

Steigt der Wert von  $dk/dt$  (der nach Abs. 149 stets negativ ist), so steigt auch  $\Delta z$ . Für die Grundkurve ist er

$$\Delta z = -\Delta t \cdot \frac{m}{C} \cdot \frac{s_t}{t - t_0},$$

wächst also allmählich mit Abnahme der Temperatur  $t$  und erreicht bei  $t = t_0$ , d. h. bei Annäherung der Temperatur der Legierung an die der Umgebung, den Wert  $\infty$ . Die  $\Delta z, t$ -Linie ist, falls  $s_t$  unveränderlich angenommen wird, eine gleichseitige Hyperbel. Beginnt bei  $T'$  eine Wärmetönung einzusetzen, liegt also bei  $T'$  ein Haltepunkt, so wird die  $\Delta z, t$ -Linie bei  $T'$  plötzlich eine Spitze  $bef$  bilden, wie in Abb. 108, um sich dann wieder allmählich der Grundkurve zu nähern.

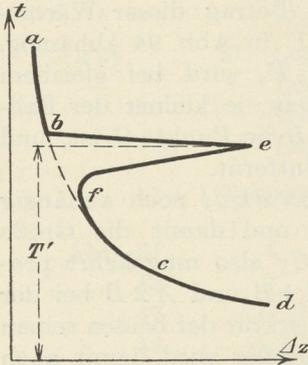


Abb. 108.

In den beiden Abb. 134 und 135 sind für eine bestimmte Legierung die  $z, t$ -Linie (9 in Abb. 134) und die  $\Delta z, t$ -Linie (9' in Abb. 135) dargestellt. Während man in der  $z, t$ -Linie 9 bei  $689\text{ C}^\circ$  den Richtungswechsel nur sehr unsicher erkennt, ist die Wärmetönung in der  $\Delta z, t$ -Linie 9' durch die Spitze deutlich gekennzeichnet. Bei der Aufzeichnung dieser Kurve 9' wurden die Zeiten  $\Delta z$  zum Durchlaufen der Temperatur  $\Delta t = t_2 - t_1 = 10\text{ C}^\circ$  als Abszissen zu den Ordinaten  $\frac{t_1 + t_2}{2}$  eingetragen.<sup>1)</sup>

## 2. Die Mittel zur Temperaturmessung.

**162.** Zur Aufnahme der  $z, t$ - und der  $\Delta z, t$ -Linien sind Messungen höherer Wärmegrade erforderlich. Hierbei kommt es weniger darauf an, daß die Messung absolut genommen den höchsten, dem derzeitigen Stand der Wissenschaft entsprechenden Grad der Genauigkeit besitzt, sondern es genügt, relativ genügend genaue Werte zu erzielen. Für die Aufnahme der  $z, t$ -Linien,  $\Delta z, t$ -Linien usw. kommen nur das Quecksilberthermometer, das Thermolement und das Widerstandspyrometer in Betracht. Da aber bei metallurgischen Arbeiten die Messung höherer Wärmegrade eine wichtige Rolle spielt, soll bei dieser Gelegenheit auch noch auf die übrigen wichtigsten Vorrichtungen zur technischen Temperaturmessung, insbesondere auf die optischen Pyrometer etwas näher eingegangen werden.

### a) Das Quecksilberthermometer.

**163.** Für Temperaturen bis etwa  $400\text{ C}^\circ$  benutzt man Quecksilberthermometer aus Jenaer Glas. In diesen steht der Quecksilberfaden unter dem Druck eines das Quecksilber nicht angreifenden Gases, z. B. Stickstoff, oder Kohlendioxyd. Änderungen der Eigenspannungen im Glas (324—338) infolge der Erwärmung und Abkühlung bei der Benutzung können den Nullpunkt des Thermometers wesentlich verändern und so die Ablesung unsicher machen. Dieser Übelstand wird durch künstliches Altern beseitigt, indem man das Thermometer bei der höchsten Temperatur, für die es gebraucht wird, längere Zeit (Tage, unter Umständen Wochen) erhält und dann sehr langsam abkühlt.

Die Thermometer sind so geeicht, daß sie die richtige Temperatur nur dann unmittelbar abzulesen gestatten, wenn sich das gesamte Quecksilber innerhalb der zu messenden Temperatur befindet. In der Mehrzahl der Fälle läßt sich aber bei der Temperaturmessung nicht vermeiden, daß ein Teil des Quecksilberfadens aus dem zu messenden Temperaturbereich in eine kühlere Umgebung hineinragt.

<sup>1)</sup>  $t_2$  ist die Temperatur zu Beginn,  $t_1$  zu Ende der Temperaturintervalle  $\Delta t = 10\text{ C}^\circ$ .

Dann ist nur ein Teil des Quecksilberfadens auf die zu messende Temperatur erhitzt, und die Ablesung ergibt einen zu niedrigen Wert.

Ist  $t$  die wirkliche Temperatur, bei der sich die Kugel des Thermometers I (Abb. 109) befindet,  $t'$  die am Thermometer I unmittelbar abgelesene Temperatur,  $t_m$  die Ablesung des Hilfsthermometers II, dessen Kugel sich in der Mitte des herausragenden Fadens befindet,  $n$  die Länge des herausragenden Quecksilberfadens in Skalenteilen des Thermometers I, so ist

$$t = t' + \delta$$

$$\delta = \frac{n}{6300} (t' - t_m),$$

wenn das Thermometer aus Jenaer Glas XVI<sup>III</sup> oder aus Greiner und Friedrichsschem Resistenzglas besteht.

Die Kugel des Hilfsthermometers II muß vor unmittelbarer Bestrahlung geschützt werden.

**164.** Die Quecksilberthermometer für höhere Wärmegrade müssen unter scharfer Kontrolle gehalten werden, wenn man sich nicht der Gefahr aussetzen will, unzuverlässige Angaben zu erhalten. Man verfährt zweckmäßig folgendermaßen: Man beschafft sich zwei Normalthermometer, die man von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt als Gebrauchsnormale eichen läßt. Gegen diese vergleicht man die im Betrieb befindlichen Thermometer in regelmäßigen Zeiträumen in Ölbädern. Man achte hierbei möglichst darauf, daß die Thermometer mit dem ganzen Faden eintauchen, also  $\delta = 0$  wird. Die Normalthermometer sind nur so lange verwendbar, als sie beide gleiche Temperaturangaben liefern. Sobald dies nicht mehr der Fall ist, sind sie zu beseitigen und durch neue zu ersetzen. Aber auch wenn sie noch gleiche Angaben liefern, ersetzt man sie durch neue, wenn alte Gebrauchsthermometer unbrauchbar geworden sind und verwendet die früheren Normalthermometer von da ab als Gebrauchsthermometer im Betrieb. Die neuen Normalthermometer sind jedesmal in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt zu eichen. Diese Eichung ist natürlich zwecklos, wenn nicht die Sicherheit besteht, daß die Gläser vorher genügend gealtert waren, so daß nicht die Normalthermometer beim Gebrauch in kurzer Frist infolge Nachaltens ihre Angaben ändern und so unbrauchbar werden. Man muß deshalb besonders darauf hinwirken, daß die Eichung in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt erst nach vorgenommener Alterung geschieht.

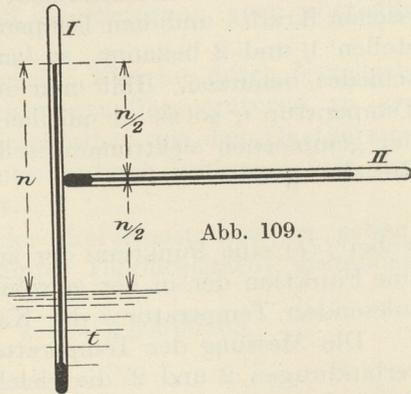


Abb. 109.

### b) Die Thermolemente.

**165.** Werden zwei Drähte A und B (Abb. 110) aus zwei verschiedenen Metallen oder Legierungen bei 1 miteinander verlötet und bei 2 erwärmt, so entsteht in den Drähten A und B eine thermoelektromotorische Kraft  $e$ . Werden die Enden 2 und 2' durch Kupferdrähte C miteinander verbunden, so wird durch diese elektromotorische Kraft in dem geschlossenen Kreis ein elektrischer Strom erzeugt, dessen Stärke mittels des Galvanometers G gemessen werden kann. Die Größe der elektromotorischen Kraft  $e$  ist abhängig von dem Unterschied in der Temperatur der beiden Verbindungen 1 einerseits und 2 und 2' andererseits.

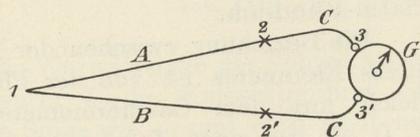


Abb. 110.

Man nennt eine solche Verbindung zweier Drähte aus verschiedenen Metallen ein Thermoelement, die beiden Drähte  $A$  und  $B$  die Schenkel, 1 die Warmlötstelle, die Enden 2 und 2' die freien Enden oder, wenn der Stromkreis geschlossen ist, die Kaltverbindungen (zuweilen auch Kaltlötstellen).

Ist für ein Thermoelement die Beziehung zwischen der thermoelektromotorischen Kraft  $e$  und dem Temperaturunterschied zwischen den beiden Verbindungsstellen 1 und 2 bekannt, so kann man es zur Messung dieses Temperaturunterschiedes benutzen. Hält man auch die Verbindung 2 und 2' auf einer bestimmten Temperatur  $\tau$ , so ist es möglich, die Temperatur  $t$  der Warmlötstelle auf Grund der gemessenen elektromotorischen Kraft  $e$  zu ermitteln. Man hat die allgemeine Beziehung

$$t = f(e) + \varphi(\tau),$$

wobei  $f(e)$  eine Funktion der zu messenden elektromotorischen Kraft, und  $\varphi(\tau)$  eine Funktion der in der gewöhnlichen Weise mittels Quecksilberthermometers abzulesenden Temperatur  $\tau$  der Kaltverbindungen 2 und 2' ist.

