

Versuch TEMP

Temperaturmessung mit verschiedenen Sensoren und Messverfahren

1 Versuchsziel

- Erfahrungen mit Einsatz und Schaltungstechnik verschiedener Temperatursensoren,
- Einsatz von Messdatenerfassungssoft- und -hardware (LabVIEW),
- fachgerechter Umgang mit Messabweichungen und Messunsicherheiten,
- Parameterermittlung durch Kurvenapproximation.

Eingesetzte Sensorelemente:

Pt-100-Element in der Mehrzahl der industriellen Anwendungen zu finden
NTC (negative temperature coefficient)

2 Vorbereitung

1. Die nichtlineare Temperaturabhängigkeit beim Pt-100 - Widerstand ist nach DIN EN 60751(IEC 751) für $\vartheta \geq 0^\circ\text{C}$ gegeben durch

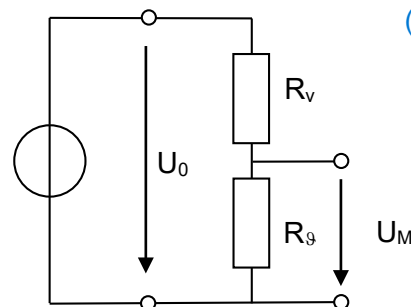
$$R(\vartheta) = R_0 \cdot (1 + A \cdot \vartheta + B \cdot \vartheta^2)$$

mit $R_0 = 100\ \Omega$, $A = 3,9083 \cdot 10^{-3}^\circ\text{C}^{-1}$, $B = -5,775 \cdot 10^{-7}^\circ\text{C}^{-2}$.

Wie lautet die Umkehrfunktion $\vartheta(R)$? Prüfen Sie, ob sich damit $\vartheta(100\ \Omega) = 0^\circ\text{C}$ ergibt.

2. Leiten Sie daraus die Gleichung für $\Delta\vartheta$, die Unsicherheit der Temperatur, bei gegebener Unsicherheit des Widerstands ΔR her.

3. Wie lässt sich in der nebenstehenden Messschaltung der gesuchte temperaturabhängige Widerstand aus den Messspannungen U_0 und U_M (und R_v) bestimmen?



$$(U_M \cdot R_v) / (U_0 - U_M) = R_\theta$$

4. Die theoretische Kennlinie eines NTC ist

$$R(T) = R(T_0) \cdot e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

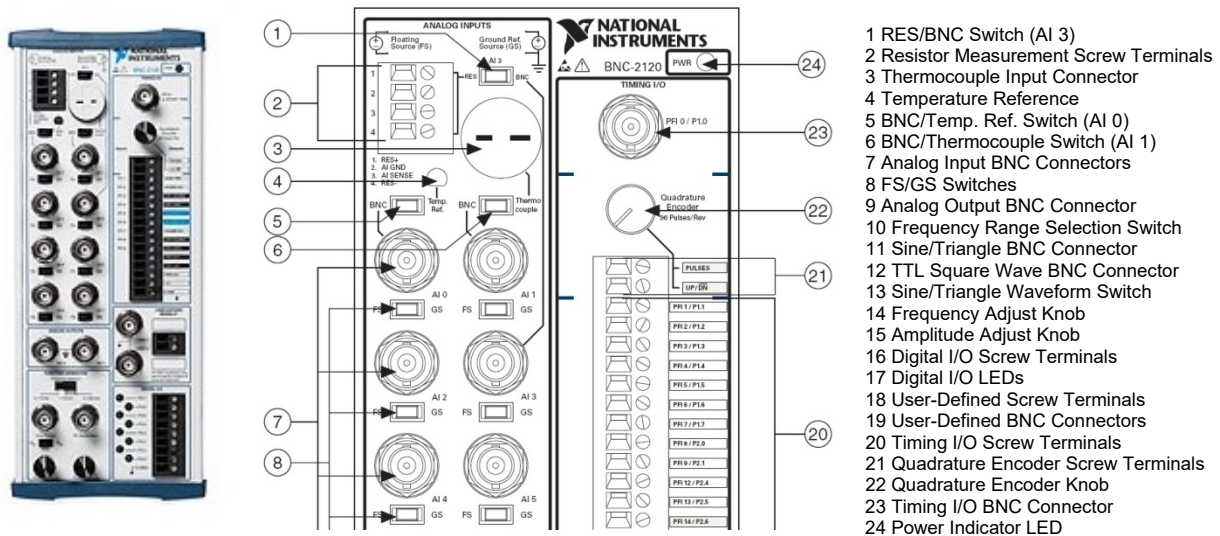
wobei T und T_0 als absolute Temperaturen in Kelvin einzusetzen sind.

