

Redundante Temperatursensorik für Hochtemperaturanwendungen

I. Tobehn-Steinhäuser¹, L. Barthelmann^{1,2}, S. Herbst¹, Xuemei Xu¹, G. Krapf² und T. Ortlepp¹

¹CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH, Erfurt, Deutschland

²Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, TU Ilmenau, Ilmenau, Deutschland

Kontakt: itobehn@cismst.de

1 Einleitung

Um die Betriebssicherheit von Sensorsystemen zu erhöhen, wird das Prinzip der Redundanz angewendet. Hierbei wird eine bestimmte Anzahl an zusätzlichen Sensorelementen bereitgestellt, die im Fall eines Ausfalls die Funktion des fehlerhaften Sensorelements komplett übernehmen können. Als Unterscheidungsmerkmal werden beim Aufbau von redundanten Systemen zwei Kategorien unterschieden: Das System besteht aus Sensorelementen gleicher oder unterschiedlicher Technologie (bzw. Kennlinie) [1]. Der erste Fall wird als *homogene*, der letzte als *diversitäre Redundanz* bezeichnet. Letztere Bauweise weist den wesentlichen Vorteil auf, die Wahrscheinlichkeit eines gleichzeitigen Ausfalls aller Sensoren durch die gleiche Ursache signifikant zu minimieren.

Aus diesem Grund wurde ein diversitär aufgebautes, redundantes Sensorsystem zur Temperaturmessung entwickelt. Dieses besteht aus einer vom CiS Forschungsinstitut optimierten Halbleiterdiode sowie einem industriell gefertigten Platin-Widerstandsthermometer (Pt1000). Die Verwendung von Widerstandsthermometern und Dioden zum Zwecke der Temperaturmessung zählt zu den sekundären Temperaturmessverfahren, d.h. zum Ausdrücken der Temperatur wird eine Abbildungsgröße $X_A(T)$ verwendet. Bei der Diode ist dies die Flussspannung U_F in Durchlassrichtung und bei dem Platin-Widerstandsthermometer der Widerstand R . Abb. 1 und Abb. 2 zeigen die unterschiedlichen Kennlinien der Sensorelemente in einem Temperaturbereich von -40 °C bis $+140\text{ °C}$. Wie in Abb. 1 zu erkennen ist, sinkt die über dem pn-Übergang abfallende Flussspannung mit steigender Temperatur, während sich in Abb. 2 der Widerstand mit steigender Temperatur erhöht. Die Abbildungsgrößen weisen einen annähernd linearen Zusammenhang zur Temperatur auf, weswegen beide Sensorelemente eine für die Temperaturmessung geeignete Kennlinie aufweisen.

Für Hochtemperaturanwendungen sind Temperaturen größer 140 °C zu erwarten. Vor diesem Hintergrund werden die Bauelemente des Redundanzsensors bei höheren Temperaturen, als in Abb. 1 und Abb. 2 gezeigt, untersucht. Da Platin-Widerstandsthermometer eine nach [2] genormte Kennlinie bis 850 °C besitzen, liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen bei den Halbleiterdioden.

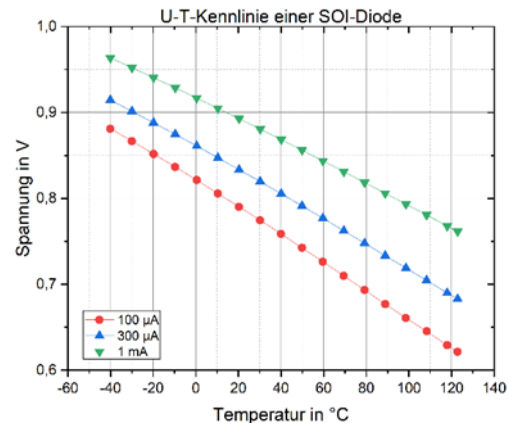


Abb. 1: Charakteristische U-T-Kennlinien einer Diode im Temperaturbereich von -40 °C bis $+140\text{ °C}$

