

---

K. Irrgang / L. Michalowsky (Hrsg.)

# **Temperaturmesspraxis**

**mit Widerstandsthermometern  
und Thermoelementen**

**VULKAN-VERLAG ESSEN**

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	V
<b>Autoren</b> .....	VI
<b>Formelzeichen</b> .....	XIII
<b>1 Physikalische Grundlagen der Temperaturmesstechnik</b> .....	1
L. Michalowsky	
<b>1.1 Die Temperatur als physikalische Zustandsgröße</b> .....	2
<b>1.2 Temperaturskalierungen</b> .....	5
<b>1.3 Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes und Grundlagen der elektrischen Leitungsvorgänge</b> .....	5
<b>1.4 Elektrische Leitfähigkeit von Metallen</b> .....	8
<b>1.5 Elektrische und mechanische Eigenschaften von Legierungen</b> ....	13
<b>1.6 Matthiesen-Regel</b> .....	18
<b>1.7 Halbleitung in Silicium, Verbindungshalbleitern und Keramiken</b> ....	19
<b>1.8 Thermoelektrizität</b> .....	23
<b>1.9 Wärmedehnung fester Körper</b> .....	26
<b>1.10 Wärmeleitung</b> .....	28
<b>1.11 Normalgeräte der ITS-90</b> .....	30
<b>2 Werkstoffe für elektrisch berührende Thermometer</b> .....	33
L. Michalowsky	
<b>2.1 Einführung</b> .....	34
<b>2.2 Widerstandswerkstoffe</b> .....	34
2.2.1 Edelmetalle und Halbedelmetalle .....	34
2.2.2 Metalle und Legierungen .....	38
2.2.3 Silicium .....	41
2.2.4 Keramische Halbleiter .....	42
2.2.5 Glaskeramiken .....	47
<b>2.3 Thermoelementpaarungen</b> .....	47
2.3.1 Einführung in die Probleme der Werkstoffauswahl .....	47
2.3.2 Edle und halbedle Metalle für Thermopaarungen .....	48
2.3.3 Unedle Thermomaterialien .....	50
2.3.4 Thermopaarungen für sehr hohe Anwendungstemperaturen .....	55
2.3.4.1 Metallische Thermopaarungen für sehr hohe Anwendungs- temperaturen .....	55
2.3.4.2 Anorganisch-nichtmetallische Thermopaarungen für sehr hohe Anwendungstemperaturen .....	56

<b>3</b>	<b>Werkstoffe für Thermometerschutzrohre</b> .....	57
	L. Michalowsky	
<b>3.1</b>	<b>Einleitung</b> .....	58
<b>3.2</b>	<b>Metallische Werkstoffe</b> .....	58
<b>3.3</b>	<b>Polymerwerkstoffe</b> .....	60
<b>3.4</b>	<b>Keramische Werkstoffe für Schutzrohre</b> .....	63
3.4.1	Kriterien für die Auswahl keramischer Schutzrohrwerkstoffe .....	63
3.4.2	Nitridwerkstoffe .....	63
3.4.2.1	Aluminiumnitrid .....	66
3.4.2.2	Bornitrid .....	66
3.4.2.3	Siliciumnitrid .....	70
3.4.2.4	Sialone .....	73
3.4.3	Siliciumkarbidwerkstoffe .....	74
3.4.4	Hochfeuerfeste Keramikwerkstoffe .....	77
<b>3.5</b>	<b>Keramische Schichten für Thermometerschutzrohre</b> .....	78
3.5.1	Kriterien für die Werkstoffauswahl .....	78
3.5.2	Das Plasmaspritzverfahren .....	79
3.5.3	Das Hochratesputterverfahren .....	80
3.5.4	Keramische Schichtwerkstoffe für Schutzrohre .....	80
<b>4</b>	<b>Elektrische Berührungsthermometer</b> .....	83
	K. Irrgang	
<b>4.1</b>	<b>Klassifizierungen</b> .....	84
4.1.1	Übersicht .....	84
4.1.2	Bauformen und Bestandteile .....	84
4.1.2.1	Allgemeines .....	84
4.1.2.2	Anlege-Temperaturfühler .....	85
4.1.2.3	Einsteck-Temperaturfühler .....	89
4.1.2.4	Eintauch-Temperaturfühler .....	92
4.1.2.5	Temperaturmesspendel und Gehäuse-Temperaturfühler .....	94
4.1.2.6	Hoch-Temperaturfühler .....	95
4.1.2.7	Hand-Temperaturfühler .....	97
4.1.2.8	Temperaturmessmodule .....	97
<b>4.2</b>	<b>Widerstandsthermometer</b> .....	100
4.2.1	Primärer Temperatursensor: Temperaturmesswiderstand .....	100
4.2.2	Metallische Temperaturmesswiderstände .....	101
4.2.2.1	Nickelmesswiderstände .....	101
4.2.2.2	Platinmesswiderstände .....	102
4.2.2.2.1	Die Temperatur-Widerstands-Charakteristik .....	102
4.2.2.2.2	Zulässige Toleranzen für Platinmesswiderstände nach EN 60751 / DIN IEC 751 .....	105
4.2.2.2.3	Praktisch erweiterte Toleranzklassen und Kennwerte .....	106
4.2.2.2.4	Material- und konstruktionsbedingte Kennlinienänderungen .....	107
4.2.2.3	Messstrom und Eigenerwärmung .....	111
4.2.2.4	Sensorbauformen .....	112
4.2.2.4.1	Keramikmesswiderstände .....	112

