



Temperatur- und Feuchtemessung

Die Messungen von Temperatur und Feuchte eines Dampfes gehören untrennbar zusammen, weil ein bestimmtes Gasvolumen bei jeder Temperatur nur eine begrenzte Höchstmenge von Feuchtigkeit enthalten kann. Deshalb wird in der zweiten Folge dieser Artikelreihe die elektronische Temperaturbestimmung vertieft behandelt.



Bild 9: PT100, ein Platin-Messwiderstand mit weiter Verbreitung und hoher Linearität

Elektrische Eigenschaften

Elektronische Thermometer beruhen auf der Temperaturabhängigkeit elektrischer Eigenschaften von Leitern oder Halbleitern. Hier sollen nur Widerstandssensoren (PT100) und von den Halbleitersensoren die Diode und die Thermospannungssensoren angerissen werden.

RTD-Temperatur Sensoren (RTD: Resistive Temperature Device) ermitteln die Temperatur über eine Messung des temperaturabhängigen Widerstands eines Metalldrahtes. Der Widerstandsverlauf wird von Linearitätsfehlern befreit (linearisiert), als Temperatur interpretiert und auf einem Display angezeigt oder zur weiteren Verarbeitung an eine Prozess-Software übergeben. Obwohl RTD-Drähte aus jedem Metall hergestellt werden können, wird in der Praxis meistens Platin verwendet. Die Gründe dafür sind seine ausgezeichnete Wiederholgenauigkeit (Reproduzierbarkeit) der Messung, Stabilität und Resistenz gegenüber Korrosion und Chemikalien. Meist kommt ein PT-100-RTD (PT100: Platindrahtsensor mit 100 Ω bei 0 $^{\circ}\text{C}$) zum Einsatz. Für eine kom-

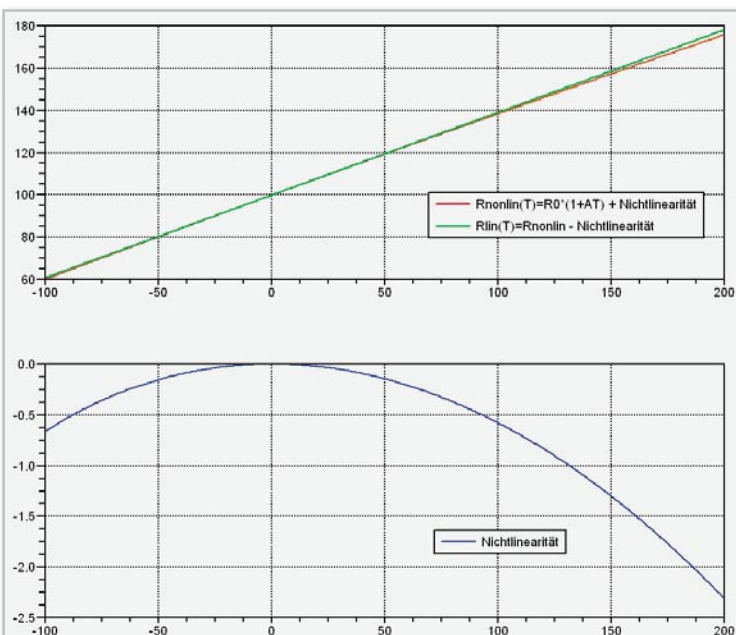


Bild 10: In der Gleichung von Callendar und Van Dusen korrigieren Korrekturterme höherer Ordnung die Linearitätsabweichungen des Platin-Messdrahtes.

$$R(T) = R_0 \left(1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot (T - 100) T^3 \right) \quad \text{Callendar-Van Dusen-Gleichung}$$

mit

R_0 : Nominalwert eines Platin-Messwiderstands bei 0 $^{\circ}\text{C}$

T : Temperatur in $^{\circ}\text{C}$

$$A = 3,90830 \cdot 10^{-3}$$

$$B = -5,77500 \cdot 10^{-7}$$

$$C = \begin{cases} 0 & \text{für } 0^{\circ}\text{C} \leq T < 850^{\circ}\text{C} \\ -4,18301 \cdot 10^{-12} & \text{für } -200^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

(1)

pakte Bauform wird der Platin-Messdraht aufgewickelt und in einer kleinen Schutzhülse untergebracht (Abbildung 9). Die Widerstandsmessung erfordert einen Messstrom durch den Platindraht, der diesen erwärmt und damit das Messergebnis verfälscht. Dieser Erwärmungsfehler hängt natürlich auch vom Wärmeübergang zwischen den Messwicklungen und dem Messmedium ab.