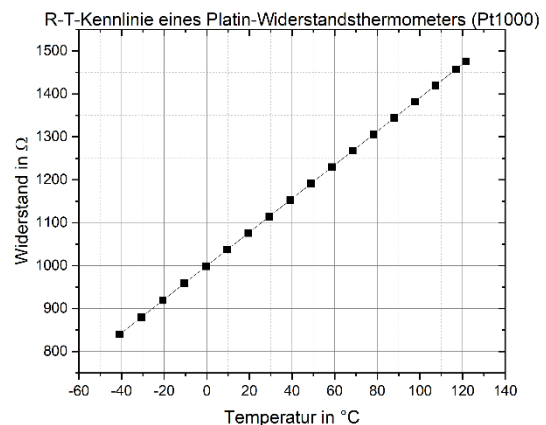


Abb. 2: Charakteristische R-T-Kennlinie eines Pt1000 im Temperaturbereich von -40 °C bis $+140\text{ °C}$

2 Experimenteller Aufbau

2.1 Die Temperaturdioden für einen Temperaturbereich von -40 °C bis $+140\text{ °C}$

Abb. 3 und Abb. 4 zeigen die Layouts der im Redundanzsystem untersuchten Temperaturdioden. Dabei wurden zwei Diodentypen (DO101 und D5_07) verwendet.

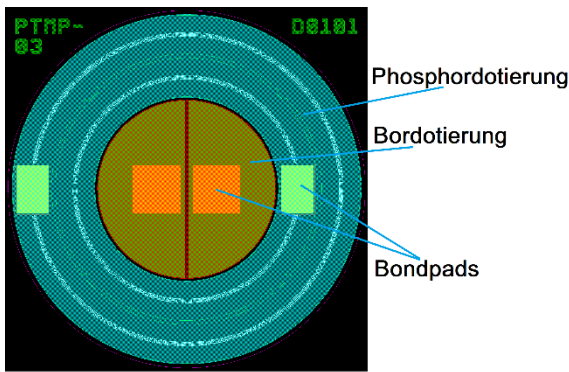


Abb. 3: Layout der Diode des Typs DO101

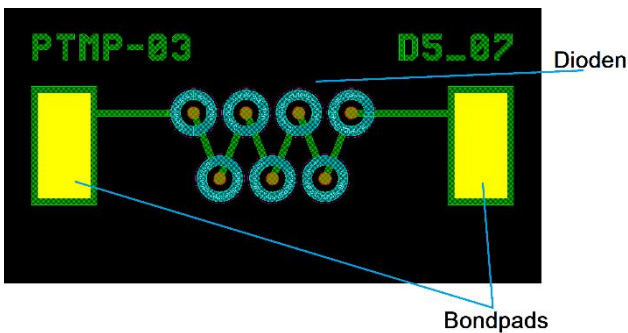


Abb. 4: Layout der Diode des Typs D5_07

In Abb. 3 befindet sich das p-Gebiet im mittleren Vollkreis, während das n-Gebiet durch den äußeren Kreisring dargestellt wird. In Abb. 4 handelt es sich um eine Reihenschaltung von insgesamt sieben Dioden. Diese besitzen jeweils den gleichen Aufbau wie die in Abb. 3 dargestellte Diode; innen das p-Gebiet und außen das n-Gebiet. Über die markierten Bondpads ist es möglich auf das p- bzw. n-Gebiet der Dioden zuzugreifen.

Abb. 5 zeigt den Technologiequerschnitt mit den verwendeten Schichtmaterialien für die Herstellung der Dioden. Für die Verhaugung des gesamten Chips wird eine Verglasung gewählt. Der Grund hierfür ist, dass dadurch eine bestmögliche Minimierung der Dunkelströme zu erwarten ist. Damit die Chips aber die bei der Verglasung auftretenden Temperaturen von 600 °C ohne Beschädigung überstehen, kann keine Standardmetallisierung aus Aluminium-Silizid verwendet werden. Deshalb werden die Chips mit einer Wolframmetallisierung hergestellt. Tab. 1 und Tab. 2 zeigen die im Herstellungsprozess verwendeten Werte für Schichtdicke und spezifischen Widerstand sowie deren Abweichungsbereich.

