PAP1
Versuch 41: "Temperaturmessung"

Jonas Schweer

September 10, 2024

1 Einleitung

1.1 Was soll gemessen werden?

In diesem Versuch werden wir mit einem Platinwiderstandsthermometer (ein PT-100) und einem Gasthermometer gefüllt mit Luft Temperaturen im Bereich von dem Siedepunkt von flüssigem Stickstoff und dem Siedepunkt von Wasser messen. Temperaturen zwischen 0°C und 100°C werden wir zudem noch mit einem Pyrometer messen und protokollieren. Abschließend werden wir ein Thermoelement (ein PtRh-Element) verwenden um die Temperaturverteilungen einer Bunsenbrennerflamme mit maximaler und minimaler Luftzufuhr zu messen.

1.2 Aufbau des Versuches und Messmethode

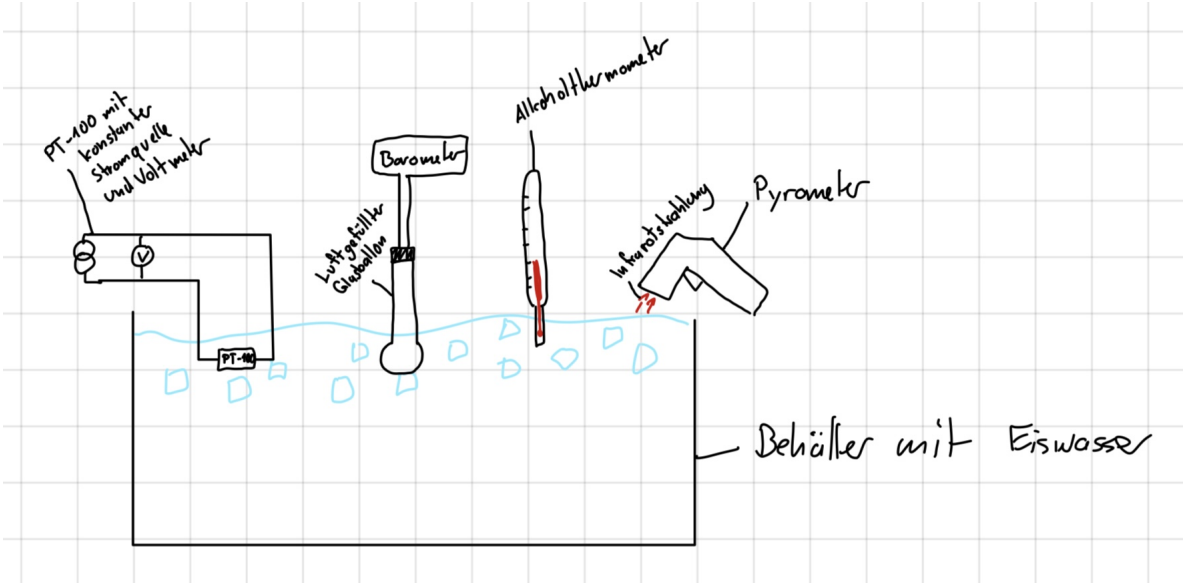


Figure 1: Aufbau der ersten Messung

Unser erster Versuchsaufbau besteht aus einem großen Behältnis, welches sowohl mit Wasser und Eis in einem Verhältnis gefüllt ist welches die 0°C nahezu erreichen sollte. Wir geben sowohl das PT-100 Thermometer und das Gasthermometer mit Luft in die Mischung, als auch ein geeichtes Alkoholthermometer, von dem wir die tatsächlichen Temperaturen ablesen können. An das Gasthermometer schließen wir ein Druckmessgerät an, und durch den PT-100 lassen wir von einer externen Spannungsquelle einen niedrigen Strom von $100mA$ fließen, damit wir mit einem Multimeter die abfallende Spannung abmessen können. Wenn sich die erwarteten 0°C ungefähr eingestellt haben, lesen wir die Spannung von dem Multimeter und den Druck von dem Gasthermometer ab. Zudem messen wir mit dem Pyrometer die Temperatur der Oberfläche des Wassers. Figure 1 zeigt den beschriebenen Aufbau.

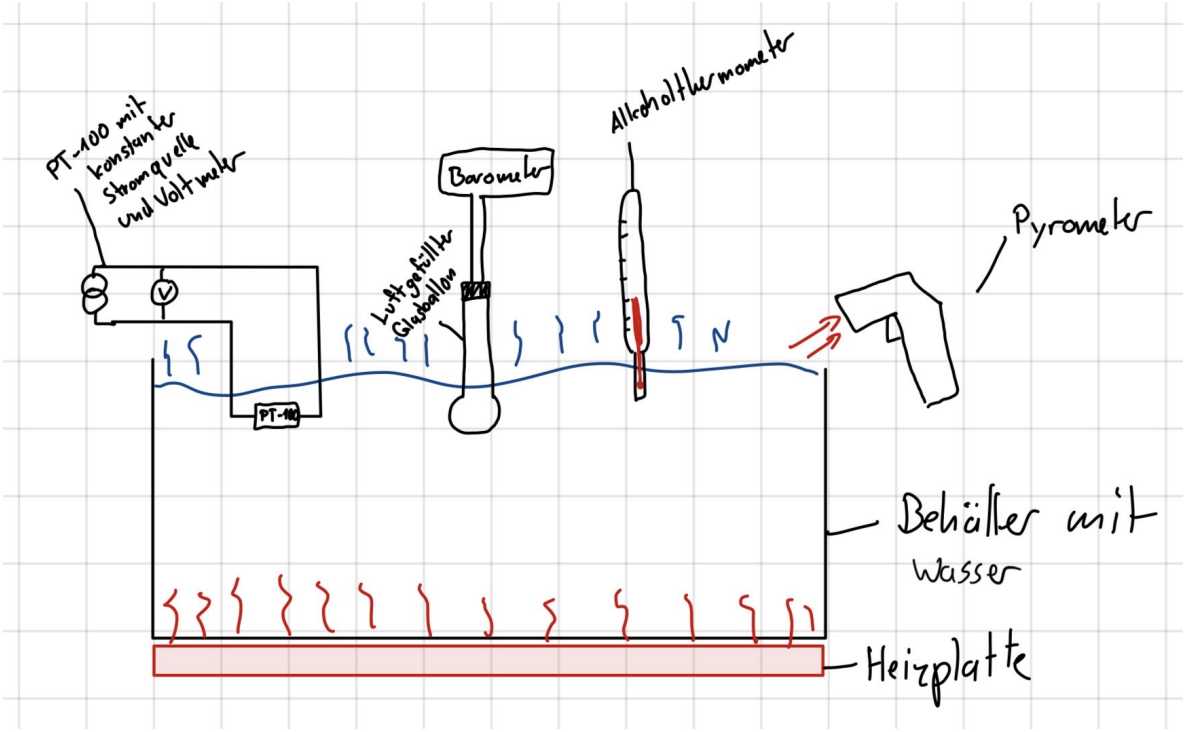


Figure 2: Aufbau der zweiten Messung

Nun belassen wir den Aufbau gleich, stellen ihn jedoch auf eine Heizplatte mit der wir das Eiswasser langsam erhitzen. In 10°C Schritten, die wir von dem Alkoholthermometer abmessen, nehmen wir die gleichen Messungen wie in Versuch 1 erneut. Hierbei achten wir vor Allem bei höheren Temperaturen darauf, das Pyrometer schräg und seitlich zu halten, um durch den aufsteigenden Wasserdampf die Messungen nicht zu verfälschen. In Figure 2 wird das noch einmal dargestellt.