4.2.2.4.2	Glasmesswiderstände .....	112
4.2.2.4.3	Schichtmesswiderstände (Flachmesswiderstände) .....	114
4.2.2.4.4	Folienmesswiderstände .....	115
4.2.2.4.5	Bandmesswiderstände .....	116
4.2.2.4.6	Nutenmesswiderstände .....	116
4.2.3	Halbleitende Temperaturmeßwiderstände .....	117
4.2.3.1	Überblick .....	117
4.2.3.2	NTC-Temperatursensoren - Heißeiter .....	118
4.2.3.2.1	Definition .....	118
4.2.3.2.2	Aufbau und Bauformen .....	118
4.2.3.2.3	Kennwerte .....	119
4.2.3.2.4	Sonderausführungen von NTC-Messwiderständen .....	122
4.2.3.3	PTC-Temperatursensoren - Kaltleiter .....	122
4.2.3.4	Siliziummesswiderstände .....	123
4.2.3.4.1	Definition und Wirkungsprinzip .....	123
4.2.3.4.2	Widerstands-Temperatur-Abhängigkeit .....	123
4.2.3.4.3	Applikationen und Bauformen .....	124
4.2.4	Thermometerbaugruppen und Systemfamilien .....	124
4.2.4.1	Einleitung .....	124
4.2.4.2	Widerstandsthermometersysteme in der Industrieautoma- tion .....	126
4.2.4.2.1	Fühler nach EN-Norm .....	126
4.2.4.2.2	Fühler nach amerikanischem Standard .....	128
4.2.4.2.3	Fühler für die Lebensmittel-/Getränkeindustrie .....	129
4.2.4.2.4	Thermometrisch-modulares Gerätesystem, thermale Mikro- module .....	133
4.2.4.3	Widerstandsthermometersysteme in der Gebäudeautoma- tion (TGA) .....	134
4.2.4.3.1	Überblick und Standardausführungen .....	134
4.2.4.3.2	Primärsensoren der TGA im Vergleich .....	135
4.2.4.3.3	Thermische Ein- und Anbauprobleme .....	137
4.2.4.3.4	Spezifische Applikationen für Wärmezählung, Solartechnik und Raumklimatisierung; Sonderlösungen .....	138
4.2.4.4	Widerstandsthermometer in automotiven Systemen .....	144
4.2.4.4.1	NTC-Fühler für den mittleren Temperaturbereich (bis 200 °C) .....	144
4.2.4.4.2	Abgastemperaturfühler .....	144
4.2.4.5	Messeinsätze .....	146
4.2.4.5.1	Standardmesseinsatz .....	147
4.2.4.5.2	Mantelmesseinsatz .....	147
4.2.4.5.3	Sonderausführungen .....	148
4.2.4.6	Metallische Schutzrohre und Schutzhülsen .....	148
4.2.4.6.1	Einteilung der metallischen Schutzrohre .....	149
4.2.4.6.2	Mechanisch verformte Schutzrohre .....	150
4.2.4.6.3	Theoretische Grundlagen zur Berechnung der mechanisch- thermischen Festigkeit von Thermometerschutzrohren .....	151
4.2.4.6.4	Belastungsdiagramme .....	154
4.2.4.6.5	Gebräuchliche metallische Schutzrohrwerkstoffe .....	155
4.3	<b>Thermoelemente</b> .....	156