Die Messung der Temperatur  $t$  ist nur zuverlässig, wenn die beiden Kaltverbindungen 2 und 2' die gleiche Temperatur  $\tau$  haben. Ebenso müssen sich die Verbindungen der Kupferdrähte  $C$  mit den Klemmen 3 und 3' des Galvanometers bei gleicher Temperatur befinden. Ist dies nicht der Fall, so entstehen an den Stellen 2 bzw. 2' und 3 bzw. 3' infolge Berührung zweier verschiedener Metalle neue thermoelektromotorische Kräfte, die die Messung von  $e$  beeinträchtigen.

Man kann die freien Enden der Schenkel 2 und 2' unmittelbar mit den Klemmen des Galvanometers  $G$  ohne Zuhilfenahme des Kupferdrahtes  $C$  verbinden. Vielfach ist es aber zweckmäßig, den Kupferdraht zwischenzuschalten. Man kann so das Galvanometer in größere Entfernung von der Wärmequelle bringen und damit die Bedingung, daß die Temperaturen der Klemmenverbindungen 3 und 3' gleich sind, mit größerer Sicherheit erfüllen. Außerdem sind die Angaben des Galvanometers nur für eine bestimmte Temperatur, die Eichtemperatur, richtig; je mehr die Temperatur infolge Wärmestrahlung von der Wärmequelle her von der Eichtemperatur abweicht, um so größer wird die Gefahr der Ungenauigkeit in der Galvanometerangabe.

**166.** Die Verwendung des Thermoelementes zur Temperaturmessung wird zurückgeführt auf Becquerel (1826) und Tait (1873). Die Temperaturmessung mittels dieses Hilfsmittels ist besonders ausgebildet worden durch Henri Le Chatelier, Barus, Roberts-Austen, Holborn, Wien, Day.

**167.** Zur Messung niederer Wärmegrade ( $-200$  bis  $+600$  C°) kann man Thermoelemente aus Kupfer-Konstantan<sup>1)</sup> oder aus Eisen-Konstantan verwenden, deren elektromotorische Kraft verhältnismäßig groß ist. Der Strom geht in diesen Elementen an der Warmlötstelle 1 vom Konstantan zum Kupfer bzw. Eisen.

Zur Messung von Wärmegraden zwischen  $+200$  und  $1500$  C° verwendet man in der Regel das Le Chateliersche Element, bestehend aus einem Platindraht und aus einem Draht einer Legierung von 90% Platin mit 10% Rhodium. In diesem geht der Strom an der Warmlötstelle 1 vom Platin zum Platin-Rhodium.

Die Beziehung zwischen der Temperatur  $t$  und der elektromotorischen Kraft  $e$  dieses Elementes ist von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt durch Vergleich mit dem Gasthermometer mit Stickstofffüllung (Holborn und Wien,  $L_2 I$ ) bis zu einer Temperatur von etwa  $1100$  C° ermittelt. Dadurch ist die Anzeige der Thermoelemente an die sogenannte Gasthermometerskala ange-

<sup>1)</sup> Legierung von 50% Kupfer mit 50% Nickel, oder 60% Kupfer mit 40% Nickel.

geschlossen. Die Beziehung läßt sich von 250 bis 1100 C° ausdrücken durch die Gleichung:

$$e = a + b(t - \tau) + c(t^2 - \tau^2) \dots \dots \dots (7)$$

wenn  $t$  die Temperatur der Warmlötstelle,  $\tau$  die der Kaltverbindung,  $a$ ,  $b$  und  $c$  Konstanten bedeuten. Es wird angenommen, daß die Gleichung auch oberhalb 1100 C° gültig ist.

Die Konstanten  $a$ ,  $b$  und  $c$  sind für jedes einzelne Element durch Vergleich mit einem Normalthermoelement bei drei verschiedenen Temperaturen zu ermitteln. Das Normalelement ist mittelbar oder unmittelbar mit dem Gasthermometer verglichen. Der Befund wird für jedes Element durch Prüfungsschein der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt bescheinigt.

Um einen Begriff von der Größenordnung der drei Konstanten zu geben, seien beispielsweise die folgenden, für ein bestimmtes Thermoelement geltenden angeführt:

$$a = -0,320; \quad b = +0,008239; \quad c = +0,00000165.$$

Diese in Gl. 7 eingesetzt geben  $e$  in Millivolt.

Die durch Gl. 7 angegebene Beziehung zeichnet man für  $\tau = 0$  in Form einer Schaulinie mit  $e$  als Abszisse und  $t$  als Ordinate auf. Zum Zweck der Messung irgendeiner Temperatur  $t$  hat man dafür zu sorgen, daß die Warmlötstelle 1 des Thermoelementes die Temperatur  $t$  annimmt; alsdann ermittelt man die elektromotorische Kraft  $e$  an den freien Enden 2 und 2' und entnimmt aus dem Schaubild die zu  $e$  gehörige Temperatur unmittelbar, wenn die Kaltverbindungen 2 und 2' auf 0° gehalten worden sind. Herrschte jedoch an den Kaltverbindungen die mittels Quecksilberthermometer gemessene Temperatur  $\tau$ , so ist zu der aus der Schaulinie entnommenen Temperatur  $t$  noch eine Berichtigung  $\delta$  zuzuzählen.

168. Die Berichtigung ergibt sich wie folgt. In Abb. 111 sei  $t = f(e)$  die Schaulinie, die die Temperatur  $t$  in Abhängigkeit von  $e$  für  $\tau = 0$  darstellt. Die Schaulinie muß durch den Koordinatenanfang gehen, weil für  $t = 0$  und  $\tau = 0$  die elektromotorische Kraft  $e$  auch gleich Null sein muß. Oberhalb 300 C° deckt sich die Schaulinie mit der der Gl. 7 entsprechenden; unterhalb 300 C° weicht sie davon ab, weil für diese niedrigen Temperaturen die Gl. 7 nicht gültig ist.

Nach Angaben von Holborn und Wien ( $L_2 I$ ) ergibt sich für  $\cotg \beta$  der Mittelwert von etwa 0,0055 für Temperaturen zwischen Null und etwa 100 C°. Für irgendeine Temperatur  $\tau$  innerhalb dieses Bereiches ist sonach

$$\Delta e = \tau \cotg \beta = 0,0055 \tau.$$

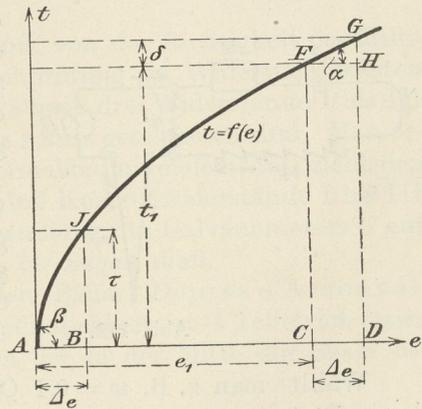


Abb. 111.

Dieselbe elektromotorische Kraft, aber mit entgegengesetztem Vorzeichen, ergibt sich auch, wenn die Kaltverbindungen die Temperatur  $\tau$ , die Warmlötstelle die Temperatur 0 haben. Besitzt die Warmlötstelle die Temperatur  $t$ , die Kaltverbindung die Temperatur  $\tau$ , so wirkt  $\Delta e$  im entgegengesetzten Sinne wie  $e$ , und man mißt nur den Unterschied  $e_1 = e - \Delta e$ . Um die richtige thermoelektromotorische Kraft zu erhalten, die der Temperatur  $t$  entspricht, ist also zu der abgelesenen elektromotorischen Kraft  $e_1$  noch der Betrag  $\Delta e = 0,0055 \tau$  zuzuzählen. Aus Abb. 111 ist dann ersichtlich, daß die Berichtigung  $\delta = GH$ , die zu der aus dem Schau-

bild entnommenen, zu  $e_1$  gehörigen Temperatur  $t_1$  zuzuzählen ist, gleich wird  $\delta = \Delta e \cdot \operatorname{tg} \alpha$ . Hierin ist

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{\frac{de}{dt}} = \frac{1}{b + 2ct_1},$$

wenn der Wert von  $de/dt$  aus Gl. 7 entnommen wird. Folglich erhält man:

$$\delta = \frac{0,0055 \tau}{b + 2ct_1}.$$

Setzt man die oben angegebenen Werte für die Konstanten  $b$  und  $c$  ein, so findet man für die Berichtigung folgende Tabelle:

$t_1$	$\delta$	$t_1$	$\delta$
300	0,60 $\tau$	1000	0,48 $\tau$
400	0,58	1100	0,46
500	0,56	1200	0,45
600	0,54	1300	0,44
700	0,52	1400	0,43
800	0,51	1500	0,42
900	0,49	1600	0,41

Im Mittel kann man  $\delta = 0,5 \tau$  setzen, wenn  $\tau$  nicht zu groß ist.

Für das Element Kupfer-Konstantan ist die Beziehung zwischen  $e$  und  $t$  durch eine gerade Linie darstellbar. Infolgedessen ist in Abb. 111

$$GH = BJ = \tau,$$

folglich ist die Berichtigung  $\delta$  in allen Fällen gleich  $\tau$ .

**169.** Messung der elektromotorischen Kraft  $e$  mittels Nullverfahren. Als Beispiel hierfür sei die Lindecksche Schaltung zur Messung von  $e$  beschrieben. (Lindeck und Rothe,  $L_2 2$ .) Sie ist schematisch in Abb. 112 dargestellt.  $A$  ist ein Akkumulator,  $W$  ein Regelwiderstand,  $T$  das Thermoelement,  $M$  ein Milliampereometer (Drehspulensinstrument nach Deprez d'Arsonval),  $G$  ein Galvanometer gleicher Bauart,  $w$  ein genau geeichter Abzweigwiderstand.

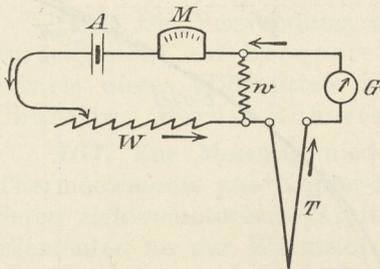


Abb. 112.