Zur Korrektur des nicht streng proportional zur Temperatur verlaufenden Widerstandswerts des Platindrahtes dient die empirisch von Callendar und Van Dusen abgeleitete Gleichung (1) eines Polynoms vom Grad 4. Sie beschreibt mit hoher Präzision den Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem wahren Wert des Platin-Widerstandes. Bei ihrer Interpretation ist zu beachten, dass der vierte Summand in der Klammer mit den Korrekturtermen dritter und vierter Ordnung nur bei negativen Temperaturen wirksam wird.

In Abbildung 10 oben zeigt die rote Kurve den Widerstandsverlauf eines PT100-Messwiderstands zwischen -100 °C und +200 °C ohne Korrektur durch die Polynomterme zweiten, dritten und vierten Grades. Diese sind als blaue Kurve unten abgebildet. Addiert man sie zur roten Kurve, erhält man den linearisierten Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstandswert als grüne Kurve. Das geschilderte Korrekturverfahren entspricht den allgemein anerkannten Standards IEC 751 und ASTM E1137.

$$\left. \frac{\partial U_{AK}}{\partial T} \right|_{I=const} \approx -2 \frac{mV}{K} \quad (2)$$

Die **Durchlassspannung einer Diode** hängt bei konstant gehaltenem Durchlassstrom (typ. 10 µA) nur von der Temperatur des pn-Übergangs ab (Gleichung [2]). Abbildung 11 zeigt den Temperaturgang der über einer speziell dotierten Siliziumdiode der Firma Lakeshore abfallenden Spannung. Damit sind Messgenauigkeiten von 0,5 K zu erreichen. Der Messbereich erstreckt sich von 1,4 bis 500 K (-272...227 °C). Das Messprinzip wird in einer Vielzahl von Temperatursensoren mit integrierter Auswerteelektronik angewandt.

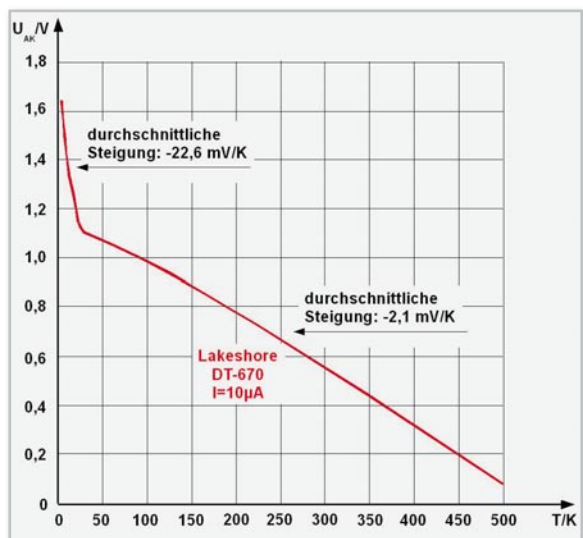


Bild 11: Bei konstantem Strom ist die über einer Diode abfallende Spannung streng proportional zur Temperatur des pn-Übergangs.

