A XIII-a Conferinţă Naţională multidisciplinară – cu participare internaţională,
"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii româneşti",
SEBEŞ, 2013

EINIGE FRAGEN BEZÜGLICH DES ELEKTRISCHEN WIDERSTANDS VON THERMOELEMENTEN

Nicolae FÂNTÂNARU, Dan HODOR

UNELE PROBLEME PRIVIND REZISTENŢA ELECTRICĂ A TERMOCUPLURILOR

La măsurarea temperaturii cu termocupluri apare o variaţie nedorită a rezistenţei electrice a acestora în funcţie de lungimea de introducere în mediul de măsurare şi de temperatura medie a lor. În cadrul acestei comunicări se tratează determinarea prin măsurare şi prin calcul a rezistenţei electrice a termocuplurilor aflate în exploatare, cu prezentarea diagramelor aferente şi a unor exemple pentru termocuplul PtRh-Pt.

Bei Temperaturmessungen mit Thermoelementen tritt eine unerwünschte Änderung des elektrischen Widerstandes der Thermopaare ein, abhängig von der Länge ihres Einbaus und von ihrer mittlerer Temperatur. Innerhalb dieses Aufsatzes wird die Bestimmung durch Messen oder durch Rechnen des elektrischen Widerstands von in Betrieb befindlichen Thermoelementen, behandelt. Gleichzeitig wurden Diagramme entwickelt in diesem Sinn, mit konkreten Beispiele für ein PtRh-Pt Thermoelement.

Cuvinte cheie: termocupluri în exploatare, rezistenţa electrică
Schlüsselwörter: Thermoelementen in Betrieb, elektrische Widerstand

1. Während des Betriebes einer thermoelektrischer Temperaturmesseinrichtung ist es nicht nur erforderlich dass die einzelnen Messglieder eichmässig entsprechen, sondern es ist ebenso notwendig, dass bei ihrer Schaltung und Einstellung die betreffenden Betriebsbedingungen berücksichtigt werden. Hierdurch können Fehler

vermieden werden, die als Grössenordnung die zulässigen Genauigkeitsfehler der Einzelgeräte bei weitern übertreffen [1, 2, 6, 7, 10].

Eine dieser Bedingungen beim Messen mit Millivoltmetern und Thermoelementen ist das genaue Einhalten des Widerstandes im äusseren Stromkreis des Messgerätes. Unter dem Wider-stand im äusseren thermoelektrischen Stromkreis verstehen wir die Summe der Widerstände des Thermoelements, der Ausgleich und Zuleilung und der Vorwiderstand.

Man weiss, dass die Spannung an den Klemmen eines Milli-voltmeters durch folgende Gleichung ausgedrückt wird:

$$e = \frac{r_i}{r_i + \sum r_a} e_t \qquad \text{(mV)}$$

Darin bedeuten:

e - die Spannung an den Klemmen des Millivoltmeters (mV)

e_t - die thermoelektrische Spannung des Thermoelementes (mV)

r_i - der innere Widerstand des Millivoltmeters (ohm)

$\sum r_a$ - die Summe der Einzelwiderstände des äusseren Stromkreises (ohm).

Daraus geht hervor, dass je grösser der innere Widerstand des Millivoltmeters ist, um so kleiner der Einfluss der Schwankungen des Widerstands des Thermoelements und der Verbindungsleiter auf die Anzeigen des Millivolmeters ist, somit werden also diese Anzeigen genauer.

Es ist Vorschrift, den Wert des äusseren und inneren Widerstands auf dem Zifferblatt des Millivoltmeters anzugeben. Die fabrikmässige pyrometrischen Millivoltmeter haben einen inneren Widerstand von etwa 50 bis 500 ohm und einen äusseren Widerstand, der gewöhnlich 20 bis 25 ohm nicht überschreitet. Im allgemeinen liefern die Herstellerbetriebe Millivoltmeter mit einem äusseren Widerstand, der grösser ist als der für den äusseren Kreis vorgesehene. Dadurch ist es möglich, beim Aufstellen der Millivoltmeter diese in verschiedenen Entfernungen vom Thermoelement anzubringen, und zwar je nach Bedarf, wobei die Einstellung durch Reglierung des äusseren Kreises erfolgt [13, 15, 16, 17, 19, 20].