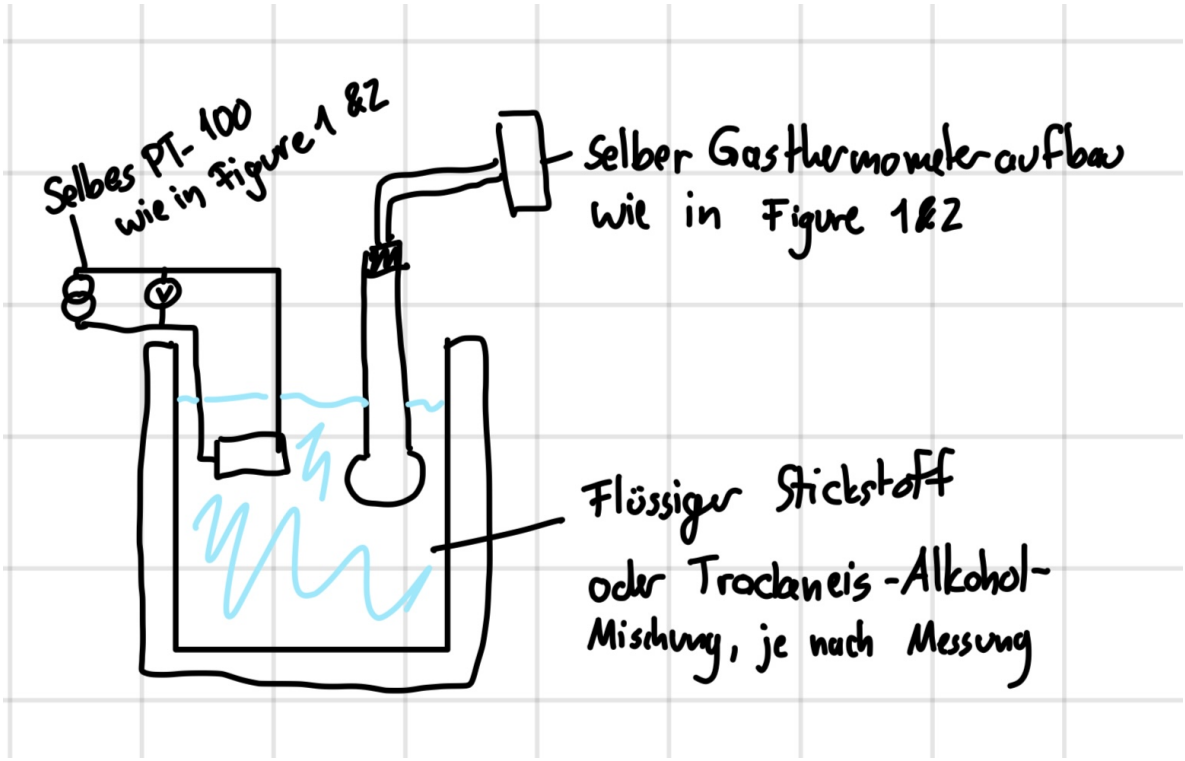


Figure 3: Aufbau der dritten Messung

Wir wollen nun mit dem Gasthermometer und dem PT-100 die Temperatur sowohl von flüssigem Stickstoff, als auch von einer Trockeneis-Alkoholmischung die Messdaten aufnehmen. Dafür füllen wir zwei Dewar-Gefäße jeweils mit dem flüssigen Stickstoff oder mit der Trockeneis-Alkoholmischung und geben vorsichtig die beiden Thermometer hinein, so wie in Figure 3 beschrieben. Sobald sich diese bedeckt in den Substanzen befinden, lesen wir die jeweiligen Messwerte ab und Protokollieren sie.

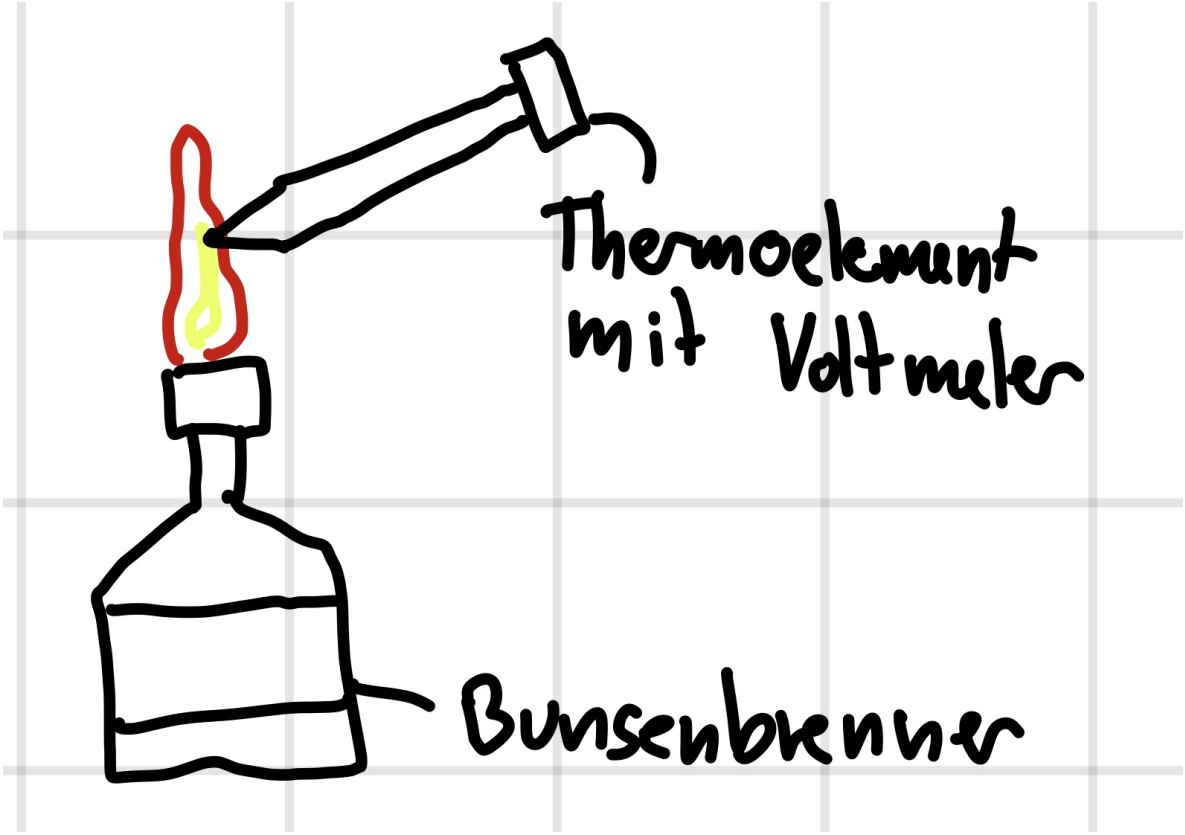


Figure 4: Aufbau der vierten Messung

Als letzte Messung (beschrieben in Figure 4) nehmen wir uns einen Bunsenbrenner und ein PtRh-Element. Zuerst lassen wir die Luftzufuhr des Brenners vollständig geöffnet und protokollieren die Anzeige des Thermoelements abhängig davon, wo wir es in die Flamme halten. Diese Messung wiederholen wir nun mit geschlossener Luftzufuhr.

