

Dipl.-Ing. Rainer Holmer, Grafing

**Untersuchungen zur
Genauigkeitssteigerung
der kalibrationsfreien
Temperaturmessung mit
Halbleiter-pn-Übergängen**

Reihe **8**: Meß-, Steuerungs-
und Regelungstechnik

Nr. **587**

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	1
1. Einleitung	3
1.1 Allgemeine Motivation der Temperaturmessung	3
1.2 Besondere Bedeutung der absoluten Temperatur	4
1.3 Der pn-Übergang im Halbleiter als Absoluttemperatursensor	5
2. Temperaturdefinition - Grundlagen der Temperaturmessung	7
2.1 Die thermodynamische Temperatur	7
2.2 Primäre und sekundäre Thermometer	12
2.2.1 Primäre Thermometer als Präzisions-Temperaturstandards	12
2.2.2 Sekundäre Thermometer	13
2.3 Die Internationale Temperaturskala von 1990 - ITS 90	14
3. Physikalische Grundlagen des pn-Übergangs im Halbleiter	17
3.1 Grundlegende Gleichungen zur Beschreibung von Halbleiterbauelementen	17
3.1.1 Poisson-Gleichung für den homogenen, isotropen Halbleiter	17
3.1.2 Gleichungen für die Elektronen- und Löcherstromdichte	19
3.1.3 Kontinuitätsgleichungen	20
3.1.4 Zusammenfassende Darstellung der Halbleiter-Grundgleichungen für den eindimensionalen Fall	21
3.2 Schwache Injektion von Ladungsträgern im Halbleiter	22
3.2.1 Definition des schwachen Injektionsfalles	22
3.2.2 Schwache Injektion in den einseitig unendlichen Halbleiter	24
3.2.3 Schwache Injektion in den beidseitig begrenzten Halbleiter mit definierter Randbedingung	26

3.3 Ideale Strom-Spannungs-Kennlinie eines pn-Übergangs nach SHOCKLEY	27
3.3.1 Grundlegende Annahmen	27
3.3.2 Ideale Strom-Spannungs-Kennlinie nach SHOCKLEY	29
3.3.3 Abweichungen realer Strom-Spannungs-Kennlinien vom idealen Verlauf nach SHOCKLEY	35
4. Stand der Technik im Bereich der Temperaturmeßverfahren auf der Basis von Halbleiter-pn-Übergängen	36
4.1 Temperaturmessung unter Nutzung eines Strom-Spannungs-Punktes	36
4.2 Temperaturmessung unter Nutzung zweier Strom-Spannungs-Punkte - PTAT-Sensoren (Methode nach VERSTER)	39
4.3 Industrielle Ausführungsformen von PTAT-Sensoren	41
4.3.1 Sensoren mit temperaturproportionalem Spannungs-Ausgang	41
4.3.2 Sensoren mit temperaturproportionalem Strom-Ausgang	42
4.3.3 Sensoren mit digitalem Ausgang	43
4.4 Zusammenfassende Genauigkeitsbetrachtung zu den vorgestellten Sensorprinzipien	44
5. Systematische Temperaturmeßfehler bei Halbleiter-pn-Temperatursensoren - Ursachen und Lösungsmöglichkeiten	47
5.1 Temperaturmeßfehler durch Abweichungen zwischen idealer und realer Strom-Spannungs-Kennlinie	47
5.1.1 Generation und Rekombination von Ladungsträgern in der Raumladungszone	48
5.1.2 Hochinjektionseffekte	58
5.1.3 Bahnwiderstandseffekt	61
5.1.4 Zusammenfassende Darstellung der Abweichungen und deren Auswirkung auf die Temperaturmessung nach VERSTER	63
5.2 Grenzen der Korrekturmöglichkeiten durch formal-mathematische Modellierung der Nichtlinearität der Strom-Spannungs-Kennlinie	65

5.3 Korrektur der systematischen Temperaturmeßfehler durch den Einsatz eines genaueren, physikalisch begründeten, analytischen Modells für die Strom-Spannungs-Kennlinie	68
6. Das GUMMEL-POON-Modell	69
6.1 Grundkonzept des GUMMEL-POON-Modells	69
6.2 Ableitung der Modellgleichungen	73
6.3 Zusammenfassende Darstellung des GUMMEL-POON-Modells	78
6.4 Reduziertes GUMMEL-POON-Modell	80
6.5 Verlauf der Strom-Spannungs-Kennlinie nach dem GUMMEL-POON-Modell	84
7. Temperaturbestimmung durch Parameterextraktion	86
7.1 Allgemeine Vorgehensweise	86
7.2 Spezielles Verfahren der nichtlinearen Optimierung als Werkzeug zur Temperaturbestimmung	87
7.2.1 Formulierung des Optimierungsproblems	88
7.2.2 Schwerpunktverfahren mit integriertem Schätzalgorithmus zur Startwertgewinnung	90
7.2.3 Gradientenverfahren zur Parameterextraktion durch nichtlineare Optimierung	96
8. Messung und Temperatúrauswertung der Strom-Spannungs-Kennlinien von pn-Übergängen	99
8.1 Meßaufbau	99
8.2 Dimensionierung des Strombereiches - Auswahl geeigneter Bauelemente .	103
8.3 Messung von Strom-Spannungs-Kennlinien	108
8.4 Temperatúrauswertung beispielhafter Strom-Spannungs-Kennlinien	113
8.5 Ursachen und Auswirkungen von zufälligen Meßfehlern bei der Aufnahme der Strom-Spannungs-Kennlinien	117

VIII

9. Betrachtungen zur Kalibrationsfreiheit des Meßverfahrens	122
9.1 Das Gasthermometer als primäres Thermometer	122
9.2 Die Temperaturmessung nach VERSTER im Vergleich	123
9.3 Temperaturmessung durch Parameterextraktion auf Basis des GUMMEL-POON-Modells im Vergleich	124
10. Ausblick	127
Literaturverzeichnis	129