2. Die Bestimmung des Widerstands im äusseren Kreis umfasst die Bestimmung des elektrischen Widerstands des Thermoelements bei der herrschenden Temperatur.

Ein in Betrieb befindliches Thermoelement erhitzt sich ungleichmässig in seiner Länge, im allgemeinen herrscht die höchste Temperatur an der warmen Lötstelle und die niedrigste an der kalten Lötstelle.

Die Temperaturverteilung über die Länge des Thermo-elements hängt von dessen Aufbau ab sowie von dessen Schutzrohr und von der Art, wie die thermische Isolierung des Rohrs an der Durchführung durch die Ofenmauer oder durch die Leitung, in welche das Element eingebaut ist, ausgeführt ist. Eine genaue Bestimmung der Temperaturverteilung über die Länge des Thermoelements sowie die Bestimmung der mittleren Temperatur des Thermoelements sind unter normalen Betriebsbedingungen schwierige und ungewöhnliche Arbeiten. In der Praxis schätzt man gewöhnlich die Mitteltemperatur eines Thermoelements auf empirischem Wege in folgender Weise:

Wenn ein Thermoelement von der Länge L in die Messstelle in der Länge von $L \cdot 3/4$ eingeführt wird (zusammen mit der Ofenmauerdicke) und bei der Warm-Lötstelle einer ständigen Temperatur von t ausgesetzt ist, so kann man die mittlere Temperatur $\bar{t}$ (mit grosser Annäherung) aus folgender Formel schätzungsweise erhalten:

$$\bar{t} = \frac{t}{1{,}3 \ldots 1{,}9} \qquad (°C)$$

Die kleinen Werte der Nenner eignen sich für Thermo-elemente mit Thermoschenkel von grossem Querschnitt und mit Schutzrohren aus Metall; die grösseren Werte werden verwendet für Thermoelemente, die aus dünnem Draht gefertigt sind und Schutzrohre aus Porzellan oder feuerfester Keramik haben.

Der Wert des Widerstands eines in Betrieb befindlichen Thermoelements hat besondere Bedeutung bei Elementen mit dünnem Schenkel, deshalb im Falle der Thermoelemente PtRh-Pt.

Der elektrische Widerstand eines Thermoelements PtRh-Pt erhöht sich beträchtlich, wenn dieses auf die dauernde Betriebstemperatur erhitzt wird und kann zwei bis vier mal so gross werden wie der Widerstand des nicht erhitzten Thermoelements. Deshalb muss man bei der Bestimmung des Widerstands des Thermoelements als Bestandteil des äusseren Kreises der Wert in Betracht ziehen, den der Widerstand des Thermoelements bei der herrschenden Temperatur hat.

3. Wenn wir den Widerstand des Thermoelements bei 20 °C, r_{20}, kennen, so wird dessen Widerstand bei einer anderen Temperatur t, r_t, durch folgende klassische Formel ausgedrückt:

$$r_t = r_{20}[1 + \alpha(t - 20)] \qquad \text{(ohm)}$$

Wenn wir die mittlere Temperatur des Thermoelements ken-nen, können wir mit Hilfe der Diagrammen (Bild 1...4) den Wert des elektrischen Widerstands des Thermoelements bestimmen, wenn dessen Temperatur $\bar{t}$ ist.

Gewöhnlich misst man den Widerstand eines Thermo-elements nicht in warmen Zustand, weil die thermoelektrische Spannung als Parasit in die Messbrücke eintritt und das abzulesende Ergebnis verfälscht. Im Fall, dass man trotzdem den Widerstand eines in Betrieb befindlichen Thermoelements mit der Wheatstone-schen Brücke direkt misst, empfiehlt es sich, die folgende Formel [18] anzuwenden, indem man die Brücke einmal direkt und ein zweites Mal umgekehrt mit dem Element verbindet:

$$r_t = \frac{2r_d - r_u}{r_d + r_u} \qquad \text{(ohm)}$$

in dem r_d der Wert bei direkter Schaltung und r_u der Wert bei umgekehrter Schaltung ist. Wenn r_d sich von r_u nicht mehr als um 10% unterscheidet, kann man das arithmetische Mittel zwischen beiden als Messergebnis nehmen.