1.3 Physikalische Grundlagen

Für diesen Versuch ist wichtig zu verstehen, was Temperatur überhaupt ist und wie sie Messbar ist. Keine dieser Messmethoden kann nämlich direkt die Temperatur messen, sonder misst leichter greifbare Größen, die im direkten Zusammenhang mit der Temperatur steht.
Die Temperatur T ist die Größe, die den thermischen Zustand eines Stoffes beschreibt. Die Temperatur wird von der mittleren kinetischen Energie der vibrierenden Teilchen des Stoffes festgelegt. Je höher diese, desto höher die Temperatur. Da die Messgeräte allerdings diese nicht Messen können, nutzen sie -je nach Thermometer- eben andere Größen.

Zum einen nutzen wir hier zum Beispiel das PT-100 Widerstandsthermometer. Dabei nutzen wir die Temperaturabhängigkeit des Widerstands und das ohmsche Gesetz um auf die Temperatur der Umgebung zu schließen. Der Widerstand $R(T)$ lässt sich für unseren Versuch gut als Polynom 2. Grades annähern, also:

$$R(T) = R_0(1 + AT + BT^2) \tag{1}$$

wobei R_0 der Widerstand bei 0°C ist ($R(0) = R_0$, bei dem PT-100 sind das 100Ω). Die Werte für A und B lassen sich als

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3}[^\circ\mathrm{C}^{-1}] \text{ und } B = -5,775 \cdot 10^{-7}[^\circ\mathrm{C}^{-2}]$$

bestimmen. Wenn man dies nun nach T umstellt und die negativen Ergebnisse ignoriert, erhält man:

$$T(R) = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B(1 - \frac{R}{R_0})}}{2B} \tag{2}$$

Der Widerstand wiederum lässt sich durch das ohmsche Gesetz bestimmen:

$$U = RI \Leftrightarrow R = \frac{U}{I} \tag{3}$$

Eingesetzt in (2) folgt:

$$T(U) = \frac{-A + \sqrt{A^2 - 4B(1 - \frac{U}{IR_0})}}{2B} \tag{4}$$

Die Temperaturmessung wird jedoch leicht verfälscht, da durch den Widerstand ein kleiner Strom geschickt werden muss, der mit

$$Q(t) = RI^2t \tag{5}$$

selbst Wärme produziert. Außerdem verfälschen auch die Leiter das Ergebnis, deshalb müssen wir, wie wir später herausfinden werden, eine 4-Leiter-Schaltung verwenden, um diesen Effekt zu minimieren.

Ein weiteres Thermometer, welches wir verwenden, ist das Druckthermometer. In diesem wird ein Gas eingeschlossen, welches dann bei Temperaturänderung expandiert oder komprimiert. Diese Volumenänderung wird durch die ideale Gasgleichung gut genug beschrieben (auch wenn es sich nicht um ein perfekt ideales Gas handelt):

$$pV = NkT \tag{6}$$

wobei p der Druck, V das Volumen, N die Teilchenanzahl, k die Boltzmann-konstante und T die Temperatur ist.
Wir sehen also, dass wir bei konstantem Volumen eine direkte Proportionalität zwischen dem Druck und der Temperatur haben. So lässt sich aus dem Druck die Temperatur ableiten.

Das dritte genutzte Thermometer ist ein so genanntes Pyrometer. Dies basiert auf dem Zusammenhang zwischen Intensität der ausgesandten Wärmestrahlung und der Temperatur selbst. Um daraus auf spezielle Werte zu schließen, ist es zuerst sinnvoll, einen schwarzen Körper zu definieren. Dieser ist ein idealisierter Körper, der alle einfallenden EM-Wellen absorbiert. Das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz sagt uns nun, dass ein solcher Körper maximales Emissionsvermögen hat. Wir legen deshalb dieses auf $\epsilon = 1$. Jeder andere, nicht idealisierte Körper muss demnach ein $\epsilon < 1$ besitzen. Für schwarze Strahler gilt das Plancksche Strahlungsgesetz, welches wie folgt formuliert ist:

$$M_\lambda(\lambda, T)\mathrm{d}A\,\mathrm{d}\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5}\frac{1}{\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1}\mathrm{d}A\,\mathrm{d}\lambda \tag{7}$$

M_λ ist hierbei die Strahlungsleistung von dem Flächenelement dA des Wellenlängenbereichs dλ. Wenn wir das nun über die gesamte Fläche des Körpers, sowie den kompletten Wellenlängenbereich integrieren, erhalten wir folgenden Zusammenhang:

$$P = \epsilon(T)\sigma A T^4 \tag{8}$$

σ ist die Stefan-Boltzmann-Konstante und $\epsilon(T)$ berücksichtigt, dass das Emissionsvermögen eines realen Körpers eben kleiner als 1 ist. Das Pyrometer macht sich also nun den Zusammenhang

$$P \propto T^4 \tag{9}$$

Als letztes Messgerät gibt es noch das Thermoelement, hier ein PtRh-Element. Dieses besteht aus zwei unterschiedlichen Metallen, die miteinander in Kontakt stehen. An diesem Kontakt baut sich aufgrund des Seebeck-Effekts eine Spannung auf, die von den verwendeten Metallen, aber vor allem auch von der Temperatur abhängt, die Thermospannung U_{th}. Den bei geschlossenem Stromkreis entstehenden Strom nennt man Thermostrom I_{th} Diese Thermospannung lässt sich für Metalle, an denen Kontaktstelle die Temperatur T_1 herrscht und an deren Enden T_2 herrscht, die Gleichung:

$$U_{th} = K(T_1 - T_2) \tag{10}$$

K ist eine Konstante, die nur von den verwendeten Metallen abhängt. So lassen sich allerdings nur Temperaturen vergleichen. Man muss T_2 kennen, um auf T_1 schließen zu können. Häufig wird dafür allerdings einfach die nahezu konstante Raumtemperatur verwendet.

Versuch 41: Temperaturmessung

Gangdruck: 1003 hPa
Fehler: ± 2 hPa

Manuel Sorgenfrei, Harish Mahendiran
Jonas Schweer
03.09.2024

[Schritt 1: Überprüfung, welcher PT-100 Aufbau genauer ist:

Spannung vom PT-100 in 4Fach und 2Fachstecker (0°C)

2x Steckung	4x Steckung
103,1 mV	101,7 mV

[Schritt 2: Alle Messinstrumente in Eiswasser legen, um einen Wert für 0°C zu erhalten

Mess-Instrumente bei 0°C geeicht

PT100	Barometer	Pyrometer	Thermometer
101.8 mV	918 mbar	-0,1°C	1°C

[Schritt 3: Erhitzen des Wassers bis 100°C und in 10°C Schritten messen.

