also bestimmt werden, wenn Strom, Spannung und Leistung gemessen werden.

Bei Drehstrom gilt die Formel nur bei gleichbelasteten Phasen. Dabei ist für U die verkettete Spannung einzusetzen. Bei Drehstrom mit ungleichbelasteten Phasen ist der $\cos \varphi$ nur ein angenäherter Mittelwert aus drei Einzelwerten. Er ist um so ungenauer, je verschiedener die Belastung der drei Phasen ist. Bei genauen Messungen ist deshalb für jede Phase der $\cos \varphi$ einzeln zu messen.

Leistungsfaktormesser (Phasenmesser)

Zur Messung des $\cos \varphi$ bei Wechsel- und Drehstrom wird ein elektrodynamisches Meßwerk verwendet (Bild 53). Dieses besteht aus einer auf der Zeigerachse befestigten, beweglichen Spule und zwei festen Spulenpaaren, von denen jedes aus zwei gegenüberliegenden Spulen besteht.

Durch die bewegliche Spule fließt der Meßstrom. Von den beiden festen Spulenpaaren liegt das eine an der Spannung, die in Phase mit dem Meßstrom ist und die andere an einer gegen den Meßstrom um 90° verschobenen Spannung. Bei Meßwerken für Drehstrom wird das eine der festen Spulenpaare an die dem Meßstrom zugeordnete Sternspannung, das andere an die gegen diese um 90° phasenverschobene verkettete Spannung gelegt. Bei Meßwerken für Wechselstrom wird die Phasenverschiebung um 90° durch einen induktiven Widerstand erzielt. Der Einstellwinkel der beweglichen Spule gibt unmittelbar den gesuchten Phasenwinkel an, unabhängig von der Größe des Stromes und der Spannung. Änderungen des Stromes und der Spannung ändern nur die Einstellkraft; damit diese nicht zu klein wird, muß im Meßstromkreis mindestens 20% des Nennstromes fließen. Im stromlosen Zustand hat der Zeiger keine feste Ruhelage, da keine Rückstellfeder vorhanden ist.

Die Stromspule wird in der Regel für 5 A bemessen; bei größeren Strömen ist daher ein Stromwandler erforderlich.

Für Elektrizitätswerke, die mit anderen parallel arbeiten, werden **Leistungsfaktormesser mit vier Quadranten** gebaut, mit denen der Leistungsfaktor bei Abgabe und Bezug sowie bei Vor- und Nacheilung gemessen werden kann.

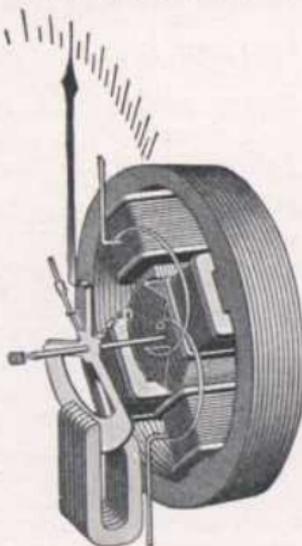


Bild 53

Leitfähigkeit

Bei wässrigen Flüssigkeiten wird nicht der Widerstand in Ohm, sondern der reziproke Wert, die Leitfähigkeit in Siemens (S) angegeben. Es ist zum Beispiel $10 \text{ S} = 0,1 \Omega^{-1}$.

Die Leitfähigkeit eines Würfels von 1 cm Seitenlänge ist der Leitwert (Einheit S cm^{-1}).

Zur Messung der Leitfähigkeit wird die Flüssigkeit in ein Gefäß aus Isolierstoff (z. B. Glas) gegossen, in das Elektroden eintauchen, die von der Flüssigkeit nicht angegriffen werden (z. B. aus Silber oder Platin).

Für die Messung wird Wechselstrom verwendet, da die bei Gleichstrom auftretenden Polarisations-Erscheinungen die Messung fälschen würden. Weiter ist zu berücksichtigen, daß die Leitfähigkeit von Flüssigkeiten stark von der Temperatur abhängig ist. Eine Temperaturzunahme von $10 \text{ }^\circ\text{C}$ kann Änderungen der Leitfähigkeit von 20 bis 30% hervorrufen.

Die einfachste Leitfähigkeits-Meßeinrichtung besteht aus einem empfindlichen Strommesser für Wechselstrom (z. B. Drehspulgerät mit Trockengleichrichter), der in Reihe mit den Elektroden an eine konstante Wechselspannung gelegt wird. Die Leitfähig-

keit wird aus dem Quotienten $\frac{\text{Strom}}{\text{Spannung}}$ errechnet.

Genauere Ergebnisse lassen sich mit Hilfe einer Schleifdraht- oder Walzenmeßbrücke mit Summer und Kopfhörer erzielen (vergl. Seite 72). Der Widerstandswert ist in Siemens umzurechnen.

Für Daueranzeige oder Registrierung dienen Wechselstrom-Quotientenmesser oder Kreuzspul-Ohmmeter mit Trockengleichrichter in jedem der beiden Spulenzweige. Die Anzeige dieser Geräte ist unabhängig von den normalen Spannungs- und Frequenzschwankungen des Wechselstromnetzes. Die Geräte können auch mit einer Temperatur-Ausgleichsschaltung ausgeführt werden, so daß sich der gemessene Wert immer auf die gleiche Temperatur (z. B. $20 \text{ }^\circ\text{C}$) bezieht.

Die elektrische Leitfähigkeit von wässrigen Flüssigkeiten ändert sich entsprechend der Konzentration bzw. dem Salzgehalt. Die Leitfähigkeitsmessung hat daher praktische Bedeutung bei der Überwachung von Turbinen-Kondensat auf Eindringen von Kühlwasser, zur Bestimmung des mitgerissenen Kesselwassers im Dampf, ferner für die Überwachung des Kessel-Speisewassers sowie zur Ermittlung der Konzentration von Säuren und Laugen.

Die Mengenummessung strömender Stoffe

(Luft, Gas, Dampf, Flüssigkeit) kann erfolgen durch:

1. Volumenmessung, z. B. Scheiben- oder Kippwassermesser, Gasuhren usw.,
2. Unmittelbare Geschwindigkeitsmessung, z. B. Flügelrad-Wassermesser,
3. Mittelbare Geschwindigkeitsmessung, z. B. Ringwaage oder Mandex-Mengenmesser.

Die Mengemesser unter 1. und 2. dienen vornehmlich zur Zählung und kommen hauptsächlich für kleinere Rohrweiten in Frage. Die Mengemesser unter 3., auf die im nachstehenden eingegangen werden soll, eignen sich in gleicher Weise zur Anzeige, Registrierung und Zählung der Menge und zwar bei allen in der gleichen Praxis vorkommenden Rohrweiten.

Mengenmessung durch mittelbare Geschwindigkeitsmessung (Druckdifferenzverfahren)

Wird die Rohrleitung, durch die der zu messende Stoff fließt, an der Meßstelle durch Einbau eines Drosselgerätes verengt, so entsteht an dieser Einschnürungsstelle eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit. Es wird ein Teil der Druckenergie in Strömungsenergie umgesetzt. Der auf diese Weise am Drosselgerät erzeugte Druckabfall (Wirkdruck)

ist ein Maß für den Durchfluß und wird für die Betätigung der Mengenmeßgeräte nutzbar gemacht. Der Wirkdruck tritt nicht in seiner vollen Höhe als bleibender Druckverlust in Erscheinung, ein Teil des am Drosselgerät erzeugten Druckabfalles wird wieder zurückgenommen.

Die Mengen - Meßeinrichtung besteht also aus dem Drosselgerät und dem mit diesem durch die Wirkdruckleitungen verbundenen Empfangsgerät, das die strömende Menge anzeigt, fortlaufend aufschreibt oder zählt.

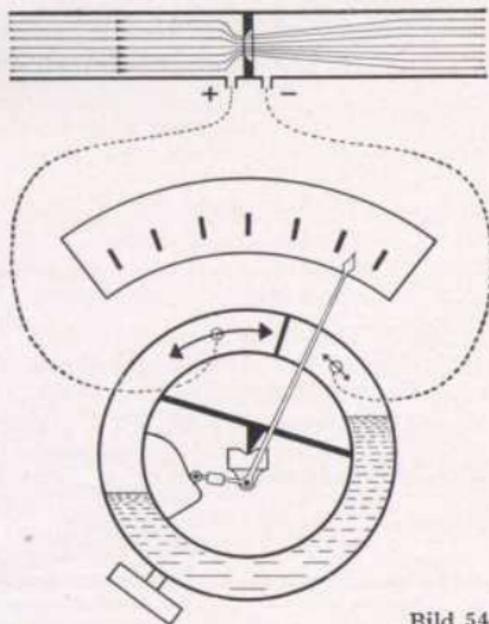


Bild 54

Das Empfangsgerät kann bis zu etwa 50 m entfernt vom Drosselgerät angebracht sein.

Nach dem Druckdifferenz-Verfahren können selbst die größten betriebsmäßigen Durchflußmengen bei allen praktisch vorkommenden Temperaturen und statischen Drücken gemessen werden. Das Verfahren hat den besonderen Vorteil, daß im Meßstrom keine beweglichen Teile verwendet werden, die einer Wartung bedürfen oder dem Verschleiß unterliegen.

Das Drosselgerät

Als Drosselgeräte werden heute hauptsächlich verwendet: Normblende (Bild 55), Normdüse (Bild 56) und Venturirohr (Bild 57).

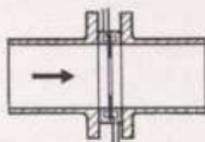


Bild 55

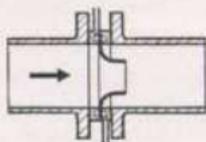


Bild 56

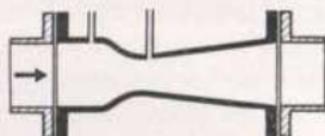


Bild 57

Die durch eine Drossel fließende Menge ist:

$$V = 3600 \cdot f \cdot \alpha \cdot \epsilon \cdot \sqrt{\frac{2g}{\gamma}} \cdot \sqrt{h} \text{ m}^3/\text{h}$$

$$G = 3600 \cdot f \cdot \alpha \cdot \epsilon \cdot \sqrt{2g\gamma} \cdot \sqrt{h} \text{ kg/h}$$

In dieser Formel bedeuten:

V = Durchflußmenge in m³/h

G = Durchflußmenge in kg/h

f = lichter Querschnitt der Drossel in mm²

α = Durchflußzahl

ε = Expansionszahl

g = Erdbeschleunigung = 9,81 m/sec²

γ = Raumbgewicht in kg/m³

h = Differenzdruck in mm WS

Die Durchflußzahl α, auch Beiwert genannt, ist für alle Rohrleitungen, alle Eigenschaften der strömenden Stoffe und für alle mechanischen Ausführungsformen der Drosselgeräte durch eingehende Untersuchungen ermittelt und vom VDI veröffentlicht worden.

Von den obengenannten Drosselgeräten wird nachstehend die Normblende beschrieben, die wegen ihrer geringen Baulänge, der leichten Einbaumöglichkeit und nicht zuletzt ihres günstigen Preises den Vorzug verdient.

Die VDI-Normblende (in Ausführung nach den VDI-Durchflußregeln Din 1952) setzt sich zusammen aus dem Fassungsring mit den beiden Ringkammern und der eigentlichen Blende, die in den Fassungsring eingesetzt ist (Bild 58). An den Fassungsring sind die beiden Wirkdruckentnahmestutzen angeschweißt. Der Wirkdruck gelangt in die Ringkammern durch eine Anzahl Bohrungen, die gleichmäßig auf den ganzen inneren Umfang verteilt sind. Dadurch wird bei etwa ungleichmäßig über den Rohrquerschnitt verteilter Strömung ein mittlerer Wert in der Wirkdruckentnahme erzielt.



Bild 58

Die Einbaustelle der Blende soll in einer möglichst langen, geraden, störungsfreien Rohrstrecke liegen. Die Störung im Gleichlauf der Strömung verursachenden Schieber, Krümmer usw. müssen sich daher in einer bestimmten Mindestentfernung von der Blende befinden, wenn fehlerhafte Beeinflussung des Meßvorganges ausgeschaltet werden soll. Diese Mindestentfernung beträgt etwa $10 \cdot \cdot \cdot 25$ Rohrdurchmesser vor der Blende und etwa 5 Rohrdurchmesser hinter der Blende (untere Werte bei kleinen, obere bei größeren Öffnungsverhältnissen). Wird eine zusätzliche Toleranz von $1 \cdot \cdot \cdot 2\%$ zugestanden, so genügt eine Entfernung von $5 \cdot \cdot \cdot 7$ Rohrdurchmessern vor, und von $1 \cdot \cdot \cdot 2$ Rohrdurchmessern hinter der Blende. Nähere Einzelheiten über die notwendigen geraden Rohrlängen sind in den VDI-Durchflußmesser-Regeln DIN 1952 angegeben.

Da bei **Normblenden für kleine Rohrweiten** die Messung durch Wandrauigkeit und Kaliber-Toleranzen der in der Industrie gebräuchlichen Rohre beeinflusst wird, werden die Normblenden für kleine Rohrweiten mit kalibrierten Präzisions-Ein- und Auslaufrohren entsprechender Länge geliefert. Mit wachsendem Rohrdurchmesser treten diese Fehler zurück, so daß auf diese Rohre verzichtet werden kann.

Die Herstellung von Ringkammer-Normblenden für Rohrweiten über etwa 500 mm Durchmesser wird schwierig; für große Rohrweiten werden deshalb einfache **Scheibenblenden** verwendet. Die Wirkdruckentnahme erfolgt durch Anbohrungen vor und hinter der Blende, die in einem Hohlring zusammengefaßt werden (ringförmige Druckentnahme). Da diese Anordnung (im Gegensatz zu Ringkammer-Normblenden) nicht leicht verschmutzt, wird sie zweckmäßig bei verunreinigten Gasen auch bei kleineren Rohrweiten gewählt. Die Meßgenauigkeit ist fast dieselbe wie bei Ringkammer-Normblenden. — Bei beschränkten Genauigkeitsansprüchen genügt für die Wirkdruckentnahme oft je eine Anbohrung vor und hinter der Blende.

Die Berechnung der Normblende setzt Erfahrung und eingehende Kenntnis der Empfangsgeräte voraus und wird deshalb meistens dem Lieferwerk überlassen. Die Unterlagen für die Berechnung werden in der Regel durch einen Fragebogen eingeholt.

Das Empfangsgerät

ist im Prinzip ein Differenzdruck-Messer, der in Einheiten der Durchflußmenge geeicht ist. Zwischen dem am Drosselgerät erzeugten Wirkdruck und der Durchflußmenge besteht jedoch eine quadratische Beziehung. Zur Erzielung einer abstandsgleichen Skala erhält das Empfangsgerät daher stets eine Radiziereinrichtung.

Als Empfangsgeräte stehen Ringwaage und Strömungsmesser zur Auswahl. Welches der beiden Geräte jeweils am Platze ist, hängt in der Hauptsache vom statischen Druck ab. Allgemein kann gesagt werden: Für Gasmengenmessung bis 1 kg/cm^2 kommt nur die Ringwaage in Frage, für Preßgas, Wasser und Dampf bis 40 kg/cm^2 Ringwaage oder Mandex; dabei überwiegt bei den niedrigen Drücken die Ringwaage, bei den höheren das Mandexgerät. Die Wahl muß von Fall zu Fall getroffen werden. Bei Drücken über 40 kg/cm^2 kommt nur das Mandexgerät in Frage.

Die Ringwaage (Bild 54, Seite 31) ist für die Messung von Gas-, Wasser-, Preßluft- und Dampfmengen bei statischen Drücken bis etwa 40 kg/cm^2 geeignet.

Das Meßwerk wird gebildet durch einen zur Hälfte mit Flüssigkeit gefüllten Hohlring, der drehbar gelagert ist. Der Raum über der Flüssigkeit ist durch eine Trennwand in zwei Kammern geteilt, die durch die Wirkdruckleitungen mit den Druckentnahmestellen des Drosselgerätes verbunden sind. Der Hohlring wird durch die Wirkung der Druckdifferenz auf die Trennwand soweit gedreht, bis durch ein Gegengewicht der Gleichgewichtszustand wieder hergestellt ist.

Die Ausführung des Waageringes und die Wahl der Füllflüssigkeit richtet sich nach dem statischen Druck. Niederdruck-Ringwaagen (bis etwa 1 kg/cm^2) haben in der Regel Messingtrommel mit Wasserfüllung, wenn nicht durch das Meßmedium eine Trommel aus anderem Material erforderlich wird. Hochdruck-Ringwaagen (bis etwa 40 kg/cm^2 statischer Druck) erhalten einen Stahlring mit Quecksilberfüllung.

Die Ringwaage-Mengenmesser werden in der Regel mit mehreren Meßbereichen ausgeführt, die in einfacher Weise dadurch erzielt werden, daß an das Gegengewicht Gewichte an- oder abgesetzt werden, was während des Betriebes möglich ist. Der Anzeigebereich ändert sich beim Wechseln der Gewichte stets im Verhältnis der Quadratwurzeln der Wirkdruckbereiche.

Die Skala kann in Eichteilung (d. h. in Einheiten der zu messenden Menge) oder in Zehnteilung ausgeführt sein. Letztere Teilung ist dann am Platz, wenn die Meßbereiche öfter gewechselt werden.

Die Ringwaage-Schreibgeräte sind Linienschreiber. Die Aufzeichnung erfolgt durch eine am Zeiger befestigte Glasfeder auf einem

frei ablaufenden Schreibstreifen. Der zeitgenaue Papiervorschub wird betätigt entweder durch einen kleinen Synchronmotor zum Anschluß an das Wechselstromnetz oder durch ein Uhrwerk mit Hand- oder elektrischem Aufzug. Wie groß der stündliche Papiervorschub zu wählen ist, hängt von den Meßwertschwankungen ab; in den meisten Fällen genügen 20 mm/h.

Zur Zählung der Durchflußmenge erhalten Ringwaage-Anzeige- und Schreibgeräte ein mechanisches Zählwerk mit Zahlenrollenwerk, das in Abhängigkeit von der Zeigerstellung betätigt wird.

Die Angaben des Zählers können durch einen Zählsender auf elektrischem Wege auf einen in beliebiger Entfernung angebrachten Fernzähler übertragen werden, der ein elektromagnetisches Zählwerk besitzt. Jedesmal wenn vom Zähler eine volle Einheit vorgeschoben ist, wird vom Zählsender ein Stromimpuls auf den Fernzähler gegeben und dort die gleiche Einheit vorgeschoben.

Der Zeigerstand der Ringwaagegeräte kann durch Elektro-Fernsender über beliebige Entfernungen auf elektrische Anzeige- bzw. Schreibgeräte übertragen werden. Als Betriebsspannung wird dazu $4 \cdot 10^3 \cdot 24$ V Gleichstrom benötigt. Verbrauch etwa 50 mA. Näheres über elektr. Fernübertragung siehe Seite 10.

Das Mandex-Gerät eignet sich für die Messung von Preßgas-, Preßluft-, Wasser- und Dampfmen gen bei statischen Drücken bis etwa 150 kg/cm^2 . Dieses Gerät ist der Natur nach ein Wirkdruckempfänger wie die Ringwaage.

Es besitzt in seinem Aufbau zwei Druckgefäße, die wie die Schenkel eines U-Rohres miteinander verbunden und zum Teil mit Quecksilber gefüllt sind (Bild 59). Im Minusgefäß befindet sich ein Schwimmer, der entsprechend der am Drosselorgan auftretenden Druckdifferenz seine Hubbewegungen ausführt. Der Hub des Schwimmers ist das Maß für die Durchflußmenge. Die Hubbewegungen des Schwimmers werden über Zahnstange und Zahnrad durch eine magnetische Kupplung in den drucklosen Raum des Gerätes übertragen. Zwischen den beiden Hufeisen-Magneten der Kupplung liegt eine Trennwand aus unmagnetischem Stahl.

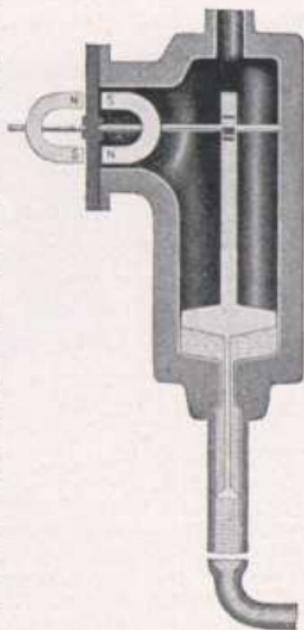


Bild 59

Auf diese Weise wird eine drucksichere, reibungslose und schlupffreie Übertragung erreicht.

Im Gegensatz zur Ringwaage kann das Mandexgerät in der Regel nur für einen Meßbereich ausgeführt werden.

Die Registrierung und Zählung der Durchflußmenge erfolgt in gleicher Weise wie bei den Ringwaage-Geräten durch Linien-schreiber bzw. Zähler. Ebenso kann wie bei diesen elektrische Fernzählung und Fernübertragung des Zeigerstandes vorgenommen werden (vergl. Seite 35).

Wirkdruckleitungen

(Verbindungsleitungen zwischen Drosselgerät und Ringwaage bzw. Mandexgerät). Sie erfordern schon mit Rücksicht auf den Druck sorgfältige Verlegung. Weiter ist grundsätzlich zu beachten:

Gas und Preßluft führen stets Feuchtigkeit, so daß bei Abkühlung Kondensat ausscheidet, welches die Wirkdruckleitungen verstopfen würde. Die Wirkdruckleitungen müssen deshalb mit Gefälle nach einem Entwässerungstopf verlegt werden (Bild 60). Die Blenden müssen mit den Anschlußstutzen nach oben in die Rohrleitung eingesetzt werden. Für die Entwässerung der Blende, sowie zum Ablassen von Kondensat, das sich gegebenenfalls vor oder hinter der Blende sammelt, sind unten an der Blende Entwässerungsöffnungen vorzusehen.

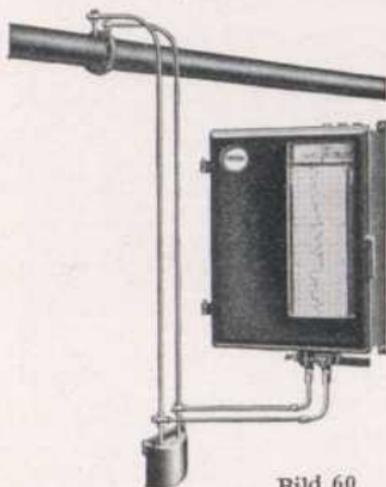


Bild 60

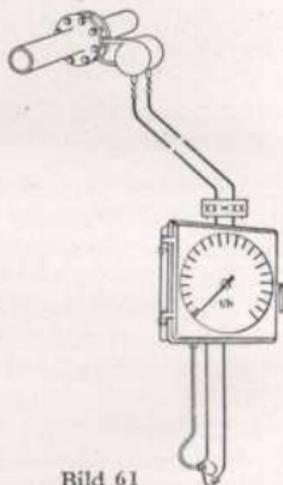


Bild 61

Bei Wasser und Dampf ist der Mengenmesser möglichst unterhalb der Blende anzubringen; die Wirkdruckleitungen sind mit stetem Gefälle nach dem Mengenmesser zu verlegen (Bild 61). Muß der Mengenmesser aus räumlichen Gründen oberhalb der Blende sitzen, so kann an der obersten Stelle eine Entlüftung vorgesehen werden; meistens genügt jedoch gelegentliches Ausblasen. An Blenden für Dampf müssen Ausgleichgefäße angebracht werden, damit in beiden Rohrleitungen stets gleiche Wassersäulen vorhanden sind.

Einfluß des Zustandes der zu messenden Stoffe

Bei der Berechnung des Drosselorgans und bei der Auswertung des Meßergebnisses ist der Zustand des zu messenden Stoffes, d. h. seine Temperatur und sein Druck, bei Gasen außerdem die Feuchtigkeit zu berücksichtigen. Es sind streng voneinander zu unterscheiden: Der Betriebszustand, der Rechenzustand und der Normalzustand. Letzterer hat nur bei Gasen Bedeutung.

Der Betriebszustand herrscht im Augenblick der Messung. Er wird durch den Index „betr“ bezeichnet (z. B. V_{betr} = Volumen im Betriebszustand).

Der Rechenzustand wird der Blendenberechnung zugrunde gelegt. Er ist so zu wählen, daß er sich vom Betriebszustand möglichst wenig unterscheidet. Bezeichnung durch Index „rech“ z. B. V_{rech} .

Der Normalzustand von Gasen bezieht sich auf 0° C und 760 mm QS. Bezeichnung durch Index „o“, z. B. V_0 .

Die Anzeige des Mengennessers ist also nur dann richtig, wenn der augenblickliche Betriebszustand mit dem Rechenzustand übereinstimmt. Bei Abweichungen bedarf die Anzeige einer Korrektur.

Dampf und Preßgas

Die Korrektur kann hier mit großer Annäherung mit Hilfe einer einfachen Faustregel, der sog. „Frankfurter Regel“ erfolgen, die besagt:

Die Zustandsberichtigung der Mengemessung ist nahezu gleich dem halben Betrag der absoluten Druck- und Temperaturschwankung:

Beispiel: Dampfmesser zeigt 9 t/h;

Der Blendenberechnung zugrundegelegter Druck	15	kg/cm ² abs.
Wirklicher Betriebsdruck	16,5	kg/cm ² abs.
Druckschwankung	1,5	kg/cm ²

Die Abweichung des Betriebsdruckes vom Rechendruck beträgt also 10%, die Anzeige ist um 5% zu berichtigen. Da höherer Druck das spezifische Gewicht erhöht und die Berichtigung nach oben. Die Dampfmenge, bezogen auf den Rechendruck von 15 kg/cm² abs. beträgt demnach:

$$9 + 0,45 = 9,45 \text{ t/h.}$$

Ob die Korrektur zum angezeigten Wert addiert oder von ihm subtrahiert wird, ergibt sich aus der Überlegung, daß steigender Druck das spezifische Gewicht erhöht und das spez. Volumen verkleinert, während steigende Temperatur das spez. Gewicht verkleinert und das spez. Volumen erhöht.

Wasser (und anderen Flüssigkeiten)

Zustandsberichtigungen kommen nur selten vor, so daß sich ein Eingehen auf diese an dieser Stelle erübrigt.

Gas von niedrigem Druck

Die Korrektur der gemessenen Werte wird umständlicher, weil nicht nur Druck und Temperatur sowie veränderliche Gaszusammensetzung, sondern auch Feuchtigkeitsänderungen und die Schwankungen des Barometerstandes von Einfluß sind. Bei sehr genauen Messungen muß also die Korrektur unter Berücksichtigung all der genannten Einflüsse errechnet werden.

Die Zustandsänderungen erfolgen nach den Gasgesetzen. Bedeuten T die absolute Temperatur ($273 + t^{\circ}\text{C}$) und P den absoluten Druck (Barometerstand + Überdruck in mm QS), so ist

$$V_{\text{betr}} = V_0 \frac{760}{P_{\text{betr}}} \cdot \frac{T_{\text{betr}}}{273}$$

$$\gamma_{\text{betr}} = \gamma_0 \frac{P_{\text{betr}}}{760} \cdot \frac{273}{T_{\text{betr}}}$$

Diese Zustandsumrechnungen sind nur richtig für trockene Gase. Die industriellen Gase bestehen jedoch meistens aus einer Mischung von Gas und Wasserdampf; in der Regel sind sie feucht gesättigt, wenn die Temperatur $30 \dots 35^{\circ}\text{C}$ nicht überschreitet. (Eine Ausnahme bilden Gase, die sich nach vorhergehender Komprimierung wieder ausdehnen). Der Wasserdampf verhält sich jedoch bei der Zustandsänderung anders als Gas.

Beispiel für die Bestimmung der Menge:

1 m^3 trockenes Gas von 25°C kühlt (bei gleichbleibendem Druck) auf 15°C ab. Die Menge ändert sich dann gemäß obiger Formel:

$$V_{15} = 1 \cdot \frac{273 + 15}{273 + 25} = 0,967 \text{ m}^3$$

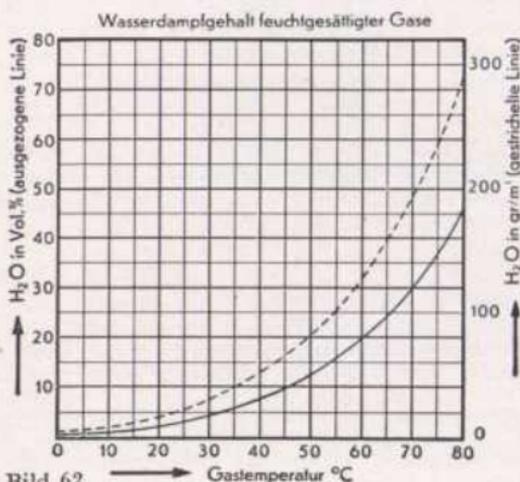


Bild 62

Ist jedoch das Gas feucht-gesättigt, so beträgt gemäß Bild 62 der H_2O -Anteil 3% und somit der trockene Gasanteil 97%. An Stelle von 1 m^3 ist also $0,97 \text{ m}^3$ einzusetzen. Die Menge beträgt dann $0,97 \cdot 0,967 = 0,938 \text{ m}^3$

Der H_2O -Anteil bei 15°C beträgt gemäß Bild 62 etwa 2% des Volumens, also $0,02 \cdot 0,938 = \text{rd. } 0,19 \text{ m}^3$.

Bei Abkühlung von 25°C auf 15°C ändert also 1 m^3 feuchtes Gas das Volumen auf

$$0,938 + 0,19 = 0,957 \text{ m}^3$$

Beispiel für die Bestimmung des Raumgewichtes:

Angenommen wird feucht-gesättigtes Koksgas, das in trockenem Normalzustand das Raumgewicht $0,5 \text{ kg/m}^3$ besitzt. Die Betriebstemperatur sei 33°C , der Gasdruck 755 mm QS . Nach Bild 62 besitzt das Gas bei 33°C 5 Volumenprozent Wasserdampf; die Mischung besteht also aus 95 Raumteilen Trockengas und 5 Raumteilen Wasserdampf.

In den Normalzustand überführt, wiegen dann, wenn das Raumgewicht von Dampf $0,81 \text{ kg/m}^3$ beträgt:

$0,95 \text{ m}^3$ Trockengas	$0,95 \cdot 0,5 = 0,475 \text{ kg}$
$0,05 \text{ m}^3$ Wasserdampf	$0,05 \cdot 0,81 = 0,040 \text{ kg}$
$1,00 \text{ m}^3$ feuchtes Gas	$0,515 \text{ kg}$

$$\gamma_{\text{of}} = 0,515 \text{ kg/m}^3$$

Im Betriebszustand beträgt dann das Raumgewicht:

$$\gamma_{\text{betr f}} = \gamma_{\text{of}} \cdot \frac{P_{\text{betr}}}{760} \cdot \frac{273}{T_{\text{betr}}} = 0,515 \cdot \frac{755}{760} \cdot \frac{273}{306} = 0,456 \text{ kg/m}^3$$

Genau so wird das Raumgewicht im Rechenzustand gefunden.

Die Skalenteilung der Ringwaagen wird allgemein auf trockenes Normalvolumen bezogen, um eine einfache Vergleichsbasis zu haben; es werden also trockene Normal-Kubikmeter abgelesen, vorausgesetzt, daß sich das Gas zur Zeit der Messung im Rechenzustand befindet. Im allgemeinen wird dies nicht der Fall sein. Es weicht vielmehr der Betriebszustand vom Rechenzustand infolge Temperatur- und Druckänderungen ab. Der Ablesewert ist dann zu korrigieren. Das berichtigte Volumen ergibt sich aus der Formel:

$$V_{\text{okorr}} = V_{\text{otr}} \cdot \frac{T_{\text{rech}}}{T_{\text{betr}}} \cdot \frac{P_{\text{betr}}}{P_{\text{rech}}} \cdot \frac{\tau_{\text{betr}}}{\tau_{\text{rech}}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma_{\text{rech f}}}{\gamma_{\text{betr f}}}}; \text{ m}^3/\text{h}$$

Darin bedeuten: V_{otr} = Ablesung an der Ringwaage, τ = Gas minus Feuchtigkeit in Volumen-Prozent, Index tr = trocken, Index f = feucht. Die Werte mit dem Index „rech“ sind aus der Blendenberechnung zu entnehmen. T_{betr} und P_{betr} ergeben sich aus Betriebsmessungen, τ_{betr} ergibt sich durch Multiplikation des Wasserdampfgehaltes in Volumen-Prozent bei Sättigung (Bild 62) mit dem Feuchtigkeitsgehalt in Prozent. Das feuchte spez. Betriebsgewicht $\gamma_{\text{betr f}}$ ist durch besondere Rechnung zu ermitteln (siehe oben).