Für genauere Bestimmungen, der Widerstand des Thermoelements r_t bei seiner Arbeitstemperatur t kann aus der Gleichung:

$$r_t = r_1 + r_2 + n(t - 20)(r_1\alpha_1 + r_2\alpha_2) \quad \text{(ohm)}$$

errechnet werden. Hierhin bedeuten:

r_1; r_2 - die Widerstände der beiden Thermoschenkel bei 20 °C (ohm)
$n = L_e / L_g$ - das Verhältnis zwischen der Eintauch-und Gesamtlänge des Thermopaars (m/m)
α_1; α_2 - die Temperaturbeiwerte des elektrischen Widerstands der beiden Schenkel (°C $^{-1}$).

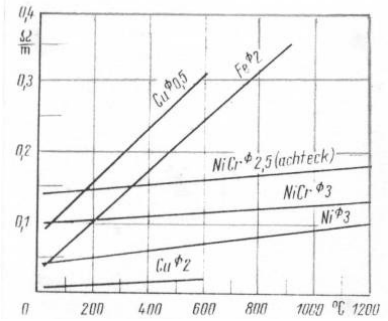

Bild 1

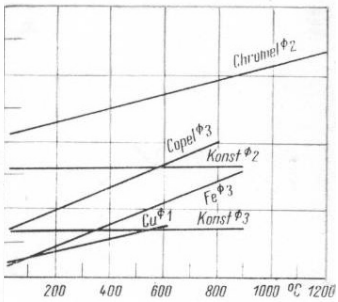

Bild 2

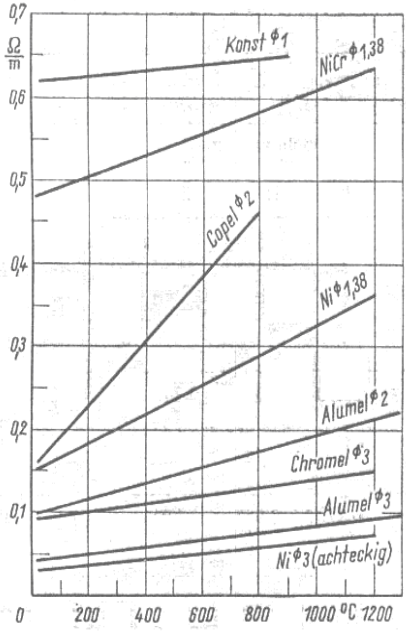

Bild 3

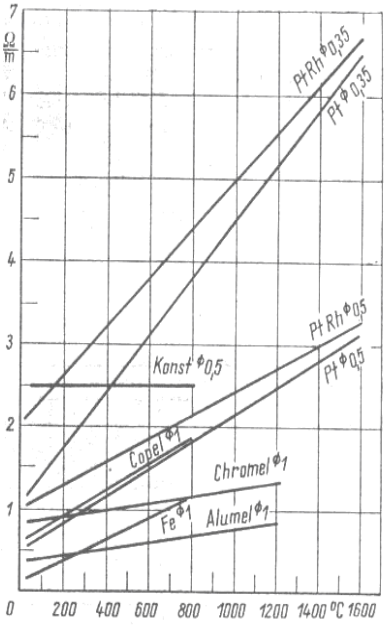

Bild 4

Bild 1 ... 4
Elektrischer Widerstand der Thermopaare (ohm/m)

Mit Hilfe von aufgestellten Diagrammen können dann für den ganzen Temperaturbereich die Widerstände der Thermoelemente in ohm/m ±10 % bestimmt werden.

Beispiel 1. Zu bestimmen ist der elektrische Widerstand eines Thermoelements PtRh-Pt, Durchmesser 0,5 mm, 1,5 m lang, für eine Einführungslänge von etwa 1,1 m und für eine Temperatur t = 1200 °C am Boden des Schutzrohres, wobei bekannt ist, dass der Widerstand des Thermoelements bei 20 °C 2,5 ohm beträgt und dass das Schutzrohr aus Porzellan ist. D*a* wir ein Thermo- element aus dünnem Draht und ein Schutzrohr aus Porzellan ha- ben, ist die mittlere Temperatur annähernd: $\bar{t}$ = (1/1,7...1/1,8)·t = 670...700 °C.