Wird der Widerstand  $W$  so geregelt, daß das Galvanometer  $G$  den Strom Null anzeigt, so ergibt sich, wenn  $i$  die am Milliampereometer abgelesene Stromstärke in Milliampere ist, die thermoelektromotorische Kraft  $e$  zu

$$e = wi.$$

Wählt man z. B.  $w = 0,1$  Ohm, so erhält man  $e$  ohne weiteres, wenn man  $i$  mit 10 teilt.

Die Genauigkeit der Messung hängt ab von der Genauigkeit und Unveränderlichkeit der Angaben des Strommessers  $M$ . Die Zeigerinstrumente nach Deprez d'Arsonval entsprechen den Anforderungen.

Die ganze Vorrichtung ist in Abb. 113 veranschaulicht. Die Bedeutung der Buchstaben ist dieselbe wie in Abb. 112. Der Regelwiderstand  $W$  besteht aus drei Kurbelwiderständen von 100, 10 und 1 Ohm und einem an dem Umfang der Deckplatte ausgespannten Draht  $d$  von etwa 1,5 Ohm. Der in den Stromkreis eingeschaltete Teil dieses Drahtes kann durch eine über die drei kleineren

Kurbeln übergreifende größere Kurbel verändert werden. Anstatt des in Abb. 112 gezeichneten einen Abzweigwiderstandes  $w$  von 0,1 Ohm sind in dem Widerstandskasten  $N$  in Abb. 113 mehrere Abzweigwiderstände vorhanden, und zwar zwischen der Klemme  $+$  und Klemme 1 0,05 Ohm; ferner zwischen 1 und 2 ein Widerstand von 0,05 Ohm, zwischen 2 und 3, 3 und 4, 4 und 5 je ein Widerstand von 0,1 Ohm. Sämtliche Widerstände bestehen aus Manganin. Die Einschaltung eines der Widerstände  $w$  erfolgt mittels einer Lasche  $L$ , die den in der Mitte des Deckels von  $N$  befindlichen Kontaktknopf  $m$  mit jeder der Klemmen 1 bis 8 zu verbinden erlaubt. Indem man die vom  $+$ -Pol des Thermoelements  $T$  kommende Leitung entweder mit der Klemme  $+$  oder mit der Klemme 1 verbindet, lassen sich folgende Abzweigwiderstände  $w$  herstellen: 0,05, 0,1, 0,15, 0,2, 0,25, 0,3, 0,35, 0,4 Ohm. Das Milliamperemeter  $M$  reicht bis 150 Milliampere,

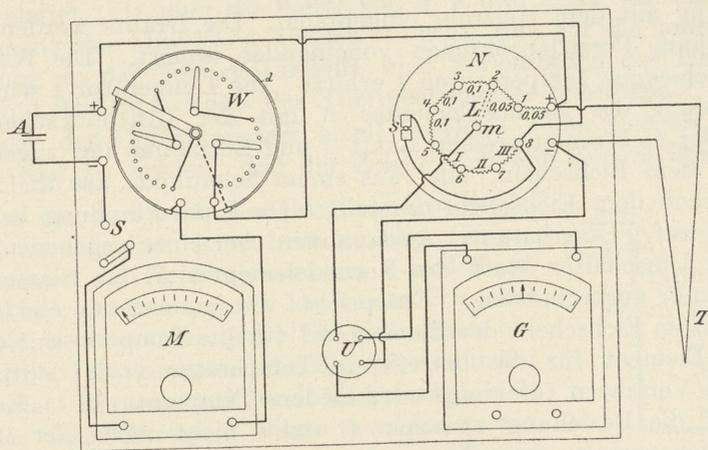


Abb. 113.

man kann sonach mittels der Schaltung Spannungen bis  $150 \times 0,4 = 60$  Millivolt messen.

Da die Genauigkeit der Messung in erster Linie von der Richtigkeit des Milliampereometers  $M$  abhängt, so sind zu seiner Nachprüfung im Widerstandskasten  $N$  zwischen den Klemmen 5 und 6, 6 und 7, 7 und 8 noch drei Widerstände I bis III vorgesehen, die für gewöhnlich mittels des Stöpsels  $s$  kurz geschlossen sind. Man ersetzt  $T$  durch ein galvanisches Normalelement (Normalkadmiumelement), zieht den Stöpsel  $s$  und schaltet mit der Lasche  $L$  einen der Kontrollwiderstände I bis III ein. Sie sind so bemessen, daß nach erfolgter Einstellung des Galvanometers  $G$  auf Null das Milliamperemeter  $M$  auf 150, 100 bzw. 50 zeigen muß.

Das Galvanometer  $G$  ist ein Zeigergalvanometer, Bauart Deprez d'Arsonval, mit einem Widerstand von 127,2 Ohm. Die Empfindlichkeit ist 1 Teilstrich (etwa 1,5 mm) = 0,1 Millivolt. Das Meßbereich ist von der in der Mitte der Skala befindlichen Nullmarke aus  $\pm 5$  Millivolt.

Man stellt die Lindecksche Schaltung am besten entfernt von den Räumen auf, in denen sich die Öfen, deren Temperaturen zu messen sind, befinden. Damit vermeidet man etwaige Beeinträchtigung der Messung durch Erwärmung der Teile der Schaltung. Man braucht lange Zuleitungen nicht zu scheuen, da ja der Widerstand der Zuleitungsdrähte vom Thermoelement bis zur Schaltung bei der Messung nach dem Nullverfahren nicht in Betracht kommt.

170. Im Kgl. Materialprüfungsamt wird die Lindecksche Schaltung nicht zur eigentlichen Temperaturmessung, sondern nur zur zeitweiligen Nachprüfung der Thermolemente gebraucht. Ein soeben von der Physikalisch-Technischen

Reichsanstalt geeichtes Thermoelement wird als Vergleichsnormale  $N$  benutzt und gelangt zunächst nicht in den Betrieb. Die übrigen in Gebrauch befindlichen Elemente werden von Zeit zu Zeit mittels der Lindeckschen Schaltung mit der Vergleichsnormale  $N$  in folgender Weise verglichen.  $N$  und das zu prüfende Element  $T$  werden an den Warmlötstellen mit Platindraht fest zusammengebunden und in einen elektrisch geheizten Ofen (189) nach Art der Abb. 114

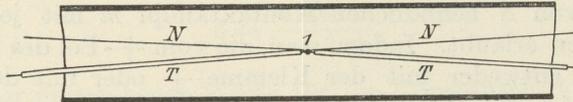


Abb. 114.

ohne Berührung mit dem Heizrohr eingebracht. Die Drähte werden durch übergeschobene dünne Porzellanröhrchen voneinander isoliert. Die Warmlötstelle 1 wird auf verschiedene Temperaturen  $t$  erhitzt. Die Temperatur  $t$  wird festgestellt durch Verbindung des Normalelementes  $N$  mit der Lindeckschen Schaltung, Ermittlung der elektromotorischen Kraft  $e$  und Entnahme der zugehörigen Temperatur  $t$  aus dem Eichschein, oder aus einem Schaubild, das die Abhängigkeit von  $t$  und  $e$  nach dem Eichschein darstellt. Die Kaltverbindung beider Thermo-elemente wird auf  $0\text{ C}^\circ$  erhalten. Alsdann wird bei einer gegebenen Temperatur  $t$  durch einen Umschalter statt des Normalelementes  $N$  das Element  $T$  an die Lindeckschaltung angeschlossen. Entspricht die gemessene elektromotorische Kraft noch der im Eichschein des Elementes  $T$  für die Temperatur  $t$  angegebenen, so zeigt das Element für die betreffende Temperatur noch richtig an. Man wiederholt das Verfahren für einige verschiedene Temperaturen  $t$ . Entspricht für das Element  $T$  die Beziehung zwischen  $t$  und  $e$  nicht mehr der im Prüfungsschein der Reichsanstalt angegebenen, so muß diese Beziehung mit Hilfe der Vergleichsnormale  $N$  bei mindestens drei verschiedenen Temperaturen neu festgestellt werden. Mit Hilfe der drei Beobachtungen berechnet man die Konstanten  $a$ ,  $b$  und  $c$  und erhält so die Beziehung zwischen  $e$  und  $t$  für das ganze Meßbereich des Elementes.

Wenn sich auch die Thermolemente beim sachgemäßen Gebrauch nur verhältnismäßig wenig ändern, so ist es doch bei Arbeiten im metallurgischen Laboratorium nicht immer zu vermeiden, daß man die Elemente auch schädigenden Einflüssen aussetzt. Nachprüfung des Elementes auf seine Temperaturangaben ist dann natürlich vonnöten.

Ist eines der im Betrieb befindlichen Elemente durch ein neues zu ersetzen (wegen zu großer Verkürzung der Schenkel infolge wiederholten Neulötens), so verwendet man als Ersatz das bis dahin als Vergleichsnormale gebrauchte Thermo-element  $N$  und verwendet das neubeschaffte, von der Reichsanstalt geeichte Element von nun an als Vergleichsnormale.

**171.** Messung des Spannungsunterschiedes an den Klemmen eines Galvanometers. Dieser Weg ist weniger genau als der vorher beschriebene; dafür ist er aber wesentlich bequemer und wird deshalb in der Regel begangen. Die Anordnung erfolgt nach Abb. 110. Es ist zu bemerken, daß das Galvanometer  $G$  nicht die elektromotorische Kraft  $e$  des Thermoelementes, sondern den Spannungsunterschied  $e'$  an den Klemmen 3 und 3' mißt. Dieser Spannungsunterschied  $e'$  hängt aber von dem Widerstand  $W$  des Galvanometers und von dem Widerstand im Stromkreis  $w$  ab. Letzterer setzt sich zusammen aus dem Widerstand des Thermoelementes selbst, der sich mit der Temperatur verändert, und dem Widerstand der Zwischenleitung zwischen 2 und 3, sowie 2' und 3'. Um

den Einfluß dieses wechselnden Widerstandes  $w$  möglichst zu verringern, wird der Widerstand  $W$  des Galvanometers groß gewählt. Er beträgt 360, bei neueren Instrumenten sogar 415 Ohm.

