

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Überblick zur Thematik des Buches	1
1.2	Thermoelektrische Begriffe und Erläuterungen	4
2	Zur Geschichte der Thermoelektrik	7
2.1	Die Anfänge	7
2.2	Die Erfindung des Thermoelementes	9
2.3	Die Entdeckung weiterer thermoelektrischer Effekte durch Peltier und Thomson	9
2.4	Magnus-Gesetz versus Benedicks-Effekt	11
2.5	Praktische und theoretische Weiterentwicklungen bis zur Neuzeit	13
	Literaturverzeichnis	15
3	Elektrophysikalische Effekte mit thermischem Einfluss oder thermischer Wirkung	17
3.1	Übersicht	17
3.2	Beschreibung ausgewählter Effekte	17
3.2.1	Benedicks-, Thomson-, Seebeck- und Peltier-Effekt	17
3.2.2	Kristallrichtungsabhängige thermische Effekte	18
3.2.3	Thermoelektrischer Druckeffekt	18
3.2.4	Thermoelektrische Effekte bei transversaler magnetischer Durchflutung	20
3.2.5	Thermoelektrische Effekte bei longitudinaler magnetischer Durchflutung	20
	Literaturverzeichnis	22
4	Thermoelektrischer Basiseffekt	23
4.1	Definition und Erläuterung des Basiseffektes	23
4.2	Physikalische Systematik thermoelektrischer Metallwerkstoffe	25
4.2.1	Klassifikation klassischer metallischer Thermomaterialien	25
4.2.2	Charakteristische Temperaturbereiche der Thermomaterialien	27
4.2.3	Energieniveaus thermisch angeregter Elektronen	29
4.2.4	Quantenmechanische Korrekturfaktoren im thermoelektrischen Basismodell	31
4.2.4.1	Betrachtungen zum Vorzeichenwechsel der ASC	31
4.2.4.2	Betrachtungen zu Korrekturfaktoren der ASC	33
4.3	Berechnung des absoluten Seebeck-Koeffizienten	33
4.3.1	Einführung	33
4.3.2	Allgemeiner Thermodiffusionseffekt	34
4.3.3	Einfluss der thermischen Ausdehnung auf die Ladungsträgerdichte	36

4.3.4 Einfluss des Temperaturverlaufes längs des Thermodrahtes.	38
4.3.5 Absoluter Seebeck-Koeffizient $ASC(T)$ bzw. $ASO(T)$	40
4.3.6 Absoluter Seebeck-Koeffizient $aso(T)$ im offenen Thermokreis mit Bezug auf beliebige Temperaturdifferenzen ΔT	43
4.3.7 Absoluter Seebeck-Koeffizient $ASG(T)$ im geschlossenen Thermokreis mit Bezug auf die Kelvin-Temperatur	44
4.4 ASC-Berechnung von Übergangsmetallen	46
4.4.1 Übersicht.	46
4.4.2 Berechnung des ASC von nichtmagnetischen Übergangsmetallen (offener Kreis).	47
4.4.3 ASC-Berechnung für magnetisch geordnete Werkstoffe – der thermoelektrische Spin-Basiseffekt (ASS)	48
4.4.3.1 Einführung	48
4.4.3.2 Der Spin-Seebeck-Koeffizient ASS	51
4.4.4 Der ASC von binären Metallverbindungen bzw. Mischmetallen (ASM)	53
4.4.4.1 Erläuterung	53
4.4.4.2 Berechnungsmodell für den ASM nach Bärner	53
4.5 Verknüpfung von ASC und Wärmekapazität.	55
4.5.1 Wärmekapazität und spezifische Wärme	55
4.5.2 ASC-Berechnungen mittels γ -Koeffizient der Wärmekapazität	57
Literaturverzeichnis	59