Wie lautet die Umkehrfunktion $T(R)$?

$$\ln \left(\frac{R(T)}{R(T_0)} \right)$$

3 Geräte, Software, Materialien

Eingesetzt werden relativ hochwertige Multimeter sowie die digitale Messdatenerfassung mit **NI-USB-6212** I/O-System und BNC 2120 Anschlussbox (wie im Versuch DAQ-LV).



Zur Spannungsversorgung der Messschaltungen wird ein PeakTech-Netzgerät eingesetzt.

Die PC-gestützte Datenverarbeitung geschieht mit LabVIEW und MATLAB.

Ein NTC und ein Pt-100 Widerstand stehen jeweils angeschlossen an eine Platine mit **dem Vorwiderstand** $R_v = 1\text{ k}\Omega$ zur Verfügung.

3.1 NTC Datenblattauszug (EPCOS B57891 M0103 J)

General technical data

Climatic category	(IEC 60068-1)		40/125/56	
Max. power	(at 25 °C)	P_{25}	200	mW
Resistance tolerance		$\Delta R_R / R_R$	$\pm 5, \pm 10$	%
Rated temperature		T_R	25	°C
Dissipation factor	(in air)	δ_{th}	approx. 3.5	mW/K
Thermal cooling time constant	(in air)	τ_c	approx. 12	s
Heat capacity		C_{th}	approx. 40	mJ/K

R_{25} Ω	No. of R/T characteristic	$B_{25/100}$ K	Ordering code
10 k	4901	<u>$3950 \pm 3\%$</u>	B57891M0103+000

+ = Resistance tolerance
J = $\pm 5\%$

Das Datenblatt des Pt-100 befindet sich in Anhang A.

4 Versuchsdurchführung

4.1 NTC-Tempersensor und Pt-100 mit Multimeter (30 Min.)

4.1.1 "RTD"-Temperaturmessung mit dem Multimeter

Stellen Sie an dem bereitgestellten Multimeter den Modus "**Temperatur RTD**" ein. Führen sie einen "**Zero**"-Abgleich durch (Beschreibung siehe unten).

Fixieren Sie den bereitgestellten **NTC** und den **Pt-100** Widerstandstempersensor nah beieinander in einer **thermischen Isolierung**. Beide Sensoren bleiben in dieser Lage bis zum abschließenden Aufheizvorgang (Abschnitt 4.3).

Messen Sie dann in diesem Modus die Temperatur des Pt-100-Sensorelementes.

5.5.2 Messung mit Widerstandssensoren

⇒ Stellen Sie den Drehschalter auf „Temp_{TC}“ bzw. „Temp_{RTD}“.

Die zuletzt ausgewählte Temperaturmessung bzw. der zuletzt eingestellte Tempersensor Typ-K oder Pt100/Pt1000 bleibt gespeichert und wird entsprechend angezeigt. Wechsel in die jeweils andere Messfunktion durch **FUNC | ENTER**.

Der Typ Pt100 oder Pt1000 wird automatisch erkannt und eingeblendet. Es bestehen zwei Möglichkeiten, den Zuleitungswiderstand zu kompensieren:

Automatische Kompensation

⇒ Betätigen Sie die Taste **ZERO | ESC**.
Die Anzeige „Short leads“ erscheint.

Sofern Sie den Zuleitungswiderstand direkt eingeben wollen, können Sie die folgende Eingabeaufforderung überspringen.