Zu beachten ist, daß das Galvanometer nur für eine bestimmte Temperatur der umgebenden Luft geeicht ist und bei anderen Temperaturen abweichende Ergebnisse liefert. Man muß daher dafür Sorge tragen, daß das Galvanometer in gehöriger Entfernung von der Wärmequelle aufgestellt wird.

Man verwendet Zeiger galvanometer mit Drehspule nach Deprez d'Arsonval. Die Instrumente der Firma Siemens & Halske haben z. B. eine Empfindlichkeit von 1 Teilstrich (etwa 0,8 mm) = 0,1 Millivolt. Die Skala hat Teilung in Millivolt und gleichzeitig in  $C^{\circ}$ . Die Teilung in  $C^{\circ}$  wird auf Grund der Gl. 7 für  $\tau = 0$  und für Durchschnittswerte der Konstanten  $a$ ,  $b$  und  $c$  aus der Teilung in Millivolt abgeleitet. Da aber die Werte von  $a$ ,  $b$  und  $c$  für verschiedene Thermo-elemente voneinander abweichen können, so muß man für die unmittelbare Temperaturablesung an der Temperaturskala eine Berichtigung auf Grund der Millivoltteilung und des Eichscheins des Thermo-elementes anbringen.

Der Zeiger des Galvanometers spielt oberhalb eines Spiegels. Bei der Ablesung ist darauf zu achten, daß der Zeiger sich mit seinem Spiegelbild deckt.

172. Um die durch die Berichtigung  $\delta$  bedingte Unsicherheit zu umgehen, ist es zweckmäßig, für genauere Messungen die Kaltverbindungen 2 und 2' auf der Temperatur  $\tau = 0^{\circ}$  zu halten. Die beiden Schenkel des Thermo-elementes werden jeder für sich durch ein Glasrohr  $r$  (Abb. 115) gezogen. Die Kaltverbindungen (Klemmen oder Lötungen) 2 und 2' befinden sich innerhalb der Glasröhrchen. Diese tauchen in ein Gefäß, das gefüllt ist mit einem Gemisch von Wasser und feinerstoßenem Eis, dessen Temperatur also  $0 C^{\circ}$  beträgt.

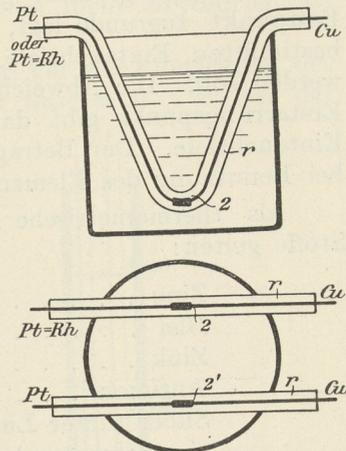


Abb. 115.

Die Warmlötstellen 1 zwischen Platin und Platin-Rhodium werden leicht während der Versuche zerstört. Meist werden die Metalle in der Nähe der Warmlötstelle bei dauerndem Gebrauch in hohen Temperaturen brüchig infolge Überhitzung (316, 317), teils auch infolge der Einwirkung von reduzierenden Gasen oder Metalldämpfen. Man beseitigt dann das brüchige Ende und stellt eine neue Lötung in der Leuchtgas-Sauerstoffflamme her.

173. Man denke sich ein Thermo-element kurz geschlossen wie in Abb. 116. Wie früher sei 1 die Warmlötstelle mit der Temperatur  $\tau$ . In dem Element entsteht elektromotorische Kraft wegen der Berührung zweier verschiedener Metalle bei 1 und 2. Man nennt die so entstehende elektromotorische Kraft die Peltierwirkung. Sie ist abhängig von dem Temperaturunterschied bei 1 und 2.

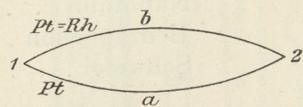


Abb. 116.

Ferner entstehen aber noch elektromotorische Kräfte, die über jeden der beiden Drähte  $a$  und  $b$  verteilt sind, wegen der verschiedenen Temperatur an verschiedenen Stellen je eines dieser Drähte. Die aus dieser Quelle entstammende elektromotorische Kraft nennt man die Thomsonwirkung.

Die in dem Stromkreis zu beobachtende elektromotorische Kraft ist sonach die algebraische Summe der Unterschiede in der Peltierwirkung bei 1 und 2 und der Unterschiede in der Thomsonwirkung in den Drähten  $a$  und  $b$ .

Die Thomsonwirkung hängt nun wesentlich ab von den Temperaturverschiedenheiten innerhalb der Drähte  $a$  und  $b$ , und es muß sonach auf diese Wirkung das Temperaturgefälle von den Lötstellen 1 nach 2 Einfluß ausüben. Die Wirkung muß sich mit einem anderen Betrag geltend machen, wenn einmal nur ein kleiner Teil des Thermoelementes in unmittelbarer Umgebung der Lötstelle 1 auf die zu messende Temperatur  $t$  erhitzt ist, der übrige Teil des Elementes aber durch Berührung mit der Atmosphäre rasch abgekühlt wird, und wenn ein anderes Mal ein größerer Teil des Elementes auf die Temperatur  $t$  erhitzt ist und der Temperaturabfall von 1 nach 2 langsamer erfolgt. Man sagt im ersten Falle, daß die Eintauchtiefe des Elementes klein ist. Die elektromotorische Kraft hängt somit bis zu einem gewissen Grade von der Eintauchtiefe ab.

Die Eichungen der Elemente in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt werden mit verhältnismäßig großen Eintauchtiefen (über 20 cm) durchgeführt. Verwendet man die Elemente mit geringeren Eintauchtiefen zur Temperaturmessung, was sich praktisch gar nicht immer vermeiden läßt, so kann man Abweichungen zwischen den Angaben des Elementes und denen des Eichscheins erhalten. In diesem Falle empfiehlt es sich Berichtigungen anzubringen, die man auf folgende Weise erhält: Man bestimmt die Erstarrungstemperatur von Metallen, deren Erstarrungspunkt genau bekannt ist und den man als thermometrischen Festpunkt zugrunde legt, mittels des Thermoelementes unter Anwendung einer bestimmten Eintauchtiefe, die später für den eigentlichen Versuch verwendet werden soll. Die Abweichung des gemessenen Erstarrungspunktes von dem Soll-Erstarrungspunkt gibt dann für die betr. Temperatur die Berichtigung für die Eintauchtiefe. Der Betrag dieser Berichtigung ist häufig zu ermitteln, da er sich bei Benutzung des Elementes leicht ändert.

Als thermometrische Festpunkte können die Erstarrungspunkte folgender Stoffe gelten:

Zinn . . . . .	232 C°	(Holborn & Henning, $L_2 43$ )
Blei . . . . .	327 C°	(Holborn & Day, $L_2 3$ )
Zink . . . . .	419 C°	„ „ „
Antimon . . . . .	631 C°	„ „ „
Silber (unter Luftabschluß geschmolzen) . . . . .	961,5 C°	„ „ „
Kupfer + 3,4% Kupfer- oxydul (eutektische Legierung) . . . . .	1065 C°	„ „ „ (E. Heyn, $L_2 4$ ).

Ferner sind auch noch verwendbar die Siedepunkte von

Naphtalin . . . . .	218,0 C°	} Holborn & Henning, $L_2 43$ .
Benzophenon . . . . .	305,9 „	
Schwefel . . . . .	444,5 „	

174. Als Hauptvorteil des Thermoelementes hat die geringe Masse der Warmlötstelle zu gelten, die es gestattet, an räumlich sehr begrenzten Stellen noch Temperaturmessungen vorzunehmen. Die Lötstelle nimmt wegen der kleinen Masse auch die Temperatur sehr schnell an, so daß veränderliche Temperaturen gut meßbar sind. Das Thermoelement eignet sich deswegen für die Aufnahme von  $z, t$ -Linien besonders. Es ist keine Frage, daß die Lehre von den Metallen und Legierungen weit hinter dem jetzigen Stand zurückgeblieben wäre, wenn ihr nicht das Thermoelement als Hilfsmittel zur Verfügung gestellt worden wäre.

### c) Das Platinwiderstandspyrometer.

**175.** Der elektrische Leitwiderstand von Metallen ist eine Funktion der Temperatur. Kennt man die Beziehung zwischen Widerstand und Temperatur, so kann man aus dem gemessenen Widerstand auf die Temperatur schließen, vorausgesetzt, daß der metallische Leiter an allen Stellen die zu messende Temperatur besitzt.

Das Widerstandspyrometer ist zuerst von W. Siemens vorgeschlagen und benutzt worden (*L<sub>2</sub> 5*). Es wurde besonders ausgebildet durch Callendar (*L<sub>2</sub> 6*), Griffiths, Heycock und Neville, Holborn und Wien, Chappuis und Harker, Waidner und Burgess.

Das Pyrometer ist brauchbar für Temperaturen bis herauf zu etwa 1100 C°. Für höhere Wärmegrade findet sich kein Isoliermittel mehr, das den Widerstandsdraht, der zu einer kleinen Spirale aufgewickelt ist, genügend sicher hält, so daß die Spiralwindungen sich nicht berühren, aber auf der anderen Seite durch eigene Leitfähigkeit keine Nebenschlüsse hervorruft.

Als Widerstandsdraht wird Platin verwendet, weil es nicht oxydierbar ist und bis zu hohen Temperaturen erhitzt werden kann.