Die Korrektur der gemessenen Werte ist also ziemlich umständlich. Eine Vereinfachung der Umrechnungen mit Hilfe einer Faustformel oder von Kurventafeln (wie bei Dampf- und Preßluft) ist für Gasmengemesser jedoch nicht möglich. Um die richtige Einstufung der einzelnen Einflüsse und damit überschlägige Berechnungen zu ermöglichen, kann folgendes gesagt werden:

Druck- oder Barometeränderungen haben nur geringen Einfluß: Eine Änderung um 15 mm QS (200 mm WS) ergibt einen Fehler von 1% . Bei trockenen Gasen ist der Einfluß von Temperaturänderungen gering: 5°C Änderung bedingen einen Fehler von 1% . Zu beachten ist jedoch der Einfluß der Temperatur auf die Gasfeuchtigkeit, besonders bei Temperaturerhöhung, weil die Sättigungskurve mit zunehmender Temperatur steiler wird. Eine richtige Ermittlung der Betriebstemperatur ist daher wichtig.

Der pH-Wert ist ein Maß für die Anzahl der Wasserstoff-Ionen in einer Lösung bzw. für die Wasserstoff-Ionen-Konzentration. Die Wasserstoff - Ionen - Konzentration wird angegeben in Mol/Liter. Der praktisch in Frage kommende Konzentrationsbereich liegt zwischen 1 und 10^{-14} Mol je Liter, umfaßt also ca. 14 Zehner-Potenzen. Da diese Zahlenwerte für den Gebrauch sehr unbequem und für die graphische Darstellung ungeeignet sind, wurde als Meßzahl der negative Exponent eingeführt. Dieser sogenannte „Wasserstoff-Exponent“ wird mit „pH“ bezeichnet.

Der gebräuchliche pH-Bereich erstreckt sich gemäß obiger Definition von 0 bis 14. Den pH-Wert 1 hat eine Lösung, die im Liter 10^{-1} , also $1/10$ Mol Wasserstoff-Ionen enthält. pH 14 bedeutet eine Wasserstoff-Ionen-Konzentration von 10^{-14} Mol/Liter.

Wasserstoff-Ionen sind die positiv geladenen Bestandteile des Wassers, das in geringem Maße in positive Wasserstoff-Ionen (H^+) und negative Hydroxyl-Ionen (OH^-) zerfallen ist. Nach dem Massenwirkungsgesetz ist das Produkt aus H-Ionen und OH-Ionen-Konzentration für wässrige Lösungen konstant. Leitfähigkeits-Untersuchungen ergaben einen Wert von 10^{-14} . Ist die Wasserstoff-Ionen-Konzentration einer Lösung z. B. 10^{-4} , so muß die Hydroxyl-Ionen-Konzentration 10^{-10} sein.

Die Reaktion einer Lösung, d. h. ob sauer oder alkalisch, wird bestimmt durch die Anzahl der Wasserstoff- und Hydroxyl-Ionen. Bei gleicher Menge von H- und OH-Ionen in einer Lösung ist diese neutral. Der pH-Wert dieser Lösung ist 7. Wenn die Anzahl der H-Ionen überwiegt, so ist die Lösung sauer, bei Vorherrschen der OH-Ionen alkalisch. Eine Lösung ist umso saurer, je mehr die Anzahl der H-Ionen die der OH-Ionen übertrifft und umso alkalischer, je mehr die OH-Ionen an Zahl überwiegen. Es ergibt sich also:

- pH < 7: Die Lösung ist sauer;
- pH = 7: Die Lösung ist neutral;
- pH > 7: Die Lösung ist alkalisch.

Eine $1/10$ normale Säure enthält 0,1 Mol Wasserstoff-Ionen im Liter, hat also den pH-Wert 1. Eine $1/10$ normale Lauge hat entsprechend den pH-Wert 13. Durch den logarithmischen Charakter des pH-Wertes ist bedingt, daß die Konzentrationsänderung bei Änderung des pH-Wertes von 2 auf 1 eine zehnfache ist. Eine Lösung mit dem pH-Wert 1 ist dementsprechend zehnmal so sauer wie eine Lösung mit dem pH-Wert 2.

Bei der vorstehenden Definition wurde angenommen, daß die $1/10$ normale Säure oder Lauge vollkommen in ihre Ionen zerfallen oder dissoziiert ist. Das trifft bei starken Säuren oder Laugen zu, nicht aber bei schwachen. Letztere

enthalten die meisten Wasserstoff-Ionen in undissoziierter, d. h. unwirksamer Form. Es ist von großer Bedeutung, daß durch den pH-Wert nur die freien, also wirksamen Ionen erfaßt werden. Die insgesamt vorhandenen Ionen werden durch die Titration bestimmt. Der pH-Wert gibt also im Gegensatz zur Titration den wirksamen Säuregrad an (die sog. aktuelle Acidität), d. h. aus dem pH-Wert kann auf die Aggressivität einer Säure oder Lauge geschlossen werden.

Beispiel: Bei Titration einer $\frac{1}{10}$ normalen Salzsäure wird die gleiche Menge Natronlauge verbraucht wie bei einer $\frac{1}{10}$ normalen Essigsäure. Die $\frac{1}{10}$ normale Salzsäure ist sozusagen vollkommen dissoziiert, während die Essigsäure nur zu einem Fünftel in ihre Ionen zerfallen ist. Die Anzahl der freien H-Ionen ist demnach bei der Salzsäure 50 mal so groß wie bei der Essigsäure oder die Säurewirkung der Salzsäure ist die 50fache der der Essigsäure oder die Salzsäure ist 50mal so stark wie die Essigsäure.

Pufferwirkung

Durch Verdünnen oder durch Zusatz von Säure oder Lauge wird der pH-Wert einer Flüssigkeit geändert. Die Auswirkung des Zusatzes ist verschieden und abhängig von der Art der Lösung. Flüssigkeiten, deren pH-Wert sich dabei leicht verändert, nennt man schwach gepuffert, solche, die nur weniger reagieren, sind stark gepuffert. Bei einer zehnfachen Verdünnung einer Säure müßte sich der pH-Wert um eine Einheit ändern. Bei Essigsäure, d. h. einer schwachen Säure ist die Änderung geringer, während Salzsäure, d. h. eine starke Säure ihren pH-Wert bei zehnfacher Verdünnung tatsächlich um eine Einheit ändert. Starke Säuren sind also geringer gepuffert als schwache. Destilliertes Wasser ist sehr schlecht gepuffert, so daß schon die Kohlensäure der Luft den pH-Wert nach der sauren Seite verschiebt.

Mischungen schwacher Säuren oder Laugen mit ihren Salzen sind gut gepuffert. Sie werden deshalb für Eichzwecke verwendet, da auch bei nicht allzu sorgfältigem Arbeiten ihr pH-Wert praktisch unverändert bleibt.

Messung des pH-Wertes

Für die Messung des pH-Wertes finden grundsätzlich zwei Verfahren Anwendung, nämlich das kolorimetrische und das elektrometrische.

Die kolorimetrische Methode beruht darauf, daß Farb-Indikatoren, die der zu messenden Lösung zugesetzt oder die mit der Lösung befeuchtet werden, in Abhängigkeit vom pH-Wert die Farbtönung ändern.

Das elektrometrische Meßverfahren ist das genaueste und wird bei allen anderen Methoden zur Eichung herangezogen. Bei diesem Verfahren werden die elektrischen Wirkungen von in Lösung befindlichen Ionen auf Elektroden benutzt. Die Elektroden nehmen

gegenüber der Flüssigkeit ein von der Ionen-Konzentration abhängiges Potential an.

Um das Potential der Elektrode gegenüber der Flüssigkeit messen zu können, wird eine zweite Elektrode, die von der Ionen-Konzentration nicht beeinflusst wird, in die Lösung eingetaucht (Bezugs-Elektrode). Die Potential-Differenz zwischen den beiden Elektroden steht in einem ganz bestimmten Verhältnis zu der Ionen-Konzentration.

Nach Nernst ist die Potential-Bildung wie folgt definiert: Tauchen zwei Metall-Elektroden in Lösungen ein, die Ionen des Metalls in verschiedenen Konzentrationen enthalten und die über einen Elektrolyten in leitender Verbindung stehen, so erhält man eine Konzentrationskette. Die EMK dieser Kette ist proportional der Differenz aus den Logarithmen der beiden Konzentrationen.

Eine mit gasförmigem Wasserstoff beladene Platin-Elektrode (PtH-Elektrode) verhält sich so, als ob sie aus einer metallischen Modifikation des Wasserstoffes bestünde. Eine Konzentrationskette, bestehend aus einer Platin-Wasserstoff-Elektrode und einer Bezugs-Elektrode liefert also eine Potential, welches abhängig ist von der Wasserstoff-Ionen-Konzentration oder dem pH-Wert.

Das Potential zwischen den Elektroden ändert sich bei einer Temperatur von 20°C um 58 mV, wenn sich der pH-Wert um eine Einheit ändert. Die Spannung der Elektrodenkette ist geradlinig vom pH-Wert abhängig.

Meß-Elektroden

Als Meß-Elektroden finden in der Hauptsache Verwendung:

1. Die Platin-Wasserstoff-Elektrode, welche sowohl für saure als auch alkalische Lösungen geeignet ist. Es ist die genaueste Laboratoriums-Elektrode. Ihre Handhabung ist mit einigen Schwierigkeiten verbunden, weil die Elektrode vor der Messung platinisiert und während der Messung dauernd mit Wasserstoff umspült werden muß. Als Betriebs-Elektrode für Dauermessungen kommt ihr keine Bedeutung zu.

2. Die Chinhydron-Elektrode, welche vor allem zur Messung des

pH-Wertes von sauren bis schwach alkalischen Lösungen benutzt wird (Anwendungsbereich 0-9 pH). Die Elektrode ist die im Laboratorium am meisten benutzte, da die Durchführung der Messung einfach und schnell vor sich geht. In die zu untersuchende Lösung wird Chinhydron eingebracht und zwar bis zur Sättigung. Dann wird eine Platin-Elektrode in die Lösung eingetaucht.

3. Die Antimon-Elektrode, welche eine metallische Elektrode ist und auch zur Messung von Lösungen dient, die bestimmte Elektrodengifte enthalten (Sulfide, Cyanide usw.), welche eine sichere Potential-Einstellung der Chinhydron- oder der Platinwasserstoff-Elektrode in Frage stellen. Die Handhabung ist sehr einfach, so daß sie trotz geringerer Meßgenauigkeit auch für Laboratoriumsmessungen häufig bevorzugt wird. Als Betriebs-Elektrode kommt ihr wegen der robusten Ausführungsmöglichkeit und der großen Unempfindlichkeit gegen Elektrodengifte höchste Bedeutung zu.

Für Betriebsmessungen werden die verschiedensten Formen angewandt. Bild 63 zeigt eine Antimon-Einbau-Elektrode, deren Aufbau äußerst einfach ist. Ein keramisches Rohr ist am unteren Ende mit Antimon ringförmig umgossen. Die Verbindung dieses Antimoninges mit den Anschlußklemmen in dem Elektrodenkopf ist durch einen eingelegten Platindraht hergestellt. Das Rohr dient gleichzeitig zur Aufnahme der Bezugs-Elektrode, die im Inneren untergebracht ist. Der Abschluß der Lösung im Inneren gegen die zu messende Flüssigkeit erfolgt durch einen mit einer Verschraubung gehaltenen Tonstift. Der ganze Elektrodenkörper ist in einen Leichtmetallkopf druckdicht eingesetzt. Die Elektrode ist geeignet für Drücke bis zu etwa 10 atü und Temperaturen bis 90°C. Sie kann selbstverständlich auch als Durchfluß-Elektrode ausgeführt werden.



Bild 63

4. Die Glaselektrode, welche als Universal-Elektrode bezeichnet werden kann. Bei Anwesenheit von Elektrodengiften, reduzierenden und oxydierenden Substanzen, Schwermetallen und Eiweißstoffen versagen die vorgenannten Elektroden in fast allen Fällen. Die Glaselektrode dagegen ist gegen diese schädlichen Einflüsse unempfindlich und praktisch für alle Lösungen beliebiger Zusammensetzung und Konzentration geeignet. Für das Laboratorium hat sie heute die größte Bedeutung, aber auch für Betriebsmessungen findet sie immer mehr Anwendung. Die Temperatur-



Bild 64

grenze liegt im Dauerbetrieb durchweg bei etwa $45 \cdot \cdot \cdot 50^{\circ}\text{C}$. Für Betriebsmessungen werden sowohl Eintauch- als auch Durchfluß-Elektroden verwendet.

Eine Ausführung für Betriebsmessungen zeigt Bild 64. In einem Anschlußkopf sind die Glaselektrode und die Bezugslektrode nebeneinander druckdicht eingebaut. Die Glaselektrode ist durch einen Schutzzyylinder gegen mechanische Einflüsse geschützt. Als Durchflußlektrode wird das Ganze in ein Durchflußgefäß eingebaut.

Eine Ausführung für Verwendung im Laboratorium ist in Bild 66 dargestellt.

Als Bezugslektroden kommen hauptsächlich die gesättigte Kalomel-Elektrode und die Silber-Silberchlorid-Elektrode in Anwendung, die beide ebenfalls in den verschiedensten Formen Verwendung finden.

pH-Laboratoriumsmessung

Die Messung des Potentials der Elektrodenketten soll wegen der leichten Polarisierbarkeit und der damit verbundenen Meßfehler nach Möglichkeit stromlos erfolgen. Auf jeden Fall ist Vorbedingung für eine genaue Messung, daß der Elektrode kein oder nur sehr wenig Strom entnommen wird.

Im Laboratorium werden in der Hauptsache Messungen nach dem Kompensationsverfahren durchgeführt, in vereinzelt Fällen auch mit Röhren-Voltmetern. Bei beiden Messungen wird die Elektrode nicht belastet, so daß die oben gestellten Bedingungen erfüllt sind. Die Prinzipschaltung eines Kompensators, und zwar des H & B-Schleifdraht-Kompensators Pehavi, zeigt Bild 65.

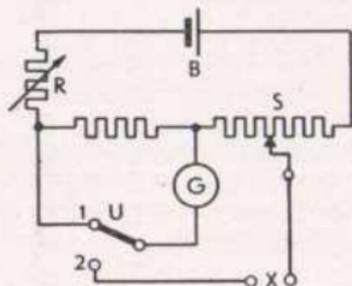


Bild 65

Aus der Batterie B fließt bei der Stellung 1 des Umschalters U über den Regelwiderstand R und den Schleifdraht S ein Strom, der mit Hilfe des Strommessers G auf einen festgelegten Wert eingestellt wird. Zur Kompensation der bei X angelegten Spannung wird der Schalter U von 1 auf 2 umgelegt und am Schleifdraht die Stellung eingestellt, bei der der jetzt als Nullgerät verwendete Strommesser keinen Ausschlag mehr zeigt. Die Stellung des Schleifkontaktes gibt die Spannung der

Elektrodenkette und damit den pH-Wert an. Mit dem Schleifkontakt ist eine Skala verbunden, welche zunächst eine Millivoltteilung besitzt, dann aber auch pH-Teilungen für die einzelnen Elektrodenketten. Durch Drehen einer Blende kann die im Augenblick gewünschte Skala sichtbar gemacht werden.

Das eingebaute Nullgerät hat eine so hohe Empfindlichkeit, daß auch das Potential von niederohmigen Glaselektroden direkt gemessen werden kann. Bild 66 zeigt das Pehavi in Verbindung mit einer Laboratoriums-Glaselektrode.

Sämtliche Elektrodenketten ändern ihr Potential mit der Temperatur der Lösung. Deshalb ist bei genauen Messungen unbedingt auf konstante Temperatur zu achten. Die gebräuchlichen pH-Kurven sind für eine Lösungstemperatur von 18° C angegeben. Falls die Temperatur im Augenblick der Messung höher oder niedriger ist, so muß der angezeigte pH-Wert berichtigt werden. Berichtigungstabellen oder Kurven stehen für jede Elektrodenkette zu Verfügung.



Bild 66

pH-Dauermessung

In den letzten Jahren hat die pH-Dauermessung (Anzeige, Registrierung und Regelung) immer größere Bedeutung gewonnen und zwar für die verschiedensten Zweige der Industrie. Die hohe Bedeutung liegt darin, daß bei einer Anzahl chemischer Vorgänge der Reaktionsverlauf von der Wasserstoff-Ionen-Konzentration beeinflußt wird, oder daß sich während des Prozesses die Wasserstoff-Ionen-Konzentration selbst verändert. An Hand der auf einem Schreibstreifen aufgezeichneten pH-Werte ist der Betriebsmann jederzeit in der Lage, auch nachträglich noch den Reaktionsverlauf eines Prozesses zu reproduzieren. Ebenso ist heute die Konstanzhaltung des pH-Wertes auf einen bestimmten pH-Wert an den verschiedensten Stellen von größtem Interesse, so daß auch die pH-Regelung immer mehr Eingang in die Betriebe findet.

Bei den Meßgeräten für pH-Dauerkontrolle sind die gleichen Gesichtspunkte hinsichtlich Stromentnahme zu berücksichtigen wie bei den Laboratoriumsgeräten.

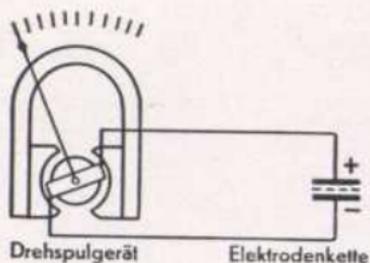


Bild 67

Für die direkte Messung des Potentials von Antimon-Elektroden wurden besonders empfindliche Meßwerke entwickelt, die einen Stromverbrauch von nur wenigen Mikroampere haben. Die dabei auftretende geringe Belastung fälscht das Elektroden-Potential nicht. Der Anschluß der Elektrodenkette erfolgt genau wie der eines Thermoelementes, wie aus Bild 67 hervorgeht.

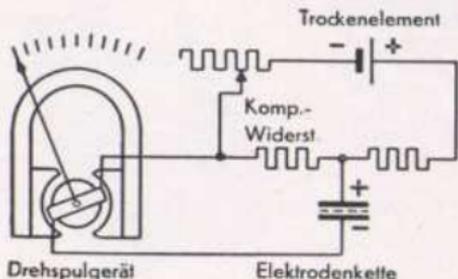


Bild 68

Falls sehr hohe Anforderungen an die Meßgenauigkeit gestellt werden, so wird häufig die sogenannte Halbpotentiometer-Schaltung angewandt. Bei dieser Schaltung (Bild 68) wird dem Elektroden-Potential eine andere Spannung entgegengeschaltet, so daß bei einem bestimmten pH-Wert kein Strom fließt. Dieser pH-Wert kann beliebig gewählt werden. Bei dem ausgewählten pH-Wert arbeitet das Meßgerät genau wie ein Kompensator, so daß also bei diesem pH-Wert die Elektrode überhaupt nicht belastet wird. Die abweichenden Werte werden dann wie bei der Schaltung nach Bild 67 nach der Größe des Zeigerausschlages gemessen.

Damit die hohe Meßgenauigkeit dieser Schaltung dauernd erhalten bleibt, muß von Zeit zu Zeit eine Kontrolle der Gegenspannung vorgenommen werden. Diese Kontrolle erfolgt in den meisten Fällen mit dem gleichen Meßgerät, indem nach entsprechender Umschaltung mittels eines vorgesehenen Einstellwiderstandes die Spannung so einreguliert wird, daß der Zeiger des Meßgerätes auf einen besonders gekennzeichneten Skalenpunkt einspielt. Bei noch höheren Genauigkeitsansprüchen wird die Kontrolle der Gegenspannung unter Verwendung eines Normalelements nach der Nullmethode durchgeführt. Eventuell kann auch für die Überwachung der Gegenspannung ein getrenntes Anzeigergerät herangezogen werden, was vor allem in Frage kommt, wenn Schreiber und Regler zusammen an eine Elektrodenkette angeschlossen werden.

Die Halbpotentiometer-Schaltung bietet noch einen weiteren Vorteil. Es besteht dabei die Möglichkeit, durch eine Zusatzeinrichtung die Temperatureinflüsse auf das Elektroden-Potential selbsttätig zu berichtigen, so daß die Anzeige oder Registrierung immer für eine bestimmte Temperatur richtig ist. Es ist hierfür der zusätzliche Einbau eines Widerstands-Thermometers in die Flüssigkeit erforderlich.

An selbsttätigen Kompensations-Meßgeräten für pH-Messungen, vor allem in Verbindung mit Glas-Elektroden, steht eine ganze Anzahl zur Verfügung. Ebenso werden Röhren-Voltmeter mit Erfolg angewandt.

Für pH-Messungen mit Glas-Elektroden ist der H&B-Fotozellen-Kompensator

((Näheres siehe Seite 52) mit einem besonders empfindlichen Nullgerät ausgerüstet worden, so daß Elektroden mit einem inneren Widerstand bis etwa 2 Megohm damit gemessen werden können.

Der grundsätzliche Aufbau einer pH-Regelanlage entspricht dem einer Temperaturregelung. Sämtliche Einzelteile sind von der Temperaturregelung übernommen und für den Spezialverwendungszweck zugeschnitten worden. Die Prinzipschaltung einer derartigen pH-Regelanlage zeigt Bild 69.

Bei der Planung einer pH-Regelanlage sind die örtlichen Betriebsverhältnisse von größter Wichtigkeit und müssen genau berücksichtigt werden, damit eine einwandfreie Konstanthaltung des pH-Wertes erreicht wird.

Zum Schluß sei bemerkt, daß die elektrometrische Meßmethode auch für die Bestimmung von Redox-Potentialen und für die potentiometrische Titration verwendet werden kann. Ebenso ist die Bestimmung anderer Ionen-Arten, z. B. Chlor-Ionen usw. sowohl im Laboratorium als auch im Betrieb von erheblicher Bedeutung.

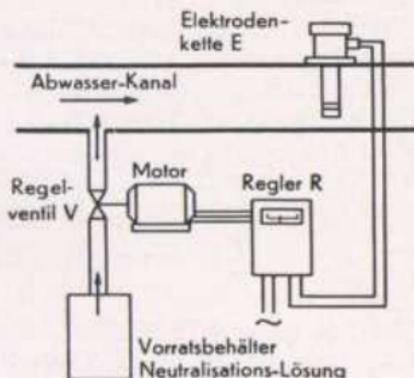


Bild 69

Anwendungsgebiete der pH-Messung

Nachstehend soll nur auf einige Anwendungsgebiete aufmerksam gemacht werden. Die Aufstellung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Braugewerbe: Überwachung des Brauwassers, der Maische und Würze.

Destillation und Kondensation: Überwachung des Kondensats auf Reinheit.

Filmindustrie: Überwachung des Waschwassers, der Bäder und Suspensionen.

Galvanotechnik: Überwachung der galvanischen Bäder, der Beizbäder, Neutralisation des Spülwassers und der Abwässer.

Gerbereien: Überwachung der Beizflüssigkeit.

Hüttenindustrie: Überwachung der Flotationsstrüben, Gasreinigung.

Kokereien: Gasreinigung, Ammoniumnitrat-Herstellung.

Kraftwerke: Überwachung des Kesselspeisewassers und der Wasseraufbereitung.

Papier-, Zellstoff-, Kunstseide-, Zellwolle- und Sprengstoffindustrie: Überwachung der Aufbereitung, der Bleich-, Seifen- und Waschbäder, der Sulfit-Kochung sowie der Abwässer auf Säuregehalt bzw. die Neutralisation derselben (letztere häufig in Verbindung mit Regelung).

Präparative Chemie: Herstellung von sauren, basischen oder neutralen Salzen.

Textilindustrie: Überwachung der Reinigungs-, Bleich- und Farbbäder, des Abwassers sowie des Kondensats von Heizschlangen.

Wasserwerke: Überwachung des Kalkzusatzes zum Trinkwasser zur Entsäuerung (in Verbindung mit Reglern).

Zuckerindustrie: Invertierung, Saturation, Vergärung der Melasse.

Selbstinduktion

Einheit: Henry (H). $10^{-3} \text{ H} = 1 \text{ mH}$ (Millihenry); $10^{-6} \text{ H} = 1 \mu\text{H}$ (Mikrohenry).

Wird an die Wechselspannung U ein Widerstand R gelegt, so fließt in diesem ein Strom I (Ohmsches Gesetz). Diese einfachen Verhältnisse gelten nicht mehr, wenn der Stromleiter eine Induktivität (Spule) ist. In diesem Fall erzeugt der Strom ein Wechselfeld, das eine in Wechselwirkung mit der Spannung U stehende EMK hervorruft. Der durch die Spule fließende Strom beträgt dann (bei sinusförmigem Wechselstrom):

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}} \text{ Ampere}$$

worin f die Frequenz in Hz und L der Selbstinduktions-Koeffizient in Henry ist. Der Ausdruck $\sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}$ wird als Scheinwiderstand Z der Spule bezeichnet.

L kann gefunden werden, wenn man den Wirkwiderstand R kennt und Z durch eine Wechselstrommessung (aus Spannung und Strom) ermittelt. Es ist dann:

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{2\pi f} \text{ Henry}$$

Stehen für die Messung außer Strom- und Spannungsmesser auch Leistungsmesser zur Verfügung, so kann diese Formel ebenfalls angewendet werden, indem der Wirkwiderstand aus $\frac{U^2}{N}$ und der Scheinwiderstand aus $\frac{U}{I}$ errechnet wird.

Brückenschaltung (nach Maxwell)

In Bild 70 ist L_1 eine bekannte, L_X die unbekannte, zu messende Selbstinduktion, $R_1 \dots R_4$ sind induktions- und kapazitätsfreie, regelbare Widerstände, VG ist ein Vibrations-Galvanometer. Die Brücke wird von Wechselstrom gespeist.

Werden die vier Widerstände $R_1 \dots R_4$ so eingestellt, daß der Galvanometerstrom Null ist, so

$$\text{gilt: } L_1 : L_X = \frac{R_2}{R_4} \text{ oder } L_X = L_1 \frac{R_4}{R_2}$$

Die Selbstinduktion L ist nur bei Spulen ohne Eisen eine reine Konstante. Hat die Spule Eisenkern oder ist Eisen in der Nähe, so ändert sich L in Abhängigkeit von der Permeabilität μ .

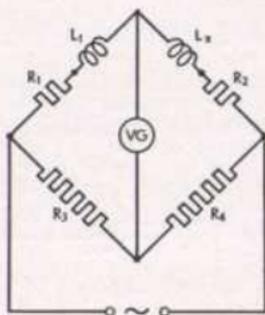


Bild 70

Spannung

Einheit: Volt (V). $10^{-3} \text{ V} = 1 \text{ mV}$ (Millivolt). $10^3 \text{ V} = 1 \text{ kV}$ (Kilovolt).

Mit Hilfe des Ohmschen Gesetzes läßt sich die Spannungsmessung auf eine Strommessung zurückführen. Wird der Spulenstrom des Strommessers durch einen Widerstand begrenzt, und das Gerät an die Spannung angeschlossen, so ist in der Meßspule fließende Strom und damit der Zeigerausschlag nur noch abhängig von der Größe der angelegten Spannung. Die für die Strommessung verwendeten Meßwerke auf Seite 53 . . . 56 können deshalb auch für Spannungsmessungen verwendet werden.

Zur Messung von Wechselstrom in Hochspannung werden zum Schutz des Messenden und des Meßgerätes Spannungswandler verwendet, deren Unterspannung in der Regel 100 V beträgt.

Der Meßbereich der Dreheisen-Spannungsmesser beginnt erst bei einigen Volt, da der Eigenverbrauch bei kleinen Meßbereichen relativ hoch ist, während sich mit empfindlichen Drehspulgeräten Bruchteile eines Millivolt noch messen lassen.

Elektrostatische Geräte

sind im Gegensatz zu den obigen Geräten reine Spannungsmesser. Das Meßprinzip fußt darauf, daß zwei Elektroden, die an Spannung liegen, sich gegenseitig anziehen. Elektrostatische Geräte sind für Gleich- und Wechselstrom, auch bei Hochfrequenz, verwendbar.

Bei dem Spannungsmesser nach Seidler (Bild 71) ist eine bewegliche Platte zwischen zwei senkrechten Metallschutzplatten aufgehängt. Die zu messende Spannung wird einerseits an die bewegliche Platte und die eine feste Schutzplatte angelegt, andererseits an die zweite Schutzplatte. Bei Einschalten der Spannung wird die bewegliche Platte von der gleichnamig geladenen festen abgestoßen und von der ungleichnamig geladenen angezogen. Diese Bewegung wird auf den Zeiger übertragen.

Der besondere Vorteil der elektrostatichen Geräte besteht in ihrem äußerst geringen Eigenverbrauch.

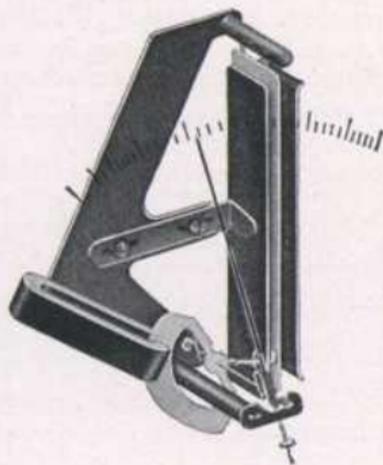


Bild 71

Bei Gleichstrom wird lediglich der Aufladestrom beim Einschalten gebraucht, während der Dauerverbrauch Null ist; bei Wechselstrom beträgt der Dauerverbrauch bei technischen Frequenzen nur geringe Bruchteile eines Milliamperes und steigt mit der Frequenz.

Elektrostatische Geräte eignen sich in erster Linie für hohe und höchste Spannungen in Gleich- und Wechselstrom, wobei bei Wechselstrom der Meßbereich durch Vorschaltung von Kondensatoren oder durch kapazitive Spannungsteilung noch erheblich nach oben erweitert werden kann. Es werden jedoch auch Geräte für kleine Spannungen gebaut, bei denen 1 Volt schon einen merklichen Ausschlag erzeugt. Die obere Verwendungsgrenze, die durch den Blindstrom und die Zuleitungen gesetzt ist, liegt bei 10^7 Hz.

Für Betriebsmessungen in Starkstrom werden elektrostatische Geräte seltener verwendet, da die Überschlagespannung nur höchstens 50% über der Meßspannung liegt und nach den Vorschriften des VDE für den Einbau in Starkstromnetze nicht ausreicht. Häufiger werden sie in Laboratorien und Prüfräumen benutzt, besonders für Messungen von Mittel- und Hochfrequenz.

Gleichstrom-Kompensatoren

Die Kompensationsmessung beruht auf dem Vergleich der unbekanntes, zu messenden Spannung mit einer bekannten Spannung. Die Messung erfolgt stromlos, d. h. der Stromquelle, die die zu messende Spannung liefert, wird im Augenblick der Messung kein Strom entnommen. Daraus ergibt sich ein wesentliches Anwendungsgebiet der Kompensationsmessung, nämlich die Messung bzw. die Kontrolle der EMK von Spannungsquellen mit relativ hohem inneren Widerstand (z. B. von Thermo-Elementen), sowie die Messung von Spannungen, wenn durch Stromentnahme Polarisationsfehler entstehen würden (z. B. pH-Messung). Besondere Bedeutung hat die Kompensation für die genaue Nachprüfung von Präzisions-Meßgeräten,

da auf diese Weise genaue Spannungs- und Strommessungen bis zu 5 Dezimalstellen bei einer Fehlergrenze von $\pm 0,02\%$ möglich sind.

Im Prinzipschaltbild (Bild 72) ist B_H die bekannte, B_X die unbekanntes Spannung. Wird der Widerstand R stetig geändert, bis im Galvanometer G kein Strom fließt, so läßt sich aus der Größe des Teilwiderstandes r die unbekanntes Spannung B_X ermitteln.

