

# Inhaltsverzeichnis

**Vorwort** ..... V

  

**1. Allgemeines** ..... 1

1.1 Geschichtliches ..... 3

1.1.1 Die Platin-Rhodium-Thermoelemente ..... 4

1.1.2 Die Wolfram-Rhenium-Thermoelemente ..... 5

1.1.3 Die Nickel-Chrom-Silizium/Nickel-Silizium-Thermoelemente ..... 6

1.1.4 Die elektronische Temperaturmessung ..... 7

1.1.5 Die Rolle der internationalen Norm und der Temperaturverteilungsmessung ..... 8

1.1.6 Gute Instrumente, falscher Einsatz ..... 8

1.2 Die Thermospannung ..... 12

1.2.1 Erfahrungen mit der Thermospannung ..... 12

1.2.2 Das Elektronenmodell der Thermospannung ..... 14

1.2.2.1 Metalle und ihr Aufbau ..... 15

1.2.2.2 Die Temperatur als Form der Bewegungsenergie ..... 17

1.2.2.3 Der thermoelektrische Effekt ..... 18

1.2.3 Das Thermoelement ..... 21

1.2.3.1 Warum in einem Stromkreis mit einheitlicher Temperatur keine Thermospannung entsteht ..... 22

1.2.3.2 Warum in einem Stromkreis aus einheitlichem Material keine Thermospannung entsteht ..... 23

1.2.3.3 Warum das Thermoelement fast unbegrenzt miniaturisierbar ist ..... 25

1.2.3.4 Warum die Temperaturspannung so klein ist ..... 25

1.2.3.5 Warum sich die Thermospannung bei Diffusion ändert ..... 26

1.2.3.6 Warum die Thermoelemente fast immer abwärts driften ..... 28

1.2.3.7 Warum sich die Thermodrähte nicht verbrauchen ..... 28

1.2.3.8 Warum Platin, Nickel und Gold thermoelektrisch negativ sind ..... 29

1.2.3.9 Warum Kupfer, Gold und Silber miteinander eine kleine Thermospannung haben ..... 29

1.2.3.10 Warum die Messung von sehr tiefen Temperaturen problematisch ist ..... 30

1.2.3.11 Warum ein altes Thermoelement tiefer im Ofen häufig mehr anzeigt ..... 30

1.2.3.12 Warum die Herstellungsart der Messstelle fast ohne Bedeutung ist ..... 32

1.2.3.13 Warum die Thermospannung kleiner wird, wenn die Vergleichsstelle erwärmt wird ..... 33

1.2.3.14 Warum Messstelle und Vergleichsstelle austauschbar sind ..... 34

1.2.3.15	Warum manchmal keine Thermospannung bei ungleichmäßiger Temperatur und verschiedenem Material entsteht . . . . .	34
1.2.3.16	Warum die heutigen Thermoelemente genauer sind . . . . .	35
1.2.3.17	Wie die digitalen Messgeräte arbeiten . . . . .	35
1.3	Fehlerquellen bei der Messung . . . . .	36
1.3.1	Eine oder mehrere Ziffern des Digitalinstrumentes fehlen . . . . .	38
1.3.2	Ein Digitalinstrument blinkt . . . . .	38
1.3.3	Ein elektronisches Instrument zeigt eine unwahrscheinlich hohe Temperatur an . . . . .	39
1.3.4	Die Anzeige eines Digitalinstrumentes springt mehr als ein Digit hin und her . . .	39
1.3.5	Unsichere Temperaturkurven . . . . .	40