Eine Spirale aus dünnem Platindraht wird (sorgfältig vor der Einwirkung der Feuergase geschützt) der zu messenden Temperatur *t* ausgesetzt. *w<sub>0</sub>* sei der Widerstand der Spirale bei 0 C°, *w<sub>100</sub>* bei 100 C°, *w* bei einer bestimmten Temperatur *p<sub>t</sub>*. Setzt man proportionales Anwachsen des Widerstandes mit der Temperatur voraus, so würde man erhalten (Abb. 117).

$$\frac{p_t}{w - w_0} = \frac{100}{w_{100} - w_0},$$

$$p_t = 100 \cdot \frac{w - w_0}{w_{100} - w_0} \dots \dots \dots (8)$$

Die so berechnete Temperatur *p<sub>t</sub>* ist von Callendar als die Platintemperatur bezeichnet worden. Da die Voraussetzung des proportionalen Anstiegs des Widerstandes des Platins mit der Temperatursteigerung nicht zutrifft, so unterscheidet sich die gefundene Platintemperatur *p<sub>t</sub>* von der wirklichen, der Skala des Gas-thermometers entsprechenden Temperatur *t* um einen bestimmten Betrag, der sich aus der Gleichung

$$t - p_t = \delta \left( \frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100} \dots \dots \dots (9)$$

ergibt. Für eine bestimmte Sorte Platindraht ist der Wert  $\delta$  eine unveränderliche Größe. Sie beträgt für reines Platin etwa 1,5. Für unreines Platin ist sie höher. Aus Gl. 9 kann man, wenn  $\delta$  und *p<sub>t</sub>* bekannt sind, die Temperatur *t* berechnen.

**176.** Ein Platinwiderstandspyrometer hat beispielsweise die in Abb. 118 angegebene Gestalt. Auf einem Glimmerröhmchen *g* ist die Platinspirale *w* aufgewickelt, so daß Berührung der einzelnen Windungen nicht stattfinden kann. *S* ist ein Schutzrohr aus Porzellan,

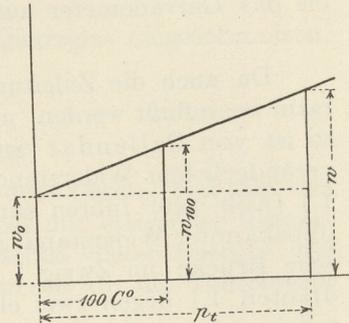


Abb. 117.

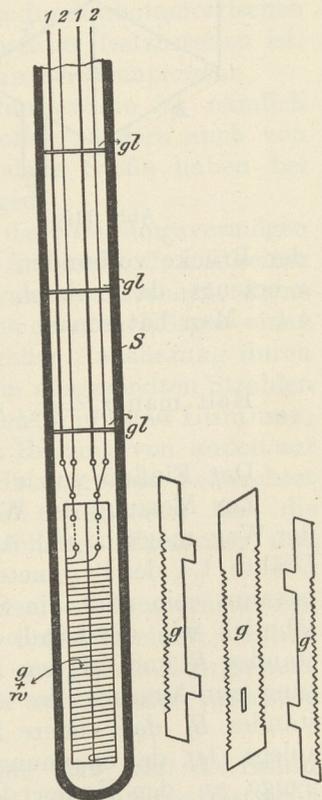


Abb. 118.

um die Platinspirale vor den Feuergasen zu schützen, *gl* sind Glimmerplättchen, die die Drähte 1 und 2 vor gegenseitiger Berührung bewahren. Die Messung des Widerstandes *w* der Spirale kann mittels der Wheatstoneschen Brücke erfolgen. *A* (Abb. 119) ist hierbei eine Stromquelle, *r*<sub>1</sub> und *r*<sub>2</sub> sind genau bekannte, möglichst gleiche Widerstände, *R* ein Regelwiderstand, *w* die Platinspirale des Pyrometers, *G* ein Zeigergalvanometer. Der Widerstand *R* wird so lange verändert, bis das Galvanometer auf Null zeigt; alsdann ergibt sich

$$w = R r_2 / r_1.$$

Da auch die Zuleitungsdrähte zur Platinwiderstandsspirale durch die Temperatur beeinflusst werden, und zwar in einer nicht in Rechnung zu ziehenden Weise, so ist von Callendar eine Einrichtung getroffen worden, um den Einfluß dieses veränderlichen Widerstandes auszuschalten. Verhältnismäßig dicke Platindrähte 1,1 (Abb. 120) führen zur Spirale *w*. Durch Erwärmung dieser Drähte wird ein unbekannter Widerstand *x* erzeugt. Der Widerstand *w* + *x* wird in die Wheatstone'sche Brücke im Zweig I (Abb. 119) eingeschaltet. Dicht neben den Zuleitungsdrähten 1,1 liegen zwei ebenso dicke und ebenso lange Platindrähte 2,2, die unten miteinander verbunden sind. Sie werden an ihren freien Enden mit dem Teil *R*

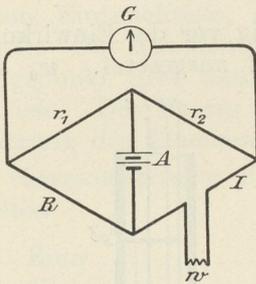


Abb. 119.

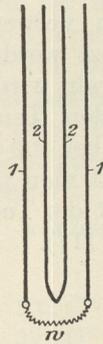


Abb. 120.

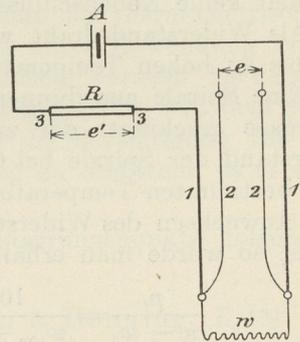


Abb. 121.

der Brücke verbunden. In diesen beiden Drähten wird ebenfalls der Widerstand *x* erzeugt, da in ihnen dieselbe Temperaturverteilung herrscht wie in den Drähten 1,1. Man hat sonach:

$$\frac{w + x}{R + x} = \frac{r_2}{r_1}.$$

Hält man *r*<sub>1</sub> = *r*<sub>2</sub>, so wird *w* + *x* = *R* + *x*,  
 $w = R.$

Der Einfluß von *x* ist also beseitigt.

Zur Messung des Widerstandes *w*, unbeeinflusst von *x*, ist auch noch folgender Weg möglich, vgl. Abb. 121 und 118. Durch die Stromquelle *A* wird durch die Drähte 1,1 des Pyrometers, den Widerstand *w* und den Widerstand *R*, der genau bekannt sein muß, ein Strom geschickt. Man mißt nun mit einer Nullschaltung (ähnlich wie die Lindecksche) den Spannungsabfall an den Enden des Widerstandes *R* und an den Enden des Meßwiderstandes *w*, indem man die Vorrichtung zur Messung des Spannungsgefälles einmal an die Enden 3,3 des Widerstandes *R*, das andere Mal an die dünnen Drähte 2,2 (im Nebenschluß zu *w*) anlegt. Ist das Spannungsgefälle an den Enden des Widerstandes *w* gleich *e*, dasjenige an den Enden des Widerstandes *R* gleich *e'*, und *i* die Stromstärke im Kreise, so erhält man

$$e = i w, \quad e' = i R,$$

folglich

$$w = R \frac{e}{e'}.$$

Zur Eichung des Pyrometers ist nur die Kenntnis der Widerstände bei zwei genau bekannten Temperaturen notwendig. Man wählt in der Regel die Temperaturen 0 und 100 C°, oder auch die Temperaturen 0 und den Siedepunkt des Schwefels. Mit Hilfe der so gemessenen Widerstände kann man die Konstanten der Gl. 8 bestimmen.

Das Pyrometer ist zur Messung in kleinen Räumen ungeeignet, da es selbst einen verhältnismäßig großen Raum einnimmt.

Die Firma Heraeus liefert Widerstandspyrometer in Quarzglas eingeschmolzen, die bis zu 900 C° verwendbar sind.

#### d) Optische Temperaturmessung.

177. Die optische Temperaturmessung beruht auf dem Gesetz, daß die von einem Körper ausgesandte Strahlungsenergie (Lichtstärke) mit steigender Temperatur zunimmt. Kennt man den Zusammenhang zwischen dieser Energie und der Temperatur, so kann man durch Messung der ersteren auf die Temperatur schließen.

Der Anstieg der Lichtstärke mit dem Anstieg der Temperatur ist außerordentlich groß. Setzt man beispielsweise die von einem Stoff bei 1000 C° ausgestrahlte Lichtstärke für rotes Licht (Wellenlänge 0,656  $\mu$ ) gleich 1, so ist die Lichtstärke bei 1500 C° über 130 und bei 2000 C° über 2100.

Daraus erklärt sich auch die Möglichkeit, bereits mit dem bloßen Auge angenähert die Temperatur festzustellen, wenn auch nur vergleichsweise.

Verfeinern kann man dieses bloße Schätzungsverfahren durch photometrischen Vergleich der Strahlungsstärke des Körpers, dessen Temperatur festzustellen ist, mit der Strahlungsstärke eines Vergleichskörpers von bekannter Temperatur.

Hier liegt aber eine Schwierigkeit vor. Die Strahlungsstärke ist nämlich nicht nur abhängig von der Temperatur des erhitzten Stoffes, sondern auch von seiner Eigenart und Oberflächenbeschaffenheit. Verschiedene Stoffe haben bei gleicher Temperatur verschieden starkes Strahlungsvermögen.

Kirchhoff erkannte, daß nur für einen solchen Stoff das Strahlungsvermögen ausschließlich von der Temperatur abhängig und von der Art des Stoffes und seiner Oberfläche unabhängig ist, der bei Bestrahlung alle Strahlen absorbiert, keine zurückwirft oder hindurchläßt. Er nannte einen solchen idealen Körper einen „absolut schwarzen Körper“. Er wird mit sehr großer Annäherung durch einen Hohlraum mit so enger Öffnung dargestellt, daß die ausgesandten Strahlen im Innern vor ihrem Austritt hinreichend oft reflektiert werden (Wien und Lummer, *L<sub>2</sub> 9*). Bringt man einen solchen schwarzen Körper durch Heizung von außen auf gleichmäßige Temperatur (durch Bäder oder elektrische Heizung) und beobachtet die Strahlung durch die kleine Öffnung, so ergibt sich tatsächlich, daß die Stärke der Strahlung nur noch von der Temperatur abhängt (Lummer und Kurlbaum, *L<sub>2</sub> 10*).

