

# 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 Thermorähte 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 blinks . . . . .	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
<b>2. Messstelle . . . . .</b>	<b>43</b>
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 Chargenthermoelemente 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.</b>	<b>Thermodrähte</b> . . . . .	121
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 Thermo drähte . . . . .	124
3.2.1.1	Warum sich die Thermospannung ändert . . . . .	124
3.2.1.2	Anforderungen an die Thermo drähte . . . . .	127
3.2.1.3	Auswahl der Thermo drähte nach Norm . . . . .	128
3.2.1.4	Beschränkung der Thermo drahtauswahl . . . . .	131
3.2.1.5	Garantie des Thermo elementes . . . . .	132
3.2.1.6	Lebensdauer der Thermo drähte . . . . .	133
3.2.1.7	Die „Krankheit“ der Thermo drähte . . . . .	133
3.2.1.8	Durchschnittliche Lebensdauer der Nickel-Chrom/Nickel-Aluminium-(K)-Thermo drähte . . . . .	145
3.2.1.9	Durchschnittliche Lebensdauer der Platin-Rhodium-/Platin-(Typ-S-und-R)-Thermo drähte . . . . .	149
3.2.1.10	Durchschnittliche Lebensdauer der Platin-Rhodium-30-%/Platin-Rhodium-6-%-(B)-Thermo drähte . . . . .	152
3.2.1.11	Durchschnittliche Lebensdauer der Wolfram-Rhenium-Thermo drähte . . . . .	155
3.2.1.12	Vergleich zwischen den Driftfunktionen der Thermo drähte . . . . .	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 Thermo drähte . . . . .	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 Thermo drähte . . . . .	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 Thermo drähte . . . . .	207
3.3.1	Thermoelement-Tabellen, „Kurven und Formeln“ . . . . .	207
3.3.2	Normen der Thermospannung und ihrer Toleranzen . . . . .	208
3.4	Kontrolle der Thermo drähte . . . . .	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 Kontrollöfchen 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 Aufkühlungsgas 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 schützt 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 . . . . .

---

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