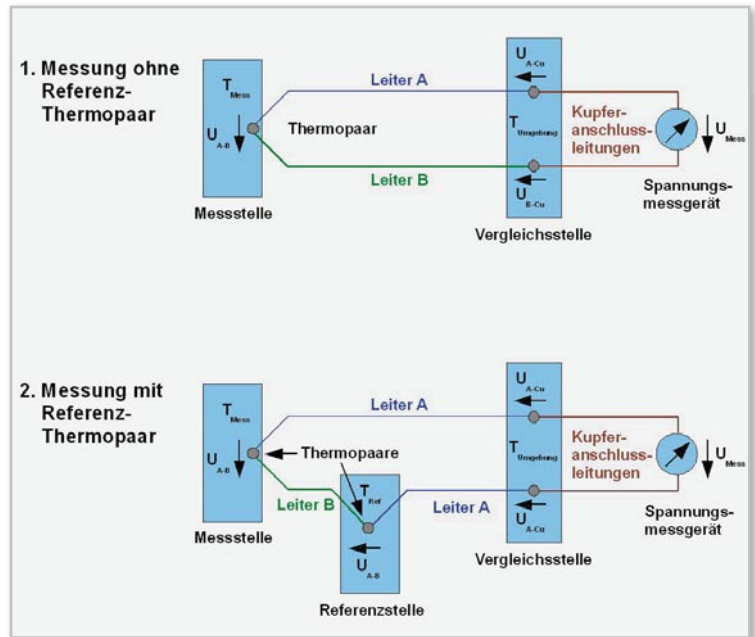


Bild 12: Das Thermopaar (oben) wird erst durch ein Referenz-Thermopaar (unten) zum genauen Messfühler.

Thermoelemente. An der Kontaktstelle zweier unterschiedlicher Metalle A und B (Thermopaar) entsteht eine Thermo-spannung U_{AB} . Sie wird von einem Elektronenübergang aus dem Metall mit der geringeren Elektronenaustrittsarbeit in das mit der größeren Elektronenaustrittsarbeit hervorgerufen (Seebeck-Effekt) und liegt bei Raumtemperatur im Bereich einiger Millivolt. Die in der Kontaktstelle entstehende

$$\begin{aligned}
 U_{Mess} &= U_{A-Cu|T=T_{Umgebung}} + U_{A-B|T=T_{Mess}} - U_{A-B|T=T_{Referenz}} - U_{A-Cu|T=T_{Umgebung}} \\
 &= U_{A-B|T=T_{Mess}} - U_{A-B|T=T_{Referenz}} = k \cdot T_{Mess} - k \cdot T_{Referenz} \\
 &= k(T_{Mess} - T_{Referenz}) = k \cdot T_{Mess} \Big|_{T_{Referenz}=0} \quad k: \text{Thermokonstante } \mu V/K
 \end{aligned}$$

Auflösen nach der Messtemperatur:

$$T_{Mess} = \frac{U_{Mess}}{k} + T_{Referenz} = \frac{U_{Mess}}{k} \Big|_{T_{Referenz}=0} + T_{Umgebung} \Big|_{T_{Referenz}=T_{Umgebung}} \quad (3)$$

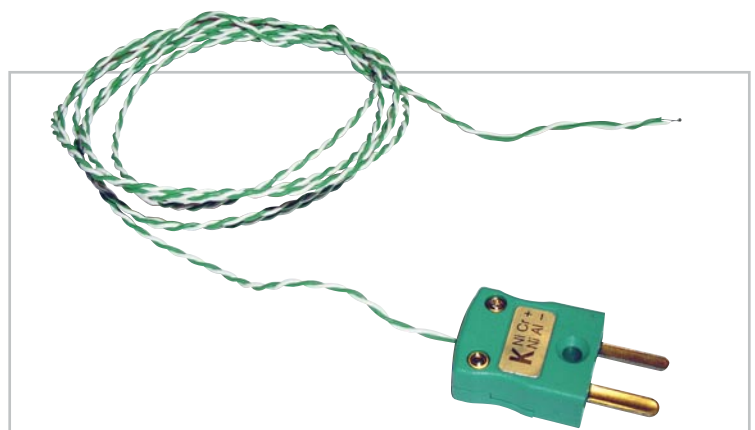


Bild 13: Ein Nickel-Chrom-Thermopaar mit verschweißten Drahtenden als Temperatur-Messfühler. Im Stecker befindet sich das Referenzpaar auf Umgebungstemperatur.