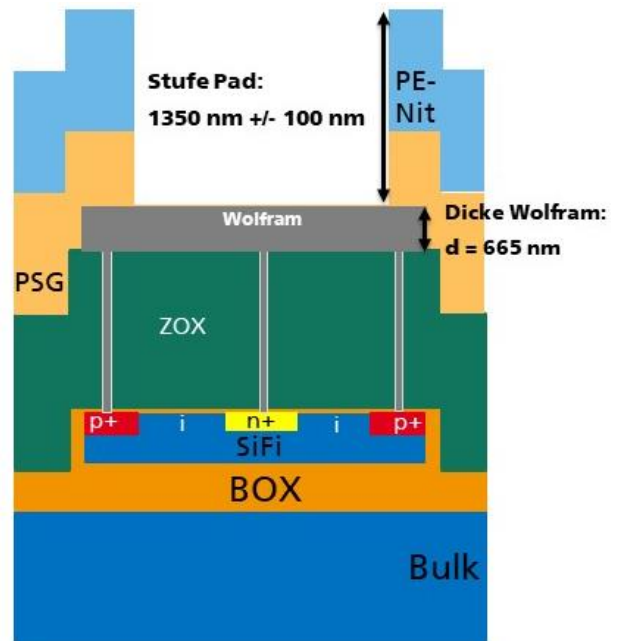


Abb. 5: Technologiequerschnitt einer Diode zur Veranschaulichung des Schichtaufbaus sowie der verwendeten Materialien

Tab. 1: Übersicht der Schichtdicken und deren Abweichungsbereich

	Schichtdicke [nm]		
	Min	Target	Max
SOI-Film	201,5	206,6	211,5
Burried-Oxide (BOX)	390	400	410
Gesamtdicke	710000	725000	740000

Tab. 2: Übersicht der spezifischen Widerstandswerte und deren Abweichungsbereich

Dotant: Phosphor	Widerstand [Ohm*cm]		
	Min	Target	Max
SOI-Film	15	42,8	70,6
Basewafer	30	42,8	55,6

Da das Fraunhofer IMS [3] in Duisburg diese Technologie sehr gut beherrscht, werden dort die Dioden in einem Dünnschicht-SOI-Prozess auf 8" Wafer gefertigt. Die Wafer werden anschließend in weiteren Herstellungsschritten von 8" auf 4" verkleinert („Down-Sizing“) und abgedünnt. Anschließend werden die Bondpads der Dioden bei Siebert TFT [4] in Hermsdorf mit einer Goldschicht versehen, um die Bondbarkeit sicherzustellen [5, 6].

2.2 Der Platinschichtwiderstand

Das zweite Sensorelement ist ein Platin-Widerstandsthermometer mit einem Grundwiderstand von $R_0 = 1000 \Omega$ (Pt1000), hergestellt durch die UST Umweltsensorik GmbH in Geschwenda [7]. Das Grundmaterial des Sensors besteht aus Keramik, auf welchem eine dünne Leiterbahn aus Platin aufgedampft ist. Abb. 6 zeigt das Design des Sensors mit den Grundabmaßen $l = 3 \text{ mm}$ und $b = 2 \text{ mm}$.

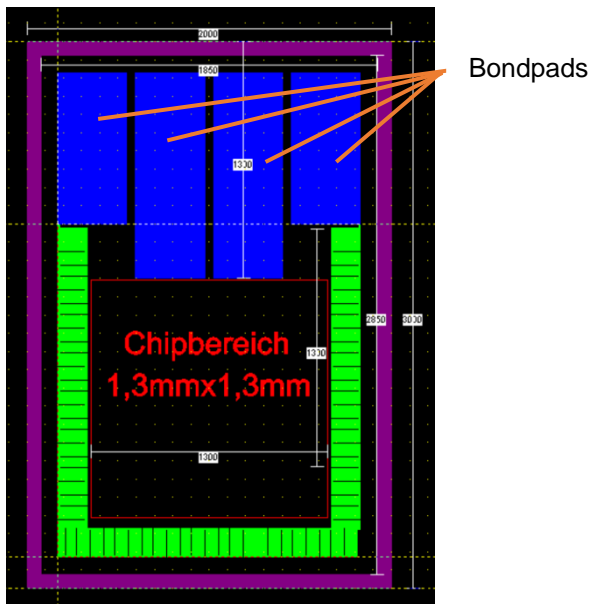


Abb. 6: Layout des Platin-Widerstandsthermometers (Pt1000)