## 2. Messstelle . . . . . 43

2.1	Messstellen mit wenigen Wärmeleitfehlern . . . . .	48
2.1.1	Konventionelle Messstellen in homogenen Temperaturfeldern . . . . .	48
2.1.2	Messstellen in inhomogenen Temperaturfeldern . . . . .	56
2.1.3	Konventionelle Messstellen im inhomogenen Temperaturfeld . . . . .	62
2.1.4	Doppelmessung mit zwei konventionellen Messstellen . . . . .	63
2.1.5	Virtuelle Messstelle der konventionellen Messstellen . . . . .	65
2.1.6	Hinweise zur Messung in inhomogenen Temperaturfeldern . . . . .	71
2.2	Schnelle Messstellen (Dynamik) . . . . .	75
2.2.1	Die Zeitkonstante . . . . .	75
2.2.2	Die Anfangsgeschwindigkeit (Anfangszeitkonstante) . . . . .	78
2.2.3	Schneller messen mit dünneren Messstellen . . . . .	81
2.2.4	Der Einfluss der Umgebung . . . . .	83
2.2.5	Verbesserung der Geschwindigkeit fertiger Thermoelemente . . . . .	85
2.3	Messstellen für die Oberflächentemperaturmessung . . . . .	92
2.3.1	Falsche Oberflächentemperaturmessung mit Kupferplättchen . . . . .	92
2.3.2	Die richtige Oberflächentemperaturmessung an einer Stahl- oder Keramikwand . . . . .	94
2.3.3	Falsche Oberflächentemperaturmessung mit Mantelthermoelementen . . . . .	98
2.4	Die bewegliche Messstelle . . . . .	100
2.4.1	Bewegungsrichtung bei der Profilmessung . . . . .	101
2.4.2	Ständige oder periodische Bewegung . . . . .	101
2.4.3	Automatische Profilmessung mit Korrektur . . . . .	102
2.5	Fehlersuche an der Messstelle . . . . .	104
2.5.1	Dickeres Thermoelement zeigt scheinbar niedrigere Temperaturschwankung an . . . . .	104
2.5.2	Oberflächenmessung ist druckempfindlich . . . . .	106

2.5.3	Gelötete Messstelle macht unverständliche Sprungkurven. . . . .	106
2.5.4	Schwankende Temperaturmessung der bewegten Oberfläche. . . . .	107
2.5.5	Angedrückte Messstelle zeigt zu wenig an . . . . .	108
2.5.6	Neues Thermoelement zeigt um etwa 20 K mehr an. . . . .	108
2.5.7	Verdrillte Messstelle zeigt falsch an . . . . .	109
2.5.8	Messstelle berührt fremdes Metall. . . . .	109
2.5.9	Einige Chargethermoelemente zeigen unsicher an . . . . .	110
2.5.10	Polaritätswechsel am Netzstecker verringert die Störung. . . . .	110
2.5.11	Die Erdung des Messinstrumentengehäuses bringt sehr große Störungen . . .	112
2.5.12	Eine Steckdose ist störungsfrei, eine andere nicht . . . . .	114
2.5.13	Kleine Wechselspannung an der Messstelle, trotzdem große Störung. . . . .	116
 <b>3. Thermodrähte. . . . .</b>		<b>121</b>
3.1	Thermodrähte, Thermopaar, Thermoschenkel. . . . .	122
3.1.1	Die Thermodrähte und das Thermopaar . . . . .	123
3.2	Zuverlässigkeit der Thermodrähte . . . . .	123

3.2.1	Auswahl der Thermodrähte . . . . .	124
3.2.1.1	Warum sich die Thermospannung ändert . . . . .	124
3.2.1.2	Anforderungen an die Thermodrähte . . . . .	127
3.2.1.3	Auswahl der Thermodrähte nach Norm . . . . .	128
3.2.1.4	Beschränkung der Thermodrahtauswahl . . . . .	131
3.2.1.5	Garantie des Thermoelementes . . . . .	132
3.2.1.6	Lebensdauer der Thermodrähte . . . . .	133
3.2.1.7	Die „Krankheit“ der Thermodrähte . . . . .	133
3.2.1.8	Durchschnittliche Lebensdauer der Nickel-Chrom/Nickel-Aluminium-(K)- Thermodrähte . . . . .	145
3.2.1.9	Durchschnittliche Lebensdauer der Platin-Rhodium-/Platin-(Typ-S-und-R)- Thermodrähte . . . . .	149
3.2.1.10	Durchschnittliche Lebensdauer der Platin-Rhodium-30-%/Platin-Rhodium- 6-%-(B)-Thermodrähte . . . . .	152
3.2.1.11	Durchschnittliche Lebensdauer der Wolfram-Rhenium-Thermodrähte . . . . .	155
3.2.1.12	Vergleich zwischen den Driftfunktionen der Thermodrähte . . . . .	156
3.2.1.13	Lebensdauer im Kältebereich (0,1–400 K) . . . . .	157
3.2.1.14	Lebensdauer bei Ausschaltzeiten . . . . .	159
3.2.1.15	Qualitative Folgerungen für die Praxis . . . . .	160
3.2.2	Schutzrohre für die Thermodrähte . . . . .	162
3.2.2.1	Formen der Schutzrohre . . . . .	163
3.2.2.2	Auswahl der Schutzrohre in Berührung von festen Körpern . . . . .	166
3.2.2.3	Schutzrohre für die Messung in Flüssigkeiten . . . . .	167
3.2.2.4	Auswahl der Schutzrohre in Schmelzen . . . . .	170
3.2.2.5	Auswahl der Schutzrohre in Gasen (Luft, Schutzgas, Abgas) sowie im Vakuum . . . . .	174
3.2.2.6	Schutzrohrentwicklung . . . . .	184
3.2.3	Durchführungen für die Thermodrähte . . . . .	184
3.2.3.1	Auswahl der Durchführungen in Luft . . . . .	185
3.2.3.2	Thermoelektrischer Kurz- und Massenschluss in der Durchführung . . . . .	185
3.2.3.3	Durchführungen für Schutzgasöfen . . . . .	190
3.2.3.4	Durchführungen für (Hoch-)Druckanlagen . . . . .	190
3.2.3.5	Durchführungen für Vakuum-Wärmebehandlungsanlagen . . . . .	193
3.2.3.6	Durchführungen durch elektromagnetische Felder . . . . .	196
3.3	Thermospannung der Thermodrähte . . . . .	207
3.3.1	Thermoelement-Tabellen, „Kurven und Formeln“ . . . . .	207
3.3.2	Normen der Thermospannung und ihrer Toleranzen . . . . .	208
3.4	Kontrolle der Thermodrähte . . . . .	213
3.4.1	Generelle Betrachtung zur Kontrolle . . . . .	213
3.4.1.1	Toleranzen der Wärmebehandlung . . . . .	220