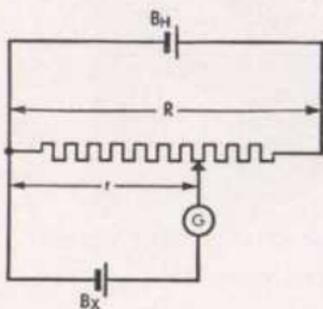


Bild 72

Diese Schaltung liegt dem **H_B-Präzisions-Kompensator** zugrunde, der in erster Linie zur genauesten Nachprüfung von Präzisions-Meßgeräten in Laboratorien und Prüfmtern verwendet wird. Alle Messungen werden hier auf die genau bekannte, unveränderliche Spannung eines Normelementes zurückgeführt (etwa 1,0183 V bei 20° C). Da dieses jedoch nicht belastet werden darf, wird die Messung auf dem Umweg über einen Hilfsstromkreis durchgeführt. — Im Nachstehenden soll nur auf die grundsätzliche Schaltung unter Außerachtlassung aller Zusatzeinrichtungen eingegangen werden.

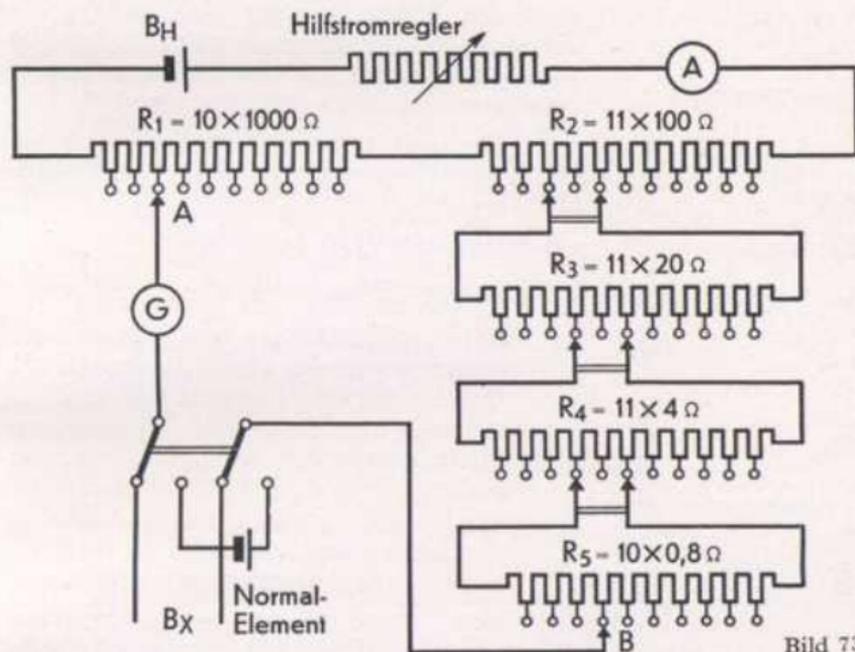


Bild 73

R_2 , R_3 und R_4 sind Doppelkurbel-Widerstände mit 10 Stellungen; der Abstand der beiden Schleifkontakte ist fest. R_1 und R_5 sind Einfachkurbel-Widerstände. Bei der Messung wird zunächst der Strom aus der Hilfsstrombatterie B_H mit Hilfe des Strommessers A auf 0,1 mA eingestellt. Dann wird durch Einstellung von $R_1 \dots R_5$ eine Spannung zwischen A und B abgegriffen, die der Spannung des Normelementes entspricht (1,0183 V). Da diese Widerstände so bemessen sind, daß die Ziffer der Kurbelstellung gleichzeitig eine Ziffer des Spannungswertes darstellt, sind die Kurbeln von R_2 , R_3 , R_4 und R_5 auf 10, 1, 8, 3 zu stellen (R_1 steht auf 0). — Durch den Umschalter wird diese Spannung gegen das Normelement geschaltet und am Hilfsstromregler nachgeregelt, bis das Galvanometer keinen Ausschlag mehr zeigt. Dann sind beide Spannungen genau gleich und der Hilfsstrom beträgt auf fünf Dezimalstellen genau 0,1000 mA.

Die zu messende Spannung wird dann ermittelt, indem der Umschalter auf Bx geschaltet und die Kurbeln $R_1 \dots R_4$ eingestellt werden, bis das Galvanometer keinen Ausschlag mehr zeigt. Die gesuchte Spannung kann dann an den Kurbelstellungen abgelesen werden.

Spannungen über 1,1 V werden gemessen, indem eine Teilspannung eines Präzisions-Widerstandes an den Kompensator gelegt wird. Bei Strommessungen wird der Spannungsabfall eines Normalwiderstandes kompensiert und daraus der Strom errechnet.

Der Kompensator nach Lindeek-Rothe

ist in erster Linie zur Kontrolle der EMK von Thermoelementen bestimmt. Zur Bestimmung der unbekanntenen Spannung U_x

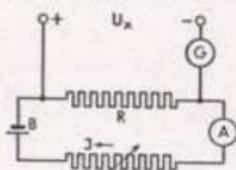


Bild 74

wird der Strom I unter Verwendung des Strommessers A stetig geregelt, bis das Galvanometer G stromlos wird. Die unbekanntene Spannung errechnet sich dann aus: $U = I \cdot R$. Die Fehlergrenze der Messung ist durch die des Strommessers und die des Widerstandes gegeben.

Kompensator für pH-Messung siehe Seite 44.

Der Fotozellen-Kompensator „Potentiolux“

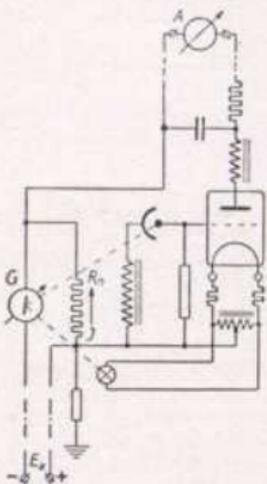


Bild 75

ist ein selbsttätiges, verzögerungs- und verzerrungsfreies Verstärkergerät für kleine Gleichspannungen von etwa 0,1 mV aufwärts. Durch seine Verwendung wird es ermöglicht, daß kleine Spannungen praktisch ohne Stromverbrauch mit robusten Meßgeräten gemessen oder registriert werden können (z. B. die EMK von Thermoelementen oder pH-Werte).

Dem Fotozellen-Kompensator „Potentiolux“ liegt die Schaltung des Lindeek-Rothe-Kompensators zugrunde. An die Stelle des handgesteuerten Regelwiderstandes tritt ein vom Null-Galvanometer selbsttätig geregelter Widerstand. Dieser wird dargestellt durch eine Dreielektrodenröhre, deren Gittervorspannung durch eine Fotozelle gesteuert wird. Die Fotozelle wird beim Ausschlagen des richtkraftlosen Spiegel-Galvanometers mehr oder weniger

blicktet; dadurch ändert sich ihr Widerstand und damit die Gittervorspannung, die den Anodenstrom der Röhre steuert. Die für Röhre und Fotozelle erforderlichen Hilfsspannungen werden dem Wechselstromnetz entnommen und durch die Röhre bzw. die Fotozelle selbst gleichgerichtet. Die Meßgenauigkeit wird praktisch nur durch den angeschlossenen Strommesser bestimmt.

Einheit: Ampere (A). $10^{-3} \text{ A} = 1 \text{ mA}$ (Milliampere); $10^{-6} \text{ A} = 1 \mu\text{A}$ (Mikroampere).

Die Strommessung erfolgt heute überwiegend durch das Weicheisen- (Dreheisen-) und Drehspulgerät. Die bisher daneben verwendeten Ferraris-, Hitzdraht- und elektrodynamischen Strommesser werden immer mehr durch das Dreheisengerät verdrängt.

Das Dreheisengerät

ist als Betriebs- und Feinmeßgerät für Gleich- und Wechselstrom technischer Frequenz verwendbar.

Das Dreheisen-Meßwerk (Bild 76).

In einer Ringspule befinden sich zwei Eisenkerne, wovon der eine an der Spule, der andere an der Zeigerachse befestigt ist. Diese werden von dem durch die Spule fließenden Strom gleichnamig magnetisiert und stoßen sich gegenseitig ab. Als Gegenkraft dient die Spannung einer Spiralfeder.

Die durch die Remanenz des Eisens entstehenden Meßfehler werden durch Wahl besonderer Eisenlegierungen vernachlässigbar klein gehalten, so daß bei Frequenzen bis 100 Hz nur eine Teilung für Gleich- und Wechselstrom nötig ist. In der jüngsten Zeit ist es sogar gelungen, Dreheisen-Feinmeßgeräte höchster Genauigkeit (Fehlergrenze $\pm 0,2\%$) zu entwickeln.

Der besondere Vorteil der Dreheisengeräte liegt darin, daß sie für Gleich- und Wechselstrom gleichermaßen verwendbar und im Vergleich zu anderen Meßgeräten hoch überlastbar sind. Die sog. „überstromsicheren“ Dreheisenstrommesser (Geräte mit besonders geformten Eisenkernen)

lassen eine 50fache Überlastung eine Sekunde lang ohne Schaden zu (kleinere Überlastungen entsprechend länger).

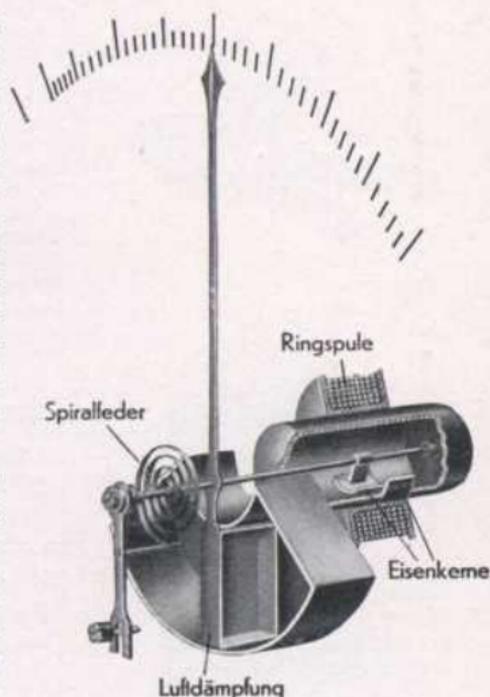


Bild 76

Der Eigenverbrauch ist jedoch wesentlich höher als beim Drehspulgerät, da sich das Dreheisengerät sein Feld selbst erzeugen muß (etwa zwischen 0,7 und 3 VA).

Der kleinste ausgeführte Meßbereich beträgt etwa $0 \cdots 0,2$ A, der größte (bei genügend großem Gehäuse) etwa $0 \cdots 400$ A. Bei Wechselstrom können größere Meßbereiche durch Verwendung von Stromwandlern erzielt werden (Sekundärstrom meistens 5 A).

In Verbindung mit tragbaren Geräten sind zur Erzielung von mehreren Meßbereichen die Präzisions-Vielfach-Stromwandler besonders zweckmäßig.

Stromwandler dürfen, solange durch die primäre Wicklung Strom fließt, niemals auf der Sekundärseite geöffnet werden, da an den offenen Sekundärklemmen lebensgefährliche Spannungen entstehen können. Sekundärseite niemals sichern!



Bild 77

Für schnelle Betriebsmessungen in Wechselstrom wurde ein Einleiter-Stromwandler in Zangenform, der sog. „Dietze-Anleger“ entwickelt. Als Eisenkern dienen zwei Backen, die durch Isoliergriffe zangenartig geöffnet, über den Leiter geschoben und dann wieder geschlossen werden. Der umklammerte Leiter dient jetzt als eine Primärwicklung; als Sekundärwicklung dient die Spule des Anlegers, an die der Strommesser (Dreheisengerät oder das weiter unten beschriebene Drehspulgerät mit Trockengleichrichter) angeschlossen wird. Dietze-Anleger werden für Ströme zwischen etwa 5 und 1000 A gebaut; sie können bei entsprechender Länge der Isolier-Handgriffe auch in Hochspannungs-Anlagen bis etwa 20 000 V verwendet werden.

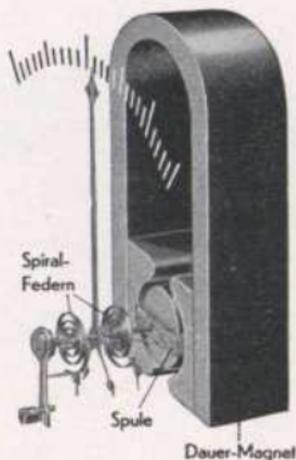


Bild 78

Das Drehspulgerät

ist ein ausgesprochenes Gleichstromgerät. Durch zusätzliche Verwendung von Gleichrichter-Einrichtungen wird es auch für Wechselstrom fast aller vorkommender Frequenzen verwendbar.

Das Drehspul-Meßwerk. Im homogenen Feld eines Dauermagneten ist eine Spule drehbar gelagert. Wird durch diese Strom geschickt, so entsteht ein der Stromstärke verhältnismäßiges Drehmoment. Die Drehspule und der daran befestigte Zeiger drehen sich soweit, bis die Gegenkraft der Spiralfedern dem Drehmoment der Spule das Gleichgewicht halten.

Das Drehspul-Meßwerk hat von allen elektr. Meßsystemen die höchste Genauigkeit. Der Eigenverbrauch ist (bei den mittleren und besonders bei den kleinen Meßbereichen) sehr gering. Die ausführbaren Meßbereiche liegen zwischen Bruchteilen eines Mikroamperes und den größten vorkommenden Stromstärken.

Die Erweiterung der Meßbereiche erfolgt durch Nebenwiderstände, die auf einen bestimmten Spannungsabfall abgeglichen werden, so daß das gleiche Gerät mit beliebig vielen Nebenwiderständen verwendet werden kann.

Die Verbindungsleitungen zwischen Nebenwiderstand und Meßgerät sind auf einen bestimmten Widerstand abgeglichen. Es dürfen also nur die mitgelieferten Nebenschlußschnüre verwendet werden oder als Ersatz solche mit genau gleichem Widerstand, da sonst Meßfehler entstehen. — Beispiel: Ein Drehspul-Strommesser zum Anschluß an einen beliebigen Nebenwiderstand von 60 mV Spannungsabfall habe einen Stromverbrauch von 20 mA. Der Gesamtwiderstand des Meßwerks (einschl. der Nebenschlußleitungen) beträgt also 3 Ohm. Als Meßleitung werde 1 m Kupferlitze von 1 mm² und 0,035 Ohm Widerstand mitgeliefert. Wird nun eine Meßleitung von 4 m benötigt, so ist ein Kupferquerschnitt von 4 mm² zu verwenden, damit der Widerstand der gleiche bleibt. Würde versehentlich 4 m Litze von 1 mm² Querschnitt verwendet, so würde sich der Gesamtwiderstand des Meßwerks um $3 \times 0,035 = 0,15$ Ohm, also um 3,5% erhöhen und der Strommesser um 3,5% zu wenig anzeigen. — Bei großen Stromstärken sind tunlichst längere Nebenschlußschnüre zu nehmen, damit das Drehspulgerät nicht durch das magnetische Feld der Hauptleitung beeinflusst wird. Der Aufstellungsort des Gerätes ist stets so zu wählen, daß fremde Felder die Messung nicht fälschen können.

Drehspul-Galvanometer

Als solche werden Drehspulgeräte hoher und höchster Empfindlichkeit bezeichnet, die entweder für sich oder als Bestandteil einer Meßeinrichtung (Meßbrücke, Kompensator usw.) nur zum Nachweis kleiner Ströme (und Spannungen) dienen. Die Geräte sind meistens nicht geeicht; die Eichung wird bei Bedarf vom Messenden vorgenommen.

Nach der Art der Ablesung und der Anordnung des beweglichen Systems werden hauptsächlich Zeiger- und Spiegelgalvanometer unterschieden. Bei den letzteren tritt an die Stelle des Zeigers ein kleiner, sehr leichter Spiegel; die Ablesung der Stellung der Drehspule erfolgt mit Hilfe einer getrennt vom Gerät aufzustellenden Skala (Seite 79) und eines mit Hilfe einer Projektionslampe erzeugten Lichtzeigers, seltener durch ein Fernrohr mit Strichmarke. Die Spiegelgalvanometer sind wesentlich empfindlicher als Zeigergalvanometer, da der Spiegel erheblich leichter ist als der Zeiger und der gewichtlose Lichtzeiger beliebig lang gemacht werden kann. Größenordnungsmäßig lassen sich mit den empfindlichsten Zeigergalvanometern Ströme von etwa 10^{-9} A, mit den empfindlichsten Spiegelgalvanometern Ströme von 10^{-12} A nachweisen.

Bei den sog. „Lichtmarken-Galvanometern“ sind Skala, Optik und Lampe zu einem einzigen Gerät zusammengebaut. Die Drehspule ist meistens oben und unten an einem gespannten, gefederten Metallband aufgehängt, dessen Torsion gleichzeitig als Rückstellkraft dient. Das Gerät vereinigt also die Vorteile der Zeiger- und Spiegel-Galvanometer.

Ballistische Galvanometer dienen zur Messung von Strom- und Spannungsstößen (z. B. beim Entladen von Kondensatoren, vgl. Seite 20) und haben deshalb größeres Trägheitsmoment.

Drehspulgeräte für Wechselstrom

Aus dem zu messenden Wechselstrom wird durch einen Trockengleichrichter oder Thermoumformer Gleichstrom erzeugt, der vom Drehspulgerät gemessen wird. Die Meßgenauigkeit ist dementsprechend geringer als bei reinen Gleichstrom-Drehspulgeräten; sie vermindert sich mit größer werdender Frequenz.

Drehspulgeräte mit Trockengleichrichter (Bild 79)

sind für Wechselstrom bis etwa 10^4 Hz geeignet. Sie werden in erster Linie zur Messung kleiner Ströme zwischen etwa 0,1 und 50 mA benutzt; der Meßbereich kann jedoch durch Verwendung von Meßwandlern mit entsprechendem Übersetzungsverhältnis erweitert werden. Nebenwiderstände werden zur Erweiterung des Meßbereiches seltener verwendet, da der Spannungsabfall an der Gleichrichterschaltung (etwa 1 V) und damit der Eigenverbrauch ziemlich hoch ist.

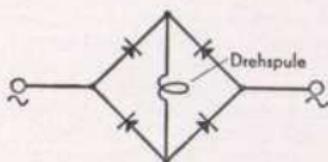


Bild 79

Die Drehspulgeräte mit Trockengleichrichter werden mit sinusförmigem Wechselstrom geeicht. Bei Abweichungen von der Sinusform tritt ein Fehler ein, der jedoch erst bei erheblichen Oberwellen, wie sie heute in Wechselstrom kaum mehr auftreten, die Anzeige nennenswert fälscht.

Trockengleichrichter sind empfindlich gegen Wärme. Die Geräte dürfen deshalb nicht in zu heißen Räumen oder über Heizkörpern angebracht, noch elektrisch überlastet werden.

Drehspulgeräte mit Thermoumformer (Bild 80)

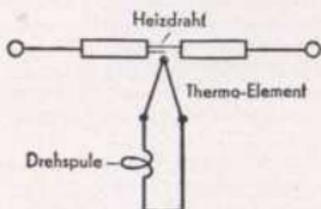


Bild 80

sind für Frequenzen bis höchstens 10^8 Hz (bei größeren Strömen weniger) und für Ströme zwischen etwa 0,1 mA und 500 A verwendbar. Sie können auch für Gleichstrom verwendet werden. Die Anzeige ist von der Kurvenform in weitem Maße unabhängig.

Der Thermoumformer setzt sich zusammen aus dem Thermoelement und dem Heizdraht. Der Heizdraht wird von dem zu messenden Wechselstrom durchflossen und dadurch erwärmt. Die Erwärmung teilt sich der Heißblötstelle des Thermoelements mit. Die dadurch entstehende EMK wird mit dem Drehspulgerät gemessen.

Temperatur

Die allgemein bekannten Ausdehnungs-Thermometer (Quecksilber-Thermometer usw.) sind nur für einen begrenzten Temperaturbereich verwendbar. Demgegenüber kann mit den nachstehend beschriebenen elektrischen Temperatur-Meßeinrichtungen ein Bereich zwischen -200 und $+3500^{\circ}\text{C}$ erfaßt werden; außerdem besteht die Möglichkeit, das Ablesegerät soweit von der Meßstelle zu entfernen, wie es praktisch notwendig erscheint.

Messung mit elektr. Widerstands-Thermometern

für Temperaturen zwischen etwa -200 und $+550^{\circ}\text{C}$

Die Messung beruht darauf, daß sich der elektrische Widerstand bestimmter Metalle in genau bekannter Weise mit der Temperatur ändert; er wird mit steigender Temperatur größer, mit fallender kleiner. Der Widerstand einer solchen Drahtwicklung ist also ein Maß für die Temperatur. Zur Messung des Widerstandes wird meistens das Kreuzspul-Meßwerk verwendet.

Das Kreuzspul-Meßwerk hat zwei gekreuzte, starr miteinander verbundene Spulen, die im inhomogenen Feld eines Dauermagneten drehbar sind. Das Meßwerk spricht an auf das Verhältnis der Ströme in den beiden Spulen. Während der Strom in der einen Spule durch einen temperatur-unabhängigen Widerstand konstant gehalten wird, wird der Strom in der anderen Spule vom Widerstand der Drahtwicklung bestimmt, die der Temperatur ausgesetzt ist. Dabei beeinflussen die im normalen Betrieb vorkommenden Schwankungen der Meßspannung die Anzeige nicht, da sie sich auf beide Spulen in gleicher Weise auswirken.

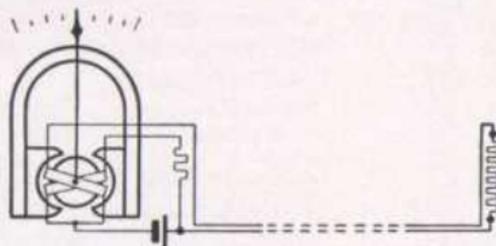


Bild 81

Die Meßeinrichtung setzt sich also stets zusammen aus der temperaturempfindlichen Wicklung (dem Widerstands-Thermometer), dem Empfangsgerät (Kreuzspulgerät) und einer Gleichstromquelle. Die Schaltung erfolgt nach Bild 81.

Das Widerstands-Thermometer hat in der Regel für Temperaturen bis 150°C eine Wicklung aus Nickel, bis 550°C und außerdem für sehr niedrige Temperaturen aus Platin. Für den praktischen Gebrauch werden die Wicklungen in Schutzhüllen eingebaut, deren Ausführung sich nach dem Verwendungszweck und der Beanspruchung durch Druck, Temperatur und chemische Einflüsse richtet. Bild 82 zeigt ein Thermometer für Luft (Zimmerthermometer), Bild 83 ein druckfestes Einschraub-Thermometer für Behälter und Rohrleitungen.



Bild 82



Bild 83

Die Ansprechzeit der Widerstands-Thermometer richtet sich hauptsächlich nach der Masse der Schutzhülle und dem Wärmeübergang von dem zu messenden Medium zum Thermometer. Für Messungen in Flüssigkeiten kann mit Halbwertzeiten von $0,5 \dots 1$ Minuten gerechnet werden, während Messungen in Gasen Halbwertzeiten bis zu mehreren Minuten erfordern. Unter Halbwertzeit ist hierbei die Zeit zu verstehen, in der die Thermometerwicklung die Hälfte der Temperaturänderung erreicht hat. Im allgemeinen laufen Temperaturvorgänge so träge ab, daß die Ansprechzeiten der Widerstands-Thermometer keine Rolle spielen. Bei schnell schwankender Temperatur wird in manchen Fällen die Messung zweckmäßiger mit Thermoelementen in geeigneter Ausführung durchgeführt, deren Ansprechzeit erheblich niedriger gehalten werden kann.

Das Empfangsgerät kann als Anzeige-, Registrier- oder Regelgerät ausgebildet sein. Die Anzeigegeräte haben die bei elektrischen Geräten üblichen Formen.

Bei Meßanlagen mit vielen Meßstellen lassen sich sämtliche Widerstands-Thermometer mit Hilfe eines geeigneten Umschalters auf ein einziges Anzeigegerät schalten, wodurch eine erhebliche Verbilligung der Meßanlage erzielt werden kann.

Die Registrierung wird gewöhnlich mit Punktschreibern vorgenommen, da die Meßgröße nur langsamen Änderungen unterworfen ist; außerdem ist der Eigenverbrauch der Punktschreiber im Verhältnis zu Linienschreibern sehr gering, so daß der Thermometerstrom klein gehalten und so eine zusätzliche Erwärmung des Widerstands-Thermometers vermieden wird.

Punktschreiber zeichnen die einzelnen Meßwerte in gleichmäßigen Zeitabständen (von $10 \dots 60$ Sekunden) auf einem Schreibstreifen auf. Bei jeder Aufzeichnung drückt ein Fallbügel den freispielenden Zeiger auf ein Farbband (ähnlich wie bei der Schreibmaschine) und drückt dabei einen Punkt auf den Schreibstreifen. Der Zeitvorschub des Schreibstreifens wird so gewählt, daß sich die einzelnen Punkte fast lückenlos zu einer Kurve aneinanderreihen. Der

Antrieb der Punkschreiber erfolgt durch einen kleinen Synchronmotor mit entsprechendem Übersetzungsgetriebe oder durch ein Uhrwerk mit Hand- oder Motoraufzug. — Mehrfarbenschreiber haben eine Einrichtung zum elektrischen Umschalten auf die einzelnen Meßstellen, wobei gleichzeitig das der betreffenden Meßstelle zugeordnete Farbband selbsttätig unter den Zeiger geschoben wird.

Über Temperaturregelung siehe S. 65.

Als Meßbereich kann der innerhalb des Temperaturablaufes interessierende Bereich gewählt werden (z. B. $40 \cdots 100$ oder $250 \cdots 450$ °C usw.).

Als **Gleichstromquelle** dient bei ortsfesten Anlagen zweckmäßig ein kleiner Trockengleichrichter zum Anschluß an das Wechselstromnetz. Der Strombedarf für jedes Meßwerk beträgt meist etwa 20 mA.

Der **Widerstand der Fernleitung** muß bei der Eichung der Empfangsgeräte berücksichtigt werden. Da er sich im voraus meistens nicht genau angeben läßt, wird für die Eichung ein runder Wert angenommen (z. B. 3 Ohm) und auf der Skala vermerkt. Mit dem Gerät wird ein Abgleichwiderstand geliefert, der in die Leitung mit eingebaut wird. Nach der Leitungsverlegung wird von diesem soviel abgenommen, bis der Gesamtwiderstand 3 Ohm beträgt.

Als größter Widerstand der Fernleitung (Hin- u. Rückleitung) zwischen Empfangsgerät und Widerstands-Thermometer kann 10 Ohm angenommen werden. Sind die Verbindungsleitungen jedoch größeren Temperaturschwankungen ausgesetzt, z. B. bei Freileitungen, so können nur kleinere Fernleitungs-Widerstände zugelassen werden, da die durch die Temperaturschwankungen entstehenden Widerstandsänderungen Fehler in die Messung bringen würden. Bei langen Freileitungen sind deshalb entweder größere Querschnitte oder noch besser die Kompensationsschaltung nach Bild 85 zu verwenden, bei der Änderungen des Fernleitungs-widerstandes praktisch nicht in die Messung eingehen.

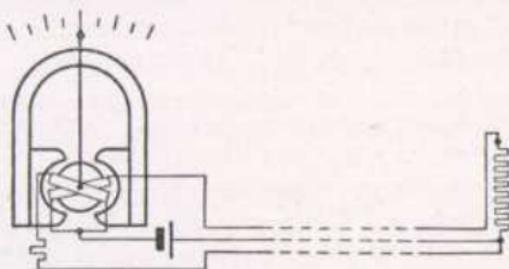


Bild 85

Messung mit Thermoelementen

für Temperaturen bis etwa 1600 °C

Das Thermoelement besteht aus zwei Drähten aus verschiedenen Metallen bzw. Metall-Legierungen, die an einem Ende mitein-

ander verschweißt oder verlötet sind. Wird die Schweißstelle erwärmt, so entsteht eine EMK (Thermospannung), deren Größe

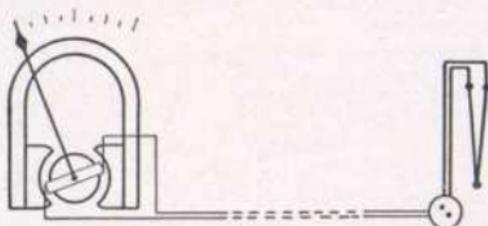


Bild 86

von der Art der verwendeten Metalle und vom Temperaturunterschied zwischen der Schweißstelle (heiße Lötstelle, Meßstelle) und den kalten Enden (kalte Lötstelle, Vergleichsstelle) abhängt. Die Thermospannung wird mit einem

Drehspul-Millivoltmeter (Seite 54) oder einem Kompensator (Seite 62) gemessen.

Die Temperatur-Fernmeßeinrichtung mit Thermoelementen besteht also in der einfachsten Form aus dem Thermoelement als dem Fühlorgan und dem entfernt davon angebrachten Drehspulgerät als Empfangsgerät.

Das Thermoelement

Die Wahl der Metalle (bzw. Metall-Legierungen) für die Elementdrähte richtet sich in erster Linie nach der zu messenden Temperatur. Der Querschnitt der Drähte ist für die EMK ohne Belang. Die Tabelle Seite 101 gibt für drei der wichtigsten Thermoelemente die Thermospannungen in Abhängigkeit von der Temperatur an.

Die höchste Meßgenauigkeit läßt sich mit Elementen aus Platin und einer Platinlegierung (z. B. Platinrhodium) erzielen.

In der Regel erhält das Thermoelement für den praktischen Gebrauch eine Schutzarmatur, deren Ausführung sich nach dem Verwendungszweck und der Beanspruchung durch Temperatur, Druck und chemische Einflüsse richtet.

Bild 87 zeigt eine (unten aufgeschnittene) Armatur, bei der die Drähte des Thermoelementes durch Keramik-Röhrchen gegeneinander isoliert in einem gemeinsamen, gasdichten Keramikrohr liegen, das seinerseits vom eigentlichen Schutzrohr umgeben ist. Die Enden der Drähte sind an eine Anschlußdose geführt.



Bild 87

Mit Rücksicht auf die Vielseitigkeit der Meßmedien, Einbaumöglichkeiten usw. ist es nicht möglich, in diesem kurzen Rahmen allgemeine Angaben für die Auswahl der Schutzhüllen zu machen. Anhaltspunkte siehe Tabelle Seite 103. Die Schutzhülle ist jedoch von ausschlaggebender Bedeutung für die Lebensdauer des Thermoelements und es ist daher immer zweckmäßig, die Beratung des Lieferwerkes in Anspruch zu nehmen.

Die Schweißstelle des Thermoelements stellt (im Gegensatz zur Wicklung des Widerstands-Thermometers) eine kleine punktförmige Masse dar. Sollen Messungen schnell veränderlicher Temperaturen durchgeführt werden, so kann die Schweißstelle unten in das (nicht zu dick zu wählende) Schutzrohr eingelötet werden, so daß guter Wärmeübergang gewährleistet ist, oder es kann bei nicht zu hohen Temperaturen und nicht aggressiven Meßmedien ganz auf die Schutzhülle verzichtet werden. Wird die Schweißstelle als kleines Plättchen ausgebildet so kann damit die Temperatur von geraden Oberflächen gemessen werden (Bild 88). Die Ausführung nach Bild 89 dient zur Messung der Oberflächen-Temperatur von Walzblöcken aus Leichtmetall. Das Thermoelement hat zwei Spitzen aus verschiedenen Metallen, die bei der Messung durch einen leichten Schlag in den Metallblock gedrückt werden, wobei das warme Metall zusammen mit den Spitzen die Heißblotstelle darstellt.



Bild 88

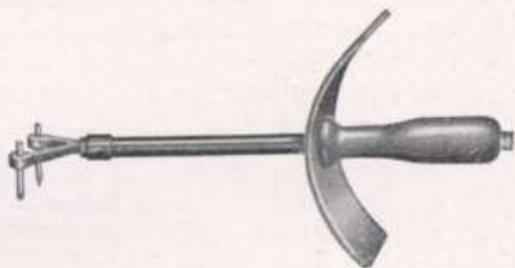


Bild 89

Das Empfangsgerät

Zur Messung der Thermospannung dienen meist Drehspul-Millivoltmeter, die in Grad Celsius oder Millivolt geeicht sind und für Anzeige, Registrierung oder Regelung ausgebildet werden können. Der Widerstand der Verbindungsleitungen zwischen Thermoelement und Drehspulgerät wird bei der Eichung berücksichtigt.