Beim Design des Sensors müssen diese Grundabmaße eingehalten werden, damit sie mit den Fertigungsautomaten verarbeitbar sind. Der in Abb. 6 gekennzeichnete Chipbereich ist für das Aufbringen der Halbleiterdiode vorgesehen. Von den Kontakten des p- und n-Gebietes der aufzubringenden Diode führt jeweils ein Bonddraht zu den mittleren beiden Bondpads der Keramik des Platin-Widerstandsthermometers. Die äußeren beiden Bondpads der Keramik sind die Kontakte des Platinwiderstandes. Somit ist es möglich über die mittleren und äußeren beiden Bondpads auf das p- und n-Gebiet der Diode sowie auf die Anschlüsse des Widerstandes zuzugreifen [5, 6].

2.3 Der kombinierte Sensor

Die Diode wird mithilfe eines Glaslots auf der Keramik des Pt1000 befestigt (siehe Abb. 7). Hierfür wird das Lot auf der Keramik verteilt („dispensed“) und anschließend getrocknet. Beim Umschmelzen, welches bei $430 \text{ }^\circ\text{C}$ stattfindet, wird der Chip auf das Glaslot gesetzt und sinkt anschließend in das halbflüssige Glas ein. Das Lot hat den Vorteil chemisch resistent

zu sein. Es wurde kein herkömmlicher Kleber verwendet, da das Sensorsystem anschließend verglast werden soll. Durch die hohe thermische Belastung des Verglasens (bei $\approx 600 \text{ }^\circ\text{C}$) ist es notwendig, ein Glaslot zu benutzen. Andere Versuche haben gezeigt, dass die Verwendung eines Glaslots mit einer Umschmelztemperatur von $475 \text{ }^\circ\text{C}$ eine bessere thermische Stabilität beim Verglasen erzielt [5, 6].

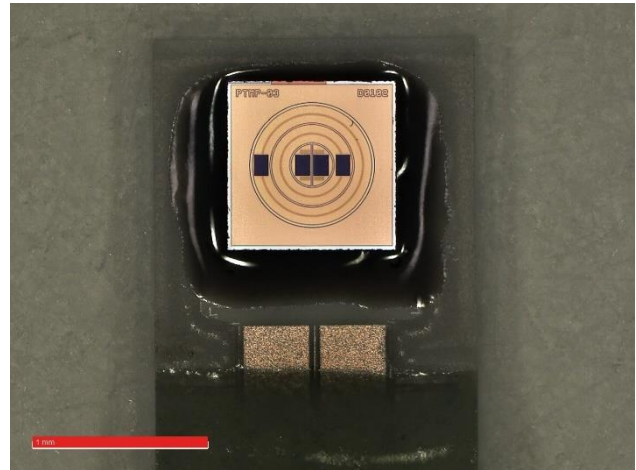


Abb. 7: Realisiertes Redundanzsystem aus Diode und Platin-Widerstandsthermometer

2.4 Die Elektronik und Auswertesoftware

Um den Widerstand des Pt1000 und die Flussspannung der Diode gleichzeitig auszulesen, wurde die in Abb. 8 gezeigte Messelektronik entwickelt.



Abb. 8: Messelektronik zur Auswertung der Rohdaten der Sensorelemente

In Abb. 8 ist auf der linken Seite der sechspolige DIN-Rundsteckverbinder zu sehen. Dieser wird mit den DIN-Steckern der Messproben verbunden. Auf der rechten Seite ist die Mini-USB-Buchse angebracht, welche über ein Mini-USB zu USB-Kabel mit einem Computer verbunden wird. Die Leiterkarte ist bestückt mit drei elektronischen Baugruppen. Die erste ist ein Mikrocontroller der Kennung AT-MEGA32U4. Dieser überträgt die Daten über einen