Messreihe bei Erhitzung des Wassers mit versch. Geräten

Messinstrumente	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C	70°C	80°C
PT-100	104,5 mV	107,8 mV	112,1 mV	116,2 mV	120 mV	124,2 mV	128,4 mV	132,6 mV
Barometer	953 mbar	986 mbar	1020 mbar	1054 mbar	1089 mbar	1125 mbar	1163 mbar	1198 mbar
Pyrometer	9,8 C°	19°C	30,5°C	40°C	52°C	60°C	71,5°C	86°C

90°C	93°C
136,9 mV	138 mV
1233 mbar	1241 mbar
90,7°C	91,5°C

[Schritt 4: PT-100 und Barometer in Trockeneis-Alkohol-Mischung und flüssigen Stickstoff
→ Messwerte ablesen

Messgeräte in Trockeneis + Alkohol

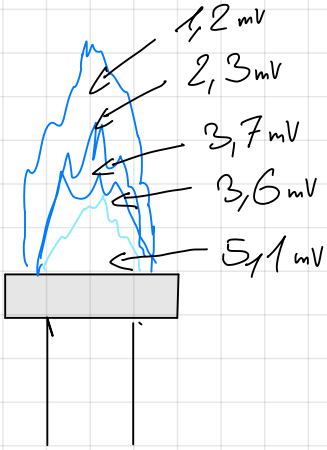
PT-100:	73,7 mV
Barometer:	695 mBar

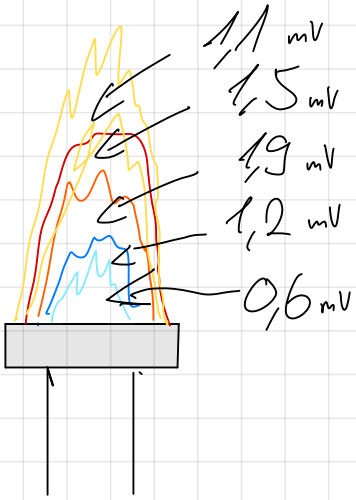
Messgeräte in flüssigem Stickstoff

PT-100	19,8 mV
Barometer	257 mBar

[Schritt 5: Messen einer Brennerflamme mit einem Thermoelement.

Luft:	auf U[mV]	zu U[mV]
unten	5,1	0,6
mitte	3,6	1,2
oben mitte	3,7	1,9
oben	2,3	1,5
ganz oben	1,2	1,1





M. Kurtz

3 Auswertung

Um die Aufgaben auswerten zu können, müssen wir zuerst die Fehler der Messinstrumente bestimmen. Aus den Handbüchern der meisten verwendeten Geräte finden wir viele Informationen:

Messinstrument	Multimeter	Barometer	Pyrometer
Fehler	$\pm(0,08\%\,des\,Messwertes + 0,5mV)$	$\pm 2mbar$	$\pm(1,5\%\,des\,Messwertes + 2°\mathrm{C})$

Table 1: Relevante Messfehler der genutzten Geräte

Der Fehler der Stromquelle wird als vernachlässigbar angenommen, da weder Herstellerangaben zur Verfügung standen, noch das Multimeter stark geschwankt hat. Deswegen wird der Fehler des Multimeters vermutlich überwiegen.
Also nächstes müssen wir den Druck des Barometers bei siedendem Wasser umrechnen, um den tatsächlichen Druck bei 100°C zu bekommen, da das Wasser nicht bei 100°C siedet, wenn es sich nicht um Normalbedingungen handelt. Dazu nutzen wir diese Formel:

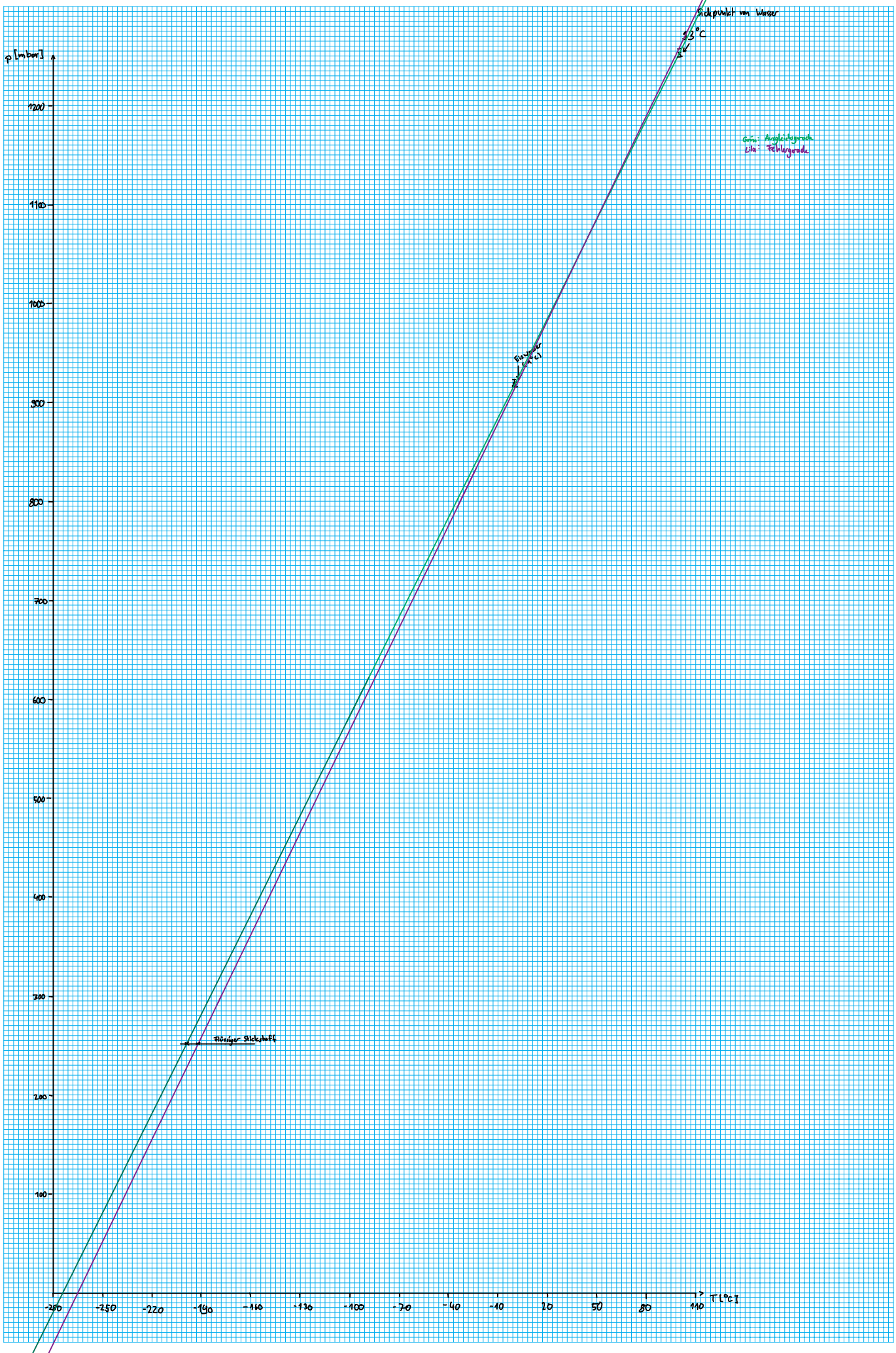
$$p_{NB} = p_{gem}\frac{1013,25hPa}{p_{LD}} \tag{11}$$