Bei Meßanlagen mit vielen Meßstellen lassen sich die Thermoelemente mit Hilfe eines geeigneten Umschalters auf ein einziges Empfangsgerät schalten, wodurch eine erhebliche Verbilligung der Meßanlage erzielt wird.

Für die Registrierung werden vornehmlich Punktschreiber verwendet (siehe Seite 58); der Anschluß von Linienschreibern ist mit Rücksicht auf ihren hohen Eigenverbrauch nur unter Verwendung einer geeigneten Verstärker-Einrichtung, z. B. des auf Seite 52 beschriebenen Fotozellen-Kompensators möglich.

Zur Registrierung schnell veränderlicher Temperaturen werden in besonderen Fällen (z. B. bei Erprobungsmessungen in Flugzeugen) optische Schreiber verwendet. Bei diesen hat das Drehspul-Millivoltmeter an Stelle des Zeigers einen kleinen Spiegel, von dem ein von einer Projektionslampe erzeugter Lichtstrahl auf einen lichtempfindlichen Schreibstreifen geworfen wird. Dank der geringen Masse des Spiegels wird neben großer Empfindlichkeit kleine Einstellzeit erreicht.

Über Temperatur-Regelung siehe Seite 65.

Häufig interessiert innerhalb eines Temperaturablaufes nur ein ganz bestimmter enger Bereich. In diesem Fall wird der Thermospannung eine Hilfsspannung entgegengeschaltet, die die Thermospannung zum Teil aufhebt (halb-potentiometrische Schaltung). Beträgt z. B. die Thermospannung 10 mV, so kann durch eine Gegenspannung von 5 mV erreicht werden, daß das Anzeigergerät über den ganzen Skalenumfang nur den Bereich $5 \cdot 10^{-2}$ mV umfaßt. Die Gegenspannung kann durch Vergleich mit einem Normalelement sehr genau bestimmt werden, so daß die Meßgenauigkeit in demselben Maße steigt, in dem der Meßbereich unterdrückt wird.

Für sehr genaue Messungen der Thermospannung (z. B. Kontrollmessungen) werden Kompensatoren verwendet; dem Thermoelement wird während der Messung kein Strom entnommen, so daß auch der Einfluß des Widerstandes im Meßkreis herausfällt.

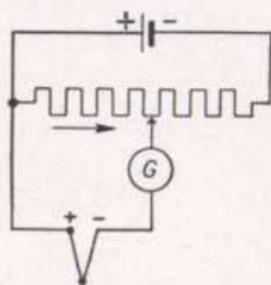


Bild 90

Die Kompensationsmessung beruht auf dem Vergleich der unbekanntes Thermospannung mit einer bekannten Spannung. Im Bild 90 ist das allgemeine Prinzip dargestellt. Die EMK des Thermoelements wird gegen einen Spannungsabfall geschaltet, der durch einen genau eingestellten Hilfsstrom an einem Widerstand erzeugt wird; der Spannungsabgriff wird so lange geändert, bis beide Spannungen gleich sind, d. h. bis das im Stromkreis der beiden Spannungen liegende Galvanometer keinen Ausschlag mehr zeigt. Die Einstellung des Hilfsstromes, die vor der eigentlichen Kompensation vorzunehmen ist, kann (wie beim Lindeck-Rothe-Kompensator) durch einen genauen Strommesser oder wie beim nachstehend beschriebenen tragbaren H&B-Kompensator mit Hilfe eines Normalelementes erfolgen.

Die grundsätzliche Schaltung des tragbaren H&B-Kompensators zeigt Bild 91. Als Bezugsnormal gilt ein Normalelement NE, das im unbelasteten Zustand stets eine genaue, gleichbleibende Spannung (etwa 1,0183 Volt bei 20° C) besitzt. Da das Normalelement nicht belastet werden darf, wird die Messung auf dem Umweg über einen Hilfsstromkreis vorgenommen. Als Hilfsstromquelle dient eine Trockenbatterie B.

Die Einstellung des Hilfsstromes J wird in Stellung I des Umschalters U mit dem Regelwiderstand R_f vorgenommen. Sie ist vollendet, wenn das Galvanometer G keinen Ausschlag mehr zeigt, wenn also der Spannungsabfall am festen Widerstand R_n gleich ist der EMK des Normalelementes NE.

Zur Messung der EMK des Thermoelements wird (in Stellung II des Umschalters U) der Stufenwiderstand R_f sowie der Schleifdraht R_s verstellt, bis

das Galvanometer G keinen Ausschlag mehr zeigt; der Spannungsabfall an den Teilwiderständen r_t und r_s ist dann gleich der EMK des Thermoelementes. Es ist also

$$U_x = J \cdot (r_t + r_s)$$

Bei dem ausgeführten Gerät kann U_x unmittelbar an der Kurbel- und Schleifdrahtstellung abgelesen werden. Weiter hat das Gerät Zusatzeinrichtungen zur Eichung und Prüfung von Millivoltmetern.

Von besonderer Bedeutung für die Temperaturmessung mit Thermoelementen ist die selbsttätige Kompensation durch den Fotozellen-Kompensator. Dieser bewirkt die verzögerungs- und verzerrungsfreie Verstärkung kleiner Thermospannungen und ermöglicht so deren genaue fortlaufende Messung mit Empfangsgeräten von hohem Leistungsverbrauch, d. h. von großer Einstellkraft und kurzer Einstelldauer. Wirkungsweise des Fotozellen-Kompensators siehe Seite 52.

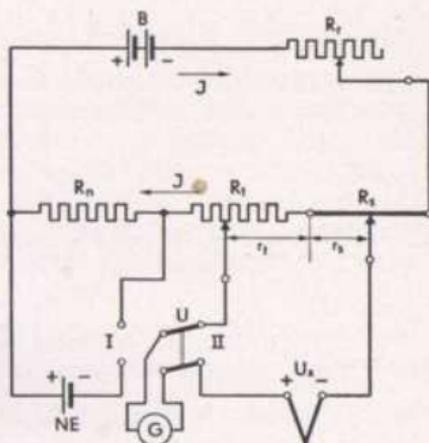


Bild 91

Die Ausgleichsleitungen

Wie eingangs gesagt, wird bei der Temperaturmessung mit Thermoelementen nicht die absolute Temperatur, sondern die Temperaturdifferenz zwischen Meß- und Vergleichsstelle erfaßt. Zur Erzielung einer exakten Messung muß also die Temperatur der kalten Lötstelle genau bekannt sein. Da die kalte Lötstelle, d. h. die Anschlußklemmen des Thermoelements durch Wärmeleitung oder Strahlung miterwärmt wird, wird das Thermoelement durch isolierte Drähte aus dem gleichen (bzw. thermoelektrisch gleichen) Material künstlich verlängert und die Kaltlötstelle auf diese Weise an einen Ort mit normaler Raumtemperatur verlegt. Da diese in der Regel 20°C beträgt, ist es üblich, die Skala der Anzeigegeräte nicht bei Null, sondern bei 20°C beginnen zu lassen.

Genaue Konstanthaltung der Kaltlötstellen - Temperatur läßt sich erreichen, wenn die Ausgleichsleitungen in einen mit elektrischer Beheizung und selbsttätiger Temperaturregelung ausgerüsteten Kasten, einen sog. Thermostaten eingeführt werden, dessen Temperatur über der höchsten Raumtemperatur liegt (in der Regel 50°C).

In besonderen Fällen kann als Thermostat eine mit schmelzendem Eis gefüllte Thermosflasche verwendet werden, dessen Temperatur bekanntlich genau 0°C beträgt.

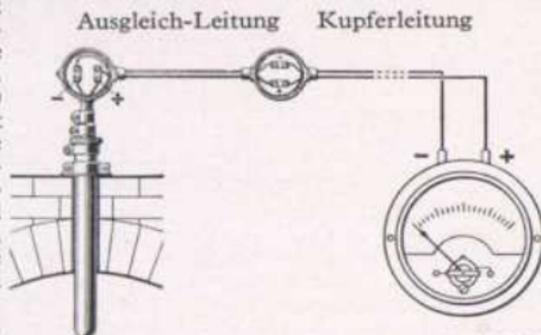


Bild 92

Messungen mit Strahlungs-pyrometern

Strahlungs-pyrometer werden in erster Linie für hohe Temperaturen verwendet, die mit Thermo-elementen nicht mehr zu erfassen sind, weiter auch dann, wenn der Verschleiß an Schutz-rohren das normale Maß übersteigt oder eine Messung mit Thermo-elementen nicht möglich ist. Das tragbare Te.lstrahlungs-pyrometer „Pyropto“ eignet sich nebenbei als bequemes Kontroll-gerät für thermoelektrische Meßanlagen.

Gesamtstrahlungs-pyrometer „Pyrradio“

für Temperaturen zwischen 600 und 2000°C

Das Gerät beruht auf der Messung der Gesamtstrahlung eines „schwarzen Körpers“; das ist ein Körper, der alle auftreffenden Strahlen aufsaugt und keine zurückwirft, andererseits aber bei jeder Temperatur ein Höchstmaß an Strahlung aussendet. Es wird vorwiegend für Messungen an geschlossenen Öfen verwendet, die als „schwarze Körper“ anzusprechen sind. Der Anbau erfolgt entweder vor einem Loch am Ofen oder druckdicht an die Ofenwand selbst. Dabei wird meistens ein einseitig geschlossenes Glührohr vor das „Pyrradio“ gesetzt, dessen Boden anvisiert wird.

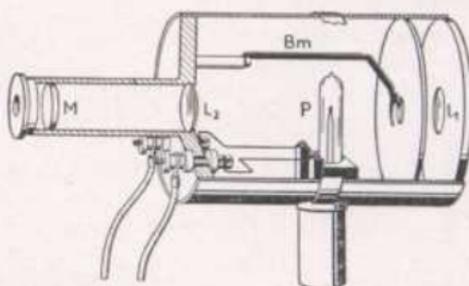


Bild 93

Die Linse L_2 und die Öffnung M dienen zum Anvisieren des Glühgutes.

Da die Wärmestrahlung mit der vierten Potenz der Temperatur wächst, ergibt sich eine am Anfang erheblich verengte und gegen das Ende immer weiter werdende Skalenteilung. Diese bei anderen Geräten unerwünschte Teilung ist jedoch hier sehr günstig, da die breite Teilung im Gebrauchsbereich liegt. — Im Gegensatz zu thermoelektrischen Pyrometern beschädigen gelegentliche Temperaturüberschreitungen das „Pyrradio“ nicht. Ein weiterer Vorzug ist in der geringen thermischen Trägheit zu erblicken.

Eine Bimetallblende macht die Temperaturanzeige unabhängig von der Eigentemperatur des Pyrradio bis zu 120° C; bei höherer Erwärmung ist das Gerät zu kühlen.

Für die Anzeige, Registrierung und Regelung der Meßwerte werden die gleichen Geräte wie bei Thermoelementen des vorigen Abschnittes verwendet.

Teilstrahlungspyrometer „Pyropto“

für Temperaturen zwischen 700 und 3500° C

Die Temperaturmessung beruht auf dem Helligkeitsvergleich eines elektrisch beheizten Glühfadens mit dem zu messenden Glühgut bei einer bestimmten Wellenlänge. Wird der Glühfaden auf die gleiche Helligkeit gebracht wie das Glühgut, so ist die am Glühfaden angelegte Spannung ein Maß für die Temperatur. Ein an die Klemmen des Glühfadens angelegter Spannungsmesser kann also unmittelbar in Grad Celsius geeicht werden.

Die Vergleichslampe sitzt im Strahlengang eines Fernrohres, mit dem das Glühgut anvisiert wird. Sie wird von einem Sammler gespeist. Die Einstellung auf die Helligkeit erfolgt mit Hilfe eines Regelwiderstandes.

Bei Temperaturen oberhalb 800° C wird vor die Okularlinse ein Rotfilter geschaltet. Die Erweiterung der Meßbereiche nach oben erfolgt durch Zwischenschaltung von Graugläsern zwischen Linse und Glühlampe.

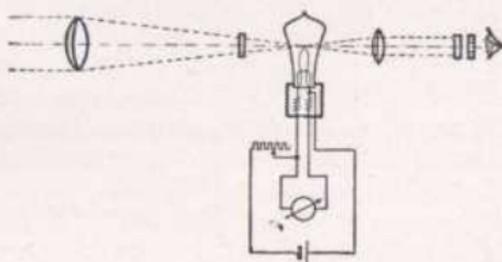


Bild 94

Die Messungen sind nur dann streng richtig, wenn der anvisierte Körper wie ein „schwarzer Körper“ strahlt, d. h. wenn er sich in einem Ofen ohne große Öffnung befindet. Bei Messung außerhalb des Ofens wird die Temperatur zu niedrig gemessen und ist dann an Hand einer Berichtigungstafel zu erhöhen.

Das Pyropto wird zur Messung von Glühgut in Öfen, für Blöcke und ausfließendes Material verwendet. Zur Messung der Flammentemperatur ist es jedoch nicht geeignet.

Temperaturregelung

Aufgabe der Temperaturregler ist es, in elektrischen sowie gas- und ölbeheizten Öfen, in Bädern, Wärmespeichern usw. die Tem-

peratur durch entsprechende Steuerung der Energiezufuhr entweder auf einem bestimmten Wert konstant zu halten oder den Temperaturverlauf nach einem vorher festgelegten Programm einzuhalten (Programmregler).

Die Meßwerke der Regler und die Meßmethoden sind die gleichen wie bei den Anzeige- und Schreibgeräten. Das auf Seite 57...64 Gesagte gilt also auch für die Regler.

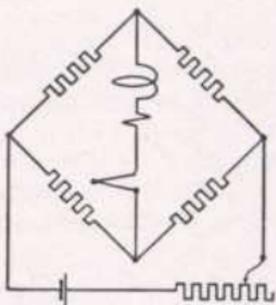


Bild 95

Bei hohen Ansprüchen an die Meßgenauigkeit können Regler zum Anschluß an Thermoelemente als „Kompensations-Regler“ ausgeführt werden. Das Drehspul-Meßwerk wird in Reihe mit dem Thermoelement in den Diagonalzweig einer Brückenschaltung gelegt und die Brücke so abgeglichen, daß beim Sollwert die EMK des Thermoelementes durch eine gleich große Spannung kompensiert wird. Solange der Sollwert vorhanden ist, fließt also im Stromkreis des Thermoelementes kein Strom und die Messung ist unabhängig von dem Widerstand im Meßkreis. Jede Abweichung vom Sollwert wird vom Zeiger auf der Skala angegeben. Als Hilfsspannung wird ein Spezial-Trockenelement verwendet, das mit Hilfe eines Normalelementes eingeregelt wird.

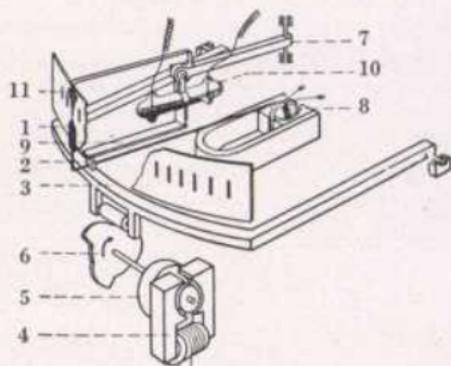


Bild 96

Mechanischer Aufbau der Regler

Bild 96 zeigt das Prinzip des Fallbügelreglers. Um trotz der geringen Einstellkraft des Meßwerkes eine kräftige und zuverlässige Kontaktgabe für die Betätigung des Steuerorganes einzuleiten, wird der Zeiger nur zur Steuerung herangezogen, während eine fremde Energiequelle die nötige Kraft liefert. Ein kleiner Motor (4) mit dem Untersetzungsgetriebe (5) treibt die Kurvenscheibe (6). Von dieser wird in regelmäßigen Zeitabständen (z. B. alle 20 Sekunden) der Tastbügel (3) gehoben und gesenkt. Dabei wird die Stellung des vor der Skala frei schwingenden Meßwerkzeigers (1) abgetastet.

Kommt der Zeiger in den Bereich des eingestellten Sollwertes (unter den Bügel 9), so wird der Bügel gehoben, die starr daran befestigte Quecksilber-
röhre (10) gekippt und dadurch der Stromkreis geschlossen (bzw. geöffnet).
Mit dem Tragarm (7) ist ein Sollwertzeiger (11) verbunden, mit dem sich die
Kontaktgabe auf einen bestimmten Wert der Skala einstellen läßt.

Da der Meßwerkzeiger bei jedem Hub des Fallbügels nur kurze Zeit festgehalten wird, und in der übrigen Zeit frei schwingt, ist es möglich mehr als eine
Schaltröhre anzubringen und dadurch die Energie-
zufuhr in Stufen vorzunehmen. — Das Schaltwerk
kann außerdem so ausgebildet werden, daß die ein-
mal vom Tastbügel hergestellte Schaltung der
Kippröhre bestehen bleibt (Dauerkontakt).

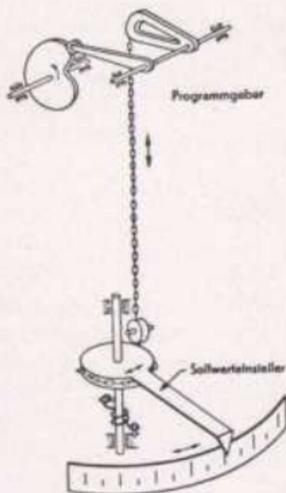


Bild 97

Bild 97 zeigt die Wirkungsweise des **Program-
reglers**. Dieser hat als zusätzliche Einrichtung zu
dem Fallbügelregler den Programmgeber, der für die
zeitgenaue selbsttätige Einstellung der Sollwerte
nach einem vorher festgelegten Programm sorgt. Das
Regelprogramm ist auf einer Scheibe aufgetragen,
die während der Dauer des Programms, die beliebig
gewählt werden kann, eine Umdrehung macht. Auf
dem Rande der Scheibe gleitet ein Fühlhebel, der
mit dem Sollwertesteller des Reglers mechanisch
verbunden ist. Der Antrieb der Programmscheibe
erfolgt durch einen kleinen Synchronmotor mit
einem der Programmdauer angepaßten Unter-
setzungsgetriebe.

Temperaturregelung bei elektrischen Öfen

Bei kleineren elektrischen Öfen bis etwa 6 kW reicht die Schalt-
leistung der Quecksilber-
röhren zur direkten Schaltung des Heiz-
stromes aus, bei größeren Öfen wird von der Schaltröhre ein
Schaltschütz gesteuert, das die Schaltung der Heizleistung über-
nimmt.

Die einfachste Art der Regelung ist dann gegeben, wenn die elektrische Heizung
beim Unterschreiten der Solltemperatur ein- und beim Überschreiten ausge-
schaltet wird. Diese Methode kann jedoch nur bei kleineren Öfen verwendet
werden. Bei größeren Öfen würde die in der Masse des Heizkörpers und der
Ofenwände aufgespeicherte Wärme den Ofeninhalt auch nach der Abschaltung
(d. h. über die Solltemperatur hinaus) heizen; der umgekehrte Vorgang würde
sich bei der Abkühlung abspielen, so daß also eine periodische Über- und
Unterwärmung, d. h. ein Pendelvorgang eintreten würde. Die Regelung er-
folgt deshalb bei größeren Öfen zweckmäßig in zwei oder mehreren Stufen
und zwar derart, daß ein Teil der Heizung bereits vor Erreichung des Soll-
wertes abgeschaltet wird. Bei Drehstrom läßt sich Regelung in zwei Stufen
leicht durch Stern-dreieck-Schaltung erzielen.

Temperaturregelung bei Öfen mit Gas-, Öl-, Dampf- und Heißwasser-Heizung

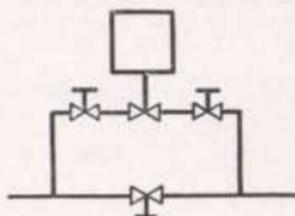


Bild 98

Das durch den Regler gesteuerte Drosselorgan für das Heizmedium wird grundsätzlich in eine Umgehungsleitung eingebaut, so daß also nur die Spitzenmenge geregelt wird, während die in der Hauptleitung fließende Teilmenge konstant bleibt (Bild 98).

Als Steuerorgan kann ein Magnetventil oder ein motorgetriebenes Steuerorgan (Ventil oder Drosselklappe) verwendet werden. Ähnlich wie bei elektrischen Öfen kann auch hier die Heizung in zwei oder mehreren Stufen vorgenommen werden. Bei Verwendung eines motorgetriebenen Drosselorgans bestehen außerdem verschiedene Schaltmöglichkeiten, mit deren Hilfe ein gleichmäßiger Temperaturverlauf erzielt werden kann.

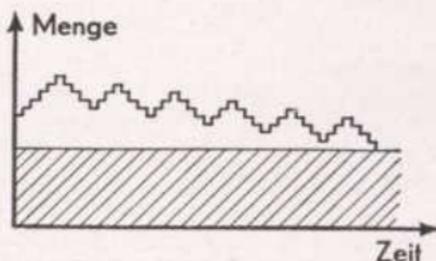


Bild 99

Mengendiagramm (Bild 99), dargestellt ist Mit dieser Schaltung lassen sich in einem großen Teil der Fälle große Regelgenauigkeiten erzielen.

Bei sehr großen Öfen und sehr hohen Ansprüchen an Genauigkeit wird häufig die Verwendung der „elastischen Rückführung“ erforderlich. Diese wirkt grundsätzlich folgermaßen:

Um auf jeden Fall eine Überregelung oder ein Pendeln zu verhüten, wird der Meßwerkzeiger des Reglers nach der ersten Kontaktgabe durch elektrische Beeinflussung künstlich sofort wieder in die Sollwertstellung zurückgeführt; dem Regler wird also sozusagen der Sollwert vorgetäuscht. Mit der gleichen Geschwindigkeit, mit der die Meßgröße dem Sollwert zustrebt, nimmt die elektrische Beeinflussung wieder ab, so daß der Zeiger in der Sollstellung bleibt, wenn sich inzwischen nicht die Meßgröße geändert hat. In diesem Fall wird das Drosselorgan vom Regler erneut verstellt und das Spiel beginnt von neuem. Die praktische Ausführung der elastischen Rückführung richtet sich nach dem Meßwerk und nach der Regelaufgabe.

Bei kleineren Öfen genügt als Steuerorgan häufig das Magnetventil. Bei größeren Öfen würde der Regelvorgang bei plötzlicher Änderung der Energiezufuhr leicht ins Pendeln geraten (vgl. Seite 67). Deshalb wird hier ein motorgetriebenes Drosselorgan verwendet. Das Öffnen und Schließen kann in einem Zuge oder schrittweise erfolgen. In letzterem Falle wird das Drosselorgan bei jedem Niedergang des Fallbügels nur um einen kleinen Betrag verstellt, wie im

Übersetzungsverhältnis

Bei **Leistungs-Transformatoren** ist die Übereinstimmung der Übersetzungsverhältnisse die wichtigste Bedingung für den einwandfreien Parallel-Lauf. Schon kleine Abweichungen können sehr störend wirken.

Bei **Meßwandlern** verursachen Abweichungen vom Soll-Übersetzungsverhältnis zusätzliche Meßfehler, die sich vor allem bei Messung el. Arbeit (Verkauf oder Kauf von elektrischer Energie) geldlich auswirken können. Die Meßtechnik hat daher Geräte geschaffen, die eine einfache und genaue Prüfung des Übersetzungsverhältnisses ermöglichen.

Messung des Übersetzungsverhältnisses von Leistungs-Transformatoren

Die naheliegende Messung der Primär- und Sekundärspannung bei Leerlauf mit Spannungsmessern, gegebenenfalls unter Verwendung von Spannungswandlern, wird selbst bei Verwendung von Präzisions-Geräten zu ungenau, da sich einerseits die Fehler der Meßgeräte addieren können, und andererseits der Eigenverbrauch der Geräte oft eine Belastung darstellt, so daß die Messung in Wirklichkeit nicht mehr bei Leerlauf erfolgt. Der Meßfehler wird noch vergrößert, wenn die Messung aus Mangel an geeigneten Hochspannungs-Meßgeräten nicht mit der Nennspannung, sondern mit einer wesentlich niedrigeren Spannung vorgenommen wird. Weitere Fehler werden durch die Spannungsschwankungen im Netz hervorgerufen.

Bei dem **Trafo-Übersetzungsmesser nach Keller** (Bild 100) erfolgt die Messung des Übersetzungsverhältnisses durch Kompensation. Als Meßspannung genügt in den meisten Fällen die Netzspannung von 220 Volt, nur bei Transformatoren für sehr hohe Spannungen ist auch eine höhere Meßspannung erforderlich. Die Fehlergrenze beträgt höchstens 0,3%.

Der Meßvorgang ist folgender:
Der Transformator wird oberspannungsseitig erregt; parallel zur Oberspannungs-Wicklung liegt ein Spannungsteiler. Die Unterspannung des Transformators wird unter Zwischenschaltung eines vielfach angezapften Hilfswandlers gegen eine am Spannungsteiler abgegriffene Teilspannung kompensiert. Als Nullgerät dient dabei ein Drehpulgerät mit Trocken - Gleichrichter. Unter Berücksichtigung des gewählten Übersetzungsverhältnisses des Hilfswandlers ist dann das Verhältnis am Spannungsteiler ein Maß für das Leerlauf-Übersetzungsverhältnis des Prüflings.

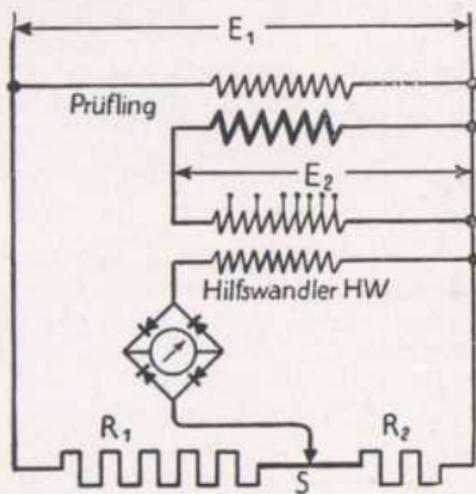


Bild 100

Die Belastung des Prüflings durch die Meßeinrichtung ist in jedem Fall so gering, daß die Messung des Übersetzungsverhältnisses praktisch im Leerlauf erfolgt. Schwankungen der Meßspannung haben keinen Einfluß auf die Meßgenauigkeit. Da nur eine einzige Ablesung erforderlich ist, kann die Messung auch von einer einzigen Person durchgeführt werden.

Messung des Übersetzungsverhältnisses bei Meßwandlern

Da an die Meßwandler nicht nur Strom- und Spannungsmesser, sondern auch Leistungsmesser und Zähler angeschlossen werden, ist außer der Feststellung des Übersetzungsverhältnisses auch die Messung der Phasenverschiebung zwischen dem primären und sekundären Werte von Bedeutung. Die ausgeführten Prüfeinrichtungen tragen dem Rechnung.

Die Meßwandler-Prüfeinrichtung nach Schering-Alberti, die als Beispiel beschrieben werden soll, beruht auf der Kompensation zweier von der Primär- und Sekundärgröße abhängiger Spannungen. Bild 101 zeigt die Stromwandlerprüfung.

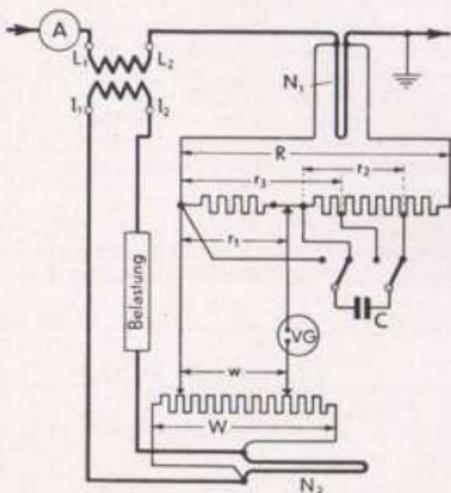


Bild 101

Der Primärstrom I_1 des zu prüfenden Stromwandlers durchfließt den Strommesser A und ein Widerstandsnormal N_1 . Der Sekundärkreis ist über eine Belastung und das Widerstandsnormal N_2 geschlossen und wird vom Strom I_2 durchflossen. Parallel zu N_1 und N_2 liegen die Spannungsteiler R und W, außerdem parallel zu einem Teilwiderstand von R die Kapazität C. Das Verhältnis $W : w$ wird entsprechend dem Übersetzungsverhältnis des Prüflings eingestellt. Als Nullgerät dient ein Vibrationsgalvanometer VG. Die Kompensation der Spannung erfolgt durch den Regelwiderstand r_1 , die der Phasenlage durch den regelbaren Kompensator C. Das Vibrationsgalvanometer zeigt erst Null, wenn sowohl Spannung als auch Phase kompensiert sind. Der

Stromfehler kann unmittelbar am Regelwiderstand r_1 abgelesen werden, während die Stellung des regelbaren Kompensators C ein Maß für den Fehlwinkel ist.

Die Prüfeinrichtung für die Spannungswandler ist im Prinzip die gleiche, lediglich die Meßelemente sind andere.

Vakuum

Für die betriebsmäßige Vakuummessung kommen die Barowaage und Feder-Druckmesser in Frage.

Die Barowaage ist eine Sonderausführung der Ringwaage und dient vornehmlich zur genauen Messung von Hochvakuum, z. B. bei der Überwachung von Kondensator-Anlagen. Die Messung erfolgt durch den Vergleich des zu messenden (unvollkommenen) Vakuums mit dem absoluten Vakuum; infolgedessen ist die Anzeige stets unabhängig vom Barometerstand (absolut).

Das Prinzip der Barowaage zeigt Bild 102. Ein drehbar gelagerter Hohlring aus Glas ist zur Hälfte mit Quecksilber gefüllt. Der Raum über dem Quecksilber ist durch eine Trennwand in zwei Kammern geteilt. Die rechte Kammer ist vollkommen geschlossen und evakuiert, die linke durch eine bewegliche Leitung mit dem zu messenden Vakuum verbunden.

Auf der Trennwand ruht von der rechten Kammer her der Druck Null (absolutes Vakuum), von der linken Kammer wirkt der Überdruck des zu messenden Vakuums. Der Waagering wird daher nach rechts gedreht, bis er durch das Gegen-Drehmoment des Gewichtes G in die Gleichgewichtslage kommt. Der Drehwinkel ist ein Maß für das Vakuum. — Der gleichzeitig auf den Quecksilberspiegel wirkende Druck ruft lediglich eine Verschiebung der Quecksilbersäule hervor.



Bild 102

Der Höchstmeßbereich ist bestimmt durch den mittleren Durchmesser des Glasringes. Dieser beträgt bei den ausgeführten Geräten etwa 150 mm, so daß ein Höchstmeßbereich von etwa $80 \cdot 100\%$ Vakuum erzielt wird. Der kleinste ausführbare Meßbereich beträgt etwa $95 \cdot 100\%$ Vakuum (stets bezogen auf die technische Atmosphäre = 735,6 mm QS). — Temperaturschwankungen haben keinen Einfluß auf die Meßgenauigkeit.

Feder-Druckmesser

Für Vakuummessung allgemeiner Art werden die auf Seite 4 beschriebenen Plattenfeder- und Rohrfeder-Meßwerke verwendet. Die Messung erfolgt durch Vergleich des zu messenden Vakuums mit der Atmosphäre; die Anzeige ist also stets abhängig vom Barometerstand.

Fernübertragung der Meßwerte

erfolgt wie bei den Druckmessern durch Elektro-Fernsender (siehe Seite 10).

Widerstand

Einheit: Ohm (Ω); $10^3 \Omega = 1 \text{ k}\Omega$ (Kilohm); $10^6 \Omega = 1 \text{ M}\Omega$ (Megohm). Ist U die Spannung in V, I der Strom in A, so ist der

Widerstand: $R = \frac{U}{I}$ (Ohmsches Gesetz).