Grundwertreihen für Thermoelemente NiCr/NiAl (Typ K) in μV
Referenzstellentemperatur 0°C, -100 ... 500°C, DIN EN 60584

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-100	-3.554	-3.523	-3.492	-3.462	-3.431	-3.400	-3.368	-3.337	-3.306	-3.274	-3.243
-90	-3.243	-3.211	-3.179	-3.147	-3.115	-3.083	-3.050	-3.018	-2.986	-2.953	-2.920
-80	-2.920	-2.887	-2.854	-2.821	-2.788	-2.755	-2.721	-2.688	-2.654	-2.620	-2.587
-70	-2.587	-2.553	-2.519	-2.485	-2.450	-2.416	-2.382	-2.347	-2.312	-2.278	-2.243
-60	-2.243	-2.208	-2.173	-2.138	-2.103	-2.067	-2.032	-1.996	-1.961	-1.925	-1.889
-50	-1.889	-1.854	-1.818	-1.782	-1.745	-1.709	-1.673	-1.637	-1.600	-1.564	-1.527
-40	-1.527	-1.490	-1.453	-1.417	-1.380	-1.343	-1.305	-1.268	-1.231	-1.194	-1.156
-30	-1.156	-1.119	-1.081	-1.043	-1.006	-968	-930	-892	-854	-816	-778
-20	-778	-739	-701	-663	-624	-586	-547	-508	-470	-431	-392
-10	-392	-353	-314	-275	-236	-197	-157	-118	-79	-39	0
0	0	39	79	119	158	198	238	277	317	357	397
10	397	437	477	517	557	597	637	677	718	758	798
20	798	838	879	919	960	1.000	1.041	1.081	1.122	1.163	1.203
30	1.203	1.244	1.285	1.326	1.366	1.407	1.448	1.489	1.530	1.571	1.612
40	1.612	1.653	1.694	1.735	1.776	1.817	1.858	1.899	1.941	1.982	2.023
50	2.023	2.064	2.106	2.147	2.188	2.230	2.271	2.312	2.354	2.395	2.436
60	2.436	2.478	2.519	2.561	2.602	2.644	2.685	2.727	2.768	2.810	2.851
70	2.851	2.893	2.934	2.976	3.017	3.059	3.100	3.142	3.184	3.225	3.267
80	3.267	3.308	3.350	3.391	3.433	3.474	3.516	3.557	3.599	3.640	3.682
90	3.682	3.723	3.765	3.806	3.848	3.889	3.931	3.972	4.013	4.055	4.096
100	4.096	4.138	4.179	4.220	4.262	4.303	4.344	4.385	4.427	4.468	4.509
110	4.509	4.550	4.591	4.633	4.674	4.715	4.756	4.797	4.838	4.879	4.920
120	4.920	4.961	5.002	5.043	5.084	5.124	5.165	5.206	5.247	5.288	5.328
130	5.328	5.369	5.410	5.450	5.491	5.532	5.572	5.613	5.653	5.694	5.735
140	5.735	5.775	5.815	5.856	5.896	5.937	5.977	6.017	6.058	6.098	6.138
150	6.138	6.179	6.219	6.259	6.299	6.339	6.380	6.420	6.460	6.500	6.540
160	6.540	6.580	6.620	6.660	6.701	6.741	6.781	6.821	6.861	6.901	6.941
170	6.941	6.981	7.021	7.060	7.100	7.140	7.180	7.220	7.260	7.300	7.340
180	7.340	7.380	7.420	7.460	7.500	7.540	7.579	7.619	7.659	7.699	7.739
190	7.739	7.779	7.819	7.859	7.899	7.939	7.979	8.019	8.059	8.099	8.138
200	8.138	8.178	8.218	8.258	8.298	8.338	8.378	8.418	8.458	8.499	8.539