3.4.1.2	„Gefahren der Kontrolle“	222
3.4.2	Thermoelement-Thermometer ohne Kontrolle	225
3.4.3	Kontrolle der Thermodrähte durch Austausch	225
3.4.4	Vergleich zwischen den eingebauten Thermoelementen	226
3.4.5	Mikroprozessor-Kontrolle	227
3.4.6	Kontroll-Schutzrohr	229
3.4.7	Kontrolle der Thermodrähte mit Vergleich	231
3.4.7.1	Kontrollfchen für neue Thermoelemente	231
3.4.7.2	Kontroll-Metallrohr in einem Ofen	234
3.4.7.3	Fixpunkt-Kontrolle der Thermodrähte	235
3.4.7.4	Kontrolle mit optischem Pyrometer	237
3.4.8	Wann kontrolliert werden muss	239
3.4.8.1	Drift, Toleranz und Lebensdauer	239
3.4.8.2	Zur Notwendigkeit wöchentlicher Kontrollen	242
3.4.8.3	Kontrolltermin-Tabellen	242
3.4.9	Computer-Kontrolle – Ein Thermoelement-Thermometer ohne Alterung	248
3.5	Fehlersuche	249
3.5.1	Thermoelement gibt keine Thermospannung ab	249
3.5.2	Neu eingelegtes Platin-Rhodium/Platin-Thermoelement zeigt um 12 K mehr an	250
3.5.3	Zusammengesuchte Thermoelemente ergeben unverständliche Temperaturverteilung	250
3.5.4	Kalibrierte Thermoelemente ergeben eine unverständliche Temperaturverteilung	251
3.5.5	Thermoelemente sind unterschiedlich kalibriert	252
3.5.6	Wiederholung der Temperaturverteilungsmessung mit anderem Ergebnis	253
3.5.7	Zwei Thermoelemente werden gegeneinander ausgetauscht	254
3.5.8	Mantelthermoelemente liefern im Aufkohlungsgas falsche Ergebnisse	254
3.5.9	Thermodrähte im Flusssäure-Dampf liefern fallende Temperatur	255
3.5.10	Glasseide-isolierte Thermodrähte zeigen eine falsche Temperaturverteilung an	256
3.5.11	Platin-Thermodrähte im Chrom-Nickel-Mantel driften sehr schnell	256
3.5.12	Zwei Öfen stören sich gegenseitig	257
3.5.13	Bei einer Temperatur höher als 500 C tritt eine Störung auf	258
3.5.14	Beim Ausschalten sind die Störungen weg	258
3.5.15	Beim Ausschalten sind die Störungen nicht weg	259
3.5.16	Störspannungen über 1.400 C	259
3.5.17	Störspannungen im gasbeheizten Ofen	261
3.5.18	Gegen Störspannungen schtzt kein Metallschutzrohr	262
3.5.19	Erden hilft gegen Störspannungen selten	262