Die Ermittlung des Widerstandes kann also grundsätzlich aus Strom und Spannung erfolgen. Die Durchführung einer einigermaßen genauen Messung ist jedoch umständlich, da u. a. der Eigenverbrauch des Strom- und Spannungsmessers, die Widerstandszunahme durch Erwärmung infolge Stromdurchgangs usw. berücksichtigt werden muß. — Die Meßtechnik bietet wesentlich zweckmäßigere und einfacher zu handhabende Einrichtungen. Die wichtigsten davon zur Messung des Widerstandes von festen Leitern, von Erd- und Flüssigkeitswiderständen, sowie von Isolations- und Oberflächenwiderständen sind nachstehend zusammengestellt.

Widerstandsmessung von festen Leitern

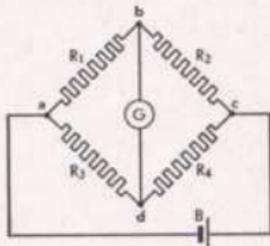


Bild 103

Wheatstone-Meßbrücke

Bei sehr genauen Brücken mit Spiegelgalvanometern können Widerstände zwischen $0,1$ und $10^6 \Omega$ mit einer Toleranz von etwa $0,05\%$ gemessen werden.

In Bild 103 ist R_1 der unbekannte zu messende Widerstand, R_2 , R_3 und R_4 bekannte regelbare Widerstände, G ist ein Galvanometer, B eine Stromquelle (Taschenlampenbatterie). Werden die drei bekannten Widerstände so eingeregelt, daß der Galvanometerstrom

Null wird, so wird die Spannung $ad = ab$ und $dc = bc$, infolgedessen

$R_1 : R_2 = R_3 : R_4$ und endlich $R_1 = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}$. Der Wert $\frac{R_3}{R_4}$ wird zur Vereinfachung der Rechnung als dekadische Zahl gewählt (z. B. 10 ; 1 ; $0,1$; $0,01$), so daß die Bestimmung von R_1 lediglich durch Multiplikation von R_2 mit einer dekadischen Konstanten erfolgt.

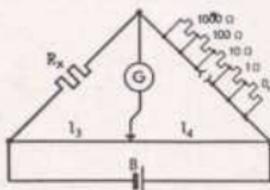


Bild 104

Schleifdraht-Meßbrücke

Der Meßbereich und die zu erreichende Toleranz genügen für technische Messungen.

An Stelle der Widerstände R_3 und R_4 wird ein kalibrierter Schleifdraht verwendet, der durch einen beweglichen Kontakt (Schleifer) in die beiden Abschnitte l_3 und l_4 geteilt wird. Als Vergleichswiderstand (R_2) dient einer der festen Widerstände $0,1$, 1 , 10 , 100 oder 1000Ω , der entsprechend der Größenordnung des zu messenden Widerstandes zu wählen ist. Die beiden Abschnitte l_3 und l_4 werden so eingestellt, daß das Galvanometer

Null zeigt. Es ist dann: $R_x = R_2 \cdot \frac{l_3}{l_4}$

Die Walzenmeßbrücke

ist eine Schleifdraht-Meßbrücke mit verlängertem Schleifdraht; Meßbereich und Toleranz sind infolgedessen günstiger (etwa $0,1 \cdot \dots \cdot 100000 \Omega$ bei einer Toleranz von etwa $0,3\%$).

Der Draht ist auf einer Walze aus Isolierstoff in etwa 10 Windungen spiralenförmig aufgewickelt. Als beweglicher Kontakt dient eine kleine Gleitrolle, die durch einen besonderen Trieb eingestellt wird.

Thomson-Meßbrücke

für kleine Widerstände zwischen etwa 10^{-6} und 1Ω . Bei Verwendung eines hinreichend empfindlichen Galvanometers und genauer Präzisions-Widerstände läßt sich eine Toleranz von $0,1\%$ erzielen. Der Einfluß der Zuleitungen und der Übergangswiderstände fällt hier heraus.

Die Messung beruht auf dem Vergleich des Spannungsabfalls, der an dem zu messenden Widerstand (R_X) erzeugt wird, mit dem Spannungsabfall an einem bekannten, sehr genauen Widerstand (R_N).

Gemäß Bild 105 fließt aus der Batterie B durch R_X und R_N ein Strom, der größenordnungsmäßig mehrere Ampere beträgt. An den Klemmen von R_X und R_N wird der Spannungsabfall abgegriffen. Werden die (im Vergleich zu R_X und R_N sehr hochohmigen) Widerstände R_3 bis R_6 so gewählt bzw. geändert, daß das Galvanometer G keinen Ausschlag mehr zeigt, so ergibt sich aus ähnlichen Überlegungen wie bei der Wheatstone-Brücke:

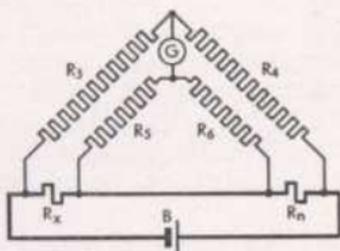


Bild 105

$$R_X : R_N = R_3 : R_4 = R_5 : R_6; R_X = R_N \cdot \frac{R_3}{R_4} = R_N \cdot \frac{R_5}{R_6}.$$

Das wesentliche bei der Schaltung ist, daß auch die Verbindungsleitung zwischen R_X und R_N durch die Widerstände R_5 und R_6 im Verhältnis $R_X : R_N$ geteilt wird, so daß auch deren Einfluß herausfällt.

Das Kreuzspul-Ohmmeter

ist im Gegensatz zu den Meßbrücken ein Zeigergerät für direkte Ablesung. Es wird mit Vorteil besonders dann verwendet, wenn eine größere Anzahl gleichartiger Widerstände in rascher Folge zu messen ist.

Das Kreuzspul-Meßwerk. Im inhomogenen Feld eines Dauermagneten drehen sich zwei starr miteinander verbundene, gekreuzte Spulen. Der Widerstand des

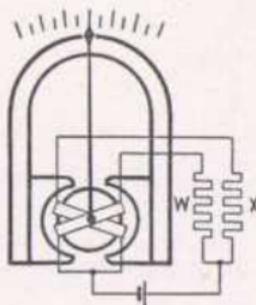


Bild 106

einen Spulenzweiges ist konstant, im anderen Spulenzweig liegt der zu messende Widerstand. Die Anzeige ist theoretisch nur vom Verhältnis der beiden Spulenströme, nicht aber von der angelegten Spannung abhängig. Praktisch beeinflußt eine Schwankung der Meßspannung um etwa $\pm 20\%$ die Anzeige nicht.

Leitungsprüfer

sind kleine Drehspul-Strommesser mit Ohm-Skala. Sie dienen in der Hauptsache zur Untersuchung verlegter Leitungen (Fernsprechleitungen, Zündkabel usw.).

Die Anzeige ist nur bei der Spannung richtig, die der Eichung zugrunde gelegt wurde. Zum Ausgleich von Spannungsschwankungen wird in das Gerät ein Spannungsteiler oder ein magnetischer Nebenschluß eingebaut.

Messung des Erdwiderstandes

Hier werden meistens Schleifdraht- oder Walzen-Meßbrücken verwendet. Die Messung erfolgt mit Wechselstrom, weil bei Verwendung von Gleichstrom Polarisations-Erscheinungen auftreten würden, die das Meßergebnis erheblich fälschen könnten. Als Nullgerät tritt an die Stelle des Galvanometers ein Kopfhörer. Die Abgleichung der Brücke ist dann vollzogen, wenn im Kopfhörer kein Ton mehr hörbar ist.

Bei der Messung von Erdwiderständen wird grundsätzlich folgendermaßen verfahren:

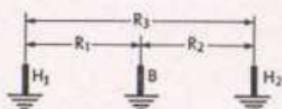


Bild 107

Außer der zu messenden Erdung B sind noch zwei Hilfserdungen H_1 und H_2 erforderlich. Die drei Erdungen müssen mindestens 20 m voneinander entfernt sein. Es sind die Erdungen $B+H_1$ ($= R_1$), $B+H_2$ ($= R_2$) und $H_1 + H_2$ ($= R_3$) zu messen. Es ist dann:

$$B = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2}$$

Die Meßtechnik liefert auch Geräte, bei denen der Widerstand B mechanisch (ohne Rechnung) ermittelt wird.

Messung des Widerstandes von Flüssigkeiten siehe Leitfähigkeit Seite 30.

Messung des Isolations-Widerstandes

Die Widerstandswerte liegen hier sehr hoch. Die Skala der Meßgeräte wird deshalb in Megohm geeicht. Die Meßspannung wird dementsprechend ebenfalls hoch gewählt (meistens 500 V). Die Messung wird mit Gleichstrom ausgeführt, damit das empfindliche Drehspul- oder Kreuzspul-Meßwerk verwendet werden kann und Fälschungen der Anzeige durch die Kapazität des Prüflings vermieden werden.

Kurbelinduktor

Der die Spannung erzeugende Induktor wird durch eine Handkurbel mit entsprechender Zahnradübersetzung auf etwa 3000 U/min. gebracht. Auf der Achse mit dem Anker befindet sich ein Stromwender, der an die Bürsten Gleichstrom abgibt. Der Strom wird über die beiden Widerstände R_1 und R_2 an den Strommesser und an die mit E und 500 V bezeichneten Anschlußklemmen geleitet, zwischen denen der gesuchte Isolationswiderstand R_x liegt.

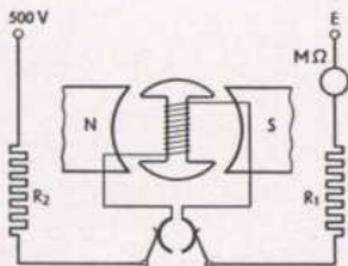


Bild 108

Die Anzeige am Strommesser ist nicht nur vom Isolationswiderstand, sondern auch von der Meßspannung, d. h. von der Umdrehungszahl des Induktors abhängig. Diese muß also zur Erzielung eines brauchbaren Meßergebnisses möglichst genau eingehalten werden. Bei dem Kurbelinduktor „Fixohmmeter“ wird der Zeiger bei Erreichung der richtigen Drehzahl durch einen Fallbügel selbsttätig festgehalten, damit der Widerstandswert in Ruhe nachträglich abgelesen werden kann.

Kreuzspul-Isolationsmesser ohne Kurbel

Dieses Gerät enthält als Spannungsquelle eingebaute Taschenlampenbatterien, aus denen mittels Umspanner mit Summergleichrichter eine Gleichspannung von 500 V erzeugt wird. Die Messung des gesuchten Isolationswiderstandes erfolgt durch ein Kreuzspul-Meßwerk (vergl. Bild 106), dessen eine Spule als Stromspule geschaltet ist, während die andere an der Spannung liegt. Die Anzeige ergibt den Quotienten aus Spannung und Strom, d. h. den gesuchten Isolationswiderstand.

Der praktische Vorteil gegenüber den Kurbelinduktoren liegt darin, daß der Kreuzspul-Isolationsmesser mit nur einer Hand bedient werden kann, so daß die andere zum Abtasten der Leitungsanschlüsse frei ist.

Messung des Oberflächenwiderstandes von Isolierstoffen

Die Schaltung nach Bild 109 zeigt als Beispiel ein Verfahren, das mit besonderem Vorteil auch bei Fertigstücken (gleichgültig ob gerade oder gekrümmt) angewendet werden kann.

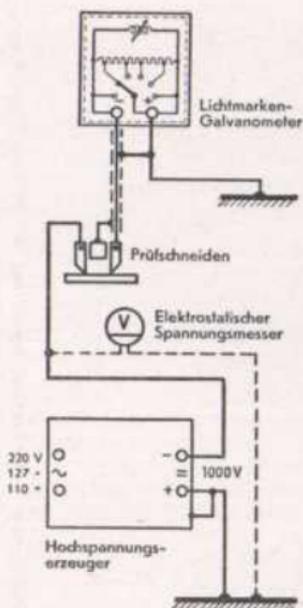


Bild 109

Auf die Oberfläche des Prüflings werden mit einem weichen Bleistift unter Verwendung einer Schablone zwei Graphitstriche in genau festgelegter Entfernung aufgetragen. Auf diese Striche werden zwei Metallprüfsschneiden, die besonders hochwertig gegeneinander isoliert sind, aufgesetzt. Die eine Schneide wird mit dem negativen Pol einer Gleichstromquelle von 1000 V verbunden, von der anderen Schneide führt eine Leitung mit besonderer Isolierung zu einem empfindlichen Drehspulgerät. Der Pluspol der Gleichstromquelle und des Galvanometers sind geerdet. Die Werte für den Isolationswiderstand können aus der Anzeige des Drehspulgerätes leicht ermittelt werden.

In der Anordnung nach Bild 109 wird als Drehspulgerät ein hochempfindliches Lichtmarken-Galvanometer mit fünf Meßbereichen verwendet (geeignet für Isolationswiderstände bis $10^{12} \Omega$), sowie eine besondere Stromquelle mit Transformator und Glühkathoden-Gleichrichter zum Anschluß an das Wechselstromnetz. Vor den Gleichspannungsklemmen liegt ein Schutzwiderstand von $0,25 \text{ M}\Omega$. Die Prüfung der Spannung erfolgt durch ein statisches Voltmeter.

Bei der Prüfung von Platten mit ebenen Oberflächen wird anstelle der oben genannten Metallprüfsschneiden eine Elektrode mit zwei Gummischneiden verwendet, die mit dünnem Blattmetall belegt sind. Der Abstand der Schneiden beträgt 10 mm. Als Drehspulgerät wird dann ein Spiegelgalvanometer hoher Empfindlichkeit erforderlich.

Mit der beschriebenen Einrichtung lassen sich auch der Widerstand im Innern der Isolierstoffe nach dem Stöpsel- und Quecksilberverfahren sowie der Durchgangswiderstand ermitteln.

Anhang

Skalen und Zeiger von Meßgeräten

Die Teilung und Bezifferung der Skala müssen dem Verwendungszweck des Meßgerätes angepaßt sein. Es können hier zwei Gruppen unterschieden werden, eine für genaue Nahablesung und eine, bei der es mehr auf gute Übersicht ankommt.

Die erste Gruppe umfaßt hauptsächlich die tragbaren Feinmeßgeräte (Präzisions- und Normal-Meßgeräte). Die Teilung ist in gleichmäßig dünnen Strichen ausgeführt. Der Zeiger ist entweder zu einem dünnen Messer von Strichbreite ausgezogen (Bild 110) oder als Fadenzeiger (Bild 111) ausgebildet. Unter dem Zeiger befindet sich ein Spiegelbogen; bei der Ablesung muß sich der Zeiger mit dem Spiegelbild decken, damit Fehler durch Parallaxe vermieden werden.

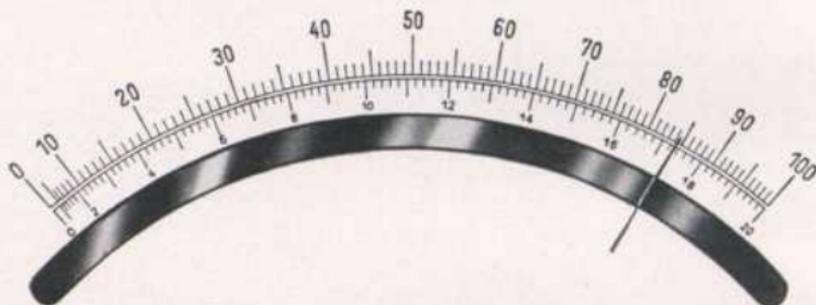


Bild 110 Skala eines Dreheisen-Präzisionsgerätes mit Messerzeiger und Spiegelbogen. Etwa $\frac{1}{2}$ nat. Größe

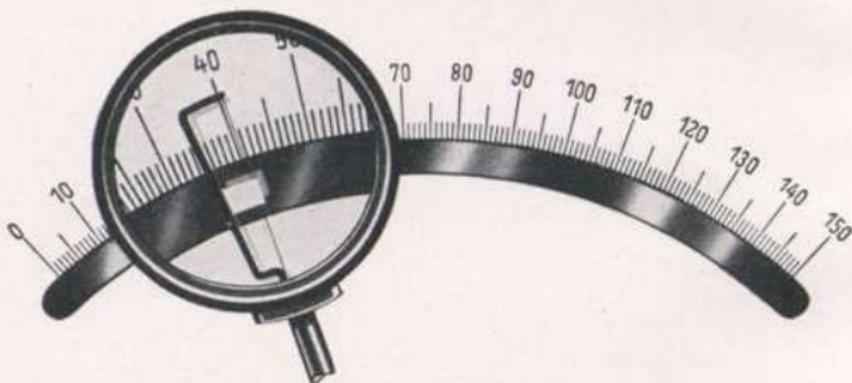


Bild 111 Skala eines Drehspul-Normalgerätes mit Fadenzeiger und Spiegelbogen, Ablesung mit Lupe. Etwa $\frac{1}{2}$ nat. Größe

Die zweckmäßigste Form der Skalenteilung für kleinere und mittlere Schalttafelgeräte zeigt Bild 112. Der obere Teil der Fünfer- und Zehnerstriche ist verstärkt, so daß außer der Feinablesung aus der Nähe auch gute Schätzung aus einiger Entfernung möglich ist. Der Zeiger wird als Lanzette oder als Balkenzeiger mit messerförmigem Ende ausgeführt.

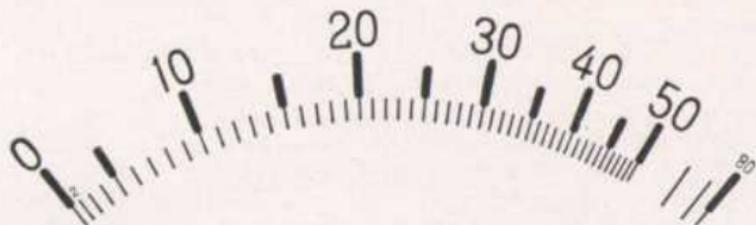


Bild 112 Skala eines überstromsicheren Schalttafel-Dreheisen-Strommessers von 130 mm Gehäusedurchmesser. Natürliche Größe

Große Schalttafelgeräte erhalten meistens Grobteilung, d. i. Teilung mit kräftigen Strichen (siehe Bild 140 und 141 Seite 97), damit auf größere Entfernung abgelesen werden kann.

Bei elektrischen Meßgeräten für kleinste Ströme und Spannungen tritt zur Erhöhung der Empfindlichkeit an die Stelle des Zeigers aus Metall ein gewichtsloser Lichtzeiger. Es wird hierbei ein Lichtstrahl durch einen kleinen am Meßwerk befestigten Spiegel abgelenkt und eine Marke auf eine Skala geworfen (Bild 113).

In neuerer Zeit gewinnt der Lichtzeiger immer mehr Bedeutung für Großanzeigergeräte. Ein Beispiel dafür ist das Großanzeigergerät Profilux (Seite 98).

Ausführung der Skala. Normal erhalten die Skalen schwarze Striche und Zahlen auf weißem Grund. Geräte, die im Dunkeln abgelesen werden müssen, bekommen entweder eine Skala aus Opalglas, hinter der Glühlampen angeordnet sind, oder es wird kleine Soffittenlampen beleuchtet, die so angeordnet sind, daß sie bei der Ablesung nicht blenden. Tragbare Geräte können einen getrennten Beleuchtungsrahmen erhalten, der bei Bedarf aufgesetzt wird (Bild 114). Ist eine Skalenbeleuchtung durch Glühlampen nicht erwünscht, wie z. B. bei Fahrzeug- und Flugzeuggeräten, so wird die Skalenfläche schwarz und die Teilung und Beschriftung sowie die Zeigerstütze in weißer Leuchtfarbe ausgeführt.

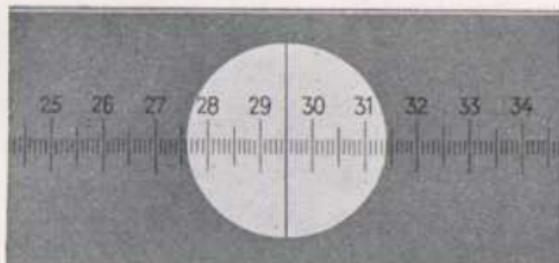


Bild 113 Skalenausschnitt eines Drehspul-Galvanometers, etwa $\frac{1}{3}$ nat. Größe

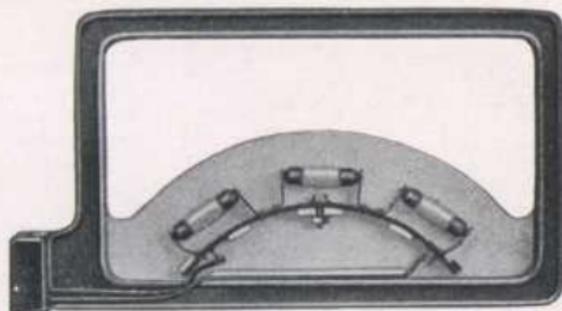


Bild 114 Aufsetzbarer Beleuchtungsrahmen für tragbare Geräte (Rückseite).

Elektrischer Teil

Ferraris- und Hitzdraht-Meßwerk

Von diesen beiden früher bedeutsamen Meßwerken, die der Vollständigkeit halber hier aufgeführt werden sollen, wird heute nur noch das Ferraris-Meßwerk in einigen Sonderfällen, das Hitzdraht-Meßwerk überhaupt nicht mehr verwendet.



Bild 115

Das Ferraris-Meßwerk (Bild 115)

Zwei Spulenpaare sind so angeordnet, daß in dem von ihnen eingeschlossenen Raum durch phasenverschobene Wechselströme ein Drehfeld entsteht. In diesem Raum ist eine Aluminiumtrommel leicht drehbar angebracht. Durch die in der Trommel induzierten Ströme entsteht ein Drehmoment; die Trommel dreht sich soweit, bis die zunehmende Spannung einer Spiralfeder dem Drehmoment das Gleichgewicht hält. Eine Magnetdämpfung bewirkt schwingungsfreie Einstellung des Zeigers.

Die Anzeige des Ferraris-Meßwerks ist in starkem Maße von der Frequenz abhängig. Die Geräte werden deshalb stets für eine bestimmte Frequenz geeicht.

Die Erweiterung des Meßbereiches erfolgt durch Meßwandler.



Bild 116

Das Hitzdraht-Meßwerk (Bild 116)

Ein gespannter Platiniridium-Draht wird vom Meßstrom durchflossen. Dadurch wird er erwärmt, dehnt sich aus und gibt so den Zug einer Plattfeder, die über einen Seidenfaden und den Brückendraht hinweg immer am Meßdraht zieht, stärker nach. Diese Bewegung wird durch den Seidenfaden vergrößert und auf den Zeiger übertragen. Schwingungsfreie Einstellung des Zeigers wird durch eine auf der Achse befestigte Aluminiumscheibe bewirkt, die sich im Feld eines Dauermagneten bewegt.

Die Anzeige des Hitzdraht-Meßwerkes ist bei Gleich- und Wechselstrom, auch bei höherer Frequenz und beliebiger Kurvenform richtig.

Die Erweiterung des Meßbereiches erfolgt bei Gleichstrom durch Neben- bzw. Vorwiderstände, bei Wechselstrom durch Meßwandler.

Ausführungsbeispiele von elektrischen Meßgeräten



Bild 117
Rundes Schalttafelgerät
für Aufbau



Bild 118
Quadrant-Instrument
für Schalttafel-Einbau



Bild 119
Kleines
Profilgerät
für Einbau



Bild 120
Rundes Schalttafelgerät
für Einbau



Bild 121
Klein-
gerät für
Einbau

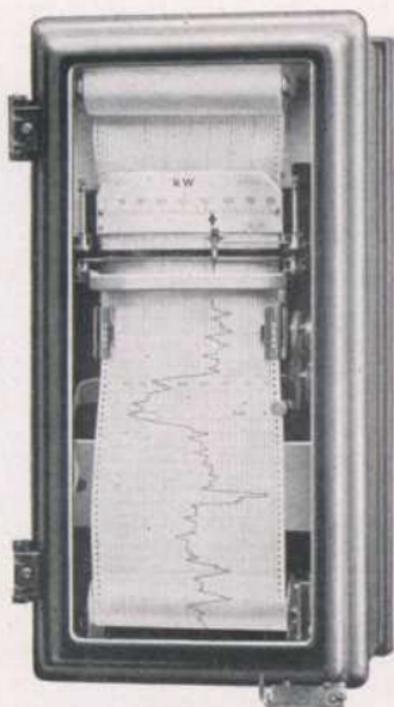


Bild 122
Großer Linienschreiber
für Aufbau m. selbsttät.
Papieraufwickelwerk



Bild 123

Druckwasserdichtes Rundgerät mit Kabelanschluß



Bild 124

Großes Flachprofilgerät für Einbau



Bild 125

Schalttafel-Flachprofilgerät mit Lichtzeiger



Bild 126

Leistungs-Meßkoffer für Wechselstrom und beliebig belasteten Drehstrom ohne Nulleiter, mit 4 Strom- und fünf Spannungs-Meßbereichen



Bild 127
Kabelmeßkoffer nach Graf für Fehlerorts-
Bestimmung, Wider-
stands-, Isolations-
und Erdwiderstands-
Messung

Bild 128
„Multavi“
Kleines tragbares
Vielfach-
Meßgerät
in Isoliergehäuse



Bild 129
Großes tragbares Präzisionsgerät in
Isoliergehäuse, mit Messerzeiger und
Spiegelbogen



Bild 130
Kleines tragbares
Avi-Meßgerät in
Preßstoffgehäuse



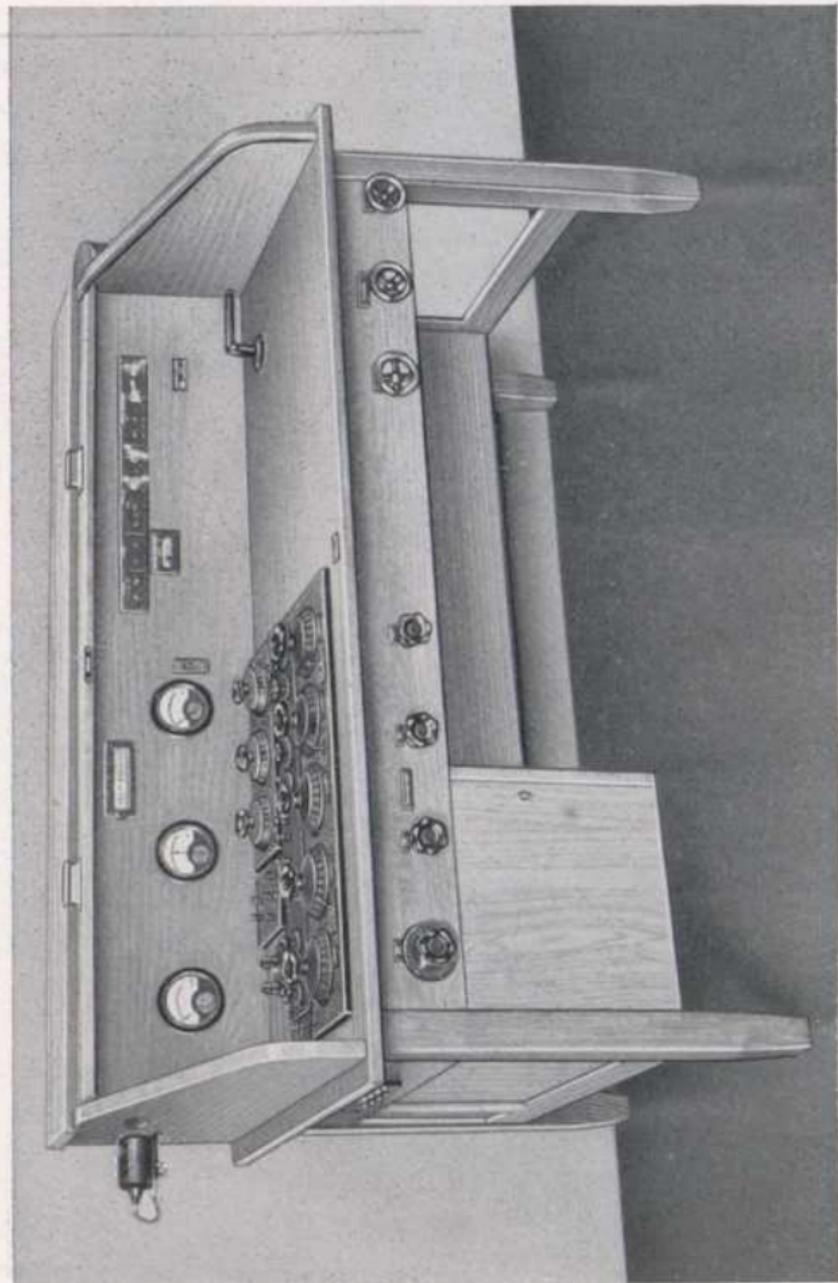


Bild 131. Großer Kompensations-Meßtisch mit Präzisions-Kompensator

Fehlergrenzen der elektrischen Meßgeräte

Elektrische Meßgeräte, die den Regeln des VDE entsprechen, erhalten ein Klassenzeichen:

Klassenzeichen	0,2	} Feinmeßgeräte
„	0,5	
„	1,0	} Betriebsmeßgeräte
„	1,5	
„	2,5	

Der Anzeigefehler

wird in Prozenten des Meßbereich-Endwertes angegeben, bei Quotientenmessern in Prozenten der dem Meßbereich entsprechenden Skalenlänge. Der Anzeigefehler darf innerhalb des Meßbereiches die nachstehenden Werte nicht überschreiten:

Klasse	Zulässiger Anzeigefehler
0,2	$\pm 0,2\%$
0,5	$\pm 0,5\%$
1,0	$\pm 1,0\%$
1,5	$\pm 1,5\%$
2,5	$\pm 2,5\%$

Diese Fehlergrenzen beziehen sich auf normale Verhältnisse, also:
auf die Raumtemperatur von 20°C ;

bei Wechselstromgeräten auf praktisch sinusförmigen Stromverlauf und auf die Nennfrequenz bzw. den Nennfrequenz-Bereich;

bei Leistungsmessern auf die Nennspannung und $\cos \varphi = 1$;

bei Leistungsfaktormessern auf die Nennspannung und eine Strombelastung zwischen 20 und 100% des Nennstromes;

bei Spannungs- und Strommessern der Klassen 0,2; 0,5; 1,0 auf kurz- und langdauernde Einschaltung;

bei Leistungsmessern der Klassen 0,2; 0,5; 1,0; auf kurz- oder langdauernde Einschaltung des Spannungspfadcs mit dem Nennwert der Spannung und kurz- oder langdauernde Einschaltung des Strompfades.

Die dabei einzuhaltenden Bedingungen siehe „Regeln für Meßgeräte“ des VDE (ETZ-Verlag, Berlin-Charlottenburg 4, VDE-Haus).

Zusätzliche Anzeigefehler durch Temperatur-, Frequenz- und Spannungs-Einfluß

Klasse	Zulässige Änderung der Anzeige
0,2	$\pm 0,2\%$ der Anzeige
0,5	$\pm 0,5\%$ „ „
1,0	$\pm 1,0\%$ „ „
1,5	$\pm 1,5\%$ „ „
2,5	$\pm 2,5\%$ „ „

Die Werte der obigen Tabelle dürfen nicht überschritten werden:

- bei einer Änderung der Raumtemperatur gegenüber der Bezugstemperatur (20°C) um $\pm 10^{\circ}\text{C}$;
- bei einer Änderung der Frequenz gegenüber der Nennfrequenz um $\pm 10\%$ oder bei einer Änderung der Frequenz innerhalb des Nennfrequenzbereiches;
- bei einer Änderung der Spannung gegenüber der Nennspannung um $\pm 20\%$ oder bei einer Änderung der Spannung innerhalb des Nennspannungsbereiches.

Fremdfeld-Einfluß

- Die Änderung der Anzeige, die durch ein Fremdfeld von 5 Gauß^3 bei gleicher Stromart und Frequenz, bei ungünstigster Phase des Fremdfeldes und bei ungünstigster gegenseitiger Lage der Felder verursacht wird, darf $\pm 1,5\%$ der Anzeige bei einem Drehspulmeßgerät und $\pm 3\%$ der Anzeige bei allen anderen Arten von Meßgeräten nicht überschreiten.
- Die Prüfung soll bei einer Einstellung des Zeigers auf zwei Drittel des Skalenendwertes ausgeführt werden. Leistungsmesser werden bei Nennspannung, bei zwei Drittel des Nennstromes und bei dem Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$ geprüft.

Einfluß des Leistungsfaktors

- Bei Nennstrom und Nennspannung und einer induktiven Phasenverschiebung von 90° darf die Einstellung des Zeigers von Leistungsmessern nicht weiter von Null abweichen, als in nachfolgender Tabelle angegeben ist.