virtuellen, seriellen COM-Port an einen PC. Um die Diode mit einem Strom von $100\ \mu\text{A}$ zu speisen, wird eine Konstantstromquelle verwendet. Das zweite Bauelement ist ein LTC2461 für die Digitalisierung der analogen Diodenflussspannung. Diese Komponente wird in Kombination mit einem Operationsverstärker LM358D der Firma Linear Technology verwendet. Die dritte Hauptkomponente ist ein RTD-Konverter der Kennung MAX31865 der Firma Maxim Integrated. Dieser ermöglicht es, den Messwert des im Redundanzsystem verwendeten Platin-Widerstandes zu digitalisieren [6].

Um die Widerstände und Flussspannungen direkt in Temperaturen umzurechnen, wurde neben der Leiterkarte eine Software entwickelt (siehe Abb. 9). Durch die Eingabe der Kennlinienparameter p , q und r wird der Widerstands- bzw. Flussspannungswert in eine Temperatur umgerechnet und angezeigt. Zusätzlich ist es möglich die errechneten Temperaturen und Rohdaten in bestimmten Messintervallen in einer separaten Datei zu speichern. Dabei erlaubt ein Softwarefenster und eine Leiterkarte jeweils das Auslesen der Daten eines Redundanzsystems [6].

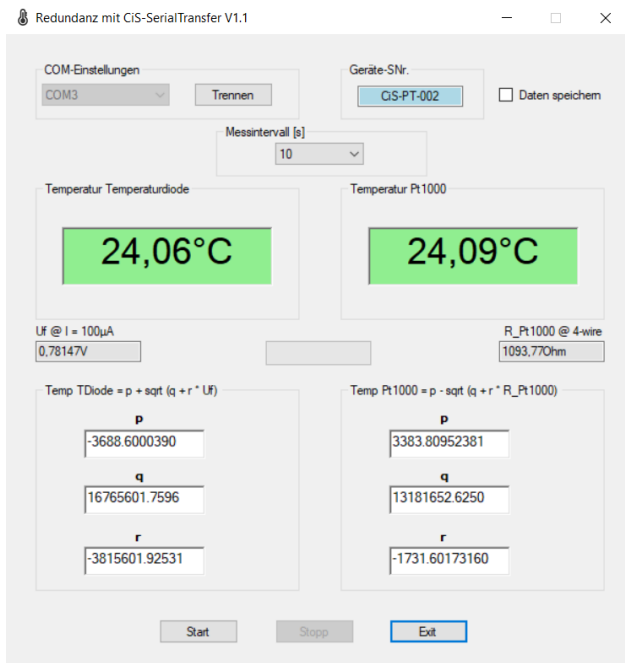


Abb. 9: Software zur Auswertung der Messdaten und Anzeige der Temperaturwerte, Kennlinienparameter p , q sowie r frei wählbar

2.5 Halbleiterdioden im Hochtemperaturbereich ($60\ \text{°C}$ bis $400\ \text{°C}$)

Die temperaturabhängige Flussspannung der Dioden wird in einem programmierbaren Hochtemperaturofen (Carbolite Gero) bis $400\ \text{°C}$ untersucht. Aufgrund der hohen Temperaturen ist der Einsatz von

Lötverbindungen innerhalb der Ofenkammer nicht möglich. Aus diesem Grund werden hitzebeständige Leiter mit der Bezeichnung HELUTHERM 400 der Firma Helukabel verwendet. Jeweils zwei Dioden werden auf einen TO8-Sockel gebondet, an dessen Beinchen die Litzen der temperaturstabilen Leiter gecrimpt sind (siehe Abb. 10). Die Hochtemperaturkabel werden aus der Probenkammer herausgeführt und mit den Messgeräten verbunden. Als Temperaturreferenz zur Messung der Temperatur innerhalb des Ofens wird ein Pt100 verwendet.