210	8.539	8.579	8.619	8.659	8.699	8.739	8.779	8.819	8.860	8.900	8.940
220	8.940	8.980	9.020	9.061	9.101	9.141	9.181	9.222	9.262	9.302	9.343
230	9.343	9.383	9.423	9.464	9.504	9.545	9.585	9.626	9.666	9.707	9.747
240	9.747	9.788	9.828	9.869	9.909	9.950	9.991	10.031	10.072	10.113	10.153
250	10.153	10.194	10.235	10.276	10.316	10.357	10.398	10.439	10.480	10.520	10.561
260	10.561	10.602	10.643	10.684	10.725	10.766	10.807	10.848	10.889	10.930	10.971
270	10.971	11.012	11.053	11.094	11.135	11.176	11.217	11.259	11.300	11.341	11.382
280	11.382	11.423	11.465	11.506	11.547	11.588	11.630	11.671	11.712	11.753	11.795
290	11.795	11.836	11.877	11.919	11.960	12.001	12.043	12.084	12.126	12.167	12.209
300	12.209	12.250	12.291	12.333	12.374	12.416	12.457	12.499	12.540	12.582	12.624
310	12.624	12.665	12.707	12.748	12.790	12.831	12.873	12.915	12.956	12.998	13.040
320	13.040	13.081	13.123	13.165	13.206	13.248	13.290	13.331	13.373	13.415	13.457
330	13.457	13.498	13.540	13.582	13.624	13.665	13.707	13.749	13.791	13.833	13.874
340	13.874	13.916	13.958	14.000	14.042	14.084	14.126	14.167	14.209	14.251	14.293
350	14.293	14.335	14.377	14.419	14.461	14.503	14.545	14.587	14.629	14.671	14.713
360	14.713	14.755	14.797	14.839	14.881	14.923	14.965	15.007	15.049	15.091	15.133
370	15.133	15.175	15.217	15.259	15.301	15.343	15.385	15.427	15.469	15.511	15.554
380	15.554	15.596	15.638	15.680	15.722	15.764	15.806	15.849	15.891	15.933	15.975
390	15.975	16.017	16.059	16.102	16.144	16.186	16.228	16.270	16.313	16.355	16.397
400	16.397	16.439	16.482	16.524	16.566	16.608	16.651	16.693	16.735	16.778	16.820
410	16.820	16.862	16.904	16.947	16.989	17.031	17.074	17.116	17.158	17.201	17.243
420	17.243	17.285	17.328	17.370	17.413	17.455	17.497	17.540	17.582	17.624	17.667
430	17.667	17.709	17.752	17.794	17.837	17.879	17.921	17.964	18.006	18.049	18.091
440	18.091	18.134	18.176	18.218	18.261	18.303	18.346	18.388	18.431	18.473	18.516
450	18.516	18.558	18.601	18.643	18.686	18.728	18.771	18.813	18.856	18.898	18.941
460	18.941	18.983	19.026	19.068	19.111	19.154	19.196	19.239	19.281	19.324	19.366
470	19.366	19.409	19.451	19.494	19.537	19.579	19.622	19.664	19.707	19.750	19.792
480	19.792	19.835	19.877	19.920	19.962	20.005	20.048	20.090	20.133	20.175	20.218
490	20.218	20.261	20.303	20.346	20.389	20.431	20.474	20.516	20.559	20.602	20.644
500	20.644	20.687	20.730	20.772	20.815	20.857	20.900	20.943	20.985	21.028	21.071