5 Verknüpfung des thermoelektrischen Basiseffektes.	61
5.1 Der Seebeck-Effekt – Basiseffekt im Zweileiterkreis.	61
5.1.1 Beschreibung	61
5.1.2 Praktische Kenngrößen des Seebeck-Effektes	62
5.1.2.1 Paarthermokräfte und Seebeck-Koeffizient	62
5.1.2.2 Der thermoelektrische Gütefaktor $ZT(T)$	65
5.1.2.3 Relative Thermospannung	66
5.2 Der Thomson-Effekt	68
5.2.1 Allgemeines	68
5.2.2 Vergleich von $ASC(T)$ und $\tau(T)$	70
5.3 Der Benedicks-Effekt – Wirkung des Basiseffektes im homogenen Leiter	72
5.3.1 Vorbemerkungen.	72
5.3.2 Berechnung der Benedicks-Spannung	73
5.3.3 Temperaturfeldeinfluss und Temperaturfeldkorrektur	75
5.4 Der Peltier-Effekt	76
5.4.1 Erläuterungen	76
5.4.2 Berechnung des Peltier-Koeffizienten	76
5.5 Relationen zwischen den thermoelektrischen Kenngrößen und vorliegenden Temperaturen	78
5.5.1 Erste Thomson-Gleichung	78

5.5.2	Zweite Thomson-Gleichung	78
5.5.3	Das thermoelektrische Dreieck.	79
	Literaturverzeichnis	81
6	Thermoelektrische Basisapplikationen	83
6.1	Thermoelement	83
6.2	Thermosicherung.	84
6.3	Thermogenerator.	85
6.4	Thermoelektrische Kühlelemente	85
	Literaturverzeichnis	86
7	Temperaturmesspraxis mit Thermoelementen	87
7.1	Thermoelektrische Basisschaltungen und Basisapplikationen	87
7.1.1	Schaltungsprinzipien	87
7.1.2	Klassische Zweidrahtbeschaltung.	88
7.1.2.1	Standardbeschaltung für Thermoelemente	88
7.1.2.2	Thermoelektrische Differenzschaltung	89
7.1.2.3	Differenzanordnung zur Tendenzmessung	90
7.1.2.4	Reihen- und Parallelschaltung von Zweidrahtpaarungen	91
7.1.3	Verkettete Schaltungsanordnungen.	94
7.1.3.1	Zweidrahtschaltung mit überbrückter Doppelmessstelle	94
7.1.3.2	Mehrdraht-Reihenschaltung.	95
7.1.3.3	Doppelte Zweidrahtschaltung mit bis zu vier Messstellen	96
7.1.3.4	Verkettete Stufenschaltung	96
7.2	Messung mit Thermoelementen	97
7.2.1	Messprinzip und Kennwertfunktion	97
7.2.2	Messunsicherheit einer Thermoelement-Messkette	99
7.2.3	Faktoren mit Einfluss auf das thermoelektrische Signal.	101
7.2.3.1	Einfluss der elektrischen Isolation	101
7.2.3.2	Einfluss örtlicher Temperaturgradienten.	103
7.2.3.3	Einfluss zeitlicher Temperaturänderungen	104
7.2.3.4	Einfluss mechanischer Belastungen	106
7.2.3.5	Einfluss der Vergleichsstelle	106
7.2.3.6	Einfluss der Einbausituation und elektrischen Korrekturvarianten	107
7.2.4	Selbstüberwachung bei Thermoelement-Messungen	114
7.2.4.1	Einleitung und Überblick	114
7.2.4.2	Kurzschlussfehler	115
7.2.4.3	Selbstüberwachung des Thermometerschutzrohres	117
7.2.4.4	Selbstüberwachung der Drift, des Messkreises und der Isolation.	119
7.3	Technische Ausführungen von Thermoelementen.	119
7.3.1	Einleitung und Begriffe	119
7.3.2	Klassische und DIN-gemäße Thermoelemente.	122