3.5.20	Geerdetes Mantelthermoelement stört. . . . .	263
3.5.21	Platin-Innenauskleidung ist zu teuer . . . . .	263
3.5.22	Die Störung tritt an einem Schreiber nur bei einer bestimmten Temperatur auf. . . . .	264
3.5.23	Leben die 1 mm dicken Thermodrähte länger? . . . . .	264

## **4. Anschlusskopf . . . . . 269**

4.1	Beispiele und Definition . . . . .	270
4.2	Anschlussköpfe zum Öffnen (Thermodrahtaustausch) . . . . .	271
4.2.1	Polarität im Anschlusskopf. . . . .	273
4.2.2	Korrosionsfreiheit im Anschlusskopf . . . . .	274
4.3	Komplexe Anschlussköpfe. . . . .	276
4.3.1	Anschlusskopf mit angedrückter Messstelle . . . . .	276
4.3.2	Anschlusskopf mit Kontroll-Loch . . . . .	276
4.3.3	Anschlusskopf mit Schutzrohrgruppe: Dreifach-Thermoelement . . . . .	277
4.3.4	Versiegelte Anschlussköpfe . . . . .	279
4.3.5	Anschlussköpfe mit Elektronik . . . . .	280
4.4	Fehlerfreie Anschlussköpfe . . . . .	281
4.5	Fehlersuche . . . . .	282
4.5.1	Einige Stunden nach dem Einschalten zeigt sich eine falsche Anzeige . . . . .	282
4.5.2	Nach Erreichen des Sollwertes zeigen viele Thermoelement-Thermometer eine zu hohe Temperatur an. . . . .	283
4.5.3	Falsche Anzeige unter 0 °C . . . . .	284
4.5.4	Falsche Polarität der Anzeige. . . . .	285
4.5.5	Ein Typ-K-Thermoelement zeigt um 143 K weniger an . . . . .	286
4.5.6	Wolfram-Rhenium-Thermoelement zeigt während der Wärmebehandlung falsch an . . . . .	288
4.5.7	Drahtumflechtung im Anschlusskopf nicht erden . . . . .	289
4.5.8	Nachteile von Drahtumflechtungen . . . . .	290
4.5.9	Veränderung der Anzeige bei Klopfen auf den Anschlusskopf . . . . .	291
4.5.10	Uneinstellbare Temperierung . . . . .	291
4.5.11	Mantelthermoelement ohne Anschlusskopf. . . . .	292
4.5.12	Drahtbruch bei einem Mantelthermoelement ohne Anschlusskopf. . . . .	293
4.5.13	Erwärmter Anschlusskopf erzeugt Fehlanzeige . . . . .	294
4.5.14	Fehlanzeige durch Messingbuchsen im Anschlusskopf . . . . .	296
4.5.15	Prozessparameter im kleinen Ofen sind nicht zu übernehmen . . . . .	297
4.5.16	Statt der Ofentemperatur wird die Anschlusskopftemperatur angezeigt . . . . .	298

<b>5. Berechnungen</b> .....	299
5.1 Formeln der elektrischen Elemente .....	300
5.2 Elektrische Spannung in der Ultrazentrifuge .....	304
5.3 Die Elektronengas-Theorie für das Thermoelement. ....	306
5.4 Das Kontaktpotenzial .....	309
5.5 Messstelle im inhomogenen Temperaturfeld .....	312
5.6 Temperaturverteilung in einem Loch .....	315
5.7 Messfehler der Thermoelement-Messstelle .....	317
5.8 Gradient und Messfehler .....	318
5.9 Die Bestimmung der Zeitkonstante .....	319
5.10 Abkühlung der Messstelle .....	319
5.11 Anfangsgeschwindigkeit. ....	321
5.12 Einstellung der Messstelle auf eine höhere Temperatur .....	323
5.13 Logarithmische Analyse .....	326
5.14 Berechnung der sich bewegenden Messstelle .....	330
5.15 Abklingen des Wärmeleitfehlers .....	335
5.16 Berechnung des dynamischen Fehlers .....	335
5.17 Abhängigkeit der Drift von der Einsatzzeit .....	338
5.18 Abhängigkeit der Drift von der Temperatur der Thermodrähte .....	341
5.19 Abhängigkeit der Drift von dem Thermodrahtdurchmesser .....	342
<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	349