Mit Zuhilfenahme von bekannten Tafeln der Fachliteratur [5; 8; 12; 14] finden wir für PtRh-Pt die Beziehung r_{1200}/r_0 = 2,51...2,57, und wenn wir das Wachsen des Widerstands des Thermoelements beim Temperaturanstieg von 0 bis 20 °C vernachlässigen, erhalten wir r_{1200} = (2,51...2,57)·r_0 = 6,27...6,42 ohm. Wenn wir das Diagramm für das Thermoelement PtRh-Pt benutzen, dessen Warmlötstelle bei 1200 °C liegt und das einen Durchmesser von 0,5 mm hat, finden wir den Widerstand zu 5,2 ohm/m. Stellen wir den nichteingeschobenen Teil des Elements in Rechnung, der eine Länge von 0,4 m hat, so ist dessen Widerstand:

$$(0{,}4/1{,}5)\cdot 2{,}5 \cong 0{,}67 \text{ ohm},$$

und der Gesamtwiderstand ergibt sich zu:

$$5{,}2\cdot 1{,}1 + 0{,}67 = 6{,}39 \quad \text{ohm}.$$

Beispiel 2. Es wird angenommen, dass eine Mes-seinrichtung sich zusammensetzt aus einem PtRh-Pt Thermoelement mit 0,5 mm Durchmesser und 1,5 m Länge, einer 3 m langen Ausgleichsleitung von 1,5 mm^2 Querschnitt und einer Kupfer-Zuleitung von 10 m Länge und einem Querschnitt von ebenfalls 1,5 mm^2; der vorgeschriebene Aussenwiderstand sei 20 ohm. Die Eintauchlänge des Thermoelementes 1,2 m und die wahre Temperatur 1270 °C. Der Thermoelementwiderstand kann wie folgt bestimmt werden. Mit Zuhilfenahme von Tafeln der Fachliteratur [5;8;12;14] findet man folgende Werte: r_1 = 1,5·1,02 = 1,53 ohm; r_2 = 1,5·0,54 = 0,81 ohm; α_1=1,4·10^{-3} °C^{-1}; α_2 = 3,1·10^{-3} °C^{-1}. Setzt man diese Werte mit n =

1,2/1,5 = 0,8 und t = 1270 °C in die aufgestellte Gleichung ein, so erhält man für das Thermoelement den Widerstandswert von 6,99 ohm. Mit Hilfe der Diagramme das Bild 4 bestimmt man für eine Eintauchlänge von 1,2 m und eine Temperatur von 1270 °C für das Thermoelement einen Widerstand von 2,81·1,2 + 2,63·1,2 = 6,53 ohm und für die freie Länge von 0,3 m, 1,02·0,3 + 0,54·0,3 = 0,468 ohm; der Thermoelementwiderstand ist somit 6,99 ohm. Aus Tafeln aus der Fachliteratur [5; 8; 12; 14] erhält man für die PtRh-Pt Ausgleichsleitung mit 1,5 mm^2 Querschnitt bestehend aus Kupfer für den Plusschenkel und einer Kupfer-Nickellegierung (99,4 % Cu + 0,6 % Ni) für den Minusschenkel, einen Widerstand von 3·(0,012 + 0,017) = 0,09 ohm. Der Widerstand der Zuleitung beträgt (nach Tafel aus der Fachliteratur) 2·10·0,0112 = 0,23 ohm. Der gesamte Aussenwiderstand ist somit 6,99 + 0,09 + 0,23 ≅ 7,3 ohm. Der Vorwiderstand muss folglich 20 - 7,3 = 12,7 ohm betragen.

Übersetzung aus dem rumänischen: Dipl.Ing. Josef Wetzler, Nürnberg/Deutschland.

SCHRIFTTUM

[1] Bejan, M., *În lumea unităţilor de măsură, ediţia a doua revăzută şi adăugită.* Editura Academiei Române şi Editura AGIR, Bucureşti, 2005.