Bild 14: Grundwertreihen für NiCr-Messfühler bei einer Referenzstellentemperatur von 0°C nach DIN EN 60584

$$\frac{U}{\mu\text{V}} = \sum_{i=1}^{10} a_i \cdot T^i \quad \text{Thermoelementspannung für } T < 0$$

$$\frac{U}{\mu\text{V}} = b_0 + \sum_{i=1}^9 b_i \cdot T^i + c_0 \cdot e^{c_1(T-126,9686)^2} \quad \text{Thermoelementspannung für } T > 0$$

mit

$$\begin{aligned}
 a_1 &= +3,9450128025 \cdot 10^{+1} & b_0 &= -1,7600413686 \cdot 10^{+1} \\
 a_2 &= +2,3622373598 \cdot 10^{-2} & b_1 &= +3,8921204975 \cdot 10^{+1} \\
 a_3 &= -3,2858906784 \cdot 10^{-4} & b_2 &= +1,8558770032 \cdot 10^{-2} \\
 a_4 &= -4,9904828777 \cdot 10^{-6} & b_3 &= -9,9457592874 \cdot 10^{-5} \\
 a_5 &= -6,7509059173 \cdot 10^{-8} & b_4 &= +3,1840945719 \cdot 10^{-7} \\
 a_6 &= -5,7410327428 \cdot 10^{-10} & b_5 &= -5,6072844889 \cdot 10^{-10} \\
 a_7 &= -3,1088872894 \cdot 10^{-12} & b_6 &= +5,6075059059 \cdot 10^{-13} \\
 a_8 &= -1,0451609365 \cdot 10^{-14} & b_7 &= -3,2020720003 \cdot 10^{-16} \\
 a_9 &= -1,9889266878 \cdot 10^{-17} & b_8 &= +9,7151147152 \cdot 10^{-20} \\
 a_{10} &= -1,6322697486 \cdot 10^{-20} & b_9 &= -1,2104721275 \cdot 10^{-23} \\
 c_0 &= +1,185976 \cdot 10^{+2} \\
 c_1 &= -1,183432 \cdot 10^{-4}
 \end{aligned}$$

[4]

Diese Gleichungen liefern die erste und zweite Spalte in Bild 14.

Thermospannung ist in einem kleinen Temperaturintervall annähernd proportional zur Kontaktstellentemperatur. Dennoch ist die direkte Messung der Spannung an den offenen Enden des Thermopaars problematisch (Abbildung 12 oben). Hier müssen die Metalle des Thermopaars über eine Kupferleitung mit dem Spannungsmessgerät verbunden werden. Dabei entstehen wieder zwei Thermospannungen (U_{A-Cu} und U_{B-Cu}), die beide von der Umgebungstemperatur abhängen, aber verschieden groß sind. Ihre Differenz geht daher verfälschend in das Messergebnis ein.

Dieser Messfehler lässt sich vermeiden, indem man, wie in Abbildung 12 unten gezeigt, ein Referenz-Thermopaar ins Spiel bringt. Jetzt sind die Thermospannungen an den Messzuleitungen jeweils U_{A-Cu} . Unter der Annahme, dass beide Anschlussklemmen der Messgerätekabel auf Umgebungstemperatur sind, kompensieren sich die Thermospannungen an ihnen (Gleichung [3]).

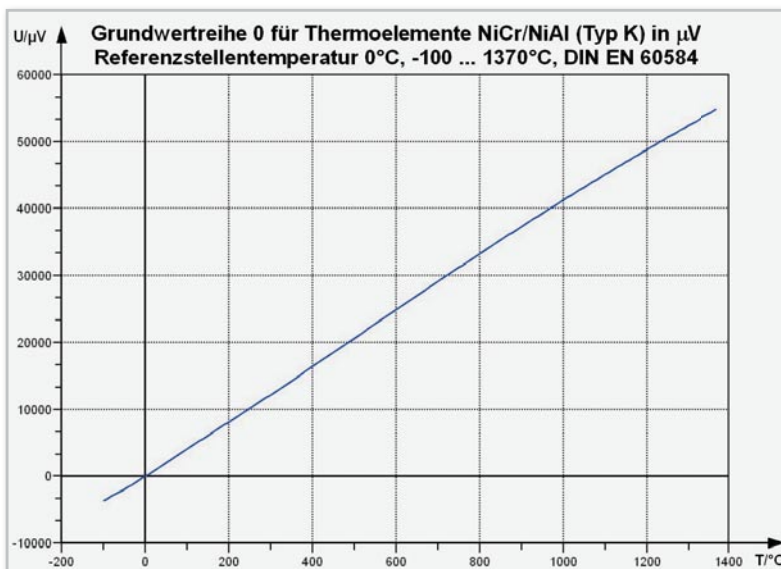


Bild 15: NiCr-Messfühler sind für einen sehr weiten Temperaturbereich geeignet.