7.3.3 Kabel-Thermoelemente und thermoelektrische Leitungen.	123
7.3.3.1 Kabelthermoelemente.	123
7.3.3.2 Thermo- und Ausgleichsleitungen zum Anschluss von Standardthermoelementen.	123
7.3.4 MIMS-Thermoelemente (Mantelthermoelemente).	125
7.3.4.1 Standardausführungen	125
7.3.4.2 Doppelwandige und konzentrische MIMS-Thermoelemente für Hochtemperaturapplikationen.	128
7.3.5 Sonderbauformen von Thermoelementen.	129
7.3.5.1 Flache scheibenförmige Thermoelemente	129
7.3.5.2 Selbstfedernde Thermoelemente.	130
7.3.5.3 Prozessprüfbare Thermoelemente.	131
7.3.5.4 Automotive Abgasthermoelemente.	132
7.3.5.5 Selbstkalibrierende Thermoelemente	133
7.3.5.6 Multipunkt-Thermoelemente	134
7.3.5.7 Starkströmungsthermoelemente	134
7.3.5.8 Thermoelektrische Eintauchmesslanzen.	136
7.3.5.9 Anlegethermoelemente	137
7.3.6 Sicherheitsrelevante Thermoelemente	140
7.3.6.1 Allgemeine Fragen	140
7.3.6.2 Explosionsgeschützte Thermoelemente	141
7.3.6.3 Thermoelemente für Temperaturbegrenzungssysteme	144
7.3.6.4 Thermoelemente für SIL-Anwendungen	147
7.3.6.5 Thermoelemente für Flammendurchschlagsicherung.	151
7.4 Dynamisches Verhalten von Thermoelementen	152
7.4.1 Begriffsdefinition	152
7.4.2 Grundlagen.	153
7.4.2.1 Allgemeine Betrachtungen	153
7.4.2.2 Beschreibung des dynamischen Verhaltens	153
7.4.3 Größen mit Einfluss auf die Dynamik	154
7.4.4 Maßnahmen zur Verbesserung der Dynamik	156
7.4.5 Messvorrichtungen zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens und typische Dynamikwerte	157
7.5 Driftverhalten von Thermoelementen	158
7.5.1 Ausfallverhalten und Zuverlässigkeit.	158
7.5.2 Thermoelektrische Drift	159
7.5.2.1 Driftbeschreibung, Driftkategorien, Driftfehler	159
7.5.2.2 Applikationsbezogene Driftkurven verschiedener Thermopaare.	161
7.5.3 Methoden der Drifterkennung	165
7.5.3.1 Driftindikation durch Anzeigedifferenz zwischen zwei materialdifferenten Simplexthermoelementen	165
7.5.3.2 Driftindikation durch Anzeigedifferenz zwischen durchmesser-verschiedenen Thermoelementen	166

7.5.3.3 Drifterkennung mittels mehrkanaligem Auswertesystem bei unterschiedlichen Vergleichstemperaturen	167
7.5.3.4 Drifterkennung durch kombinierten Einbau thermoelektrischer und widerstandselektrischer Sensorelemente	175
7.5.4 Driftminimierung	175
7.5.4.1 Pt-Thermopaar mit verschiedenen Schenkeldurchmessern.	175
7.5.4.2 MIMS-Thermoelemente mit Doppelwandung	176
7.5.4.3 Stabilisierungs- und Voralterung von Thermoelementen	177
7.6 Inhomogenitäten in Thermomaterialien	177
7.6.1 Definition und Entstehung	177
7.6.2 Einfluss der Inhomogenität auf die Thermospannung	178
7.6.3 Erfassung von Inhomogenitäten	181
7.6.3.1 Überblick	181
7.6.3.2 Ein-Gradienten-Verfahren.	181
7.6.3.3 Zwei-Gradienten-Verfahren	182
