

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	1
1.1	Überblick zur Thematik des Buches	1
1.2	Thermoelektrische Begriffe und Erläuterungen	4
<b>2</b>	<b>Zur Geschichte der Thermoelektrik</b>	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
<b>3</b>	<b>Elektrophysikalische Effekte mit thermischem Einfluss oder thermischer Wirkung</b>	17
3.1	Übersicht	17
3.2	Beschreibung ausgewählter Effekte 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
<b>4</b>	<b>Thermoelektrischer Basiseffekt</b>	23
4.1	Definition und Erläuterung des Basiseffektes	23
4.2	Physikalische Systematik thermoelektrischer Metallwerkstoffe 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 $\Delta T$ . . . . .	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 $\gamma$ -Koeffizient der Wärmekapazität . . . . .	57
Literaturverzeichnis . . . . .	59
<b>5 Verknüpfung des thermoelektrischen Basiseffektes . . . . .</b>	<b>61</b>
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 Paarthermokraft 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
<b>6 Thermoelektrische Basisapplikationen . . . . .</b>	<b>83</b>
6.1 Thermoelement . . . . .	83
6.2 Thermosicherung . . . . .	84
6.3 Thermogenerator . . . . .	85
6.4 Thermoelektrische Kühelemente . . . . .	85
Literaturverzeichnis . . . . .	86
<b>7 Temperaturmesspraxis mit Thermoelementen . . . . .</b>	<b>87</b>
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
<b>8 Werkstoffe und Bauteile für Thermoelemente . . . . .</b>	<b>187</b>
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 Hochtemperaturnesstechnik . . . . .	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
<b>9 Ausblick und Perspektive . . . . .</b>	<b>237</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>241</b>