Klasse	Abweichung	des Meßbereich-Endwertes		
0,2	$\pm 0,2\%$			
0,5	$\pm 0,5\%$	„	„	„
1,0	$\pm 1,0\%$	„	„	„
1,5	$\pm 1,5\%$	„	„	„
2,5	$\pm 2,5\%$	„	„	„

- Außerdem dürfen bei Leistungsmessern der Klassen 0,2 und 0,5 die in der obenstehenden Tabelle angegebenen Abweichungen nicht überschritten werden, wenn sie einmal bei Nennspannung, Nennstrom und induktivem Leistungsfaktor $\cos \varphi = 0,5$, das andere Mal bei Nennspannung, bei halbem Nennstrom und Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$ geprüft werden.

Lagefehler

- Die Änderung der Anzeige, die durch eine Neigung des Instrumentes um $\pm 5^{\circ}$ aus der gekennzeichneten Gebrauchslage entsteht, darf die in der nachstehenden Tabelle angegebenen Werte nicht überschreiten:

Klasse	Änderung der Anzeige	der Skalenlänge		
0,2	$\pm 0,2\%$			
0,5	$\pm 0,5\%$	„	„	„
1,0	$\pm 1,0\%$	„	„	„
1,5	$\pm 1,5\%$	„	„	„
2,5	$\pm 2,5\%$	„	„	„

- b) Hat das Instrument kein Lagezeichen, so beziehen sich die vorstehend angegebenen Lagefehler auf die Änderungen der Anzeige zwischen der senkrecht und der waagrecht gestellten Skalenebene.

Fehlergrenzen für Neben- und Vorwiderstände

- a) Die bisher angegebenen Fehlergrenzen gelten für die Meßgeräte einschließlich der als dazugehörig gekennzeichneten Neben- oder Vorwiderstände.
- b) Neben- oder Vorwiderstände, die getrennt von Meßgeräten als austauschbare Widerstände geliefert werden, sollen einer der drei nachstehend angegebenen Genauigkeitsklassen angehören:

Klasse	Zulässige Abweichung vom Nennwert
0,1	$\pm 0,1\%$ des Nennwertes
0,2	$\pm 0,2\%$ „ „
0,5	$\pm 0,5\%$ „ „

Die Fehlergrenzen gelten für alle Temperaturen zwischen $+10$ und $+30$ °C und bei jeder beliebigen Belastung der Widerstände bis zur Nennbelastung.

Fehlergrenzen bei Stromwandlern

Die jeder Klasse zugeordneten Fehlergrenzen sind nachstehend in Abhängigkeit von Bruchteilen des primären Nennstromes J_N zusammengestellt.

Klasse	Stromfehler in Prozent bei				Fehlwinkel in Minuten bei			
	0,1 J_N	0,2 J_N	1,0 J_N	1,2 J_N	0,1 J_N	0,2 J_N	1,0 J_N	1,2 J_N
0,1	$\pm 0,25$	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	± 10	± 8	± 5	± 5
0,2	$\pm 0,5$	$\pm 0,35$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	± 20	± 15	± 10	± 10
0,5	$\pm 1,0$	$\pm 0,75$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	± 60	± 40	± 30	± 30
1,0	$\pm 2,0$	$\pm 1,5$	$\pm 1,0$	$\pm 1,0$	± 120	± 80	± 60	± 60

Die Fehlergrenzen gelten für Bürden zwischen $1/4$ und $1/1$ Nennbürde bei einem sekundären Leistungsfaktor $\cos \beta = 0,8$.

Ist die Bürde, bei der die Messung durchzuführen ist, kleiner als $0,15 \Omega$, so tritt an die Stelle des Bürdenleistungsfaktors $\cos \beta = 0,8$ der Leistungsfaktor $\cos \beta = 1,0$.

Fehlergrenzen bei Spannungswandlern

Die jeder Klasse zugeordneten Fehlergrenzen, bezogen auf die jeweilige primäre Spannung, sind nachstehend zusammengestellt.

Klasse	Spannung	Spannungsfehler	Fehlwinkel
0,1	0,8...1,2 U_N	$\pm 0,1\%$	± 5 Minuten
0,2		$\pm 0,2\%$	± 10 „
0,5		$\pm 0,5\%$	± 20 „
1,0		$\pm 1,0\%$	± 40 „

Die Fehlergrenzen gelten für Leistungen zwischen $1/4$ und $1/1$ Nennleistung bei einem sekundären Leistungsfaktor $\cos \beta = 0,8$, bei Leistungen unter $3,75$ VA bei einem Leistungsfaktor $\cos \beta = 1$.

Eigenverbrauch

der elektrischen **HS**-Schalttafel-Meßgeräte und Linienschreiber

Die Angaben sind ungefähre Werte und verstehen sich:

bei Weicheisen-Strommessern für den Nennstrom (Beispiel: bei Meßbereich 0...100/150 A ist der Nennstrom 100 A),

bei Weicheisen-Spannungsmessern sowie Drehspul-Strom- und Spannungsmessern und -schreibern für den Skalenendwert,

bei den Leistungs- und Leistungsfaktormessern und -schreibern für Nennstrom und Nennspannung (110, 220, 380, 500 V),

bei den Frequenzmessern für die Nennspannung (110, 220, 380, 500 V).

Der Verbrauch der Vorwiderstände ist in den angegebenen Werten enthalten.

Strommesser						
Weicheisen-Meßwerk			Drehspul-Meßwerk			
Geräte	Eigenverbr.		Geräte	Spannungsabfall	Stromverbr.	
Kleine runde Geräte bis 100 mm Ø	0,7...1,2 VA		Kleine runde Geräte bis 100 mm Ø	120 mV*) bei eingebautem, 150 mV bei getrenntem Nebenwiderstand	5 mA	
Runde Geräte 130...225 mm Ø, Quadrant-Instrumente und Profilgeräte	1,2...3 VA		Runde Geräte 130...225 mm Ø, Profilgeräte	60 mV	20 mA	
			Quadrantinstrumente	60 mV	10 mA	
Stromschr iber						
Drehspul-Meßwerk			Drehspul-Meßwerk m. eingebautem Trocken-Gleichrichter		Ferraris-Meßwerk	
Geräte	Spann.-Abfall	Stromverbr.	Geräte	Spann.-Abfall	Geräte	Eigenverbr.
Große und kl. Linienschreiber	60 mV	770 mA	Große und kl. Linienschreiber	2...3 V	Große und kl. Linienschreib. f. 5 A	6 VA

*) Von 50 mA aufwärts

Spannungsmesser

Weicheisen-Meßwerk		Drehspul-Meßwerk	
Geräte	Eigenverbr.	Geräte	Widerstand
Kleine runde Geräte bis 100 mm \varnothing	3,5 VA	Kleine runde Geräte bis 100 mm \varnothing	200 Ω/V
Runde Geräte 130...225 mm \varnothing , Quadrant-Instrumente	7 VA	Runde Geräte 130...225 mm \varnothing , Quadrant-Instrumente und Profilgeräte	100 Ω/V
Profilgeräte	12 VA		

Spannungsschreiber

Drehspul-Meßwerk		Drehspul-Meßwerk mit eingebautem Trockengleichrichter		Elektrodynamisches, eisengeschlossenes Meßwerk	
Geräte	Eigenverbr.	Geräte	Eigenverbr.	Geräte	Eigenverbr.
Große u. kleine Linienschreiber	15 mA	Große u. kleine Linienschreib.	15 mA	Gr.Linienschr. Kl.Linienschr.	20 VA 110 mV*

*) Bei allen Meßbereichen

Leistungsmesser für Wechsel- und Drehstrom 5 A, 110...500V, 50Hz, mit eingeschlossenen elektrodynamischem Meßwerk

Geräte	Strompfad	Spannungspfad je Phase	
		cos. $\varphi = 1$	cos. $\varphi = 0,7$
Runde Geräte 225 mm \varnothing , Quadrant-Instrumente, kleine Rund- und Flachprofilgeräte, große Rundprofilgeräte	1 VA	20 mA	40 mA
Große Flachprofilgeräte	3 VA	10 mA	20 mA

Leistungsschreiber für Gleichstrom 110...550 V, mit eisengeschirmtem, elektrodynamischem Meßwerk

Geräte	Strompfad		Spannungspfad
	Spann.-Abf.	Eigenverbr.	
Große Linienschreiber	300 mV	10 mA	90 mA
Kleine Linienschreiber	300 mV	10 mA	70 mA

Leistungsschreiber für Wechsel- und Drehstrom 5 A, 110...500 V, 50 Hz, mit eisengeschlossenem elektrodynamischem Meßwerk

Geräte	Strompfad	Spannungspfad je Phase	
		cos. $\varphi = 1$	cos. $\varphi = 0,7$
Große und kleine Linienschreiber	3 VA	40...90 mA	60...130 mA

Universal-Leistungsschreiber für Gleich-, Wechsel- und gleichbel. Drehstrom, mit eisengeschirmtem elektrodynamischem Meßwerk

Geräte	Strompfad	Spannungspfad
Große Linienschreiber	5 A, 600 mV (3 VA)	90 mA je Phase

Leistungsfaktormesser 5 A, 110...500 V, 50 Hz, mit eisengeschlossenem elektrodynamischem Meßwerk

Geräte	Strompfad	Spannungspfad	
		Wechselstrom	Drehstrom
Runde Geräte 225 mm \varnothing , Quadrant-Instrumente	2 VA	100 mA	3 \times 50 mA
Runde Geräte 225 mm \varnothing sowie Quadrant-Instrumente mit 4 vollen Skalenquadranten	5 VA	160 mA	3 \times 80 mA
Kleine Rund- und Flachprofilgerä- te, große Rundprofilgeräte	2 VA	100 mA	3 \times 100 mA
Große Flachprofilgeräte	5 VA	160 mA	3 \times 100 mA

Leistungsfaktorschreiber für Drehstrom 5 A, 110...500 V, 50 Hz, mit eisengeschlossenem elektrodynamischem Meßwerk

Geräte	Strompfad	Spannungspfad
Große Linienschreiber	9 VA	4,5 VA je Phase

Frequenzmesser 50 Hz, mit Resonanz-Meßwerk n. Hartmann-Kempf

Geräte	110 V	220 V	380 V	500 V
Runde Geräte 130 u. 160 mm \varnothing , Quadrant-Instrumente	0,9 VA	1,3 VA	2,2 VA	3 VA
Runde Geräte 225 mm \varnothing , große Rund- und Flachprofilgeräte	1,2 VA	1,8 VA	3,2 VA	4,7 VA
Kleine Profilgeräte	0,5 VA	0,6 VA	0,7 VA	0,9 VA

Sinnbilder für elektrische Meßgeräte

Die Regeln des VDE schreiben vor, daß auf jedem Meßgerät neben dem Ursprungszeichen, der Einheit der Meßgröße, dem Klassenzeichen usw. auch Zeichen für die Art des Meßwerks, für die Stromart, Prüfspannung usw. anzugeben sind. Die wichtigsten dafür angewendeten Sinnbilder sind in der nachstehenden Tabelle zusammengestellt. Bei Schaltbildern finden diese Sinnbilder jedoch keine Anwendung. Schaltzeichen für Meßgeräte siehe Seite 92.

Art des Meßgerätes	Sinnbild	Art des Meßgerätes	Sinnbild
Drehspulgerät mit Dauermagnet		Gleichrichter	
Drehpul-Quotientenmesser (Kreuzpul-Ohmmeter)		Drehspulgerät mit Gleichrichter	
Weicheisengerät		Gerät mit Eisenschirm (Sinnbild für den Schirm)	
Elektrodynamisches Gerät		Gleichstrom	
Eisengeschlossenes, elektrodynamisches Gerät		Wechselstrom	
Elektrodynamischer Quotientenmesser		Gleich- und Wechselstrom	
Eisengeschlossener, elektrodynamischer Quotientenmesser		Drehstromgerät mit einem Meßwerk	
Induktionsgerät		Drehstromgerät mit zwei Meßwerken	
Elektrostatiches Gerät		Drehstromgerät mit drei Meßwerken	
Vibrationsgerät		Senkrechte Gebrauchslage	
Thermo-Umformer allgemein		Waagerechte Gebrauchslage	
Drehspulgerät mit Thermo-Umformer		Schräge Gebrauchslage	
Isolierter Thermo-Umformer		Schräge Gebrauchslage mit Angabe des Neigungswinkels	
Drehspulgerät mit isoliertem Thermo-Umformer		Nulleinstellung	
		Prüfspannungszeichen: Die Ziffer im Stern bedeutet die Prüfspannung in KV (Stern ohne Ziffer bei 500 V Prüfspannung)	

Schaltzeichen für elektrische Meßgeräte

Mefwerkbenennung	Schaltzeichen
Mefwerk allgemein	
Mefwerk mit Spannungspfad	
Mefwerk mit Strompfad	
Mefwerk mit zwei Spannungspfaden zur Summen- oder Differenzmessung	
Mefwerk mit zwei Strompfaden zur Summen- oder Differenzmessung	
Mefwerk mit zwei Spannungspfaden zur Produkt- oder Quotientenmessung	
Mefwerk mit zwei Strompfaden zur Produkt- oder Quotientenmessung	
Mefwerk mit Strom- und Spannungspfad zur Produkt- oder Quotientenmessung	

Dielektrizitätskonstante und Verlustfaktor $\operatorname{tg} \delta$ von Isolierstoffen

Stoff	Relative Dielektrizitätskonstante	$\operatorname{tg} \delta$
Cellon	5	—
Exzelsior-Papier	3,5 ··· 4,3	—
Glas	3,4 ··· 6,0	0,001 ··· 0,01
Glimmer	4,7 ··· 6,0	0,0002 ··· 0,001
Hartgummi	2 ··· 3,5	0,004
Hartporzellan	5,4 ··· 6,4	0,01 ··· 0,03
Mikanit	4,5 ··· 5,5	0,01 ··· 0,1
Minoglas	8	0,0006
Pertinax	3,5 ··· 4,5	0,01
Preßspan	2,5	—
Quarz	3,5 ··· 3,6	—
Repelit	3,5	0,01
Trolit	5 ··· 6	0,03 ··· 0,06
Turbonit	3,5 ··· 4,0	0,01

Spezifischer Widerstand verschiedener Metalle

Metall	Spezifischer Widerstand ρ bei 20° C in $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$	Temp.-Koeffizient α bei 20° C
Aluminiumdraht	0,029	0,0040
Blei	0,208	0,0040
Eisen	0,10 ··· 0,15	0,0045
Gold	0,023	0,0038
Konstantan	0,48 ··· 0,51	0,00005
Kupfer	0,0178	0,00392
Manganin	0,43	± 0,00001
Nickel	0,09 ··· 0,11	0,0044
Nickelin	0,4 ··· 0,44	0,00018 ··· 0,00021
Platin	0,10 ··· 0,11	0,0031
Quecksilber	0,958	0,00090
Silber	0,0165	0,0036
Tantal	0,16	0,003
Wismut	1,2	0,004
Wolfram	0,055	0,004
Zink	0,063	0,0037
Zinn	0,12	0,0044

Gleichstrom-Widerstand von Kupfer- u. Aluminiumleitern

mm ²	mm \varnothing	Ω/km		Drahtlänge km für 1 Ω Widerstand	
		Kupfer	Aluminium	Kupfer	Aluminium
0,5	0,8	35,8	—	0,028	—
0,75	0,98	23,9	38,4	0,042	0,026
1	1,13	17,9	28	0,056	0,036
1,5	1,38	11,9	19,05	0,084	0,051
2,5	1,78	7,16	11,5	0,140	0,087
4	2,26	4,45	7,12	0,224	0,140
6	2,76	2,98	4,77	0,334	0,209
10	3,56	1,78	2,85	0,562	0,350
16	4,52	1,11	1,78	0,960	0,562
25	5,64	0,728	1,17	1,370	0,853
35	6,67	0,519	0,83	1,925	1,20
50	8,0	0,362	0,58	2,770	1,72
70	9,45	0,260	0,416	3,840	2,41
95	11,0	0,191	0,306	5,23	3,27
120	12,4	0,152	0,243	6,57	4,12
150	13,80	0,121	0,194	8,25	5,15
185	15,35	0,098	0,157	10,1	6,37
240	17,50	0,075	0,122	13,3	8,20
300	19,55	0,060	0,096	16,6	10,4
400	22,6	0,045	0,072	22,2	13,9
500	25,2	0,036	0,058	27,8	16,9

Elektrotechnische Formeln

Ohmsches Gesetz

Ist U die Spannungsdifferenz zwischen zwei Punkten eines von Gleichstrom durchflossenen Leiters in Volt, I die Stromstärke in Ampere, so beträgt der Widerstand in Ohm:

$$R = \frac{U}{I}$$

Der Widerstand eines metallischen Leiters ist abhängig vom spezifischen Widerstand des Materials ρ , von der Länge l und dem Querschnitt q . Wird l in m, q in mm^2 und ρ in $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ eingesetzt, so gilt:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{q}$$

(Tabelle des spezifischen Widerstandes siehe Seite 93).

Der Widerstand eines Leiters ändert sich mit der Temperatur; bei Metallen nimmt er mit steigender Temperatur zu. Ist R_{20} der Widerstand bei 20°C , α der Temperaturkoeffizient und t eine Temperatur über 20°C , so gilt annähernd:

$$R_t = R_{20} (1 + \alpha t)$$

(Werte für α siehe Seite 93).

Parallel- und Hintereinanderschaltung

a) von Widerständen

Werden mehrere Widerstände $R_1, R_2, R_3 \dots$ parallelgeschaltet, so errechnet sich der Ersatzwiderstand R_e aus der Formel:

$$\frac{1}{R_e} = \sum \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \dots$$

Werden mehrere Widerstände hintereinandergeschaltet, so ergibt ihre Summe den Gesamtwiderstand:

$$R_e = \sum R = R_1 + R_2 + R_3 \dots$$

b) von Kondensatoren

Parallelschaltung:

$$C_e = \sum C = C_1 + C_2 + C_3 \dots$$

Hintereinanderschaltung:

$$\frac{1}{C_e} = \sum \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \dots$$

c) von Selbstinduktionen (die sich nicht beeinflussen)

Parallelschaltung:

$$\frac{1}{L_e} = \Sigma \frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \dots$$

Hintereinanderschaltung:

$$L_e = \Sigma L = L_1 + L_2 + L_3 \dots$$

Wirkwiderstand, Selbstinduktion und Kapazität im Wechselstromkreis

Werden U in Volt, R in Ohm, L in Henry und C in Farad eingesetzt, so ergibt sich bei sinusförmigem Wechselstrom bei der Frequenz f in sec^{-1} :

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2}}; \quad \cos\varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2}}$$

Ist der Wert von $2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}$ positiv, so eilt der Strom der Spannung zeitlich um den Winkel φ nach, ist er negativ, so eilt er um den Winkel φ vor.

Leistung

Wird die Spannung U in Volt und der Strom I in Ampere eingesetzt, so errechnet sich die Leistung in Watt:

bei Gleichstrom: $N = U \cdot I$

bei Wechselstrom: $N = U \cdot I \cdot \cos\varphi$

bei Drehstrom: $N = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$

Bei Drehstrom ist als Betriebsspannung U stets die Spannung zwischen zwei Phasen (Dreiecksspannung oder verkettete Spannung) einzusetzen.

Blindleistung

Bei Wechselstrom: $N = U \cdot I \cdot \sin\varphi$

Bei Drehstrom: $N = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi$

Arbeit

ist das Produkt aus Leistung und Zeit. Wird N in Watt und t in Sekunden eingesetzt, so beträgt die Arbeit in Wattsekunden:

$$A = N \cdot t$$

Wird N in Kilowatt und t in Stunden eingesetzt, so gilt:

$$A = N \cdot t \text{ (in Kilowattstunden).}$$

Vergleich elektrischer und mechanischer Einheiten

$$1 \text{ kW} = 1000 \text{ W} = 1,36 \text{ PS}$$

$$1 \text{ PS} = 75 \text{ mkg/s} = 0,736 \text{ kW}$$

$$1 \text{ kWh} = 367\,000 \text{ mkg} = 864 \text{ kcal} = 1,36 \text{ PSh}$$

7*

Wärmetechnischer Teil

Ausführungsbeispiele von wärmetechn. HB-Meßgeräten



Bild 132
Elektrisches Empfangsgerät in rundem Einbaugehäuse. Weitere Ausführungsformen siehe Seite 81 und 83.



Bild 133
Tragbares Teilstrahlungs-Pyrometer, „Pyropto“



Bild 134
Programmregler für Schalttafel-Einbau

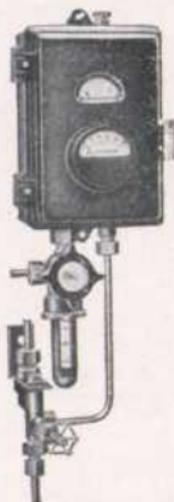


Bild 135
Areginal- bzw. Cartox-Konzentrationsmesser mit eingebautem Anzeigergerät

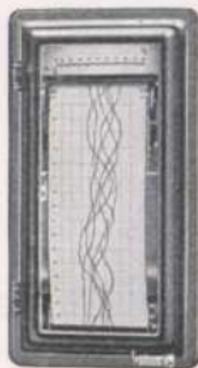


Bild 136
Sechsfarben-Punkt-schreiber für Einbau



Bild 137
Fallbügelregler (Kompensationsregler) für Aufbau

Maßstab der Abbildungen
etwa 1 : 15

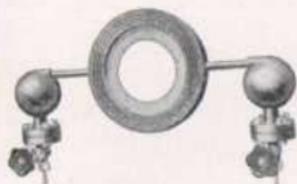


Bild 138
VDI-Normblende mit angebauten Ventilen und Ausgleichern für Dampf



Bild 139
Anzeigender Plattenfeder-Druckmesser

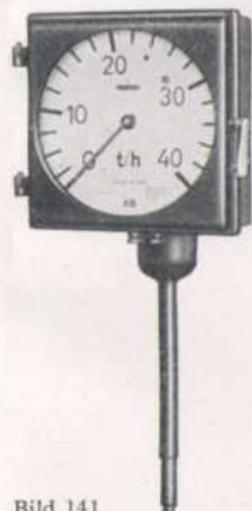


Bild 141
Anzeigender Mandex-Mengenmesser für Betriebsdrücke bis 80 kg/cm^2



Bild 140
Anzeigender Ringwaage-Mengenmesser in Rundgehäuse

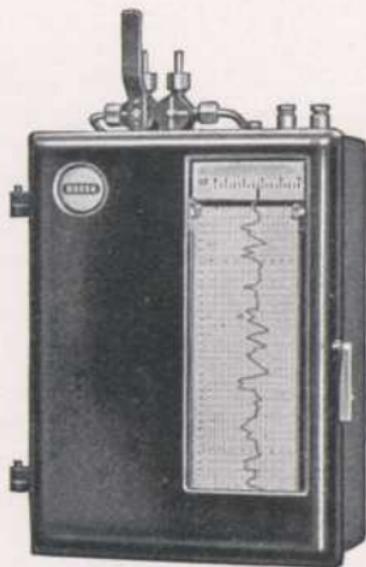


Bild 142
Schreibender Ringwaage-Mengenmesser für Aufbau

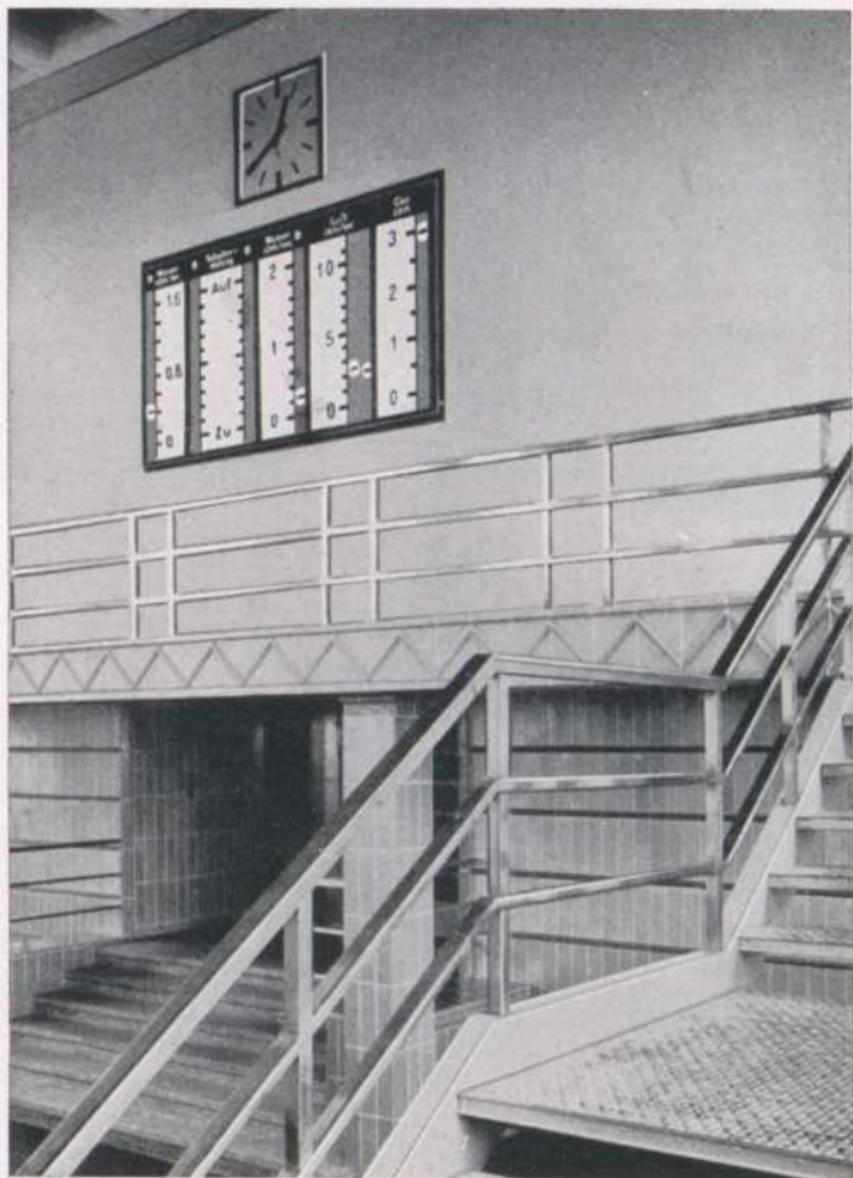


Bild 143 Großanzeigegerät „Profilux“ mit Lichtzeiger

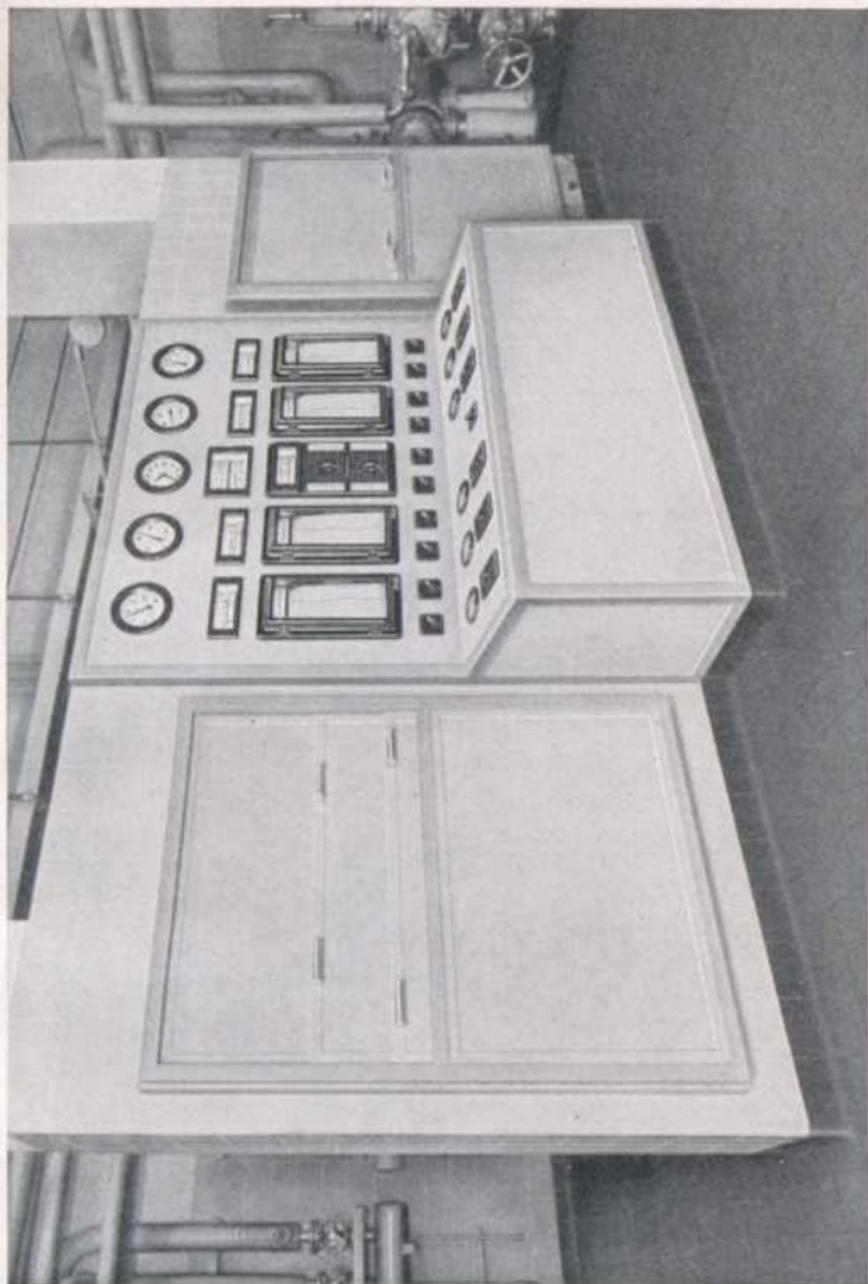
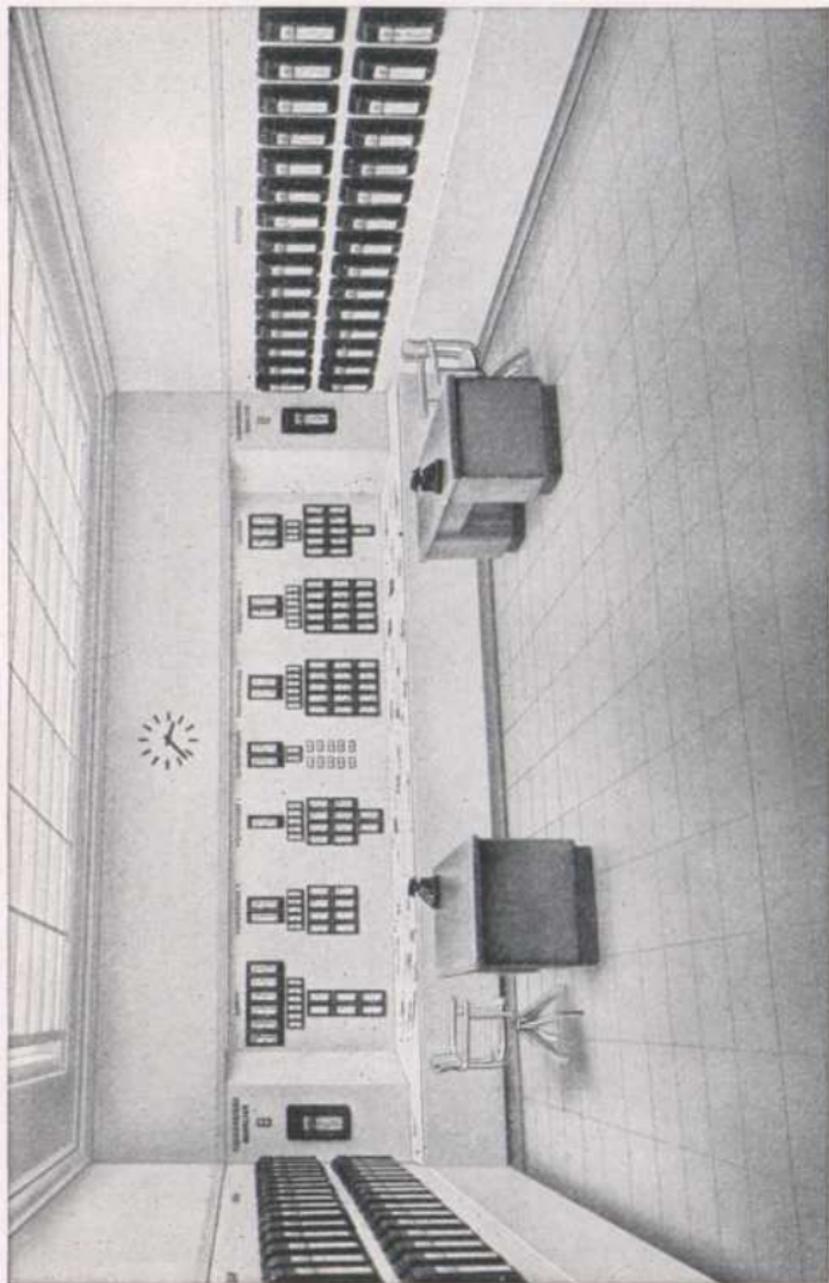