[2] Bejan, M., *Pentru o unitate în simbolistica şi unităţile de măsură din Rezistenţa Materialelor.* În: Univers ingineresc, nr.9/1996, AGIR, Bucureşti, 1996.

[3] Gruzsnicki, F., *Măsurarea temperaturii şi analiza gazelor de ardere.* Editura tehnică, Bucureşti, 1959.

[4] Gruzsnicki, F., *Tehnica măsurării temperaturilor, mărimilor calorice şi fotometrice.* Editura didactică şi pedagogică, Bucureşti, 1963.

[5] Henning, F., *Temperaturmessung.* 2.Auflage, Verlag J.A.Barth, Leipzig, 1955.

[6] Herlescu, T., *Condiţiile de instalare şi folosire a pirometrelor în întreprinderi.* În: Metrologia aplicată, vol.3, nr.6, Bucureşti, 1956.

[7] Herlescu, T., *Unele aspecte ale controlului termoelementelor în timpul exploatării.* În: Lucrările celei de a III-a Consfătuiri de sudură şi încercări de metale, Timişoara,1959, vol.3, Editura ASIT, Filiala Regională Banat, Timişoara, 1961.

[8] Hunsinger, W., *Temperaturmessung. În: Handbuch der Physik,* Band XXIII, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New-York, 1966.

[9] Hunsinger, W., *Beseitigung des Einflusses der kalten Enden bei direktzeigenden thermoelektrischen Pyrometern.* În: Helios, 41, Leipzig, 1935.

[10] Hunsinger, W., *Richtlinien für die Installation von Temperatur-Mess-und Regelanlagen.* Aus: Temperatur-Messung und Regelung, Vorträge der Arbeitstagung der Wissenschaftl. techn. Arbeitsgemeinschaft für Härterei-Technik und Wärmebehandlung, September,1951.
[11] Hunsinger, W., *Temperaturmessung mit Thermoelementen. Der Einfluss der Vergleichstemperatur und seine Berücksichtigung.* În: ATM, Lieferung 266, 267, Blatt J 2402-2, J 2402-3, (März.-April), Verlag R.Oldenbourg, München, 1958.
[12] Lieneweg, F., *Temperaturmessung.* În: Handbuch der technischen Betriebs-Kontrolle, Band III, Physikalische Messmethoden, 3. Auf-lage, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1959.
[13] Lieneweg, F., *Die Richlinie VDE/VDI 3511. Technische Temperatur-messungen.* In: ATM, Lieferung 350, Blatt V 210-2, (März), Verlag R. Olden¬bourg, München, 1965.
[14] Lindorf, H., *Technische Temperaturmessungen.* Verlag W. Girardet, Essen, 1956.
[15] Lindorf, H., *Einbaufragen bei Berührungs-und Strahlungsthermome-tern.* VDI-Berichte, Nr.112, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1966.
[16] Lindorf, H., *Temperaturmesstechnik.* Sonderdruck AEG, Berlin,1965.
[17] Obrowski, W., Hunsinger, W., *Technische Temperaturmessung.* În: Technische Rundschau, Nr.7/1963.
[18] Smirnov, A.A., *Repararea aparatelor termotehnice de măsurat şi control.* Editura Energetică de Stat, Bucureşti, 1955.
[19] Wetzler, I., *Influenţa variaţiei rezistenţei electrice într-un circuit pirometric termoelectric.* În: Metrologia aplicată, vol.10, nr.11, Bucureşti, 1963.
[20] Fântânaru, N., *Chyby zpusobené nedostatecným odporem vnejsiho obvodu pri mereni teplot teplomery s termoelektrickým clánkem.* În: Strojirenstvi, sv.16, c.10, Praha, 1966.

Ing. Nicolae FÂNTÂNARU
Secretar al Comisiei Naţionale Comportarea *in situ* a Construcţiilor Bucureşti,
membru AGIR şi ARTENS,
e-mail: cncisc@gmail.com

Tehn.sp. Dan HODOR
Direcţia Regională de Metrologie Legală Timişoara,
Laboratorul Forţe-Duritătţi,
e-mail: drmltmtm@yahoo.com