Magnesia, Kohle und Platin sind Stoffe, die bei derselben Temperatur sehr verschiedene Strahlungsstärke besitzen, also verschieden hell erscheinen. Innerhalb eines „schwarzen Körpers“ erhitzt, strahlen sie alle die gleiche Energie aus, so daß alle Umrisse verschwinden und die Körper weder voneinander noch von den Wänden des schwarzen Körpers unterscheidbar sind.

178. Optische Pyrometer werden stets derart geeicht, daß man die Stärke der Strahlung eines schwarzen Körpers bei verschiedenen Temperaturen feststellt, die durch ein Thermoelement gemessen werden. Benutzt man ein so geeichtes Pyrometer zur Temperaturmessung, so gibt es immer die Temperatur an, die ein schwarzer Körper haben würde, der die gleiche Strahlungsstärke besitzt, wie der

gemessene Körper. Man sagt, es zeigt die „schwarze Temperatur“ des zu messenden Körpers an. Diese schwarze Temperatur liegt um so mehr unterhalb der wirklichen, je kleiner das Strahlungsvermögen des zu messenden Körpers ist. Man kann aber in vielen Fällen die Bedingungen, unter denen man die Strahlung des zu messenden Körpers feststellt, denen nähern, die dem schwarzen Körper entsprechen. Mißt man z. B. optisch die Temperatur eines Körpers im Innern eines Ofenraums, in dem freie Flamme nicht vorhanden ist, so kann der Ofenraum, wenn er durch eine verhältnismäßig kleine Öffnung angesichtet wird, angenähert als schwarzer Körper gelten; man mißt unter diesen Umständen die wirkliche Temperatur des Körpers, wenn er die gleiche Temperatur, wie der Ofenraum hat. Vielfach kann man die Bedingung des schwarzen Körpers dadurch erfüllen, daß man in den Raum, dessen Temperatur zu messen ist, ein am Boden geschlossenes Eisen- oder Porzellanrohr einbringt. Hat dieses die Raumtemperatur angenommen, so gibt die mit einem optischen Pyrometer gemessene Temperatur des Bodens des Rohres die wirkliche Temperatur. Es ist natürlich vorausgesetzt, daß die Masse des Rohres im Verhältnis zur Masse der Ofenteile, die Träger der zu messenden Temperatur sind, nicht zu groß ist, so daß es beim Einbringen die Temperatur merklich herabdrückt. Eisen und Kohle nähern sich dem schwarzen Körper so weit, daß ihre schwarze Temperatur gleich ihrer wirklichen gesetzt werden kann.

Am meisten entfernt sich von den Bedingungen eines schwarzen Körpers das polierte Platin. Bei einer Temperatur von  $1500\text{ C}^{\circ}$  entspricht seine Strahlungsstärke für rotes Licht der eines schwarzen Körpers von nur  $1375\text{ C}^{\circ}$ . Die schwarze Temperatur ist also in diesem Falle  $1375\text{ C}^{\circ}$ . Bei  $1100\text{ C}^{\circ}$  würde die schwarze Temperatur des blanken Platins etwa  $1010\text{ C}^{\circ}$  sein. Bei Eisen liegt der Fall wesentlich günstiger. Bei einer Temperatur von etwa  $1000\text{ C}^{\circ}$  würde das optische Pyrometer um  $30\text{ C}^{\circ}$  zu niedrig anzeigen, wenn das Eisen nicht innerhalb eines schwarzen Körpers gemessen wird.

Viel größer können die Fehler werden, wenn die Temperatur eines Körpers optisch gemessen wird, der Licht reflektiert, das von anderen Körpern, die höhere Temperatur haben als er selbst (z. B. Ofenwände, Flammgase), auf ihn fällt. Dann gibt das optische Pyrometer zu hohe Ablesungen. Man kann sich in solchen Fällen damit helfen, daß man ein Rohr bis auf den Körper, dessen Temperatur zu messen ist, heranschiebt. Dieses schaltet das Licht von der höher erhitzten Umgebung aus. Man stellt das Pyrometer auf den Kreis ein, den die Rohröffnung auf dem Körper einschließt.

Hat das Pyrometer nur zur vergleichweisen Feststellung der Temperatur zu dienen, handelt es sich beispielsweise nur darum, eine bestimmte Temperatur in einem bestimmten Ofen immer wieder zu treffen, so sind die genannten Vorsichtsmaßregeln nicht immer erforderlich.

**179.** Immerhin bietet die Anwendung der optischen Pyrometer für die Praxis in manchen Fällen Schwierigkeiten, die es erklärlich machen, daß diese bequem zu handhabenden und an und für sich genau arbeitenden Instrumente in praktischen Betrieben verhältnismäßig wenig Eingang finden. Glühende Metallblöcke überziehen sich beispielsweise mit einer schlecht wärmeleitenden dunklen Oxydkruste, die an der der Beobachtung zugänglichen Oberfläche bereits soweit abgekühlt ist, daß sie fast schwarz erscheint, während der darunter befindliche Block noch hellrot ist. Deutlich bemerkt man dies beim Schmieden solcher Blöcke. Beim Druck oder Schlag fällt die Kruste teilweise ab und läßt vorübergehend das helle Innere erscheinen. Man muß sich dann mit der Temperaturmessung beeilen, weil sich die Kruste rasch neu bildet. Auch die Messung der Temperatur von flüssigen Metallen in der Gießpfanne ist mit Schwierigkeiten verknüpft, während die Messung des flüssigen Metalls im Ofen bequem möglich ist. In der Pfanne

wird das Metall ebenfalls von einer kälteren Schlackenkruste bedeckt, die sich schnell nachbildet und so die Messung erschwert.

Die Feststellung von Gießtemperaturen in Gießereien würde z. B., wenn sie laufend und zuverlässig erfolgen könnte, einem großen Bedürfnis der Praxis entgegenkommen. Leider haben sich hierbei die Angaben des optischen Pyrometers, trotz ihrer an und für sich großen Genauigkeit, angesichts der obengenannten Übelstände unsicherer erwiesen, als die Schätzungen geübter Gießer, die nicht nur auf Grund der Strahlung, sondern auch auf Grund einer ganzen Reihe anderer Merkmale die jeweilig zweckmäßigste Gießtemperatur sehr sicher einschätzen.

180. Farbschätzung mit dem Auge. Mit steigender Temperatur geht die Farbe des von glühenden Körpern ausgestrahlten Lichts von schwarz, rot, gelb, nach weiß über. Die Angaben über die ungefähren, den einzelnen Temperaturen entsprechenden Farben weichen außerordentlich stark voneinander ab, wie das bei Beschreibung von Farben nicht anders zu erwarten ist. In der folgenden Tabelle sind die verschiedenen Angaben hierüber einander gegenübergestellt, und zwar die von Pouillet (*L<sub>2</sub> 11*), von M. White und Taylor (*L<sub>2</sub> 12*) und von H. M. Howe (*L<sub>2</sub> 13*).

C°	Pouillet	White und Taylor	Howe
500	→ 525 Beginnende Rotglut		→ 470 Niedrigste, im Dunkeln sichtbare Rotglut
600		→ 566 Dunkelrot	→ 550 } Dunkelrot
		→ 635 Dunkelkirschrot	→ 625 }
700	→ 700 Dunkelrot		→ 700 Kirschrot
		→ 746 Kirschrot	
800	→ 800 Beginnende Kirschrotglut		
		→ 843 Hellkirschrot, Hellrot	→ 850 Hellrot
900	→ 900 Kirschrot	→ 900 Orange	
		→ 941 Hellorange	→ 950 } Gelb
1000	→ 1000 Hellkirschrot, Hellrot	→ 1000 Gelb	→ 1000 }
		→ 1080 Hellgelb	→ 1050 Hellgelb
1100	→ 1100 Dunkelorange		→ 1150 Weiß
1200	→ 1200 Hellorange	→ 1205 Weiß	
1300	→ 1300 Weiß		
1400			
1500	→ 1500 } Blendend weiß		
1600	→ 1600 }		

Wenn die Temperaturschätzung aus der Farbe immer von derselben Person geschieht, die über genügend Übung verfügt, so ist es mit ihrer Hilfe möglich, eine bestimmte Temperatur für irgendeinen technischen Zweck ziemlich sicher wieder einzustellen. Wesentlich schwieriger und unsicherer ist das Schätzen verschiedener Temperaturen, und völlig unmöglich ist eine Anweisung an eine zweite Person, mittels einer genannten Farbe eine bestimmte Temperatur einzustellen, da die Begriffe über die verschiedenen Farbtöne sehr subjektiv sind und erfahrungsgemäß von jedem anders verstanden werden. Dafür ist ja die vorstehende Tabelle ein überzeugender Beweis.

Ein solches Verfahren ist nur zulässig, wenn es auf die sichere Einstellung der Temperatur nicht genau ankommt, also einige hundert Grade für den bestimmten Zweck nichts ausmachen. Anders ist es aber in Fällen, wo ein Unterschied von wenigen Graden wesentlich verschiedene Ergebnisse liefern kann. Ein kennzeichnendes Beispiel hierfür ist z. B. die sogenannte Abschreckbiegeprobe bei Eisenkohlenstoff-Legierungen.

Hierbei sollen Eisenstäbe nach dem Abschrecken von einer Temperatur *t* aus in Wasser bei der Biegung bestimmten Anforderungen entsprechen, von denen die Abnahme der Lieferung abhängt. Die Temperatur *t* ist in den Lieferungsvorschriften meist durch die Glühfarbe angegeben, z. B. als „Kirschrotglut“. Wie wir später sehen werden (II B, 19—76) kommt es nun bei Eisenkohlenstoff-Legierungen darauf an, ob die Abschreckhitze *t* oberhalb des Umwandlungspunktes *A<sub>r1</sub>* von etwa 700 C°, oder darunter liegt. Im ersteren Falle treten wesentliche Änderungen der Festigkeitseigenschaften des Metalls ein, im letzteren Falle sind diese Änderungen nur geringfügig. Demnach fallen die Ergebnisse der Abschreckbiegeprobe sehr verschieden aus, je nachdem ob die durch die Glühfarbe geschätzte Abschreckhitze einige Grade über oder einige Grade unter der obengenannten Grenztemperatur liegt. Dadurch entsteht Unsicherheit in der Abnahme.