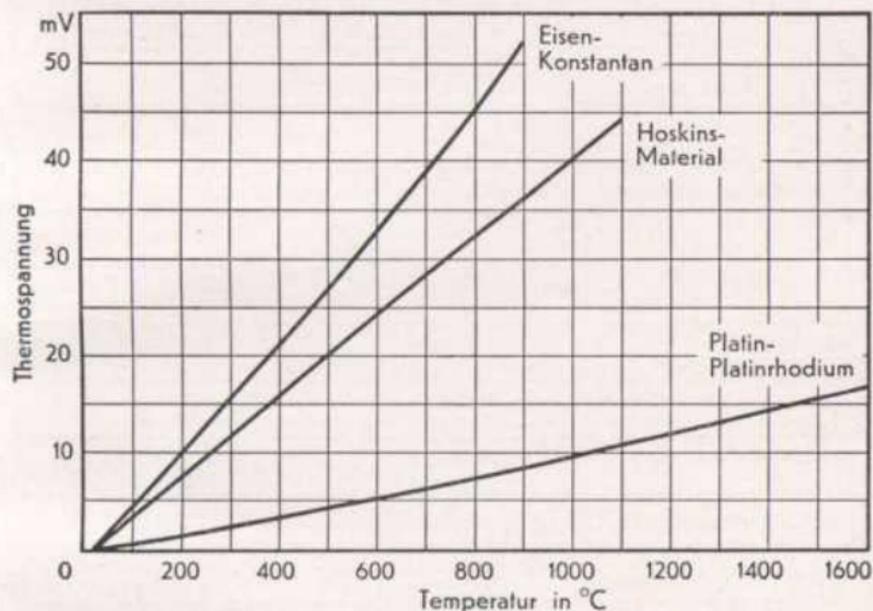
Bild 144. Wärmewarte der Heizungsanlage eines großen Verwaltungsgebäudes



Widerstand der Ω -Thermometer-Wicklungen

$^{\circ}\text{C}$	Platin Pt 90	Nickel Ni 100	$^{\circ}\text{C}$	Platin Pt 90
- 150	35,4 Ω	—	250	175,8 Ω
- 100	53,8 „	—	300	192,1 „
- 50	72,1 „	76,4 Ω	350	208,2 „
0	90 „	100 „	400	224,0 „
+ 50	107,7 „	125,9 „	450	239,6 „
100	125,1 „	154,8 „	500	254,9 „
150	142,2 „	187,4 „	550	269,9 „
200	159,1 „	—		

Abhängigkeit der Thermospannung von der Temperatur



Genormte Temperatur-Meßbereiche für Ω -Drehspulgeräte

Thermoelemente	Eisen-Konstantan	Hoskins-Material	Platin-Platinrhodium
Meßbereiche $^{\circ}\text{C}$	20...400 20...500 20...600 20...800 20...1000	20...1000 20...1100 20...1200	20...1200 20...1400 20...1600

Elektr. Widerstand der $\text{H}\beta$ -Thermoelemente, Ausgleichs- und Kupferleitungen

Thermoelemente					
Material	mm \varnothing	Widerstand bei 20° C		Widerstandszunahme bei Erwärmung *	
		Einzel Ω/m	Gesamt Ω/m	Einzel %/° C	Gesamt %/° C
Eisen (+)	1	0,14	0,81	1	0,18
Konstantan (—)	1	0,67			
Eisen (+)	4	0,01	0,08	1	0,11
Konstantan (—)	3	0,07			
Hoskins	Chromnickel (+)	1	1,0	1,3	0,03
	Nickel (—)	1	0,3		
	Chromnickel (+)	2,5	0,16	0,20	0,03
	Nickel (—)	3	0,04		
Platinrhodium (+)	0,5	1,03	1,58	0,14	0,2
Platin (—)	0,5	0,55		0,31	
Ausgleichsleitungen (+ Pol durch roten Faden gekennzeichnet)					
Passend zu Thermoelement	Material	mm ²	Widerstand bei 20° C		
			Einzel Ω/m	Gesamt Ω/m	
Eisen (+) Konstantan (—)	+ Leitung	1,5	0,07	0,42	
	— Leitung	1,5	0,35		
Chromnickel (+) Nickel (—) (Hoskins)	+ Leitung	1,5	0,07	0,24	
	— Leitung	1,5	0,17		
Platinrhodium (+) Platin (—)	+ Leitung	1,5	0,01	0,03	
	— Leitung	1,5	0,02		
Kupferleitungen (bei 20° C)					
mm ²	mm \varnothing	Widerstand für 100 m Drahtlänge		Drahtlänge für 1 Ω Widerstand	
0,5	0,8	3,58 Ω		27,9 m	
0,75	0,98	2,39 „		41,9 „	
1	1,13	1,79 „		55,9 „	
1,5	1,38	1,19 „		84,0 „	
2,5	1,78	0,716 „		139,6 „	

* Die Widerstandszunahme erfolgt nicht über den ganzen Temperaturbereich gleichmäßig; die genannten Werte beziehen sich auf die mittlere Gebrauchstemperatur, d. h. etwa 600° C bei Eisen-Konstantan, 800° C bei Chromnickel-Nickel (Hoskins) und 1200 bis 1400° C bei Platin-Platinrhodium.

Außenschutzrohre für Thermoelemente

Höchsttemperatur °C		Zulässige Meßmedien	Anwendungsbeispiele	Material des Rohres
dauernd	kurzzeitig			
700	750	Atmosphäre neutral bis oxydierend, Luft reduzierend H ₂ -, H ₂ S-, SO ₂ -, C-, H ₂ O-haltig	Glühöfen, Rauch- und Röst - Abgase, Glühöfen mit Schutzgasfüllung	Reineisen
850	900	Salpeter-, Cyan-, Bleibad*	Härte-Anlaßöfen	
500	550	Zinn-, Blei-, Lagermetall-, Spritzguß- u. Zinkschmelzen	Verzinnungs- und Verzinkungsbäder, Gießereien	
700	750	Zink-, Aluminium-*, Aluminiumlegierung-* Schmelzen	Gießereien, Verzinkungsanlagen	Spezialguß
1200	1220	Atmosphäre neutral u. oxydierend, reduzierende, C-, H ₂ -, S ₂ -haltige Gase	Glühöfen mit u. ohne Schutzgasfüllung, Temperöfen, Hydrier-, Crack-, Röstöfen	Chrom-eisen-Aluminium
1100	1150	Atmosphäre neutral u. oxydierend	Glühöfen, Temperöfen	
1300	1320	Atmosphäre neutral u. oxydierend, Chlorbarium, Borax	Zement-, Kalköfen, Härtebad für Schnelldrehstahl	Chrom-nickel
1250	1300	Atmosphäre oxydierend, reduzierend, schwefelhaltig	Röstöfen, Öfen mit Schutzgas	Chrom-eisen
1150	1220	Kupfer* und Kupferlegierungen*	Gießereien	
1250	1300	Bleischmelzen*	Härtebad(Schnelldrehstahl)	
Für chemische Industrie mit Sonderbeanspruchung				VA-Stahl
1400	1450	Atmosphäre oxydierend, reduzierend, schwefelhaltig	Glühöfen (Außenschutz)	Chamotte (nicht gasdicht)
1300	1350	Glasschmelzen	Glasöfen	
1600	1650	Atmosphäre mit aggressiven Gasen, Flugstaub (Stichflammen)	Industriegase	Keram-masse (gasdicht)

* Diese Schmelzen beanspruchen die Schutzhüllen sehr stark; es empfiehlt sich daher in vielen Fällen, nur kurzfristig zu messen.

Thermospannung des H₂-Pyrradio in Millivolt

° C	Meßber. 600... 1200° C	Meßber. 700... 1400° C	Meßber. 800... 1600° C	Meßber. 1000... 2000° C
600	1,45mV			
650	2,23 "			
700	3,14 "	1,83mV		
750	4,25 "	2,70 "		
800	5,66 "	3,77 "	2,10mV	
850	7,40 "	5,03 "	2,80 "	
900	9,41 "	6,48 "	3,62 "	
950	11,65 "	8,11 "	4,57 "	
1000	14,09 "	9,92 "	5,66 "	2,42mV
1050	16,69 "	11,90 "	6,90 "	
1100	19,40 "	14,04 "	8,28 "	3,54 "
1150	22,18 "	16,34 "	9,79 "	
1200	25,00 "	18,79 "	11,44 "	4,90 "
1250		21,39 "	13,23 "	
1300		24,13 "	15,17 "	6,67 "
1350		27,00 "	17,27 "	
1400		30,00 "	19,52 "	8,80 "
1450			21,91 "	
1500			24,45 "	11,22 "
1550			27,14 "	
1600			30,00 "	14,25 "
1700				17,71 "
1800				21,38 "
1900				25,56 "
2000				30,00 "

Umrechnung von Temperatur-Einheiten

(C = Grad Celsius, R = Grad Reaumur, F = Grad Fahrenheit)

$$C = \frac{5}{4} R = \frac{5}{9} (F - 32)$$

$$R = \frac{4}{5} C = \frac{4}{9} (F - 32)$$

$$F = \frac{9}{5} C + 32 = \frac{9}{4} R + 32$$

Rauminhalt von Wasserdampf in m³/kg

Druck p at abs.	Sattdampf		Überhitzter Dampf bei °C								
	Sättigungs- Temp °C	Raum- inhalt m ³ /kg	240°	260°	280°	300°	320°	340°	360°	380°	400°
6	158,1	0,3213	0,393	0,410	0,426	0,443	0,459	0,475	0,491	0,508	0,524
7	164,2	0,2778	0,336	0,350	0,365	0,379	0,393	0,407	0,421	0,435	0,448
8	169,6	0,2448	0,293	0,305	0,318	0,331	0,343	0,355	0,367	0,380	0,392
9	174,5	0,2189	0,259	0,271	0,282	0,293	0,304	0,315	0,326	0,337	0,348
11 *	183,2	0,1808	0,210	0,220	0,229	0,239	0,248	0,257	0,266	0,275	0,283
12	187,1	0,1664	0,192	0,201	0,210	0,218	0,227	0,235	0,243	0,252	0,260
13	190,7	0,1541	0,176	0,185	0,193	0,201	0,209	0,216	0,224	0,232	0,239
14 *	194,1	0,1435	0,163	0,171	0,179	0,186	0,193	0,201	0,208	0,215	0,222
15	197,4	0,1343	0,152	0,159	0,166	0,173	0,180	0,187	0,194	0,200	0,207
16	200,4	0,1262	0,141	0,148	0,155	0,162	0,168	0,175	0,181	0,188	0,194
17 *	203,4	0,1190	0,133	0,139	0,146	0,152	0,158	0,164	0,170	0,176	0,182
18	206,2	0,1126	0,125	0,131	0,137	0,143	0,149	0,155	0,161	0,166	0,172
21 *	213,9	0,09682	0,105	0,111	0,116	0,122	0,127	0,132	0,137	0,142	0,147
22	216,2	0,09251	0,100	0,105	0,111	0,116	0,121	0,126	0,130	0,135	0,140
24	220,8	0,08492	0,091	0,096	0,101	0,106	0,110	0,115	0,119	0,123	0,128
26 *	225,0	0,07846	0,083	0,088	0,092	0,097	0,101	0,105	0,110	0,114	0,118
28	229,0	0,07288	0,076	0,081	0,085	0,089	0,093	0,097	0,101	0,105	0,109
30	232,8	0,06802	0,070	0,075	0,079	0,083	0,087	0,091	0,094	0,098	0,101
33 *	238,1	0,06179	0,062	0,067	0,071	0,075	0,078	0,082	0,085	0,088	0,092
35	241,5	0,05822	—	0,062	0,066	0,070	0,073	0,077	0,080	0,083	0,086
41 *	250,7	0,04950	—	0,051	0,055	0,059	0,062	0,065	0,068	0,070	0,073
45	256,3	0,04495	—	0,046	0,049	0,053	0,056	0,058	0,061	0,064	0,066
51 *	263,9	0,03940	—	—	—	0,045	0,048	0,051	0,053	0,056	0,058
60	274,3	0,03310	—	—	—	0,037	0,040	0,042	0,044	0,046	0,048
65 *	279,6	0,03033	—	—	—	0,034	0,036	0,038	0,040	0,042	0,045
70	284,5	0,02795	—	—	—	0,030	0,033	0,035	0,037	0,039	0,041
81 *	294,4	0,02370	—	—	—	0,024	0,028	0,030	0,031	0,033	0,035
90	301,9	0,02096	—	—	—	—	0,023	0,026	0,027	0,029	0,031
101 *	310,3	0,01823	—	—	—	—	0,020	0,022	0,024	0,026	0,027
120	323,1	0,01462	—	—	—	—	—	0,017	0,019	0,020	0,022
126 *	326,8	0,01369	—	—	—	—	—	0,016	0,018	0,019	0,021
140	335,0	0,01181	—	—	—	—	—	0,013	0,015	0,016	0,018
161 *	346,2	0,00952	—	—	—	—	—	—	0,012	0,013	0,015
201 *	364,5	0,00612	—	—	—	—	—	—	—	0,009	0,010
220	—	0,00449	—	—	—	—	—	—	—	0,007	0,009
225,05	374	0,00306	Krit. Druck	—	—	—	—	—	—	—	—

* Normendrucke

Rauminhalt von Wasserdampf in m³/kg (Fortsetzung)

Druck p at abs.	Überhitzter Dampf bei °C										
	420°	440°	450°	460°	470°	480°	490°	500°	520°	540°	550°
6	0,540	0,556	0,564	0,572	0,580	0,588	0,596	0,604	0,619	0,635	0,643
7	0,462	0,476	0,483	0,490	0,496	0,503	0,510	0,517	0,531	0,544	0,551
8	0,404	0,416	0,422	0,428	0,434	0,440	0,446	0,452	0,464	0,476	0,482
9	0,359	0,369	0,375	0,380	0,385	0,391	0,396	0,401	0,412	0,423	0,428
11 *	0,293	0,302	0,306	0,310	0,315	0,319	0,324	0,328	0,337	0,345	0,350
12	0,268	0,276	0,280	0,284	0,288	0,292	0,296	0,300	0,308	0,316	0,320
13	0,247	0,255	0,258	0,262	0,266	0,270	0,273	0,277	0,285	0,292	0,296
14 *	0,229	0,236	0,240	0,243	0,247	0,250	0,254	0,257	0,264	0,271	0,274
15	0,214	0,220	0,223	0,227	0,230	0,233	0,237	0,240	0,246	0,253	0,256
16	0,200	0,206	0,209	0,212	0,215	0,218	0,222	0,225	0,231	0,237	0,240
17 *	0,188	0,194	0,197	0,200	0,203	0,205	0,208	0,211	0,217	0,223	0,225
18	0,177	0,183	0,186	0,188	0,191	0,194	0,197	0,199	0,205	0,210	0,213
21 *	0,151	0,156	0,159	0,161	0,163	0,166	0,168	0,170	0,175	0,180	0,182
22	0,144	0,149	0,151	0,154	0,156	0,158	0,160	0,163	0,167	0,172	0,174
24	0,132	0,136	0,138	0,140	0,143	0,145	0,147	0,149	0,153	0,157	0,159
26 *	0,122	0,126	0,127	0,129	0,131	0,133	0,135	0,137	0,141	0,145	0,147
28	0,113	0,116	0,118	0,120	0,122	0,124	0,125	0,127	0,131	0,134	0,136
30	0,105	0,108	0,110	0,112	0,113	0,115	0,117	0,118	0,122	0,125	0,127
33 *	0,095	0,098	0,100	0,101	0,103	0,104	0,106	0,107	0,110	0,114	0,115
35	0,089	0,092	0,094	0,095	0,097	0,098	0,100	0,101	0,104	0,107	0,108
41 *	0,076	0,078	0,080	0,081	0,082	0,083	0,085	0,086	0,088	0,091	0,092
45	0,069	0,071	0,072	0,073	0,074	0,076	0,077	0,078	0,080	0,083	0,084
51 *	0,060	0,062	0,063	0,064	0,066	0,067	0,068	0,069	0,071	0,073	0,074
60	0,050	0,052	0,053	0,054	0,055	0,056	0,057	0,058	0,060	0,061	0,062
65 *	0,046	0,048	0,049	0,050	0,051	0,052	0,052	0,053	0,055	0,056	0,057
70	0,043	0,044	0,045	0,046	0,047	0,048	0,048	0,049	0,051	0,052	0,053
81 *	0,037	0,038	0,039	0,040	0,040	0,041	0,042	0,042	0,044	0,045	0,046
90	0,032	0,034	0,034	0,035	0,036	0,036	0,037	0,038	0,039	0,040	0,041
101 *	0,028	0,030	0,030	0,031	0,032	0,032	0,033	0,033	0,034	0,035	0,036
120	0,023	0,024	0,025	0,025	0,026	0,026	0,027	0,027	0,028	0,029	0,030
126 *	0,022	0,023	0,024	0,024	0,025	0,025	0,026	0,026	0,027	0,028	0,029
140	0,019	0,020	0,021	0,021	0,022	0,022	0,023	0,023	0,024	0,025	0,025
161 *	0,016	0,017	0,017	0,018	0,018	0,019	0,019	0,020	0,021	0,021	0,022
201 *	0,012	0,013	0,013	0,014	0,014	0,014	0,015	0,015	0,016	0,017	0,017
220	0,010	0,011	0,011	0,012	0,012	0,013	0,013	0,013	0,014	0,015	0,015
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Normendrücke

Gesättigter Wasserdampf

Druck kg/cm ² abs.	Sättigungs- temperatur ° C	Spez. Volumen des gesätt. Dampfes m ³ /kg	Spez. Gewicht des gesätt. Dampfes kg/m ³	Wärme- inhalt der Flüssigkeit kcal/kg	Wärme- inhalt des Dampfes kcal/kg
0,1	45,45	14,95	0,0669	45,41	617,0
0,2	59,67	7,779	0,1283	59,61	623,1
0,3	68,68	5,328	0,1877	68,61	626,8
0,4	75,42	4,069	0,2458	75,36	629,5
0,5	80,86	3,301	0,3029	80,81	631,6
0,6	85,45	2,783	0,3594	85,41	633,4
0,7	89,45	2,409	0,4152	89,43	634,9
0,8	92,99	2,125	0,4705	92,99	636,2
0,9	96,18	1,904	0,5253	96,19	637,4
1,0	99,09	1,725	0,5797	99,12	638,5
1,1	101,76	1,578	0,6337	101,81	639,4
1,2	104,25	1,455	0,6875	104,32	640,3
1,3	106,56	1,350	0,7410	106,66	641,2
1,4	108,74	1,259	0,7942	108,85	642,0
1,5	110,79	1,180	0,8472	110,92	642,8
1,6	112,73	1,111	0,8999	112,89	643,5
1,7	114,57	1,050	0,9524	114,76	644,1
1,8	116,33	0,9952	1,005	116,54	644,7
1,9	118,01	0,9460	1,057	118,24	645,3
2,0	119,62	0,9016	1,109	119,87	645,8
2,1	121,16	0,8613	1,161	121,4	646,3
2,2	122,65	0,8246	1,213	122,9	646,8
2,3	124,08	0,7910	1,264	124,4	647,3
2,4	125,46	0,7601	1,316	125,8	647,8
2,5	126,79	0,7316	1,367	127,2	648,3
2,6	128,08	0,7052	1,418	128,5	648,7
2,7	129,34	0,6806	1,469	129,8	649,1
2,8	130,55	0,6578	1,520	131,0	649,5
2,9	131,73	0,6365	1,571	132,2	649,9
3,0	132,88	0,6166	1,622	133,4	650,3
3,1	134,00	0,5979	1,673	134,5	650,6
3,2	135,08	0,5804	1,723	135,6	650,9
3,3	136,14	0,5639	1,773	136,7	651,2
3,4	137,18	0,5483	1,824	137,8	651,6
3,5	138,19	0,5335	1,874	138,8	651,9
3,6	139,18	0,5196	1,925	139,8	652,2
3,7	140,15	0,5064	1,975	140,8	652,5
3,8	141,09	0,4939	2,025	141,8	652,8
3,9	142,02	0,4820	2,075	142,7	653,1
4,0	142,92	0,4706	2,125	143,6	653,4
4,2	144,68	0,4495	2,225	145,4	653,9
4,4	146,38	0,4303	2,324	147,2	654,4
4,6	148,01	0,4127	2,423	148,9	654,9
4,8	149,59	0,3965	2,522	150,5	655,4
5,0	151,11	0,3816	2,621	152,1	655,8
5,5	154,71	0,3489	2,866	155,8	656,8
6,0	158,08	0,3213	3,112	159,3	657,8

Temperatur, Dichte und Rauminhalt des Wassers

Tempera- tur °C	Dichte t/m ³	Rauminhalt m ³ /t	Tempera- tur °C	Dichte t/m ³	Rauminhalt m ³ /t
0	0,99987	1,00013	80	0,9718	1,0290
2	0,99997	1,00003	85	0,9687	1,0324
4	1,00000	1,00000	90	0,9653	1,0359
6	0,99997	1,00003	95	0,9619	1,0396
8	0,99988	1,00012	100	0,9584	1,0434
10	0,99973	1,00027	110	0,9510	1,0515
12	0,99953	1,00048	120	0,9435	1,0600
14	0,99927	1,00073	130	0,9351	1,0694
16	0,99897	1,00103	140	0,9263	1,0795
18	0,99862	1,00138	150	0,9172	1,0903
20	0,99823	1,00177	160	0,9076	1,1018
22	0,99780	1,00221	170	0,8973	1,1145
24	0,99732	1,00268	180	0,8866	1,1279
26	0,99681	1,00320	190	0,8750	1,1429
28	0,99626	1,00375	200	0,8628	1,1590
30	0,99567	1,00435	210	0,850	1,177
32	0,99505	1,00497	220	0,837	1,195
34	0,99440	1,00563	230	0,823	1,215
36	0,99372	1,00632	240	0,809	1,236
38	0,99299	1,00706	250	0,794	1,259
40	0,9922	1,0078	260	0,779	1,283
45	0,9903	1,0099	270	0,765	1,308
50	0,9881	1,0121	280	0,75	1,34
55	0,9857	1,0145	290	0,72	1,38
60	0,9832	1,0171	300	0,70	1,42
65	0,9806	1,0198	310	0,68	1,46
70	0,9778	1,0227	320	0,66	1,51
75	0,9749	1,0258			

Spez. Gewicht in kg/l von Füllflüssigkeiten für Mengemesser

Füllflüssigkeit	Spez. Gewicht in kg/l bei					
	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C
Wasser	0,9997	0,9991	0,9982	0,9971	0,9957	0,994
Quecksilber	13,571	13,558	13,546	13,534	13,522	13,510
Tetrachlorkohlenstoff		1,6045	1,5947	1,5849		
H&B-Spezial-Öl			0,888			
Äthylenbromid	2,190	2,173	2,165	2,158	2,148	2,138
Azetylentetrabromid	2,999	2,989	2,980	2,970	2,961	2,951

Psychrometertafel

gültig für stark bewegte Luft (Windgeschwindigkeit 2,5 m/s u. mehr).

Beispiel für die Ermittlung der relativen Feuchtigkeit aus der Tabelle:
Raumtemperatur = 20° C, Psychr. Differenz = 1,8° C, Feuchtigkeit = 84%.

Psychrom. Differenz ° C	Raumtemperatur ° C																		
	-10	-8	-6	-4	-2	0	+2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22		
0	95	96	97	97	98	98	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
0,2	90	91	93	94	96	96	97	97	98	98	98	98	98	99	99	99	99		
0,4	84	85	87	90	92	92	94	94	95	95	95	96	96	97	97	97	97		
0,6	79	80	82	85	88	89	91	92	92	92	92	93	94	95	95	95	95		
0,8	73	75	77	81	84	85	86	89	85	89	90	91	92	93	93	93	93		
1,0	67	70	73	77	80	82	84	85	86	87	88	89	90	91	91	91	91		
1,2	61	64	68	73	76	78	80	83	83	84	85	87	88	89	89	90	90		
1,4	54	59	64	69	72	74	77	80	80	81	83	85	86	87	87	88	88		
1,6	48	54	59	65	69	71	75	77	78	79	80	82	84	85	85	86	86		
1,8	43	49	55	61	65	68	72	74	75	77	78	80	82	83	83	84	85		
2,0	38	45	51	57	62	65	68	71	73	75	76	78	80	81	81	82	83		
2,2	32	41	47	53	58	61	64	68	70	72	74	76	78	79	80	81	81		
2,4	26	37	43	49	55	57	61	65	67	70	72	74	76	77	78	80	80		
2,6	20	32	39	45	51	54	59	63	65	68	70	72	74	76	77	78	79		
2,8	15	27	35	41	47	51	56	60	62	65	67	70	72	74	75	76	77		
3,0	10	22	32	38	44	48	53	58	60	63	65	68	70	72	73	74	75		
3,2		18	28	34	41	45	49	54	57	60	63	66	68	70	72	72	74		
3,4		14	24	30	37	42	47	52	54	58	61	64	66	68	70	70	72		
3,6			21	27	34	39	44	48	52	55	59	62	64	66	68	69	71		
3,8			18	24	31	36	41	46	50	53	57	60	62	64	66	68	69		
4,0			15	22	29	33	39	43	47	51	54	57	60	62	64	66	68		
4,2				19	26	30	36	41	45	48	52	55	58	60	62	64	66		
4,4				16	24	27	33	39	42	46	50	53	56	58	60	63	65		
4,6				13	21	25	31	36	40	44	48	51	54	57	59	61	63		
4,8				11	19	22	28	33	38	42	46	50	53	55	58	60	62		
5,0				9	17	20	25	31	36	40	44	48	51	54	56	58	60		
5,5							18	25	30	35	39	43	47	49	51	54	57		
6,0							12	18	25	30	34	38	42	46	48	51	54		
6,5								12	19	25	29	33	38	42	45	47	50		
7,0								7	14	20	24	29	34	38	41	44	46		
7,5									9	15	19	24	30	34	37	40	43		
8,0									4	10	15	20	25	30	34	36	40		
8,5											9	15	22	26	31	33	37		
9,0												11	18	23	27	30	34		
9,5													14	19	24	27	31		
10,0														10	16	20	24	28	
10,5															12	16	20	25	
11,0																8	13	17	22
11,5																	10	15	19
12,0																	6	11	16
12,5																			12
13,0																			9

Die für Raumtemperaturen unter 0°C angegebenen Feuchtigkeitswerte sind gültig, wenn das feuchte Thermometer mit Eis bedeckt ist.

Psychrometertafel (Fortsetzung)

gültig für stark bewegte Luft (Windgeschwindigkeit 2,5 m/s u. mehr).

Beispiel für die Ermittlung siehe Seite 109.

Psychrom. Differenz ° C	Raumtemperatur ° C																					
	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50	52	54	56					
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100					
0,5	96	96	96	96	96	96	96	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97					
1,0	92	92	93	93	93	93	93	94	94	94	95	95	95	95	95	95	95					
1,5	88	88	88	89	89	89	90	91	92	92	92	92	92	92	92	92	92					
2,0	84	84	85	86	86	87	87	88	88	89	90	90	90	90	90	90	90					
2,5	80	81	82	83	83	84	85	85	85	86	87	87	87	87	87	87	87					
3,0	76	77	78	79	80	81	81	82	82	83	84	84	84	84	84	84	85					
3,5	72	73	74	75	76	78	79	79	79	80	81	81	81	81	82	82	83					
4,0	69	70	71	72	74	75	75	76	77	78	79	79	79	79	80	80	81					
4,5	65	66	67	69	71	72	72	73	74	75	76	76	76	76	77	78	79					
5,0	62	64	65	66	68	69	69	70	71	72	73	74	74	74	75	76	77					
5,5	59	61	62	63	64	65	66	67	68	70	71	72	72	72	73	74	75					
6,0	56	58	59	61	62	63	64	65	66	68	68	70	70	70	71	72	73					
6,5	52	54	56	58	60	61	62	63	64	65	66	67	68	68	69	70	70					
7,0	49	51	53	55	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	68					
7,5	46	48	51	53	55	56	57	58	59	60	61	62	62	64	65	66	66					
8,0	43	45	47	50	52	53	54	55	56	58	59	60	60	62	63	64	64					
8,5	40	43	45	47	49	51	52	53	54	55	56	57	58	60	61	62	62					
9,0	37	40	42	44	46	48	49	50	51	53	54	55	56	58	59	60	60					
9,5	34	37	40	42	44	46	48	49	49	51	52	53	54	56	57	58	58					
10,0	31	34	37	40	42	44	45	46	47	49	50	51	52	54	55	56	57					
11,0	26	29	32	35	37	39	40	42	43	45	46	47	48	50	51	52	53					
12,0	20	24	27	30	32	34	36	38	40	42	43	45	46	47	48	49	50					
13,0	15	19	22	25	27	30	32	34	36	38	39	41	42	44	45	46	47					
14,0	10	14	17	20	23	26	28	30	32	35	36	38	39	41	42	43	44					
15,0			12	16	19	22	24	26	28	31	33	34	36	37	38	39	41					
16,0				13	16	18	21	23	25	28	30	31	33	34	36	37	38					
17,0					12	15	17	20	22	25	27	28	30	31	33	34	35					
18,0						12	14	17	19	22	24	25	27	29	30	32	33					
19,0									17	19	21	22	24	26	27	29	30					
20,0										14	16	18	20	22	24	25	27	28				
21,0										11	13	15	17	19	21	22	24	25				
22,0											8	11	13	15	17	19	20	22	23			
23,0													10	12	14	16	18	20	21			
24,0														8	10	12	14	16	18	19		
25,0																10	12	14	16	17		
26,0																8	10	12	14	15		
27,0																		10	12	13		
28,0																			8	10	12	
29,0																				8	10	
30,0																					7	8

Psychrometertafel (Fortsetzung)

gültig für stark bewegte Luft (Windgeschwindigkeit 2,5 m/s u. mehr).

Beispiel für die Ermittlung siehe Seite 109.