Abb. 10: Visualisierung der Messproben sowie deren Verbindung mit den Hochtemperaturkabeln (links: Sockel ohne Abdeckung, rechts: Sockel mit Abdeckung)

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Untersuchung der Redundanzsensoren in einem Temperaturbereich von $-40\ \text{°C}$ bis $+140\ \text{°C}$

Abb. 11 und Abb. 12 zeigen die Ergebnisse der Untersuchungen der einzelnen Sensorelemente. Um eine annähernd gleiche Temperatur für alle Sensoren einer Stichprobe sicherzustellen, werden die Proben in den Bohrungen eines Kupferblockes fixiert. Dabei wird die Temperatur des Kupferblockes mit zwei Referenz-Platin-Widerstandsthermometern gemessen und dessen Mittelwert im Folgenden als Temperatursollwert angenommen.

In Abb. 11 wird die in Abb. 1 gezeigte Diodenkennlinie bei $I = 100\ \mu\text{A}$ als Grundlage der Auswertung verwendet. Die U-T-Kennlinie in Abb. 1 wird mithilfe einer linearen Funktion approximiert. Die Stützpunkte hierfür werden durch den ersten und letzten Punkt des Messbereiches angegeben. Die lineare Funktion wird anschließend von der gemessenen U-T-Kennlinie subtrahiert. Das Resultat ist eine U-T-Kennlinie, die ausschließlich den nichtlinearen Anteil der gemessenen Kennlinie visualisiert. Aus einer Stichprobe von insgesamt acht untersuchten Proben ergeben sich nach Abzug des linearen Anteils somit acht Parabeln. Aus diesen wird eine gemeinsame Funktion durch Mittelwertbildung an jedem Temperaturpunkt ermittelt. Die Dioden weisen eine maximale

Standardabweichung des Mittelwertes von $\pm 0,65$ mV bei einem Vertrauensbereich von $P = 1 - \alpha = 95,4\%$ und einem t-Wert von 2,4 für eine Stichprobe von $n = 8$ auf. Je höher der Messstrom der Dioden gewählt wird, desto kleiner werden die Exemplarstreuungen der Stichprobe. Jedoch geht mit der Erhöhung des Messstroms auch eine Erhöhung der Eigenerwärmung einher. Ein guter Kompromiss konnte hier bei einem Strom von $I = 100 \mu\text{A}$ gefunden werden [8].

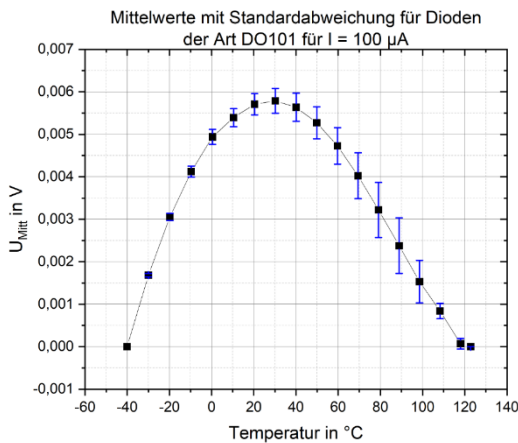


Abb. 11: Darstellung der gemeinsamen Kennlinie von Dioden des Typs DO101 für Temperaturen von -40 °C bis $+140 \text{ °C}$ (Stichprobe $n = 8$)

In Abb. 12 wird eine Stichprobe an Platin-Widerstandsthermometern (siehe Punkt 2.2) auf Einhaltung der vom Hersteller garantierten Genauigkeitsklasse A geprüft [8]. Die Prüfung sowie die Angabe der Genauigkeitsklasse erfolgen nach DIN 60751. Erkennlich ist, dass alle untersuchten Widerstände im geforderten Toleranzbereich liegen. Grundlage für die Auswertung bildet die in Abb. 2 gemessene R-T-Kennlinie des Pt1000.