**181. Photometrische Verfahren.** Bereits Becquerel (*L<sub>2</sub>* 14) bediente sich 1862 dieses Mittels. Er verglich das von dem glühenden Körper ausgestrahlte rote Licht mit dem roten Licht einer Normallampe. Rote Strahlen sind deswegen gewählt, weil der Vergleich verschiedenfarbiger Lichtquellen ohne weiteres nicht möglich ist, und ferner aus dem Grund, weil bei niedrigen Hitzegraden vorwiegend rote Strahlen ausgesandt werden und bei Benutzung des roten Lichts zum Vergleich die Messung auch bis zu niederen Wärmegraden möglich ist. Die Messung beruht darauf, daß der glühende Körper einen Teil, die Normallampe einen andern Teil des Gesichtsfeldes dicht daneben erleuchtet, und daß durch besondere Vorrichtungen die beiden Felder gleich hell gemacht werden.

Das letztere wird z. B. von H. Le Chatelier durch Verstellen der Öffnung einer Blende erreicht, die von der Strahlung des glühenden Körpers oder der Normallampe nur einen Teil in das Gesichtsfeld treten läßt. Je heller die Strahlung des Körpers, um so mehr muß davon abgeblendet werden, um die Helligkeit gleich der der Normallampe zu machen. Die zu messende Helligkeit ist sonach gleich einer dem Instrument zugehörigen Konstanten geteilt durch die Fläche der Eintrittsöffnung der Blende.

Bei dem Pyrometer von Wanner wird die Einstellung der Strahlung des glühenden Körpers auf gleiche Helligkeit mit der der Normallampe durch eine Polarisationsvorrichtung bewirkt, und schließlich beim Pyrometer von Holborn und Kurlbaum durch Änderung der Stromstärke einer elektrischen Normalglühlampe.

**182. Das Wiensche Gesetz.** Ist der erhitzte Körper absolut schwarz, so gilt für die Strahlungsenergie das Gesetz

$$E_{\lambda} = c_1 \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \dots \dots \dots (10)$$

worin *E<sub>λ</sub>* die Strahlungsenergie für Strahlen von der Wellenlänge *λ*, *c<sub>1</sub>* und *c<sub>2</sub>* Konstante und *T* die absolute Temperatur bedeuten.

Wählt man nur Licht einer Wellenlänge  $\lambda$  und vergleicht die Energie der Strahlung  $E_1$  und  $E_2$  eines und desselben schwarzen Körpers bei verschiedenen Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$ , so ergibt sich nach Gl. 10

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{e^{-\frac{c_2}{\lambda T_2}}}{e^{-\frac{c_2}{\lambda T_1}}}$$

oder

$$\ln \frac{E_2}{E_1} = \frac{c_2}{\lambda} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \dots \dots \dots (11)$$

Wählt man die Strahlungsstärke  $E_1$  bei einer bestimmten Temperatur  $T_1$  als Einheit des Vergleichmaßstabes, so kann man für alle anderen Temperaturen  $T$  das Verhältnis  $E/E_1$  ermitteln, oder umgekehrt aus dem gemessenen Verhältnis  $E/E_1$  die Temperatur  $T$  feststellen.

Das Verhältnis  $E/E_1$  ergibt sich aus dem Vergleich der Lichtstärke des glühenden Körpers für die Wellenlänge  $\lambda$  mit der Lichtstärke der Normlampe für gleiche Wellenlänge.

**183.** Das Wannersche Pyrometer (Phys. Zeitschr. 3, 112; 1902). Als Vergleich dient eine kleine 6-Volt-Glühlampe, die durch einen Akkumulator gespeist wird. Das Licht von dem glühenden Körper und das von der Glühlampe wird durch ein Prisma in das Spektrum zerlegt, von dem nur ein kleiner Teil im Rot zur Messung benutzt wird. Alsdann werden die Strahlen beider Lichtquellen in zwei aufeinander senkrechten Ebenen polarisiert. Dann kann die Lichtstärke jeder der beiden Strahlungen solange durch Drehen eines Nicols verändert werden, bis sie einander gleich sind. Der Drehwinkel des Nicols gibt dann ein Maß für  $E/E_1$ .

Die Bauart des Pyrometers ist in der Abb. 122 schematisch erläutert. Das Licht der Vergleichsglühlampe wird durch ein in der Abb. 122 nicht gezeichnetes

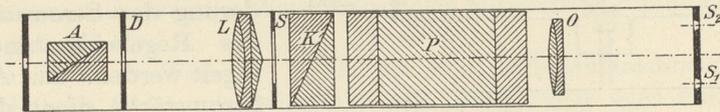


Abb. 122.

Prisma durch den Schlitz  $S_1$  in das Instrument geschickt; dasjenige des glühenden Körpers, dessen Temperatur zu messen ist, tritt durch den Schlitz  $S_2$  ein. Hinter dem Objektiv  $O$  treten die beiden Strahlenbündel durch das Prisma  $P$  mit gerader Durchsicht und werden darin in zwei Spektren zerlegt. Die beiden Spektren gelangen sodann in das doppeltbrechende Prisma  $K$ , durch das jeder Lichtstrahl in zwei aufeinander senkrecht stehenden Ebenen polarisiert wird. Der Schlitz  $S$  schaltet alles Licht bis auf einen kleinen Teil des Spektrums im Rot aus, so daß nur monochromatisches Licht von der Wellenlänge  $\lambda = 0,656 \mu$  übrigbleibt. Dieses geht durch das Doppelprisma und die Linse  $L$ , wodurch acht Spaltbilder erzeugt werden. Zwei derselben, das eine von dem glühenden Körper, das andere von der Vergleichslampe herrührend und in zwei senkrecht aufeinanderstehenden Ebenen polarisiert, berühren sich im Gesichtsfeld. Die übrigen Spaltbilder werden von der Blende  $D$  ausgeschaltet. Wird nun der Analysator  $A$  um die Achse des Instrumentes gedreht, so kann das eine der beiden Spaltbilder lichtstärker, das andere lichtschwächer gemacht werden. Der Drehwinkel  $\varphi$  des Analysators, bei dem beide Spaltbilder gleiche Helligkeit haben, wird abgelesen. Dann verhalten sich die beiden Helligkeiten  $E$  vom glühenden Körper und  $E_0$  von der Lampe wie

$$E/E_0 = \text{tg}^2 \varphi.$$

Da nach dem Wienschen Gesetz (Gl. 11)

$$\ln \frac{E}{E_0} = \frac{c_2}{\lambda} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right),$$

da ferner die Konstante  $c_2 = 14500$  und  $\lambda = 0,656 \mu$  ist, so läßt sich aus dem gemessenen Verhältnis  $E/E_0$  die Temperatur  $T$  berechnen, wenn die absolute Temperatur  $T_0$  der Vergleichslichtquelle durch Einstellen des Instrumentes auf einen schwarzen Körper bekannter Temperatur ermittelt ist.

Die Lichtstärke der Vergleichsglühlampe des Pyrometers wechselt mit der Stromstärke. Sie muß deswegen in häufigen Zwischenräumen auf Normallichtstärke eingestellt werden. Zu diesem Zwecke wird eine Amylazetatflamme von bestimmter Flammenhöhe benutzt, die ihr Licht auf eine kleine Mattscheibe vor dem Spalt  $S_2$  wirft. Der Analysator wird auf einen bestimmten, durch eine Marke angegebenen Winkel eingestellt, und der Strom der Glühlampe wird durch einen Widerstand so lange geändert, bis die Helligkeit der Amylazetatflamme und der Vergleichsglühlampe im Instrument gleich erscheinen. Die kleine Mattscheibe ist nicht mit Fingern anzufassen, da sie sonst mehr Licht durchläßt. Man stellt zweckmäßig immer dieselbe Stelle der Mattscheibe vor den Spalt.

Ein Nachteil des Instrumentes ist der große Lichtverlust durch die Polarisationsvorrichtungen, so daß es nur für Temperaturen von  $900 \text{ C}^\circ$  aufwärts verwendbar ist. Beim Härten von Stahl spielt aber gerade das darunterliegende Temperaturbereich eine wichtige Rolle.

**184.** Das Pyrometer von Holborn und Kurlbaum ( $L_2$  16), vgl. Abb. 123. Als Vergleichslichtquelle dient eine von den beiden Akkumulatoren  $A$  gespeiste

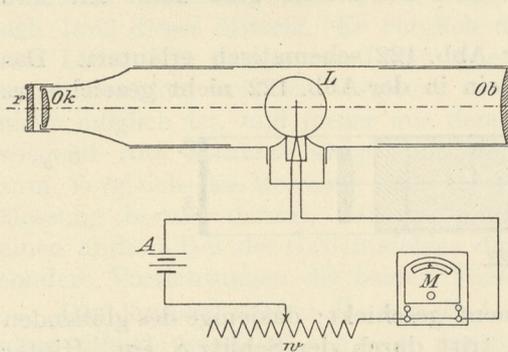


Abb. 123.

4-Volt-Glühlampe  $L$ , auf deren Glühfaden das Okular  $Ok$  scharf eingestellt ist. Die Lichtstärke der Lampe kann durch Veränderung der Stromstärke mittels des Regelwiderstandes  $w$  geregelt werden. Zur Ablesung der Stromstärke dient das Ampere-meter  $M$ . Die beiden übereinanderliegenden Bilder des Lampenfadens und des glühenden Körpers werden verglichen. Die Lichtstärke der Lampe  $L$  wird

mittels des Widerstandes  $w$  so lange geändert, bis der Faden der Lampe in dem Bilde des glühenden Körpers verschwindet, also beide gleiche Helligkeit zeigen. Die am Instrument  $M$  abgelesene Stromstärke dient dann zur Ermittlung der Temperatur  $t$  des glühenden Körpers. Für Temperaturen bis herunter zu  $800 \text{ C}^\circ$  benutzt man die Rotscheibe  $r$  vor dem Okular. Unter  $800 \text{ C}^\circ$  macht man die Messung ohne Rotscheibe, da dann der Glühfaden selbst rot ist. Man kann so Temperaturablesungen bis herunter zu  $600 \text{ C}^\circ$  ausführen. Übersteigt die zu messende Helligkeit die Temperatur des Glühfadens (etwa  $1500 \text{ C}^\circ$ ), so wird die Strahlung durch die doppelte Reflexion eines Prismensatzes  $p$  vor dem Objektiv  $Ob$  vermindert.