Wie Gleichung (3) zeigt, wäre eine Referenztemperatur von 0 °C (Eiswasser) ideal, weil dann die Messtemperatur bis auf den Faktor $1/k$ proportional zur Messspannung ist. In der Praxis ist das natürlich nur schwer zu realisieren, deshalb wird oft die Referenzstelle in den Stecker verlagert, wo gewöhnlich Umgebungstemperatur herrscht (Abbildung 13). Zur Kompensation der Umgebungstemperatur im Messergebnis dient eine Vergleichsmessung, deren Genauigkeit sich dann natürlich auch in der Gesamtmessunsicherheit niederschlägt. Anstelle dieser analogen Linearisierung geht der Trend bei digitaler Auswertung der Messspannung zur Umrechnung über eine im Speicher abgelegte Kennlinie.

Um Thermoelemente verschiedener Hersteller ohne Neukalibrierung weltweit austauschen zu können, sind in genormten Grundwertreihen die Thermoelement-Kennlinien festgelegt. Für das Thermoelement NiCr-Ni (Typ K) mit seinem besonders linearen Temperaturgang sind die Grundwertreihen nach DIN EN 60584 im Temperaturbereich -100...+500 °C in Abbildung 14 angegeben.

Thermoelemente entsprechend der Reihe 0 (2. Spalte) werden am häufigsten eingesetzt. Sie weisen bei 0 °C eine Messspannung von 0 V auf. Ihre Temperaturgangkurve von -100 °C bis 1370 °C zeigt Abbildung 15.

Die Grundwerttabellen entstehen durch Auswertung von Polynomen höherer Ordnung. Für die Spannungsreihe in der zweiten Spalte (blau) der Tabelle in Abbildung 14 gilt Gleichung (4).

Gleichung (4) ist mit wenigen Zeilen in dem bereits mehrfach erwähnten kostenlosen Programm Scilab programmiert. Einige Testwerte zeigen Übereinstimmung mit den entsprechenden Positionen der ersten beiden Spalten der Tabelle in Abbildung 14.

T = -100 °C:	U = -3.553,6313365805999637814 μ V
T = -50 °C:	U = -1.889,3833300147196041507 μ V
T = 0 °C:	U = 0 μV
T = 20 °C:	U = 798,10559225924623660831 μ V
T = 50 °C:	U = 2.023,0583816402561296854 μ V
T = 100 °C:	U = 4.096,2175736940280330600 μ V
T = 200 °C:	U = 8.138,4931746594902506331 μ V
T = 500 °C:	U = 20.644,286390056960954098 μ V

Das mobile Thermometer ELV T 1100 gehört zur Gattung der Thermometer mit Thermoelementfühler mit LC-Display (Abbildung 16). Es erfasst Temperaturen im Bereich von -40 °C bis + 1000 °C mit einer Auflösung von 0,1 K. Minimal- und Maximalwerte werden zum Abruf gespeichert und eine Hold-Funktion gestattet das „Einfrieren“ eines Messwertes.

Die zusätzliche Funktion eines Datenloggers für 2000 Messungen mit einstellbarem Aufzeichnungsintervall zwischen 1 Sekunde und 10 Minuten erlaubt das Erfassen von Temperaturverläufen über längere Zeiträume. Die gespeicherten Werte lassen sich mit der zugehörigen Windows-Software über die USB-Schnittstelle des T 1100 auslesen. Abbildung 17 zeigt eine mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel aufbereitete zyklische Messung (Messintervall 5 Minuten) der Zulauftemperatur eines solaren Brauchwasserspeichers (rot) und in der Umgebung des Messgerätes (blau) mit Excel in eine Grafik umgesetzt