Wir setzen für p_{gem} unseren gemessenen Wert für das siedende Wasser von $1241mbar$ ein und für p_{LD} den Luftdruck, den wir mit einem Fehler von $\pm 2hPa$ genau ablesen konnten. Wir erhalten so $p_{NB} = 1253,68mbar$. Natürlich müssen wir auch dafür den Fehler mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung berechnen. Wir erhalten folgende Formel:

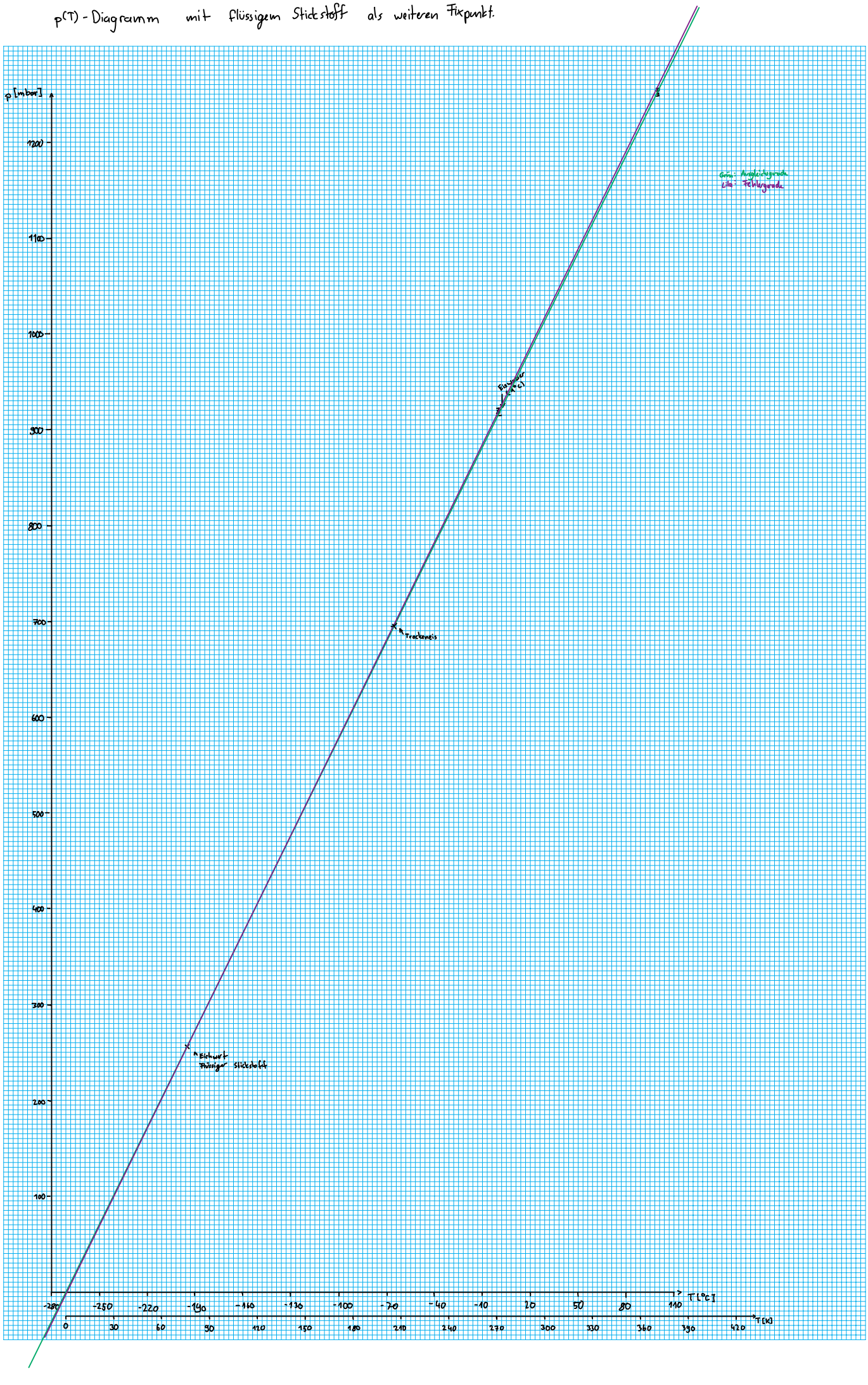
$$\Delta p_{NB} = \sqrt{(\frac{1013,25hPa}{p_{LD}}\Delta p_{gem})^2 + (\frac{1013,25hPa \cdot p_{gem}}{p_{LD}^2}\Delta p_{LD})^2} \tag{12}$$

Eingesetzt erhalten wir $\Delta p_{NB} = 2,57mbar$
Mit diesen, und einigen später auf den Blättern berechneten Werten, können wir nun die Auswertungsdiagramme anfertigen.

p(T) -Diagramm mit den 2 Fixpunkten



p(T) - Diagramm mit flüssigem Stickstoff als weiteren Fixpunkt.



Wir wollen nun zuerst die Geradengleichung bestimmen. Zuerst bestimmen wir die der Ausgleichsgeraden. Da diese nur durch die zwei Eichwerte geht, kann man die Gleichung wie folgt aufstellen:

$$p(T) = \frac{\Delta p}{\Delta T} T + p(0°\mathrm{C}) = \frac{335,68 mbar}{100°\mathrm{C}} T + 918 mbar \tag{13}$$

Um nun die Fehlergerade zu berechnen, nehmen wir an, die gerade geht durch den niedrigsten Druckwert, der im Fehler bei 0°C vorhanden ist, und den höchsten bei 100°C. Also:

$$p(T) = \frac{\Delta p}{\Delta T} T + p(0°\mathrm{C}) = \frac{340,25 mbar}{100°\mathrm{C}} T + 916 mbar \tag{14}$$

Um nun den absoluten Nullpunkt zu berechnen, setzen wir $p = 0mbar$ und stellen nach der Temperatur um. wir erhalten für die beiden Geraden:

- $T_{0,Ausgleich} = -\frac{918 mbar \cdot 100°\mathrm{C}}{335,68 mbar} = -273,47°\mathrm{C}$
- $T_{0,Fehler} = -\frac{916 mbar \cdot 100°\mathrm{C}}{340,25 mbar} = -269,21°\mathrm{C}$

also folgern wir: $T_0 = (-273,47 \pm 4,26)°\mathrm{C}$

Wenn wir nun die Temperatur für den Siedepunkt von flüssigem Stickstoff erhalten wollen, können wir einfach $p = 257mbar$ setzen, und erneut rechnen:

- $T_{N_{(l)},Ausgleich} = \frac{(257 mbar - 918 mbar) \cdot 100°\mathrm{C}}{335,68 mbar} = -196,91°\mathrm{C}$
- $T_{N_{(l)},Fehler} = \frac{(257 mbar - 916 mbar) \cdot 100°\mathrm{C}}{340,25 mbar} = -193,68°\mathrm{C}$