Jede Lampe wird durch Vergleich mit einem schwarzen Körper geeicht, dessen Temperatur mittels des Thermo-elementes gemessen wird. Die Beziehung zwischen der Stromstärke  $C$  der Lampe und der zu messenden Temperatur entspricht einer Gleichung

$$C = a + bt + ct^2.$$

Man braucht deswegen die Lampe nur für drei Punkte zu eichen. In einer Tabelle wird dann die Beziehung zwischen Stromstärke der Lampe und Temperatur festgelegt. Der Regelwiderstand  $w$  ist an dem Träger des Fernrohres des Instrumentes bequem angebracht. Man liest die Stromstärke am Amperemeter  $M$  ab und entnimmt der Tabelle die zugehörige Temperatur  $t$ .

Die Lampen müssen gut altern. Wenn man die Vorsicht gebraucht, die Lampe nie länger brennen zu lassen, als zur Einstellung nötig ist, so bleibt sie lange unverändert. Jedem Apparat sind drei Glühlampen mit Eichschein der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt beigegeben. Man nimmt nur eine Lampe in Gebrauch und benutzt eine von den beiden anderen zeitweise als Kontrolle.

**185. Férys Pyrometer ( $L_2 17$ ).** Das Licht des glühenden Körpers wird durch ein Objektiv auf die Warmlötstelle eines kleinen Kupfer-Konstantan-Thermoelementes geworfen, in dessen Stromkreis ein Galvanometer Deprez d'Arsonval eingeschaltet ist. Durch die Strahlung wird die Warmlötstelle erhitzt, und eine von der Energie der Strahlung abhängige Thermokraft wird in dem Thermoelement erzeugt. Die Öffnung des von dem glühenden Körper einfallenden Strahlenkegels muß ein für allemal unveränderlich erhalten werden.

### e) Selbstaufzeichnung der Temperatur.

**186.** Zur Selbstaufzeichnung eignen sich alle Pyrometer, bei denen nicht wie beim Wannerschenschen und Holborn-Kurlbaumschen Pyrometer eine subjektive Einstellung nötig ist, also das Quecksilberthermometer, das Thermoelement, das Widerstandspyrometer und das Férysche Pyrometer.

Beim Quecksilberthermometer kann z. B. das Bild des Quecksilbermeniskus und der dazugehörige Skalenteil laufend oder unterbrochen auf einen bewegten lichtempfindlichen Papierstreifen übertragen werden.

Bei den Instrumenten, die auf Galvanometer einwirken, läßt sich die Anzeige des Galvanometers auf zweierlei Weise selbsttätig aufzeichnen, nämlich mechanisch und photographisch.

Von dem ersteren Weg ist z. B. bei den Selbstaufzeichnern der Firma Siemens & Halske Gebrauch gemacht. Die Temperatur wird mittels Thermoelement und Zeigergalvanometer gemessen. Die Nadel  $z$  des letzteren (Abb. 124) wird durch einen Bügel  $b$  in bestimmten Zeiträumen vermittels eines Uhrwerks in der Pfeilrichtung 1 vorübergehend heruntergedrückt. Der Stift  $s$  drückt auf den Papierstreifen  $p_1$ , der durch dasselbe Uhrwerk in der Richtung des Pfeiles 2 mit bestimmter Geschwindigkeit bewegt wird. Unter dem Papierstreifen  $p_1$  liegt ein Farbband  $f$ ; bei jedem Druck des Bügels schreibt somit der Stift  $s$  einen Punkt auf das Papier  $p_1$ . Die Zeiten werden auf dem aus der Vorrichtung herausgenommenen Papierstreifen in der Richtung des Pfeiles 2, die Temperaturen längs der nach einem Kreisbogen gekrümmten Ordinaten gemessen.

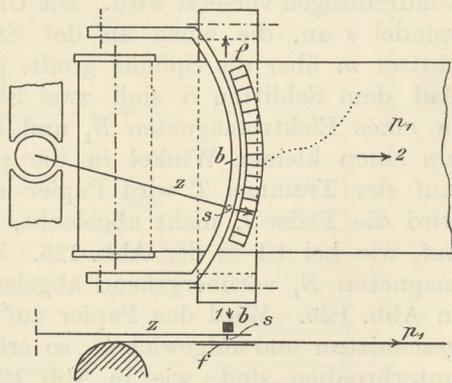


Abb. 124.

Das Instrument kann zur Überwachung des Betriebes, z. B. Messung der Temperatur des Gebläsewindes bei Winderhitzern, der Temperatur von Glühöfen usw. recht gute Dienste leisten.

Der zweite Weg der Selbstaufzeichnung vom Galvanometer aus mit Hilfe des lichtempfindlichen Papiers ist folgender. An Stelle des Zeigergalvanometers

wird ein Spiegelgalvanometer benutzt. Der Spiegel wirft das Bild eines erleuchteten schmalen Schlitzes durch einen zweiten Schlitz, der senkrecht zum ersten ist und in der Ausschlagebene des Galvanometers liegt, auf das lichtempfindliche Papier und zeichnet auf diesem einen kleinen quadratischen Fleck, falls das Papier in Ruhe ist, und eine Schaulinie, falls sich das Papier in einer Ebene senkrecht zur Ausschlageebene des Galvanometers bewegt. Die Schaulinie ist eine Gerade, wenn das Galvanometer keinen Ausschlag hat. Wenn das Galvanometer Ausschläge zeigt, so wird durch den Spiegel eine Schaulinie abgebildet, deren Koordinaten in der Bewegungsrichtung des Papiers die Zeiten, in der dazu senkrechten Richtung die Größe der Ausschläge und damit die Temperaturen angeben.

In praktischen Betrieben herrschen gewöhnlich starke Erschütterungen; es empfiehlt sich dann die mechanische Aufzeichnung. Die Spiegelgalvanometer sind gegen Erschütterungen meist zu empfindlich.

Zur Selbstaufzeichnung von  $z, t$ -Linien dagegen sind nur die Vorrichtungen mit optischer Übertragung durch Spiegelgalvanometer verwendbar. Wie wir später sehen werden, ist die Selbstaufzeichnung für die Aufnahme von  $z, t$ -Kurven nur eine Bequemlichkeit. Man erreicht mittels der später zu beschreibenden nicht selbsttätig wirkenden Vorrichtungen dieselbe Genauigkeit. Die Behauptung, daß bei Selbstaufzeichnung größere Genauigkeit erzielt werde, ist unbegründet.

### 3. Die Verfahren zur Aufnahme der $z, t$ , $\Delta z, t$ und $t, \Delta e$ -Linien.

187. Die Zeitmessung kann mit der gewöhnlichen Sekundenuhr geschehen. Damit aber der Beobachter bei der Aufnahme der  $z, t$ - und  $\Delta z, t$ -Linien seine Aufmerksamkeit den Vorgängen in der erstarrenden und abkühlenden Schmelze schenken kann, ist es zweckmäßig, zur Zeitmessung einen Zeitschreiber (Chronographen) heranzuziehen. Hierzu empfiehlt sich ein Apparat, wie er von Richard Frères, Paris und von der Firma Toepfer & Sohn, Potsdam, Mamonstraße, geliefert wird (vgl. Abb. 125 und 126). Er besteht aus einer Messingtrommel  $T$ , die durch ein Uhrwerk  $U$  mit Hilfe der Zahnräder  $Z$  in gleichmäßige Umdrehungen versetzt wird. Die Uhrwerkswelle treibt unmittelbar die Schraubenspindel  $s$  an, die einen an der Stange  $F$  geführten Schlitten  $S$ , der mit einer Mutter  $m$  über die Spindel greift, parallel zur Drehachse der Trommel  $T$  bewegt. Auf dem Schlitten  $S$  sind zwei Schreibfedern  $f_1$  und  $f_2$  angebracht. Vermittels je eines Elektromagneten  $E_1$  und  $E_2$  kann jede der Federn  $f$  bei Stromschluß um einen kleinen Winkel in die punktierte Lage (Abb. 125) abgelenkt werden. Auf der Trommel  $T$  wird Papier aufgespannt. Ist das Uhrwerk in Gang und wird die Feder  $f_1$  nicht abgelenkt, so zeichnet sie auf dem Papier eine Spirale auf, wie bei 1 1 in der Abb. 125. Wird dagegen die Feder  $f_1$  durch den Elektromagneten  $E_1$  vorübergehend abgelenkt, so beschreibt sie ein Zeichen, wie bei 2 in Abb. 125. Wird das Papier auf der Trommel parallel zur Trommelachse aufgeschnitten und aufgewickelt, so erhält man gerade Linien, die durch die Zeichen 2 unterbrochen sind, wie in Abb. 127. Die Trommel  $T$  hat einen Umfang von 300 mm und macht in 1 Minute 1 Umdrehung. Die Zeitdauer zwischen zwei durch Schließen des Stromes im Elektromagnet gegebenen Zeichen ist proportional dem Abstand  $r_1, r_2 \dots$  in Abb. 128. Zur Messung von  $r$  wird immer der Beginn  $\alpha$  des Zeitzeichens verwendet, da das Ende von der Dauer des Stromschlusses abhängt, die willkürlich ist. Da für  $r = 300$  mm die Zeit 1 Minute ist, so gibt  $r/300$ , wenn  $r$  in Millimetern gemessen wird, die Zeit in Minuten an, die zwischen den beiden Zeitzeichen verstrichen ist.