4.3.1	Einleitung, Messprinzip und Bestandteile .....	156
4.3.1.1	Überblick .....	156
4.3.1.2	Erläuterung der Wirkungsprinzipien .....	156
4.3.2	Technische Thermopaarungen .....	158
4.3.2.1	PtRh-Systeme .....	158
4.3.2.2	CuNi-Systeme .....	159
4.3.2.3	NiCr-Systeme .....	159
4.3.2.4	AuFe-Systeme (Tieftemperaturelemente) .....	160
4.3.2.5	Mo-, W-, Re-Systeme (Hochtemperaturelemente) .....	161
4.3.3	Standardisierte Thermoelemente .....	161
4.3.3.1	Übersicht, Temperaturgrenzempfindlichkeiten .....	161
4.3.3.2	Zulässige Abweichungen .....	163
4.3.3.3	Abweichungen zwischen DIN 43710 und IEC 584/1 .....	163
4.3.3.4	Ausgleichsleitungen nach DIN und IEC .....	163
4.3.4	Ausführungsformen der Messstelle, Verschaltungen .....	166
4.3.4.1	Einfache Thermodrahtelemente .....	166
4.3.4.2	Thermokoaxelemente .....	168
4.3.4.3	Thermoelektrische Module .....	168
4.3.4.4	Differenzthermoelemente .....	168
4.3.4.5	Tendenzthermoelemente .....	169
4.3.4.6	Stufenelemente .....	170
4.3.4.7	Mehrfachthermoelemente .....	171
4.3.4.8	Mittelwertthermoelemente .....	171
4.3.5	Vergleichsstelle .....	171
4.3.6	Thermoelementsystемаausführungen .....	172
4.3.6.1	Standardeinbauthermoelemente mit metallischer Fassung ....	173
4.3.6.2	Hochtemperaturthermoelemente mit keramischem Schutzrohr .....	173
4.3.6.3	Einsteckthermoelement mit Bajonettssystem .....	175
4.3.6.4	Thermoelemente für Metall-Schmelzen und Salzbad .....	175
4.3.6.5	Thermoelemente für strömende Gase bei mittleren und höheren Temperaturen .....	176
4.3.7	Mineralisolierte Mantelthermoelemente .....	178
4.3.7.1	Aufbau und Herstellungstechnologie .....	178
4.3.7.2	Applikationen .....	179
<b>5</b>	<b>Faktoren mit Einfluss auf die Messgenauigkeit .....</b>	<b>183</b>
	K. Irrgang	
<b>5.1</b>	<b>Die Temperaturmesskette .....</b>	<b>184</b>
<b>5.2</b>	<b>Langzeitverhalten und Hysterese .....</b>	<b>185</b>
5.2.1	Allgemeines Driftverhalten der Sensoren .....	185
5.2.2	Driftverhalten von Pt-Widerstandsthermometern .....	186
5.2.3	Hystereseeffekte von Platinsensoren im Tieftemperaturbereich .....	188
5.2.4	Drift von Pt-Rh-Thermoelementen .....	188
<b>5.3</b>	<b>Mess- bzw. Anschlussleitung .....</b>	<b>189</b>
5.3.1	Einfluss der Zuleitung von Widerstandsthermometern .....	189
5.3.1.1	Zwei-, Drei- und Vierleiterschaltung .....	189
5.3.1.2	Schaltungen für Mehrpunktsensoren .....	192

5.3.1.3	Differenzschaltungen und Brückenschaltungen .....	193
5.3.2	Thermoelementanschluss .....	194
5.3.2.1	Allgemeine Fehlereinflüsse durch Ausgleichsleitung und Vergleichsstelle .....	194
5.3.2.2	Die Vergleichsstellenkompensation .....	195
<b>5.4</b>	<b>Isolationswiderstand</b> .....	195
5.4.1	Isolationswiderstände bei Widerstandsthermometern .....	195
5.4.2	Isolationsbedingte intrinale Temperaturmessfehler .....	197
5.4.3	Isolationswiderstand bei Thermoelementen und Mantelthermo- elementen .....	200
5.4.4	Messung des Isolationswiderstandes .....	201
<b>5.5</b>	<b>Parasitäre Thermospannungen</b> .....	202
5.5.1	Thermoeffekte im Widerstandsmesskreis .....	202
5.5.2	Störende Thermospannungen im thermoelektrischen Kreis .....	203
<b>5.6</b>	<b>Eigenerwärmung von Widerstandsthermometern</b> .....	204
<b>5.7</b>	<b>Zeitliche Verzögerung des Temperaturmesssignals</b> .....	205
5.7.1	Allgemeines .....	205
5.7.2	Die Übergangsfunktion und der $t_{90}$ -Kennwert .....	206
5.7.3	Übertragungsfunktion .....	207
5.7.4	Experimentelle Ermittlung der Zeitkonstanten .....	208
5.7.5	Einfluss der Wärmeübergangsbedingungen .....	209
<b>5.8</b>	<b>Statisch-thermische Ein- und Anbaufaktoren</b> .....	210
5.8.1	Einleitung .....	210
5.8.2	Abschätzungen thermischer Einflüsse mittels Kopplungsfaktoren .....	211
5.8.3	Korrekturmaßnahmen gegen statisch-thermische Einflüsse bei Eintauchfühlern .....	211
5.8.3.1	Überblick .....	211
5.8.3.2	Konstruktive Maßnahmen und Montagerichtlinien .....	212
5.8.3.3	Mathematische und mathematisch-kombinatorische Korrekturmaßnahmen .....	215
5.8.4	Fouling-Einfluss .....	219
<b>5.9</b>	<b>Elektromagnetische Einflüsse und Erdschleifen</b> .....	219
<b>5.10</b>	<b>Temperaturfeldabhängiger thermoelektrischer Inhomogenitäts- einfluss</b> .....	220
<b>5.11</b>	<b>Einfluss der Messwertverarbeitung</b> .....	223
<b>5.12</b>	<b>Auswirkungen radioaktiver Bestrahlungen</b> .....	223
<b>6</b>	<b>Explosionsgeschützte Temperaturfühler</b> .....	225
	S. Büttner, K. Irrgang	
<b>6.1</b>	<b>Explosionsschutzanforderungen, allgemeine Bedingungen</b> .....	226
<b>6.2</b>	<b>Einteilung von Gerätegruppen, Gerätekategorien, Zonen und Temperaturklassen</b> .....	228
<b>6.3</b>	<b>Schutzprinzipien und Zündschutzarten</b> .....	231
<b>6.4</b>	<b>Kennzeichnung von exgeschützten Thermometern</b> .....	232
<b>7</b>	<b>Messwertumformer</b> .....	235
	H.-U. Marquardt, J. Kuhn	
<b>7.1</b>	<b>Einsatzgebiete von Temperaturmessumformern</b> .....	236