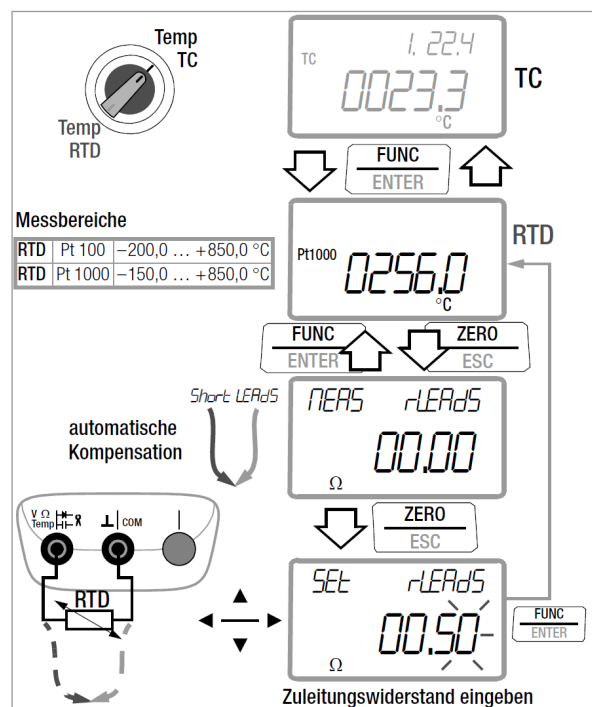
⇒ Schließen Sie die Anschlussleitungen des Messgeräts kurz. Die Anzeige „00.00“ erscheint. Mit Drücken der Taste **FUNC | ENTER** erfolgt eine automatische Kompensation des Widerstands der Anschlussleitungen bei zukünftigen Messungen. Sie können jetzt den Kurzschluss entfernen, das Gerät ist messbereit.

Zuleitungswiderstand eingeben

⇒ Im Menü automatische Kompensation müssen Sie nochmals die Taste **ZERO | ESC** betätigen.

⇒ Geben Sie den bekannten Widerstand der Anschlussleitungen über die Cursortasten ein:
Über die Tasten <|> wählen Sie die Dekade, d. h. die Position der Ziffer, die Sie ändern wollen und über die Tasten ▽△ stellen Sie die jeweilige Ziffer ein. Der Defaultwert ist 0,43 Ω (Z3409). Die Eingabegrenzen liegen zwischen 0 und 50 Ω.

⇒ Mit Drücken von **FUNC | ENTER** wird der eingestellte Wert übernommen und Sie gelangen zurück zur Messung. Der Zuleitungswiderstand bleibt auch bei ausgeschaltetem Gerät gespeichert.



4.1.2 NTC und Pt-100 – Widerstandsmessung

Stellen Sie das Multimeter auf Widerstandsmessung um. Führen sie einen "Zero"-Abgleich für die Widerstandsmessung durch und messen Sie nacheinander die **Widerstände beider Sensoren**.

4.2 Automatisierte Messdatenerfassung und Temperaturmessung (40 Min.)

4.2.1 Pt-100: Schaltungsaufbau und LabVIEW-VI

R_U ≈ 1000 Ω

* Messen Sie mit dem Multimeter den Wert des **Vorwiderstands** auf der bereitgestellten Platine mit dem Pt-100-Element. Diesen Wert später bei der Widerstandsberechnung im Express-VI "**Formel**" verwenden!

Bauen Sie mit der Platine die Messschaltung aus der Vorbereitung (Punkt 3.) auf. Zur Spannungsversorgung wird das PeakTech-Netzgerät eingesetzt. Die einstellbare Spannung steht dort an den Buchsen "+15V/1,5A" (rot) und "0" (schwarz) zur Verfügung.

Die Spannung auf 1 V einstellen und an den Eingang U_0 der Messschaltung anschließen.

Die Spannungen U_0 und U_M werden mit Koax-Leitungen über die Eingänge AI 2 und AI 3 der BNC-Box gemessen.

* Schiebeschalter an AI 3 auf Position "BNC" stellen!

DAQ-Konfiguration im LabVIEW-VI:

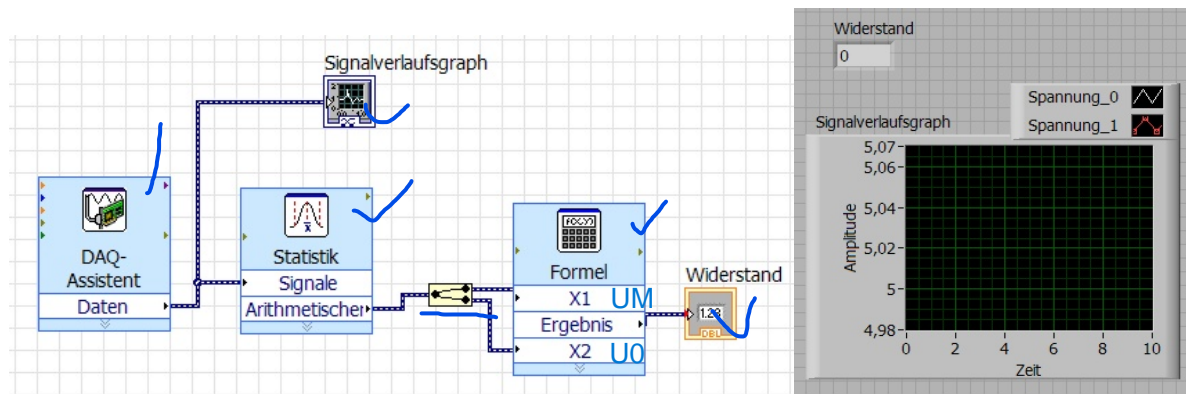
DAQ-Assistent, Eingang:

- Spannungsmessung U_0 auf AI2 und U_M auf AI3,
- Eingangsbereich $\pm 5\text{ V}$ auf AI2 und $\pm 0,2\text{ V}$ auf AI3, differentiell,
- 100 Samples, $f_s = 50\text{ Hz}$

u_0, u_M (separat)

* Ein Messwert soll durch Mittelwertbildung über 100 Werte in 2 s bestimmt werden (entsprechend der in Table 1, NI-USB-6212 Specifications, bei der Angabe "Absolute Accuracy" vorausgesetzten Methode, siehe Anhang B).

Schaltung im "Blockdiagramm" / Darstellung im Frontpanel:

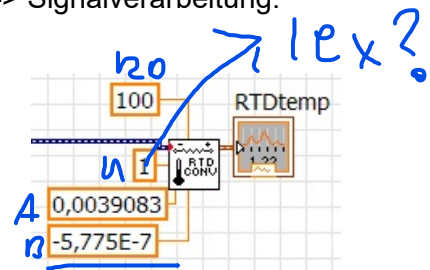


Mit dem Express-VI "Statistik" werden zunächst die Mittelwerte der jeweils 100 gemessenen Werte von U_0 und U_M berechnet. Aus diesen Spannungen wird mit Express-VI "Formel" der

* Pt-100-Widerstand bestimmt (siehe Vorbereitung). Das zur Aufspaltung des vektoriellen Signals eingesetzte VI "Signale trennen" findet sich in Express -> Signalverarbeitung.

Auf den abgebildeten Waveform-Graph kann verzichtet werden.

* Die Temperatur ist aus dem ermittelten Widerstand gemäß DIN EN 60751 zu bestimmen. Dazu kann das VI ergänzt werden um das Element "RTD-Messwerte konvertieren" aus "Mathematik" -> "Numerisch" -> "Skalierung".



konstanten

4.2.2 Durchführung der Messung mit Pt-100-Element

* Führen Sie das VI fünfmal aus und notieren Sie jeweils Widerstand und Temperatur.

4.2.3 NTC: Schaltungsaufbau und Ergänzung des VI

- * Messen Sie mit dem Multimeter den Wert des Vorwiderstands auf der bereitgestellten Platine mit dem NTC. Diesen Wert später bei der Widerstandsrechnung im Express-VI "Formel" verwenden.

Die Versorgungsspannung U_0 des PeakTech-Netzgerätes wird auch für den NTC verwendet. Sie liegt dann parallel an den Eingängen beider Schaltungen.

Die Messspannung U_M dieser Schaltung an AI4 an der BNC-Box anschließen.

Im DAQ-Assistent diesen Messkanal hinzufügen, Eingangsbereich ± 1 V, differentiell

- * Das "Signale trennen"-VI mit der Maus auf 3 Ausgangsports aufziehen. Den ersten und dritten benutzen, um mit einem weiteren "Formel"-Block den Widerstand R_{NTC} des NTC zu berechnen.

- * Einen weiteren Formelblock einfügen, der aus R_{NTC} unter Verwendung der Daten aus dem Datenblatt die Temperatur in Grad Celsius berechnet (siehe Vorbereitung).