Ausgehend von der genormten Kennliniengleichung für den Temperaturbereich von 0 °C bis 850 °C wird die Umkehrfunktion gebildet. Für die Stückprüfung wird der Messpunkt aus Abb. 2 verwendet, der einer Temperatur von 0 °C am nächsten kommt. Dieser ist in Abb. 11 als T_{Soll} bezeichnet. In die Umkehrfunktion wird der Widerstandswert nahe 0 °C eingesetzt und die Temperatur berechnet. Dafür werden die in der DIN 60751 angegebenen Werte für A und B sowie ein Grundwiderstand von $R_0 = 1000 \Omega$ verwendet. Abschließend wird die Differenz zwischen dem Sollwert des Kupferblockes und der über die Umkehrfunktion berechneten Temperatur gebildet sowie deren kombinierte Standardunsicherheit angegeben. Die in Abb. 12 gezeigten kombinierten Unsicherheiten wurden zuvor mit einem Dehnungsfaktor von $k = 2$ multipliziert (vgl. [2]).

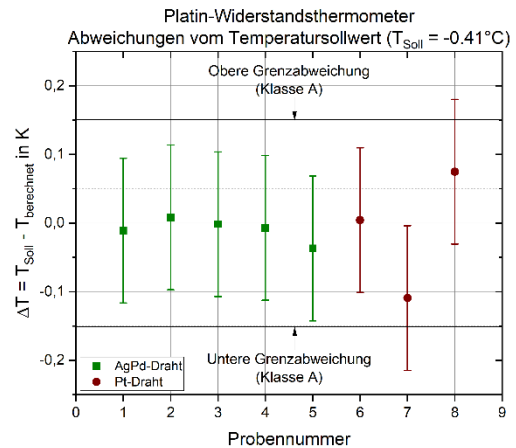


Abb. 12: Abweichungen des berechneten Temperaturwertes vom Sollwert des Kupferblockes mit kombinierter Standardunsicherheit ($k = 2$), Proben mit verschiedenem Anschlussdrahtmaterial

Abschließend lässt sich sagen, dass das entwickelte Redundanzsystem in Kombination mit der Messelektronik den von den Industriepartnern geforderten Anforderungen entspricht und eine Serienreihe in absehbarer Zeit erreicht werden kann.

3.2 Ergebnisse der Untersuchung der Halbleiterdioden im Hochtemperaturbereich (60 °C bis 400 °C)

Abb. 13 zeigt exemplarisch die Spannungs-Temperatur-Kennlinien einer Diode für mehrere Ströme.

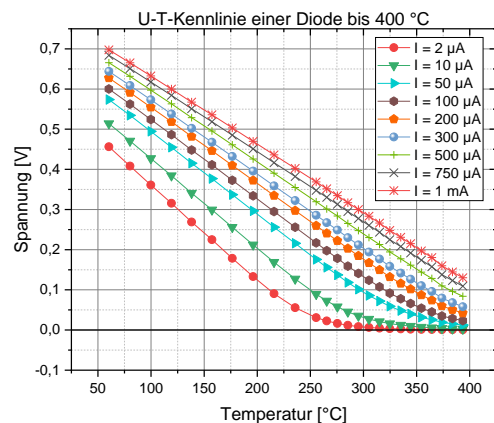


Abb. 13: Charakteristische U-T-Kennlinien einer Diode im Temperaturbereich von 60 °C bis 400 °C

Insbesondere bei kleineren Strömen nähert sich die Flussspannung dem Wert 0 an. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass beim Einsatz kleiner Betriebsströme der nutzbare Temperaturbereich auch kleiner wird, da ab einem bestimmten Punkt die Empfindlichkeit des Sensors sehr klein bzw. zu Null wird.

Abb. 13 visualisiert zudem auch, dass die Dioden für eine sehr große Temperaturspanne als zuverlässige Temperatursensoren verwendet werden können. Ein weiterer entscheidender Vorteil ist die annähernde Linearität der Kennlinie, d. h. die Empfindlichkeit des Sensors ist über den untersuchten Temperaturbereich für große Messströme annähernd konstant. Bei kleineren Strömen ist die Empfindlichkeit für einen eingeschränkten Temperaturbereich ebenfalls annähernd linear.

3.3 Vergleichskalibrierung an der TU Ilmenau im Temperaturbereich von -40 °C bis $+140\text{ °C}$

Im Weiteren wurde an der TU Ilmenau [9] eine Kalibrierung der Dioden mittels Fixpunktzellen durchgeführt. Hierfür werden die in Tab. 3 aufgeführten Fixpunkte der ITS-90 verwendet. Abschließend werden die erzielten Genauigkeiten der Dioden mit den in der DIN 60751 definierten Genauigkeitsklassen von Platin-Widerstandsthermometern verglichen (siehe Abb. 14).