Also ist unser Wert für den Siedepunkt von flüssigem Stickstoff $T_{N_{(l)},Fehler} = (-196,91 \pm 3,23)°\mathrm{C}$

Das selbe können wir für die Trockeneis-Alkoholmischung berechnen:

- $T_{CO_{2,(s)},Ausgleich} = \frac{(695 mbar - 918 mbar) \cdot 100°\mathrm{C}}{335,68 mbar} = -66,43°\mathrm{C}$
- $T_{CO_{2,(s)},Fehler} = \frac{(695 mbar - 916 mbar) \cdot 100°\mathrm{C}}{340,25 mbar} = -64,95°\mathrm{C}$

Es ergibt sich: $T_{CO_{2,(s)}} = (-66,43 \pm 1,48)°\mathrm{C}$

Tabelle Druck - Temperatur laut Diagramm + zugehöriger PT-100 Spannungsabfall + berechneter Widerstand.

	p [mbar]	T [°C]	R [Ω]	ΔR [Ω]
Eichwert →	257	-195,8	19,8	0,5
	695	-65,4	73,7	0,6
Eichwert →	918	1	101,8	0,6
	953	11,4	104,5	0,6
	986	21,2	107,8	0,6
	1020	31,4	112,1	0,6
	1054	41,5	116,2	0,6
	1089	51,9	120	0,6
	1125	62,6	124,2	0,6
	1163	73,9	128,4	0,6
	1198	84,4	132,6	0,6
	1233	94,8	136,9	0,6
	1241	97,2	138	0,6

Berechnung der Temperaturwerte mit einer Geradengleichung durch die 2 Eichwerte. So werden Ablesefehler vermieden: $T = mp + c$

$$m = \frac{\Delta T}{\Delta p} = \frac{196,8\,°C}{661\,mbar}$$

$$\Rightarrow T = \frac{196,8\,°C}{661\,mbar}\,p + c$$

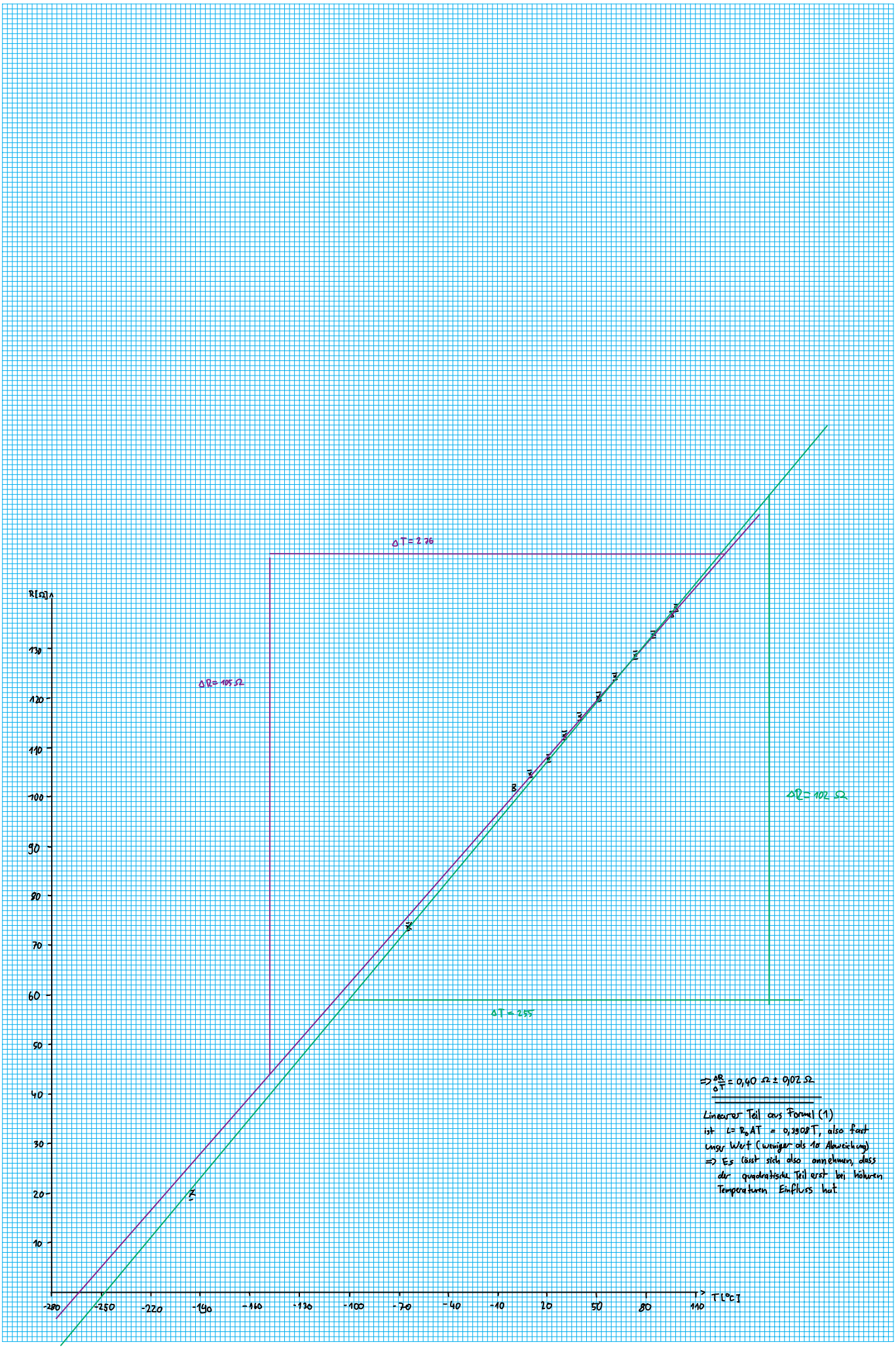
$$c = T - mp = 1 - \frac{196,8\,°C}{661\,mbar} \cdot 918\,mbar = -272,32\,°C$$

Als Fehler bleibt jetzt die Druckmessung bei 1°C

$$\Rightarrow \Delta T = \frac{\partial T}{\partial p}\,\Delta p = \frac{196,8\,°C}{661\,mbar} \cdot 2\,mbar = 0,6\,°C$$