7.6.4 Praktische Auswirkungen der Inhomogenitäten	183
Literaturverzeichnis	184
8 Werkstoffe und Bauteile für Thermoelemente	187
8.1 Einführung	187
8.2 Thermopaare auf Basis edler, Ni- und Cu-basierter und refraktärer Werkstoffe	187
8.2.1 Einleitende Klassifikation.	187
8.2.2 Standardisierte edle Thermopaare	189
8.2.2.1 Allgemeine Werkstoffauswahl für edle Thermopaare.	189
8.2.2.2 Typ S.	191
8.2.2.3 Typ R	191
8.2.2.4 Typ B	192
8.2.3 Nichtstandardisierte edle Thermoelemente.	193
8.2.3.1 Platin-Rhodium-Paarkombinationen.	193
8.2.3.2 Platin-Palladium	195
8.2.3.3 Platin-Molybdän	197
8.2.3.4 Iridium-Rhodium	198
8.2.4 Unedle Cu- und Ni-basierte Thermopaare	199
8.2.4.1 Typ T (Cu/CuNi).	199
8.2.4.2 Typ J (Fe/CuNi)	200
8.2.4.3 Typ E (NiCr/CuNi).	200
8.2.4.4 Typ K	201
8.2.4.5 Typ N	203
8.2.5 Hochtemperatur-Thermopaare	204
8.2.5.1 Anwendungsgebiete und Eigenschaften	204
8.2.5.2 Wolfram-Rhenium-Thermopaare	204
8.2.5.3 Wolfram-Molybdän-Thermopaare	205
8.2.5.4 Molybdän-Rhenium-Thermopaare	206

8.2.6 Vergleich der Hochtemperatur-Thermopaare	206
8.2.7 Tieftemperaturthermoelemente.	208
8.3 Metallschutzrohre für die Hochtemperaturmesstechnik	209
8.3.1 Anforderungen an Schutzrohrmaterialien im Hochtemperaturbereich.	209
8.3.1.1 Überblick	209
8.3.1.2 Typische Werkstoffe für den Einsatz bei mittleren Temperaturen	210
8.3.1.3 Beachtenswerte Faktoren bei der Einsatzplanung – Schwingungsstabilität, Fertigungstechnik, Schutzrohrform.	212
8.3.2 Schutzrohre aus Superlegierungen auf Fe-, Co- und Ni-Basis	215
8.3.2.1 Eigenschaften und Charakterisierung von Superlegierungen	215
8.3.2.2 Nickel-Basis-Superlegierungen	217
8.3.2.3 Kobalt-Basis-Superlegierungen	217
8.3.2.4 Eisen-Basis-Superlegierungen	218
8.3.2.5 Vergleich der Superlegierungen	218
8.3.3 Schutzrohre aus hochschmelzenden Legierungen	220
8.3.3.1 Überblick und Abgrenzung.	220
8.3.3.2 Wolfram und Wolframlegierungen	221
8.3.3.3 Molybdän und Molybdänlegierungen.	222
8.3.3.4 Tantal und Niob und Tantal bzw. Nioblegierungen.	223
8.3.3.5 Vergleich der refraktären Metalle	224
8.4 Keramische, metallkeramische und keramisch-beschichtete Schutzrohre	226
8.4.1 Überblick	226
8.4.2 Schutzrohre aus oxidischer Keramik	227
8.4.3 Schutzrohre aus nichtoxidischer Keramik	227
8.4.4 Metallkeramische und superlegierte Spezial-Schutzrohre	228
8.4.5 Keramische Beschichtung von Schutzrohren	228
8.5 Mantelwerkstoffe für Mantelthermoelemente.	229
8.5.1 Überblick zur Verwendung von Mantelthermoelementen	229
8.5.2 Werkstoffauswahl für Mantelmaterialien	230
8.5.3 Wärmedehnung/Wärmespannung ausgewählter Mantelmaterialien in Verbindung mit den Thermopaaren Typ K und Typ N	231
Literaturverzeichnis	233
9 Ausblick und Perspektive.	237
Sachverzeichnis	241