Hinweis: Wir setzen $0^\circ\text{C} = 273,15\text{ K}$.

$$T_0 - \ln\left(\frac{R(T)}{R(T_0)}\right) + \frac{B}{T_0} = T$$

4.2.4 Durchführung der Messung mit dem NTC

- * Führen Sie das VI fünfmal aus und notieren Sie jeweils den NTC-Widerstand und die Temperatur.

4.3 Dynamisches Verhalten der Sensoren (30 Min.)

Es steht eine elektrisch beheizte Aluminiumbox zur Verfügung, in der ein erhöhtes Temperaturniveau ($70 - 90^\circ\text{C}$) herrscht. Die Dynamik, mit der das Pt-100-Element und der NTC auf einen Temperatursprung reagieren, soll durch eine Messreihe bestimmt werden.

Das VI ist wie folgt abzuändern:

1. Auf die Mittelwertbildung wird verzichtet. "Statistik"-VI also entfernen.

2. DAQ Assistent umkonfigurieren

- Abtastrate 5 Hz, Anzahl Samples so, dass die Messdauer 30 Sekunden beträgt;
- "Timeout" auf 10 Minuten einstellen;

$$N = \frac{f_s \cdot t}{f_x} = \frac{5 \cdot 30}{1} = 150$$

- * 3. Das Datenexport-VI (Express -> Ausgabe -> "Messwerte in Datei schreiben") einfügen, konfigurieren und die Messreihen der beiden Widerstände R_{Pt100} und R_{NTC} sowie der Temperaturen ϑ_{Pt100} und ϑ_{NTC} in eine Datei schreiben lassen ("Spalten für x-Werte -> Nur eine Spalte" liefert die Zeitachse).

Testen Sie das VI zunächst mit einem Durchlauf mit beiden Sensoren noch in ihrer Isolation. Prüfen Sie die exportierten Werte.

Stellen Sie dann die Samplezahl so ein, dass die Messdauer 5 Minuten beträgt.

$$1500 = 5\text{Hz} / 1/300\text{s}$$

Starten Sie das VI, wobei beide Sensoren zunächst noch für ca. 15 Sekunden in ihrer Isolation bleiben, dann herausgezogen werden und zügig und gleichzeitig in die passenden Öffnungen der Box eingeführt werden.

4.4 Multimetermessung bei hoher Temperatur (10 Min.)

Lassen Sie beide Sensoren in der Box, trennen Sie aber alle Versorgungs- und Messkabel von der Platine.



Messen Sie mit dem Multimeter die Widerstände beider Sensoren.

4.5 Plausibilitätskontrolle (10 Min.)

Stellen Sie den Inhalt der Datei aus Abschnitt 4.3 grafisch dar (entweder mit einem neu zu erstellenden VI in LabVIEW oder mit MATLAB).

Vergleichen Sie insbesondere die Werte aus 4.4 mit denen der letzten Zeile im Datenexport der vorhergehenden Messung.

5 Ausarbeitung (Abgabetermin: 14 Tage nach dem Versuch)

Die Ausarbeitung soll mit Textverarbeitung erstellt und als PDF-Datei in AULIS hochgeladen werden. Kurz halten. Einfaches Deckblatt mit den üblichen Angaben. Keine umfangreichen Einleitungen und Erörterungen (vergleiche die Hinweise zum ersten Versuch OSZ).

Es empfiehlt sich, für die Rechnungen MATLAB zu verwenden. Die erstellten Scripts als Anhang A einfügen (Schriftart 9pt Courier New).

Das Vor-Ort verfasste Protokoll scannen oder mit guter Aufnahmequalität fotografieren und als Anhang in die PDF-Datei einfügen. Diese darf maximal 4 MB groß sein.

5.1 Pt-100 und NTC mit Multimeter

5.1.1 RTD-Messung

Zu 4.1.1 das Messergebnis angeben, also Messwert und Unsicherheit (aus Toleranz des Messgerätes und Toleranzklasse des Pt-100).

5.1.2 Pt-100, Widerstand und Temperatur

Zu 4.1.2 den tatsächlichen Wert des Pt-100-Widerstands ermitteln, indem Sie den gemessenen Wert um den Anschlusswiderstand R_i ("R innen", Datenblatt in Anhang A) korrigieren (bekannte systematische Abweichung). Die Unsicherheit des korrigierten Messwertes aus den Toleranzen des Messgerätes und des Anschlusswiderstands R_i bestimmen.