7.1.1	Begriffsdefinition .....	236
7.1.2	Temperaturmessumformer .....	237
<b>7.2</b>	<b>Messumformer mit analogem Ausgangssignal</b> .....	<b>240</b>
7.2.1	Analoge Normsignale in der Automatisierungstechnik .....	240
7.2.2	Schutzmaßnahmen gegen elektromagnetische Störungen .....	241
7.2.3	Explosionsschutz bei Temperaturmessumformern .....	244
7.2.4	Intern analog arbeitende Messumformer .....	246
	7.2.4.1 Grundsätzlicher Aufbau .....	246
	7.2.4.2 Linearisierung .....	246
	7.2.4.3 Schaltungstechnik .....	246
7.2.5	Intern digital arbeitende Messumformer .....	248
	7.2.5.1 Grundsätzlicher Aufbau .....	248
	7.2.5.2 Linearisierung .....	248
	7.2.5.3 Schaltungstechnik .....	249
	7.2.5.4 Das HART-Protokoll .....	249
<b>7.3</b>	<b>Übersicht zu Messumformern mit digitalem Ausgangssignal, Feldbussysteme</b> .....	<b>253</b>
<b>8</b>	<b>Prüfverfahren und Prüfeinrichtungen</b> .....	<b>257</b>
	G. Jainz, K. Irrgang	
<b>8.1</b>	<b>Allgemeines</b> .....	<b>258</b>
<b>8.2</b>	<b>Der Kalibriervorgang</b> .....	<b>258</b>
8.2.1	Voraussetzungen zur Kalibrierung und Störeinflüsse .....	258
8.2.2	Kalibrierung von Widerstandsthermometern .....	258
8.2.3	Kalibrierung von Thermoelementen .....	259
<b>8.3</b>	<b>Prüfeinrichtungen</b> .....	<b>260</b>
8.3.1	Eispunkt .....	260
8.3.2	Definierende thermometrische Fixpunkte .....	260
8.3.3	Wassertripelpunkt .....	261
8.3.4	Metallfixpunktzellen .....	262
8.3.5	Metallblockkalibratoren und Rohröfen .....	263
<b>8.4</b>	<b>Prüfung von Thermometern im Inline-Betrieb</b> .....	<b>264</b>
8.4.1	Thermometer mit Prüfkanälen .....	264
8.4.2	Thermometer mit Fixpunktzellen .....	265
<b>8.5</b>	<b>Kalibrierung von Antasttemperaturfühlern</b> .....	<b>266</b>
<b>8.6</b>	<b>Berechnung der Messunsicherheit der Prüfergebnisse</b> .....	<b>266</b>
	<b>Übersicht über relevante Normen und Standards</b> .....	<b>269</b>
	<b>Zusammenfassende Abhandlungen</b> .....	<b>274</b>
	<b>Anhang</b> .....	<b>275</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	<b>280</b>
	<b>Inserentenverzeichnis</b> .....	<b>283</b>