Psychrom. Differenz ° C	Raumtemperatur ° C																	
	58	60	62	64	66	68	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90	
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
0,5	97	97	97	97	97	97	97	97	97	98	98	98	98	98	98	98	98	
1,0	95	95	95	95	95	95	95	95	96	96	96	96	96	96	96	96	96	
1,5	92	92	92	93	93	93	93	93	94	94	94	94	94	94	94	94	94	
2,0	90	90	90	91	91	91	91	91	92	92	92	92	92	92	92	92	92	
2,5	87	87	88	88	88	88	88	88	90	90	90	90	90	90	90	90	90	
3,0	85	85	86	86	86	86	86	86	88	88	88	88	88	88	88	88	88	
3,5	83	83	84	84	84	84	84	84	85	86	86	86	86	86	86	86	86	
4,0	81	81	82	82	82	82	82	83	84	84	84	84	84	84	84	85	85	
4,5	79	79	80	80	80	80	80	81	82	82	82	82	82	82	82	83	83	
5,0	77	77	78	78	78	78	78	79	80	80	80	80	80	80	80	81	81	
5,5	75	75	76	76	76	76	76	77	78	78	78	78	78	78	79	79	80	
6,0	73	73	74	74	75	75	75	76	76	77	77	77	77	77	78	78	79	
6,5	71	71	72	72	73	73	73	74	74	75	75	75	75	75	76	76	77	
7,0	69	69	70	70	71	71	71	72	72	73	73	73	74	74	74	75	75	
7,5	67	67	68	68	69	69	69	70	71	71	71	72	72	72	73	73	73	
8,0	65	65	66	67	67	68	68	69	69	70	70	70	71	71	72	72	72	
8,5	63	63	64	65	65	66	66	67	67	68	68	68	69	69	70	70	70	
9,0	61	61	62	63	63	64	64	65	65	66	66	66	67	67	68	69	69	
9,5	59	59	60	61	62	62	62	63	64	65	65	66	66	66	67	67	67	
10,0	58	58	59	60	61	61	61	62	63	64	64	64	65	65	66	66	66	
11,0	54	55	56	57	57	58	58	59	60	61	61	61	62	62	63	63	63	
12,0	51	52	53	54	54	55	55	56	57	58	58	58	59	59	60	60	61	
13,0	48	49	50	51	52	52	52	53	53	54	55	55	56	56	57	57	58	
14,0	45	46	47	48	49	49	49	50	51	52	53	53	54	54	55	55	56	
15,0	42	43	44	45	46	46	46	47	48	49	50	50	51	51	52	52	53	
16,0	39	40	41	42	43	44	44	45	46	47	48	48	49	49	50	50	51	
17,0	36	37	38	39	40	41	41	42	43	44	45	45	46	46	47	48	49	
18,0	34	35	36	37	38	39	39	40	41	42	43	43	44	44	45	46	47	
19,0	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	40	41	42	42	43	44	45	
20,0	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	38	39	40	40	41	42	43	
22,0	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	34	35	36	36	37	38	39	
24,0	20	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	31	32	32	33	34	35	
26,0	17	18	19	20	22	23	23	25	26	27	28	29	29	30	30	31	32	
28,0	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	26	27	28	29	
30,0	9	11	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	23	24	25	26	
32,0		8	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	20	21	22	23	
34,0					10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	19	20	20	
36,0							9	10	11	12	13	14	15	15	16	17	18	
38,0											11	12	13	13	14	15	16	
40,0													11	11	12	13	14	

Dampfgehalt gesättigter Luft in g/kg

° C	g/kg	° C	g/kg	° C	g/kg
-20	0,654	20	15,19	60	158,5
-19	0,720	21	16,18	61	168,0
-18	0,792	22	17,24	62	178,3
-17	0,870	23	18,33	63	188,8
-16	0,955	24	19,51	64	200,5
-15	1,048	25	20,77	65	212,9
-14	1,150	26	22,09	66	226,0
-13	1,244	27	23,47	67	240,3
-12	1,418	28	24,93	68	255,9
-11	1,509	29	26,49	69	272,1
-10	1,650	30	28,14	70	289,7
-9	1,801	31	29,88	71	308,6
-8	1,969	32	31,69	72	329
-7	2,149	33	33,64	73	352
-6	2,343	34	35,69	74	376
-5	2,552	35	37,9	75	403
-4	2,781	36	40,1	76	432
-3	3,030	37	42,5	77	463
-2	3,30	38	45,1	78	499
-1	3,59	39	47,8	79	538
0	3,90	40	50,6	80	580
1	4,20	41	53,6	81	628
2	4,51	42	56,8	82	683
3	4,85	43	60,1	83	744
4	5,20	44	63,7	84	813
5	5,58	45	67,4	85	894
6	5,98	46	71,4	86	986
7	6,42	47	75,5	87	1093
8	6,88	48	79,9	88	1219
9	7,36	49	84,6	89	1373
10	7,88	50	89,5	90	1559
11	8,44	51	94,7	91	1794
12	9,02	52	100,3	92	2092
13	9,64	53	106,1	93	2491
14	10,30	54	112,3	94	3050
15	11,00	55	118,9	95	3880
16	11,74	56	125,9	96	5250
17	12,54	57	133,3	97	7940
18	13,37	58	141,2	98	15600
19	14,25	59	149,5	99	198200
20	15,19	60	158,5	100	—

Gewicht der Luft bei 760 mm QS und 0 °C = 1,293 kg/m³

Schmelz- und Siedetemperaturen

Schmelz- und Verdampfungswärme (bei 760 mm QS)

Stoff	Schmelz- bzw. Erstarrungs- Temperatur ° C	Schmelz- bzw. Erstarrungs- Wärme kcal/kg	Ver- dampfungs- Temperatur ° C	Ver- dampfungs- bzw. Kondensa- tionswärme kcal/kg
Äther	— 118	—	35	90
Alkohol (wasserfrei)	— 100	—	78	206
Aluminium	657	85	1800	—
Ammoniak	— 75	—	— 34	341
Antimon	630	39	755	320
Blei	327	5,4	1170	175
Eisen (rein)	1528	50	2450	—
Roheisen, grau	1200	23	—	—
„ weiß	1275	32...34	—	—
Schmiedeeisen	1475	—	—	—
Stahl	1400	—	—	—
Email- (Schmelz-) farben	960	—	—	—
Glas	900...1200	—	—	—
Gold	1064	16	2200	—
Kadmium	321	13,7	778	240
Kobalt	1778	58	—	—
Kochsalzlösung (ges.)	— 18	10,3	—	—
Kohlensäure	— 79	—	— 80	31,8
Kupfer	1084	43	2300	—
Leinöl	— 20	—	316	—
Magnesium	650	72	965	—
Mangan	1210	37	1900	—
Messing	950	—	—	—
Natrium	97	31,7	880	—
Nickel	1450	60	—	—
Paraffin	54	—	300	—
Platin	1779	27,2	—	—
Porzellan	1550	—	—	—
Quarz	1770	—	—	—
Quecksilber	— 39,4	2,8	357	68
Silber	960	24,7	1955	—
Salpeter, Natron-	313	63	—	—
Wachs	64	—	—	—
Wasser	0	80	100	539
Weichlote	130...200	—	—	—
Wismut	268	12,6	1420	—
Woodsches Metall	75	7,8	—	—
Zink	419	28	940	475
Zinn	232	14,6	2270	—

Mittlere spez. Wärme reiner Gase u. Dämpfe in kcal/m³

von 0...t°C bei konstantem Druck p = 0 kg/cm²

t °C	H ₂	N ₂	CO	O ₂	H ₂ O	CO ₂	Luft	CH ₄	NH ₃	SO ₂
0	0,310	0,310	0,310	0,312	0,354	0,382	0,311	0,369	0,379	0,425
100	0,310	0,311	0,311	0,314	0,358	0,406	0,312	0,369	0,379	0,425
200	0,310	0,311	0,313	0,319	0,362	0,429	0,313	0,420	0,413	0,463
400	0,310	0,315	0,318	0,329	0,372	0,464	0,318	0,482	0,454	0,495
600	0,311	0,321	0,325	0,337	0,384	0,491	0,324	0,538	0,497	0,519
800	0,313	0,327	0,331	0,344	0,396	0,512	0,330	0,589	0,539	0,535
1000	0,315	0,333	0,337	0,350	0,409	0,530	0,336	—	—	—

Spezifische Wärme von festen und flüssigen Stoffen (kcal/kg)

Stoff	° C	Spez. Wärme	Stoff	° C	Spez. Wärme
Aluminium	20	0,20	Koks		
Asche (Kohlen-)	20	0,16·0,19	m. 10% Asche	20·100	0,193
Aethylalkohol	0·100	0,58	„ 10% „	20·500	0,294
Asphalt	20	0,22	„ 10% „	20·1000	0,351
Benzin	20	0,48·0,52	„ 10% „	20·1200	0,363
Benzol	20	0,41	„ 20% „	20·100	0,192
Eis	-20·0	0,502	„ 20% „	20·500	0,287
Eisen	0	0,10	„ 20% „	20·1000	0,340
„	0·500	0,13	„ 20% „	20·1200	0,325
„	0·1100	0,15	Naphtalin	15	0,31
„	0·1600	0,19	„	80	0,40
Eisenoxyd	0	0,16	Paraffin	20	0,48
Erdöl	20	0,40·0,55	Petroläther	0	0,41
Gasöl	20	0,45·0,48	Petroleum	0·100	0,50
Glas	0·100	0,19	Quarz	20·100	0,190
Glyzerin	20	0,58	„	20·500	0,235
Graphit	0	0,16	„	20·1000	0,256
„	20·100	0,192	Quecksilber	0·100	0,333
„	20·500	0,317	Sandstein	0·100	0,22
„	20·1000	0,362	Kohle, bituminös		
Guß Eisen	0·300	0,13	m. 5% H ₂ O	20	0,28
Holz	20	0,50·0,65	dsgl. m. 10% H ₂ O	20	0,32
Holz sägespäne			„ 15% „	20	0,36
trocken	20	0,35	Steinkohlenteer	40	0,36
Holz kohle	20	0,16·0,17	„	200	0,45
„	0·225	0,31	Toluol	0	0,40
„	1300	0,38	Zement	20	0,26

Oberer Heizwert verschiedener Stoffe

Brennstoff	kcal/kg	Brennstoff	kcal/kg
Äther	8900	Petroleum	11000
Alkohol	7100	Phosphor (zu P_2O_5)	5950
Benzin	11000	Rohrzucker	4000
Benzol	10000	Rüböl, Leinöl	9300
Braunkohlenteeröl	10000	Schießpulver	750
Gasolin	11200	Schwefel (zu SO_2)	2220
Glyzerin	4300	Schwefelkohlenstoff	3400
Holz	4100	Steinkohlenteer	8500
Holzgeist	5300	Steinkohlenteeröl	9500
Kohlenstoff (zu CO_2)	8140	Talg	8370
Kohlenstoff (zu CO)	2440	Terpentinöl	10850
Masut	10500	Wachs	9000
Naphthalin	9640	Zellulose	4200

Heizwert deutscher Kohlen

Brennstoff	kcal/kg
Ruhrkohlen	7650
Saarkohlen, schlesische und sächsische Kohlen	7100
Oberbayrische Melasse-Kohlen	5200
Sächsische Braunkohlen	3600
Torf	3800
Steinkohlen-Briketts	7750
Braunkohlen-Briketts	4800
Gaskoks	7000
Westfälischer Anthrazit	7975

Heizwert technisch wichtiger Gase

Gasart	Oberer Heizwert kcal/m ³	Unterer Heizwert kcal/m ³
Azetylen C_2H_2	15000	12570
Schmelgas von Steinkohle	7130	6470
Leuchtgas	4380 5120	3900 4570
Koksofengas	4820	4300
Wasserstoff H_2	3050	2570
Kohlenoxyd CO	3020	—
Wassergas	2630	2410
Gichtgas	910	890
Methan	9520	8550
Benzoldampf	34960	33520

Allgemeiner Teil

Wichtige Zahlenwerte

Größe	n	log n	Größe	n	log n
$\sqrt{2}$	1,41422	0,15052	e	2,71828	0,43429
$\sqrt{3}$	1,73205	0,23856	l : e	0,36788	0,56571-1
π	3,14159	0,49715	$\ln 10$	2,30258	0,36222
$\pi : 4$	0,78540	0,89509-1	g	9,81	0,99167
$\sqrt{\pi}$	1,77245	0,24857	\sqrt{g}	3,13	0,49583

Griechisches Alphabet

Name	Groß	Klein	Deutsch	Name	Groß	Klein	Deutsch
Alpha	A	α	A	Nü	N	ν	N
Beta	B	β	B	Xi	Ξ	ξ	X
Gamma	Γ	γ	G	Omikron	O	o	O
Delta	Δ	δ	D	Pi	Π	π	P
Epsilon	E	ϵ	E	Rho	ρ	ρ	Rh
Zeta	Z	ζ	Z	Sigma	Σ	σ	S
Eta	H	η	E	Tau	T	τ	T
Theta	Θ	θ	Th	Ypsilon	Υ	υ	Y
Iota	I	ι	I	Phi	Φ	ϕ	Ph
Kappa	K	κ	K	Chi	χ	χ	Ch
Lamda	Λ	λ	L	Psi	Ψ	ψ	Ps
Mü	M	μ	M	Omega	Ω	ω	O

Bezeichnung von dekadischen Vielfachen und Teilen

T Tera = 10^{12}	h Hekto = 10^2	m Milli = 10^{-3}
G Giga = 10^9	D Dekka = 10^1	μ Mikro = 10^{-6}
M Mega = 10^6	d Dezi = 10^{-1}	n Nano = 10^{-9}
k Kilo = 10^3	c Zenti = 10^{-2}	p Piko = 10^{-12}

Durch Vorsetzen dieser Silben lassen sich aus allen Einheiten dezimale Untereinheiten bilden; z. B. 1 Kilovolt = 1000 Volt.

Spezifische Gewichte von festen Körpern (1 dm³ wiegt kg)

Aluminium, chem.rein	2,58	Fichte	0,35...0,60
„ gegossen	2,56	Kiefer	0,31...0,76
„ gewalzt	2,66	Kirschbaum	0,76...0,84
Anthrazit	1,4...1,7	Nußbaum	0,60...0,81
Antimon	6,65...6,7	Rotbuche	0,66...0,83
Arsen	5,7...5,9	Tanne	0,37...0,75
Asbest	2,10...2,80	Weißbuche	0,62...0,82
Asphalt	1,07...1,46		
Bernstein	1,06...1,09	Jod	4,95
Beton	1,8...2,45	Kadmium	8,65
Blei, gegossen	11,35	Kalk, gebrannt	2,3...3,2
„ gewalzt	11,38	„ -mörtel	1,64...1,86
„ flüssig	10,37...10,6	Kalkstein	2...2,5
Brauneisenstein	3,4...4,2	Kies	1,8...2,0
Braunkohle	1,2...1,5	Kobalt	8,75
		Kochsalz	2,1...2,2
Chrom	6,2...6,8	Koks (im Stück)	1,4
		Kork	0,24
Diamant	3,5	Kreide	1,8...2,66
		Kupfer, gegossen	8,3...8,9
Eis von 0° C	0,92	„ gehämmert	8,92...8,96
Eisen, Gußware	7,25	„ Elektrolyt-	8,88...8,95
„ Schweiß-	7,8	Kupferdraht, hart	8,96
„ Fluß-	7,85	„ geglüht	8,86
„ Flußstahl	7,86		
Erde, lehmig frisch	2,1	Leder, trocken	0,85...1,0
„ trocken	1,6...1,9	Lehm, trocken	1,5
„ mager trocken	1,3	„ frisch	1,8
Fette	0,92...0,94	Magnesium	1,69...1,75
		Magneteisenstein	5,15
Gips, gebrannt	1,81	Mangan	7,14...7,51
„ gegoss. u. trock.	0,97	Marmor	2,52...2,85
Glas, Fenster-	2,4...2,6	Mauerwerk v. Sandst.	2,05...2,12
„ Spiegel-	2,45...2,72	„ v. Ziegelst.	1,47...1,70
„ Kristall-	2,9	Messing, gegossen	8,4...8,7
Glimmer	2,65...3,20	„ gewalzt	8,52...8,62
Gold	18,6...19,3	„ gezogen	8,42...8,72
Granit	2,51...3,05		
Graphit, natürlicher	2,25	Nickel, gegossen	8,35
„ Retorten-	1,89	„ gewalzt	8,6...8,9
Gummi	0,92...0,96	Nickelin	8,63...8,77
Guttapercha	0,98		
Hartgummi	1,15	Papier	0,7...1,15
Holz, lufttrocken		Paraffin	0,87...0,91
Ahorn	0,53...0,81	Phosphor, gelb	1,83
Birnbaum	0,61...0,73	„ rot	2,19
Ebenholz	1,26	„ krist.	2,34
Eiche	0,69...1,03	Platin, gegossen	21,5
		„ -schwamm	16,3...21,2
		„ Blech, Draht	21,2...21,7

Porzellan	2,3···2,5	Stahl	7,85···7,87
Porzellanerde	1,15	Steinkohle	1,2···1,5
Pottasche	2,26	Steinsalz	2,22···2,30
Preßkohle (Brikett)	1,25	Tantal	14,1
Roteisenstein	4,90	Ton	1,8···2,6
Salpeter	1,95	Wachs	0,97
Sand, fein u. trocken	1,40···1,64	Wismut	9,8
„ feucht	1,9···2,1	Wolfram	16,5···19,26
„ grob u. trocken	1,4···1,5	Zement, erhärtet	2,72···3,05
Sandstein	2,4···2,7	Ziegelstein, gewöhnl.	1,4···2,2
Schamotte	1,85···2,12	„ Klinker	1,5···2,3
Schiefer	2,6···2,8	Zink, gegossen	6,9
Schwefel	1,9···2,1	„ gewalzt	7,13···7,20
Selen, amorph	4,7	„ flüssig	6,48
Silber, gegossen	10,4···10,5	Zinn, gegossen	7,20
„ gewalzt	10,62	„ gehämmert	7,31
Silberdraht	10,56		

Spezifische Gewichte von Flüssigkeiten (1 dm³ wiegt kg)

Alkohol, abs., bei 15° C	0,79	Petroleum, gewöhnl.	0,80
Benzin bei 15° C	0,68···0,70	Quecksilber bei 0° C	13,596
Benzol bei 0° C	0,9	Salpetersäure (100%)	1,53
Bier	1,02···1,035	„ (34%)	1,21
Essigsäure bei 0° C	1,07	Salzsäure (42%) 15° C	1,2
Glyzerin bei 15° C	1,06	„ (25%) 15° C	1,12
Kochsalzlösung, ges.	1,20	„ (10%) 15° C	1,05
Leinöl, gekocht	0,942	Schwefelsäure (66° B)	1,84
Meerwasser	1,02···1,04	„ (50° B)	1,53
Mineralöle	bis 0,96	„ f. Sammler	1,18···1,24
Mineralschmieröl 20° C	0,9···0,93	Teer aus Steinkohlen	1,2
Naphtha	0,48	Terpentinöl bei 15° C	0,873
Olivöl bei 15° C	0,92	Wein	0,992···1,002

Spezifische Gewichte von Gasen u. Dämpfen (1 m³ wiegt kg) bezogen auf den Normalzustand (0 °C und 760 mm QS)

Luft	1,293	Äthylen C ₂ H ₄	1,260
Stickstoff N ₂	1,2503	Azetylen C ₂ H ₂	1,176
Sauerstoff O ₂	1,429	Schweflige Säure SO ₂	2,927
Wasserstoff H ₂	0,090	Ammoniak NH ₃	0,771
Kohlenoxyd CO	1,250	Stickoxydul N ₂ O	1,978
Kohlensäure CO ₂	1,977	Chlor Cl ₂	3,233
Methan CH ₄	0,715	Wasserdampf H ₂ O	0,810

Elemente und Atomgewichte

Sym- bol	Name	Ord.- Zahl	Atom- Gewicht	Sym- bol	Name	Ord.- Zahl	Atom- Gewicht
Ac	Actinium	89	227,0	Nd	Neodym	60	144,27
Al	Aluminium	13	26,97	Ne	Neon	10	20,183
Sb	Antimon	51	121,76	Ni	Nickel	28	58,69
Ar	Argon	18	39,944	Nb	Niob	41	92,91
As	Arsen	33	74,91	Os	Osmium	76	191,5
Ba	Barium	56	137,36	Pd	Palladium	46	106,7
Be	Beryllium	4	9,02	P	Phosphor	15	31,02
Pb	Blei	82	207,21	Pt	Platin	78	195,23
B	Bor	5	10,82	Po	Polonium	84	210,00
Br	Brom	35	79,916	Pr	Praseodym	59	140,92
Cd	Cadmium	48	112,41	Pa	Protaktinium	91	231
Cs	Caesium	55	132,91	Hg	Quecksilber	80	200,61
Ca	Calcium	20	40,08	Ra	Radium	88	226,05
Cp	Cassiopeium	71	175,0	Rn	Radon	86	222
Ce	Cer	58	140,13	Re	Rhenium	75	186,31
Cl	Chlor	17	35,457	Rh	Rhodium	45	102,91
Cr	Chrom	24	52,01	Rb	Rubidium	37	85,48
Dy	Dysprosium	66	162,46	Ru	Ruthenium	44	101,7
Fe	Eisen	26	55,84	Sm	Samarium	62	150,43
Er	Erbium	68	167,64	O	Sauerstoff	8	16,0000
Eu	Europium	63	152,0	Sc	Scandium	21	45,10
F	Fluor	9	19,000	S	Schwefel	16	32,06
Gd	Gadolinium	64	156,9	Se	Selen	34	78,96
Ga	Gallium	31	69,72	Ag	Silber	47	107,880
Ge	Germanium	32	72,60	Si	Silicium	14	28,06
Au	Gold	79	197,2	N	Stickstoff	7	14,008
Hf	Hafnium	72	178,6	Sr	Strontium	38	87,63
He	Helium	2	4,002	Ta	Tantal	73	180,88
Ho	Holmium	67	163,5	Te	Tellur	52	127,61
Il	Illinium	61	—	Tb	Terbium	65	159,2
In	Indium	49	114,76	Tl	Thallium	81	204,39
Ir	Iridium	77	193,1	Th	Thorium	90	232,12
J	Jod	53	126,92	Tm	Thulium	69	169,4
K	Kalium	19	39,096	Ti	Titan	22	47,90
Co	Kobalt	27	58,94	U	Uran	92	238,07
C	Kohlenstoff	6	12,01	V	Vanadium	23	50,95
Kr	Krypton	36	83,7	H	Wasserstoff	1	1,0078
Cu	Kupfer	29	63,57	Bi	Wismut	83	209,00
La	Lanthan	57	138,92	W	Wolfram	74	184,0
Li	Lithium	3	6,940	X	Xenon	54	131,3
Mg	Magnesium	12	24,32	Yb	Ytterbium	70	173,04
Mn	Mangan	25	54,93	Y	Yttrium	39	88,92
Ma	Masurium	43	—	Zn	Zink	30	65,38
Mo	Molybdän	42	96,0	Sn	Zinn	50	118,70
Na	Natrium	11	22,997	Zr	Zirkonium	40	91,22

Sach- und Namensverzeichnis

	Seite
A bleichwiderstände	59
Aderunterbrechung, Fehlerortsbestimmung bei	7...9
Anzeigefehler der elektrischen Meßgeräte	85
Areginal-Konzentrationsmesser	18, 96
Astatische Leistungsmesser	24
Atomgewichte	119
Außenschutzrohre für Thermoelemente	103
Ausführungsbeispiele von elektrischen Meßgeräten	81...84
Ausführungsbeispiele von wärmetechnischen Meßgeräten	96...100
Ausgleichsleitungen	63, 102
B allistische Fehlerortsbestimmung	9
Ballistische Galvanometer	55
Ballistische Kapazitätsmessung	20
Barowaage	71
Begasungskontrolle	18
Beleuchtungsrahmen für tragbare Meßgeräte	79
Blindleistung	27
C artox-Konzentrationsmesser	18, 96
CO ₂ - und CO + H ₂ - Messer	19
D ampfgehalt gesättigter Luft	112
Dampfmengenmessung siehe Mengenummessung durch mittelbare Geschwindigkeitsmessung	
Dekadische Vielfache	116
Deprez-Geräte siehe Drehspulgeräte	
Dichte des Wassers	108
Dielektrische Verluste	22
Dielektrizitätskonstante und Verlustfaktor von Isolierstoffen	92
Dietze-Anleger	54
Differenzdruckmesser	3
Dreheisen-Meßwerk	53
Drehspulgeräte für Gleichstrom	54
Drehspulgeräte für Temperaturanzeige	61
Drehspulgeräte für Wechselstrom	56
Drehspulmeßwerk	54
Drehzahl	1
Drosselgeräte	32
Druck	3, 4
Druckdifferenzmesser	3
Druckdifferenz-Verfahren, Mengenummessung nach dem	31
Druckwasserdichte Geräte (Bild)	82
Dynamometer siehe elektrodynamische Meßgeräte	
E igenverbrauch von elektrischen Meßgeräten	88...90
Einleiter-Stromwandler nach Dietze	54
Elastische Rückführung	68
Elektrische Drehzahlmessung	1
Elektrische Feuchtigkeitsmessung	12, 13

	Seite
Elektrische Gaskonzentrationsmessung	16...19
Elektrische Meßgeräte, Ausführungsbeispiele	81...84
Elektrische Rauchgasprüfer	19
Elektrische Temperatur-Meßeinrichtungen	57...68
Elektrische Widerstandsthermometer	57...59
Elektrodynamische Leistungsmesser	23...28
Elektro-Fernsender	10
Elektrometrische pH-Messung	40...47
Elektrostatische Spannungsmesser	49
Elektrotechnische Formeln	94
Elemente und Atomgewichte	119
Erdschluß, Bestimmung des Fehlerortes bei	6, 7
Erdwiderstands-Messung	74
F allbügelregler	66
Federdruckmesser	4, 71
Fehlergrenzen der elektrischen Meßgeräte	85...87
Fehlerort	5...9
Ferndrehzahlmessung	1
Fernfeuchtigkeitsmessung	12, 13
Fernmessung der Temperatur	57...68
Fernübertragung von Meßwerten	10, 11
Fernzähler	35
Ferraris-Meßwerk	80
Feuchtigkeit, relative	12, 13
Fixohmmeter	75
Formeln, elektrotechnische	94, 95
Fotozellenkompensator „Potentiolux“	52
Frankfurter Regel	37
Frequenz	14
Füllflüssigkeit für Ringwaagen	3,34, 108
G alvanometer	55
Gase, Heizwert	115
Gaskonzentration	16...19
Gasspurprüfer	18
Gesamtstrahlungs-pyrometer „Pyrradio“	64
Gesättigter Wasserdampf	107
Gleichstromkompensatoren	50...52
Graf, Fehlerortsbestimmung nach	6, 7
Griechisches Alphabet	116
Großanzeigergerät „Profilux“ mit Lichtzeiger (Bild)	98
H aarhygrometer	13
Hartmann-Kempf, Zungenfrequenzmesser nach	14
H & B-Präzisions-Kompensator	51
Heizwerte	115
Hitzdraht-Meßwerk	80
Hochfrequenz-Meßgeräte	15, 49, 56
Hochspannungs-Kondensatoren nach Schering-Vieweg	22
Hochspannungs-Meßbrücke nach Schering	22

	Seite
Induktivitätsmessung	48
Isolationsmesser	75
Isolationswiderstand	75
K abelfehler, Bestimmung der	5...9
Kabel-Meßkoffer nach Graf (Bild)	83
Kapazität	20...22
Kapazitätsmeßbrücken	21, 22
Kapselfeder-Meßwerk	4
Keller, Trafo-Übersetzungsmesser nach	69
Klassenzeichen der elektrischen Meßgeräte	85
Kohlen, Heizwert	115
Kompensations-Meßtisch (Bild)	84
Kompensationsmessung	50, 62
Kompensationsmessung zur pH-Bestimmung	44
Kompensationsregler	66, 96
Kompensationsschaltung für Kreuzspulgeräte	59
Kompensator nach Lindeck-Rothe	52
Kompensatoren zur Messung der Thermospannung	62, 63
Kondensatoren, Preßgas-	22
Konstant-Transformator	17
Kreuzspul-Isolationsmesser	75
Kreuzspul-Meßwerk	57, 73
Kreuzspul-Ohmmeter	73
Kupferleitungen, Widerstand der	93, 102
Kurbel-Induktor	75
L eistung	23...28
Leistungsfaktor	29
Leistungs-Meßkoffer	28, 82
Leitfähigkeit	30
Leitungsprüfer	74
Leitwert	30
Lichtzeigergeräte (Bilder)	82, 98
Lindeck-Rothe-Kompensator	52
Linienschreiber (Bild)	81
„Mandex“-Mengenmesser	35, 97
Maxwell, Induktivitätsmeßbrücke nach	48
Menge	31...39
Mengenmessung durch mittelbare Geschwindigkeitsmessung	31...39
Meßbrücken, Widerstands-	72, 73
Meßbrücken für Kapazität	21, 22
Meßbrücken für Selbstinduktion	48
Meßtisch mit Präzisions-Kompensator	84
Meßwandler-Prüfeinrichtung nach Schering-Alberti	70
Multavi-Vielfach-Meßgerät (Bild)	83
N ebenwiderstände für Drehspulgeräte	55
Normblende	32, 33, 97
Normdüse	32
O berflächen-Temperatur, Messung der	61
Oberflächen-Widerstand, Messung des	76

	Seite
Ohmmeter	73
Ohmsches Gesetz	94
Optische Pyrometer	64, 65
Optische Temperaturschreiber	62
P	
Phasenmesser siehe Leistungsfaktormesser	
Photozellenkompensator siehe Fotozellenkompensator	
pH-Wert	40...47
Plattenfeder-Meßwerk	4
„Potentiolux“ siehe Fotozellenkompensator	
Preßgas-Kondensatoren	22
„Profilux“ (Bild)	98
Programmregler	67, 96
Psychrometertafel	109...111
Psychrometrische Differenz	12, 109...111
Punktschreiber	17, 58, 96
Pyrometer siehe Thermoelemente	
„Pyropto“, Teilstrahlungspyrometer	65, 96
„Pyrradio“, Gesamtstrahlungspyrometer	64, 104
Q	
Quadrantinstrument (Bild)	81
R	
Rauchgasprüfer	19
Rauminhalt des Wassers	108
Rauminhalt von Wasserdampf	105, 106
Regler	65...68, 96
Relative Feuchtigkeit	12, 13
Resonanz-Meßwerk	14
Ringkammer-Normblende	33
Ringwaage-Druckmesser	3
Ringwaage für Vakuummessung	71
Ringwaage-Mengenmesser	34, 97
Rohrfeder-Meßwerk	4
S	
Schaltzeichen für elektrische Meßgeräte	92
Schering, Hochspannungs-Meßbrücke nach	22
Schering-Alberti, Meßwandler-Prüfeinrichtung nach	70
Schleifdraht-Meßbrücke	72
Schmelz- u. Siedetemperaturen, Schmelz- u. Verdampfungswärme	113
Seidler, elektrostatischer Spannungsmesser nach	49
Selbstinduktion	48
Siedetemperaturen	113
Sinnbilder für elektrische Meßgeräte	91
Skalen und Zeiger von Meßgeräten	78, 79
Spannung	49...52
Spannungsmessung durch Kompensation	50...52
Spannungswandler	49, 87
Spezifische Gewichte	117, 118
Spezifischer Widerstand verschiedener Metalle	93
Staurand siehe Normblende	
Strahlungspyrometer	64, 65
Strom	53...56
Stromwandler	54, 87
Stromwandler-Prüfeinrichtung	70

	Seite
Taupunkt	12
Teilstrahlungspyrometer „Pyropto“	65
Temperatur	57... 68
Temperatur, Dichte und Rauminhalt des Wassers	108
Temperatureinheiten, Umrechnung von	104
Thermoelemente	59... 63, 101
Thermometer siehe Widerstands-Thermometer	
Thermospannung der Thermoelemente	101
Thermospannung des H&B-Pyrradio	104
Thermostat	63
Thermo-Umformer	56
Thomson-Meßbrücke	73
Trafo-Übersetzungsmesser nach Keller	69
Trockengleichrichter	56
Übersetzungsverhältnis	69, 70
Vakuum	71
VDI-Normblende	33, 97
Venturirohr	32
Verdampfungswärme	113
Verlustfaktor von Isolierstoffen	92
Verlustwinkel	22
Verstärker für kleine Gleichspannungen siehe Fotozellenkompensator	
Vibrations-Tachometer	2
Vielfache, dekadische	116
Vorratsmessung von Brennstoff	11
Walzen-Meßbrücke	73
Wärmeleitfähigkeits-Methode	16
Wärmetechnische Meßgeräte, Ausführungsbeispiele	96... 100
Wärmewarten (Bilder)	99, 100
Wasser, Temperatur, Dichte und Rauminhalt	108
Wasserdampf, gesättigter	107
Wasserdampf, Rauminhalt	105, 106
Wasserstoffionen-Konzentration	40
Wattmeter siehe Leistungsmesser	
Weicheisen-Meßwerk siehe Dreheisen-Meßwerk	
Wheatstone-Meßbrücke	72
Widerstand	72... 76
Widerstand der Thermoelemente, Ausgleichs- und Kupferleitungen	102
Widerstand der Thermometer-Wicklungen	101
Widerstand, spezifischer verschiedener Metalle	93
Widerstands-Meßbrücken	72, 73
Widerstandsmesser (Kreuzspul-Ohmmeter)	73
Widerstands-Thermometer	57... 59, 101
Widerstand von Kupfer- und Aluminiumleitern	93
Winkelstellungen, Fernübertragung von	11
Zahlenwerte, wichtige	116
Zungen-Frequenzmesser	14
Zwei-Leistungsmesser-Methode	25

W-264