Die Temperatur ϑ_{Pt100} gemäß DIN EN 60751 (siehe Vorbereitung 2.1) berechnen.

Die Unsicherheit $\Delta\vartheta_{Pt100}$ mittels Fehlerfortpflanzungsrechnung berechnen (siehe Vorbereitung 2.2). Dabei auch die Toleranzklasse des Pt-100 berücksichtigen.

5.1.3 NTC-Temperatur

Zu 4.1.2 die Unsicherheit ΔR_{NTC} der NTC-Widerstandsmessung angeben.

Die Temperatur ϑ_{NTC} und die Unsicherheit $\Delta\vartheta_{NTC}$ mittels Fehlerfortpflanzung unter Verwendung der Datenblattangaben berechnen.

5.2 Automatisierte Messung

5.2.1 Auswertung Pt-100

Die Unsicherheit ΔR_{Pt100} des bei einem Durchlauf des VI angezeigten Widerstands mittels Fehlerfortpflanzung berechnen. Die Unsicherheiten der Messspannungen sind dazu gemäß Anhang B zu berechnen, wobei bei "ppm of reading" $U_0 = 1V$ und $U_M = 0,11V$ als Ablesung eingesetzt werden kann).

Aus ΔR_{Pt100} die zugehörige Unsicherheit eines Einzelmesswertes der Temperatur gemäß Fehlerfortpflanzung berechnen.

Aus den 5 Temperaturmesswerten die zufällige Messunsicherheit der Temperatur für ein Vertrauensniveau von 95% bestimmen.

Aus diesen Angaben und der Toleranzklasse des Pt-100 die Gesamtunsicherheit berechnen und das vollständige Messergebnis angeben.

5.2.2 Auswertung NTC

Wie oben die Unsicherheit ΔR_{NTC} des bei einem Durchlauf des VI angezeigten Widerstands ermitteln. Dabei $U_0 = 1V$ und $U_M = 0,9$ als Ablesung einsetzen.

Aus ΔR_{NTC} unter Verwendung der Datenblattangaben die zugehörige Unsicherheit eines Einzelmesswertes der Temperatur gemäß Fehlerfortpflanzung berechnen.

Aus den 5 NTC-Temperaturmesswerten die zufällige Messunsicherheit der Temperatur für ein Vertrauensniveau von 95% bestimmen.

Aus diesen Angaben die Gesamtunsicherheit berechnen und das vollständige Messergebnis angeben.

5.3 Zeitkonstanten, Least-Squares-Parameteridentifikation

Aus der im VI erstellten Datei die Zeitreihen der Temperaturmessung ϑ_{Pt100} und ϑ_{NTC} in MATLAB importieren.

Beide Messreihen grafisch darstellen und die Verläufe mit `lsqcurvefit` durch einen Sättigungsverlauf approximieren. Funktionsansatz etwa

$$\vartheta(t) = \begin{cases} \vartheta_{start} & \text{für } 0 \leq t < t_0 \\ \vartheta_{start} + (\vartheta_{end} - \vartheta_{start}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}\right) & \text{für } t \geq t_0 \end{cases}$$

mit freien Parametern ϑ_{start} , ϑ_{end} , t_0 und τ .

Um welchen Faktor unterscheiden sich die Zeitkonstanten der beiden Sensoren?

5.4 Parameter B des NTC

Zu 4.4. die Temperatur des Pt-100 und deren Unsicherheit bestimmen (vergleiche Aufgabe 5.1.2). Außerdem die Unsicherheit ΔR_{NTC} bestimmen (vergleiche 5.1.3).


Verwenden Sie die Messwerte ϑ_{Pt100} und R_{NTC} aus den Messungen in 4.1.2 und 4.4 um den Parameter B des NTC zu berechnen.

Bestimmen Sie unter Berücksichtigung der Unsicherheiten der PT-100-Temperaturen und der gemessenen NTC-Widerstände mittels Fehlerfortpflanzung die Unsicherheit ΔB .

Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit der Datenblattangabe. Steht der Wert, den Sie ermittelt haben, unter Berücksichtigung der Messunsicherheit und der Toleranz laut Datenblatt in Widerspruch zu den Herstellerangaben?