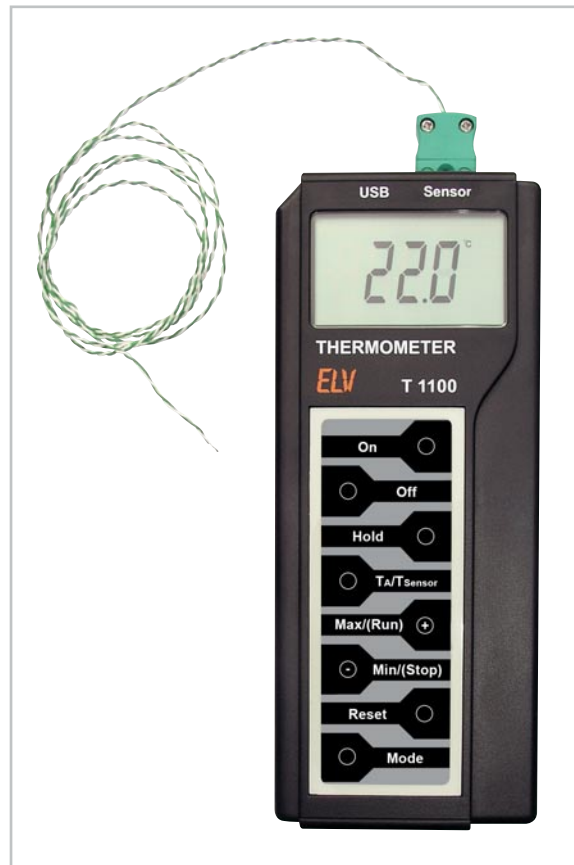


Bild 16: ELV T 1100: ein handliches, genaues Temperaturmessgerät (-40...+1000 °C) auf Thermoelementbasis mit Datenlogger

Eine detaillierte Funktionsbeschreibung des T 1100 findet sich im „ELVjournal“ 2/2004, deshalb soll an dieser Stelle darauf verzichtet werden.

Im dritten Teil des Artikels geht es um das Phänomen Feuchte, das in einem engen Zusammenhang mit der Temperatur steht. **ELV**

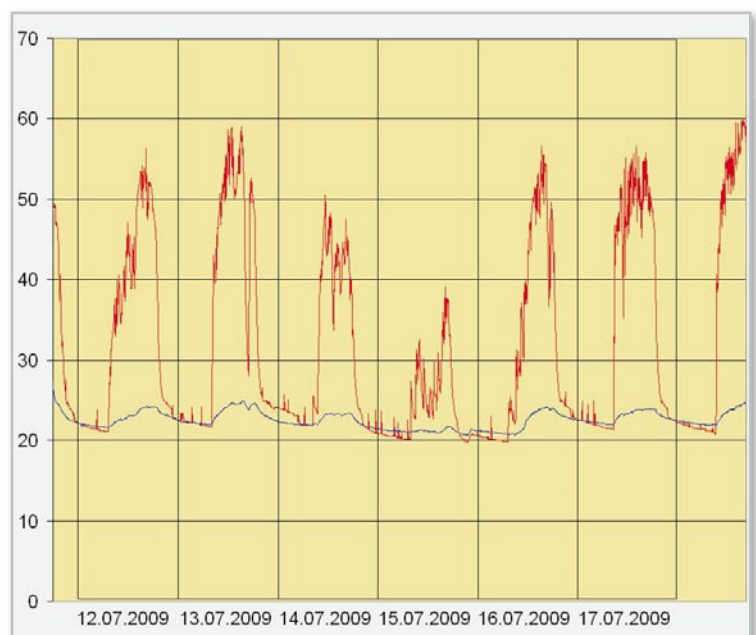


Bild 17: Die vom T 1100 in knapp sieben Tagen gespeicherten Temperaturen im Zulauf des Wärmetauschers eines solar erwärmten Brauchwasserspeichers (rot) und in der Umgebung des Messgerätes (blau) mit Excel in eine Grafik umgesetzt