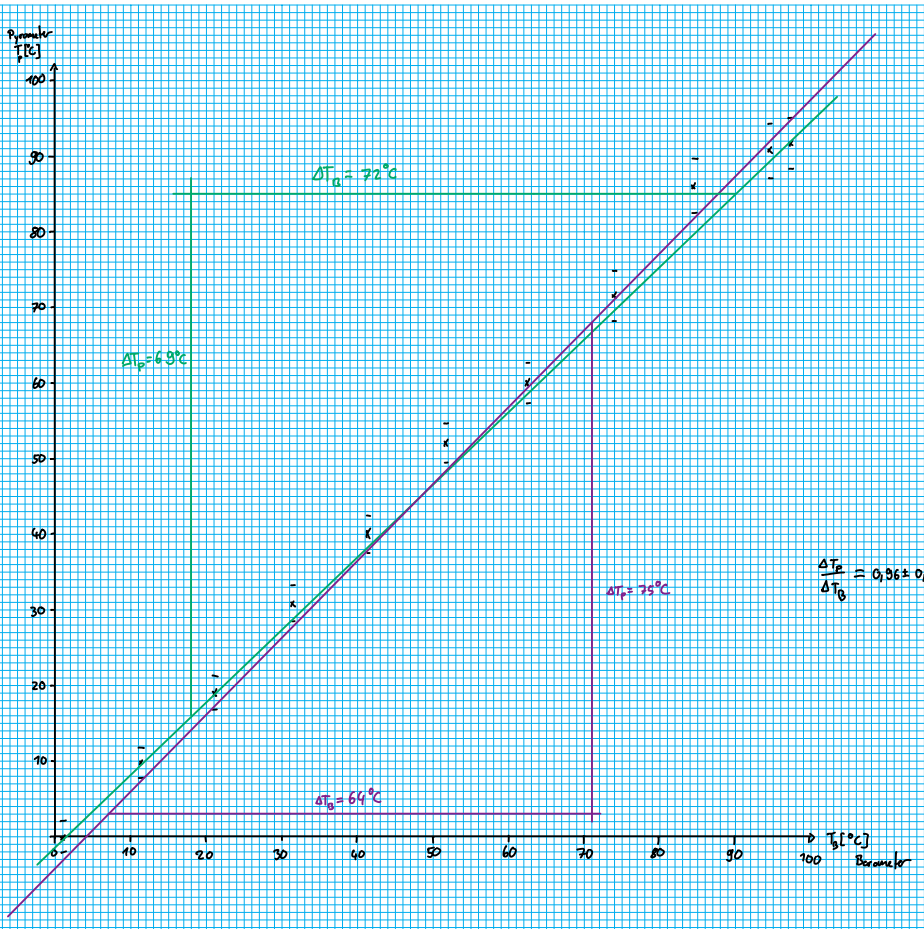
Und der Fehler des Multimeters für ΔR

$$\Delta R = \frac{\partial R}{\partial U}\,\Delta U = \frac{\Delta U}{I}$$, für ΔU siehe oben in Table 1



$\Rightarrow \frac{\Delta R}{\Delta T} = 0{,}40\ \Omega \pm 0{,}02\ \Omega$

Linearer Teil aus Formel (1)
ist $L = R_0 \Delta T = 0{,}39\,08\,T$, also fast
ungl. W/V (weniger als 1σ Abweichung)
⇒ Es lässt sich also annehmen, dass
der quadratische Teil erst bei höheren
Temperaturen Einfluss hat



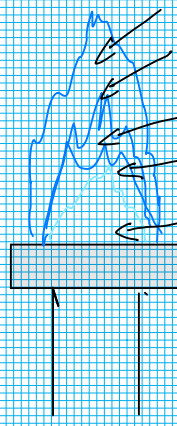
Per Handbuch

T[°C]	ΔT[°C]
-0,1	2
9,8	2,1
19	2,3
30,8	2,5
40	2,6
52	2,8
60	2,9
71,5	3,1
86	3,3
90,7	3,4
91,5	3,4

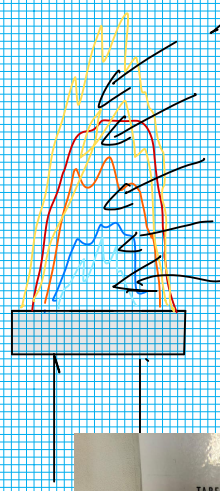
↳ Fehler Pyrometer

$\frac{\Delta T_F}{\Delta T_B} = 0,96 \pm 0,21$, also nahezu eine 1:1-Steigung, jedoch ist die Unsicherheit sehr groß.

Aufgabe 3:



1,2 mV ≙ 490°C
2,3 mV ≙ 680°C
3,7 mV ≙ 870°C
3,6 mV ≙ 855°C
5,1 mV ≙ 1030°C



1,1 mV ≙ 470°C
1,5 mV ≙ 550°C
1,9 mV ≙ 620°C
1,2 mV ≙ 490°C
0,6 mV ≙ 350°C

Umrechnung mit Hilfe beigelegter Tabelle:

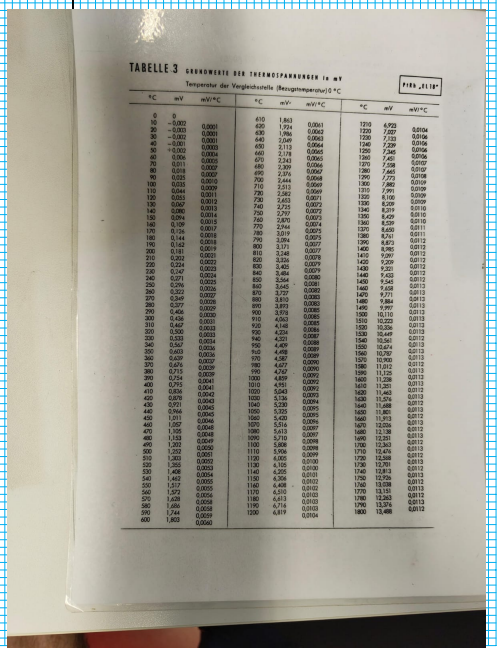


TABELLE 3 GEBRAUCHSWERTE DER THERMOSPANNUNGEN in mV

Temperatur der Vergleichsstelle (Bezugstemperatur) 0 °C

°C	mV	mV/°C	°C	mV	mV/°C	°C	mV	mV/°C
0	0		610	1,863	0,0061	1210	6,929	
10	−0,002	0,0001	620	1,924	0,0062	1220	7,007	0,0104
20	−0,003	0,0001	630	1,986	0,0062	1230	7,085	0,0104
30	−0,002	0,0001	640	2,049	0,0063	1240	7,163	0,0105
40	−0,001	0,0001	650	2,112	0,0064	1250	7,241	0,0106
50	+0,000	0,0002	660	2,176	0,0065	1260	7,320	0,0106
60	0,006	0,0002	670	2,243	0,0065	1270	7,398	0,0107
70	0,011	0,0002	680	2,309	0,0066	1280	7,477	0,0107
80	0,018	0,0007	690	2,376	0,0067	1290	7,555	0,0108
90	0,025	0,0010	700	2,444	0,0068	1300	7,633	0,0109
100	0,035	0,0009	710	2,513	0,0069	1310	7,712	0,0109
110	0,044	0,0011	720	2,582	0,0069	1320	7,791	0,0109
120	0,053	0,0012	730	2,653	0,0071	1330	8,100	0,0109
130	0,065	0,0013	740	2,725	0,0072	1340	8,179	0,0110
140	0,080	0,0014	750	2,797	0,0073	1350	8,257	0,0110
150	0,094	0,0015	760	2,870	0,0073	1360	8,336	0,0110
160	0,109	0,0017	770	2,944	0,0074	1370	8,650	0,0111
170	0,126	0,0018	780	3,019	0,0075	1380	8,741	0,0111
180	0,144	0,0018	790	3,094	0,0077	1390	8,873	0,0112
190	0,163	0,0019	800	3,171	0,0077	1400	8,985	0,0112
200	0,183	0,0021	810	3,248	0,0078	1410	9,097	0,0112
210	0,203	0,0022	820	3,326	0,0079	1420	9,209	0,0112
220	0,224	0,0023	830	3,405	0,0079	1430	9,321	0,0112
230	0,247	0,0024	840	3,484	0,0080	1440	9,433	0,0112
240	0,271	0,0024	850	3,564	0,0081	1450	9,545	0,0113
250	0,296	0,0025	860	3,645	0,0082	1460	9,658	0,0113
260	0,321	0,0026	870	3,727	0,0083	1470	9,771	0,0113
270	0,347	0,0027	880	3,810	0,0083	1480	9,884	0,0113
280	0,377	0,0028	890	3,893	0,0083	1490	9,997	0,0113
290	0,406	0,0030	900	3,978	0,0085	1500	10,110	0,0113
300	0,436	0,0030	910	4,063	0,0085	1510	10,223	0,0113
310	0,467	0,0031	920	4,148	0,0085	1520	10,336	0,0113
320	0,500	0,0033	930	4,234	0,0086	1530	10,449	0,0113
330	0,533	0,0034	940	4,321	0,0087	1540	10,561	0,0112
340	0,567	0,0034	950	4,409	0,0088	1550	10,674	0,0113
350	0,603	0,0036	960	4,498	0,0089	1560	10,787	0,0113
360	0,639	0,0037	970	4,587	0,0089	1570	10,900	0,0113
370	0,676	0,0039	980	4,677	0,0090	1580	11,012	0,0113
380	0,715	0,0039	990	4,768	0,0091	1590	11,125	0,0113
390	0,754	0,0041	1000	4,859	0,0092	1600	11,238	0,0113
400	0,795	0,0041	1010	4,951	0,0092	1610	11,351	0,0113
410	0,836	0,0041	1020	5,043	0,0092	1620	11,463	0,0112
420	0,878	0,0042	1030	5,136	0,0093	1630	11,576	0,0113
430	0,921	0,0043	1040	5,230	0,0094	1640	11,688	0,0112
440	0,966	0,0045	1050	5,325	0,0095	1650	11,801	0,0113
450	1,011	0,0045	1060	5,420	0,0095	1660	11,913	0,0112
460	1,057	0,0046	1070	5,516	0,0096	1670	12,026	0,0113
470	1,105	0,0048	1080	5,613	0,0097	1680	12,138	0,0112
480	1,153	0,0048	1090	5,710	0,0097	1690	12,251	0,0113
490	1,203	0,0050	1100	5,808	0,0098	1700	12,363	0,0112
500	1,252	0,0049	1110	5,906	0,0098	1710	12,476	0,0113
510	1,303	0,0051	1120	6,005	0,0100	1720	12,588	0,0112
520	1,355	0,0053	1130	6,105	0,0100	1730	12,701	0,0113
530	1,408	0,0054	1140	6,205	0,0101	1740	12,813	0,0112
540	1,462	0,0055	1150	6,306	0,0102	1750	12,926	0,0113
550	1,517	0,0055	1160	6,408	0,0102	1760	13,038	0,0112
560	1,572	0,0056	1170	6,510	0,0103	1770	13,151	0,0113
570	1,628	0,0058	1180	6,613	0,0103	1780	13,263	0,0112
580	1,686	0,0058	1190	6,716	0,0103	1790	13,376	0,0113
590	1,744	0,0059	1200	6,819	0,0104	1800	13,488	0,0112
600	1,803	0,0060						

4 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Zusammengefasst haben wir zuerst die Druckwerte eines Gasthermometers für verschiedene Fixpunkt-Temperaturen gemessen, um so eine Temperaturskala erstellen zu können. Auch einen Wert für den absoluten Nullpunkt konnten wir so bestimmen und daraus eine Kelvin-Skala konstruieren. Wir haben dann die Werte des Spannungsabfalls über ein Platinwiderstandsthermometers mit den Druckwerten des Gasthermometers der gleichen Temperatur verglichen und konnten so auch eine Skala für das Widerstandsthermometer erstellen. Beim Vergleich mit der Gleichung (1), fiel auf, dass der lineare Teil dieser Gleichung mit weniger als 1σ von der von uns ermittelten Steigung abweicht. Des weiteren haben wir den Druck auch noch mit den Messwerten des Pyrometers verglichen, um dessen Genauigkeit zu analysieren. Als letzten haben wir dann noch die Temperaturverteilung einer Bunsenbrennerflamme durch ein Thermoelement bestimmen können.

Bei der Berechnung des absoluten Nullpunktes kamen wir auf das Ergebnis $T_0 = (-273,47 \pm 4,26)°\mathrm{C}$, was verglichen mit dem Literaturwert von $-273,15°\mathrm{C}$ eine Abweichung von gerade mal 0,2% entspricht. Dem entsprechend würde ich sagen, dass diese Messung gelungen ist. Leider muss man allerdings dazu sagen, dass ein Fehler von $\pm 4,26$ durchaus sehr groß ist und vermutlich darauf zurückzuführen ist, dass die Fixpunkte relativ hoch gewählt wurden (Das Ergebnis wurde ohne den Siedepunkt von flüssigem Stickstoff berechnet, was vermutlich zu diesem großen Fehler geführt hat.)
Beim auftragen der Widerstände des PT-100 fiel vor Allem auf, dass der lineare Teil den Temperaturbereich unserer Messwerte sehr gut beschreibt. Wie bereits erwähnt hat auch hier die Ausgleichsgerade eine Abweichung von $< 1\sigma$. Ich nehme an, dass durch den Vorfaktor der Dimension 10^{-6} der quadratische Teil so sehr gestaucht wird, dass er erst bei wesentlich höheren Temperaturen einen merkbaren Unterschied macht.
Bei der Messreihe des Pyrometers bemerkte man besonders die Ungenauigkeit bei höheren Temperaturen, aber auch niedrigen Temperaturen. Dies lag sicherlich auch daran, dass wir das Messgerät nicht immer 100% schräg neben das Gefäß hielten und somit doch etwas Wasserdampf bei höheren Temperaturen in das Gerät kam, und daran, dass besonders bei dem Eiswasser die Oberfläche mehr aus Eis bestand und so dieses alleine gemessen wurde, anstatt das Gemisch insgesamt. Allerdings gibt es auch Störfaktoren der Umgebung, die das Ergebnis genauso verfälschen und auf die wir keine Einfluss nehmen konnten, wie Wärmestrahlung von anderen Objekten. Trotz der Ungenauigkeiten ist das Pyrometer doch sehr praktisch, das es das einzige unserer Messmittel war, das keinen Kontakt mit der zu messenden Substanz brauchte.
Die letzte Messung mit dem Thermoelement zeigt auf, dass die Flamme bei geschlossener Luftzufuhr wesentlich heißer brennt. Auch hat sie aufgezeigt, dass es am besten ist, zu erhitzende Dinge eher mittig in der Flamme zu platzieren. Allerdings sind die tatsächlichen Werte der Temperatur sicher nicht genau, da wir das PtRh-Element von Hand in die Flamme gehalten haben, und somit nicht gewährleistet werden konnten, dass wir die Kontaktstelle immer konstant gehalten haben.
Alles in Allem bin ich aber doch sehr zufrieden mit den Messergebnissen, vor Allem mit denen des Gasthermometers, da unser Nullpunkt doch schon sehr genau bestimmt wurde.