Tab. 3: Auflistung der erreichten Kalibrierunsicherheiten bei der Vergleichskalibrierung an der TU Ilmenau für verschiedene Fixpunkte der ITS-90 [10]

Fixpunkt der ITS-90	Fixpunkttemperatur	Kalibrierunsicherheit
Quecksilbertripelpunkt	$-38,834\text{ °C}$	3 mK
Wassertripelpunkt	$0,010\text{ °C}$	2 mK
Galliumschmelzpunkt	$29,765\text{ °C}$	3 mK
Indiumerstarrungspunkt	$156,599\text{ °C}$	4 mK
Zinnerstarrungspunkt	$231,928\text{ °C}$	5 mK

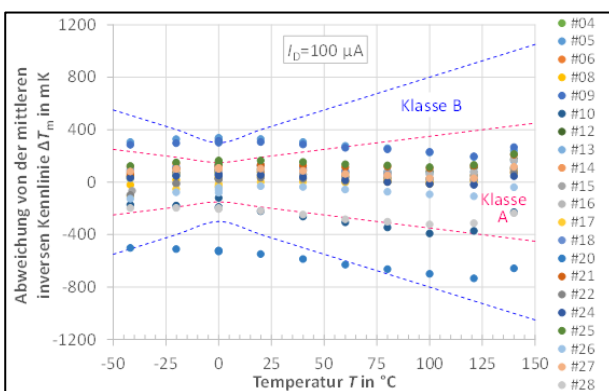


Abb. 14: Abweichungen von der gemeinsamen inversen Kennlinie und Vergleich der Genauigkeiten von Dioden und Pt100 [10]

Als Ergebnis ist zu schlussfolgern, dass die Dioden, bis auf wenige Ausnahmen, eine gleichwertige

Genauigkeit zu den definierten Klassen A und B von Widerstandsthermometern erreichen.

4 Literatur

- [1] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI): *Redundanz – Modularität - Skalierbarkeit*. Bonn, 2018
- [2] DIN EN 60751:2009-05: *Industrielle Platin-Widerstandsthermometer und Platin-Temperatur Sensoren*. 2005
- [3] Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme IMS, Finkenstraße 61, 47057 Duisburg, Deutschland
- [4] Siegert Thinfilm Technology GmbH, Wilhelm-Conrad-Röntgen-Straße 2, 07629 Hermsdorf, Deutschland
- [5] Tagungsband, Clusterkonferenz microTEC Südwest, Freiburg, 2022
- [6] Tagungsband, 11. GMM-Fachtagung Energie Autonome Sensorsysteme, Erfurt, 2022
- [7] UST Umweltsensortechnik GmbH, Dieselstraße 2 und 4, 99331 Geratal OT Geschwenda, Deutschland
- [8] BARTHELMANN, L.: *Messtechnische Untersuchung redundanter Temperaturmesssysteme im Temperaturbereich von -40 °C bis $+140\text{ °C}$* . Technische Universität Ilmenau, Bachelorarbeit, 2022
- [9] Technische Universität Ilmenau, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, Ehrenbergstraße 29, 98693
- [10] KRAPF, G.: *Messtechnische Untersuchung der temperaturabhängigen Strom-Spannungs-Kennlinien von Thermometern auf Halbleiterbasis – Untersuchung von 28 Thermometern ohne thermische Vorbehandlung*. Technische Universität Ilmenau, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, 2021, S. 9, 21

5 Danksagung

Besonderen Dank gilt u. a. dem Fraunhofer-Institut in Duisburg, der Siegert Thinfilm Technology GmbH sowie der UST Umweltsensortechnik GmbH, die wesentlich an der Fertigung des Redundanzsensors beteiligt waren. Außerdem soll auch die Kooperation mit der Technischen Universität Ilmenau hervorgehoben werden. Zusätzlich danken wir dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die finanzielle Unterstützung des Projektes Redundanz (FKZ 49MF200075).