Wenn Sie die Bearbeitung der Teilaufgaben innerhalb der Gruppe aufteilen, notieren Sie dabei bitte jeweils den Namen der Verfasserin/des Verfassers.

Anhang A: Pt-100 Datenblatt

 Heraeus Sensor Technology	Technisches Datenblatt	
		Blatt 1 von 1
Benennung:	W-EYK 6 Eintauch-Wid.-Thermometer	
Zeichnung-Nr.:	30.500-109 / A3	
Änderungsstand:	---	
Änderungsnummer:	---	
Sensor:	1 Pt 100 Ohm	
Genauigkeit:	nach DIN EN 60751 Klasse 1/3B Zwischen 0°C und +100°C	
R innen:	0,25 Ω \pm 0,1 Ω	
Temperaturbereich:	-30°C bis +500°C	
Anschlusskabel:	300 mm lang, 2x \varnothing 0,50 mm	
Innen- und Außenisolation:	Glasseeide	
Außenfarbe:	Weiß	
<u>Gehäuse:</u>		
Nennlänge:	20 mm lang	
Durchmesser:	6 mm	

Anmerkung: Die Klasse 1/3 B ist seit 2008 als Klasse AA Teil der DIN EN 60751.

Klasse	Gültigkeitsbereich °C		Grenzabweichung ^a °C
	Drahtgewickelte Widerstände	Schichtwiderstände	
AA	-50 bis +250	0 bis +150	$\pm (0,1 + 0,0017 t)$
A	-100 bis +450	-30 bis +300	$\pm (0,15 + 0,002 t)$
B	-196 bis +600	-50 bis +500	$\pm (0,3 + 0,005 t)$
C	-196 bis +600	-50 bis +600	$\pm (0,6 + 0,01 t)$

Anhang B: NI-USB-6212 Messabweichungen, Toleranzen

Die "Accuracy" der Analogeingänge ist in den "Specifications" S. 4f wie folgt angegeben:

Table 1. AI Absolute Accuracy

Nominal Range Positive Full Scale	Nominal Range Negative Full Scale	Residual Gain Error (ppm of Reading)	Residual Offset Error (ppm of Range)	Offset Tempco (ppm of Range/°C)	Random Noise, σ (μVrms)	Absolute Accuracy at Full Scale (μV)	Sensitivity (μV)
10	-10	75	20	34	295	2,710	118.0
5	-5	85	20	36	149	1,420	59.6
1	-1	95	25	49	32	310	12.8
0.2	-0.2	135	40	116	13	89	5.2



Note Sensitivity is the smallest voltage change that can be detected. It is a function of noise.

AI Absolute Accuracy Equation

$$\text{AbsoluteAccuracy} = \text{Reading} \cdot (\text{GainError}) + \text{Range} \cdot (\text{OffsetError}) + \text{NoiseUncertainty}$$

$$\text{GainError} = \text{ResidualAIGainError} + \text{GainTempco} \cdot (\text{TempChangeFromLastInternalCal}) + \text{ReferenceTempco} \cdot (\text{TempChangeFromLastExternalCal})$$

$$\text{OffsetError} = \text{ResidualAIOffsetError} + \text{OffsetTempco} \cdot (\text{TempChangeFromLastInternalCal}) + \text{INLError}$$

$$\text{NoiseUncertainty} = \frac{\text{Random Noise} \cdot 3}{\sqrt{100}} \text{ for a coverage factor of } 3 \sigma \text{ and averaging 100 points.}$$

In diesem Versuch vernachlässigen wir etwaige temperaturbedingte Abweichungen, arbeiten aber, wie in den "Specifications", mit einer Mittelung über 100 Werte. Außerdem berücksichtigen wir einen Linearitätsfehler (INL) in Höhe von 76 ppm.

Damit ergibt sich dann zum Beispiel folgende Rechnung:

Der gemittelte Messwert sei $U = 1 \text{ mV}$. Er hat im Messbereich $\pm 0,2 \text{ V}$ eine Toleranz, die sich aus "Gain Error", "Offset Error" (+INL) und "Noise" wie folgt ergibt

$$\Delta U = 135 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \text{ mV} + (40 + 76) \cdot 10^{-6} \cdot 0,2 \text{ V} + 3 \cdot 13 \mu\text{V} / 10 \approx 27,3 \mu\text{V}$$

Das entspricht 2,73 % relative Unsicherheit.