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

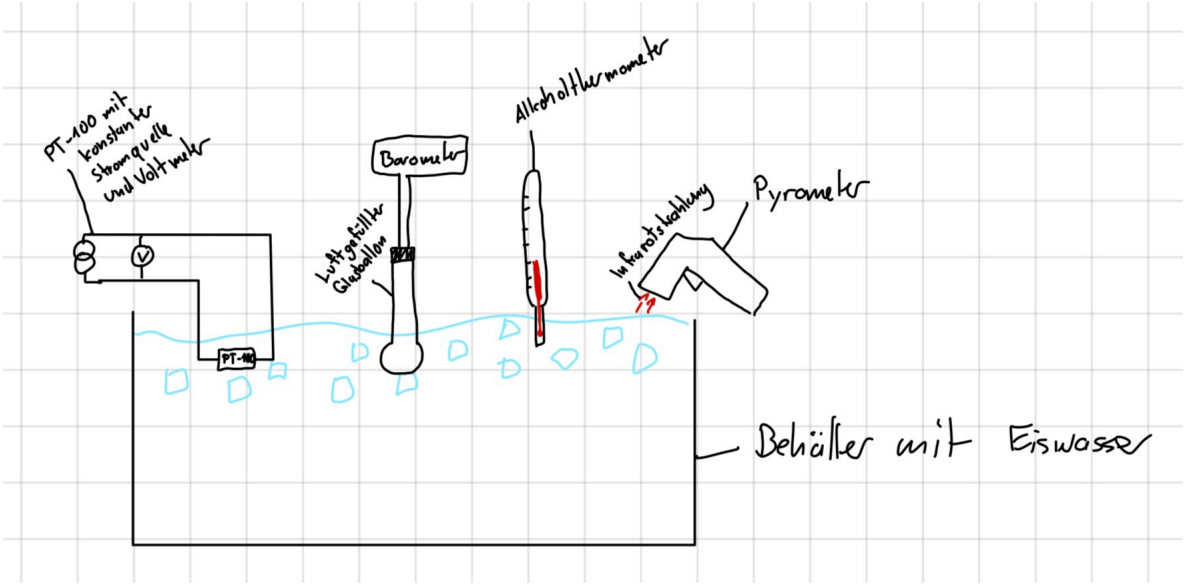


Figure 1: Aufbau der ersten Messung

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.

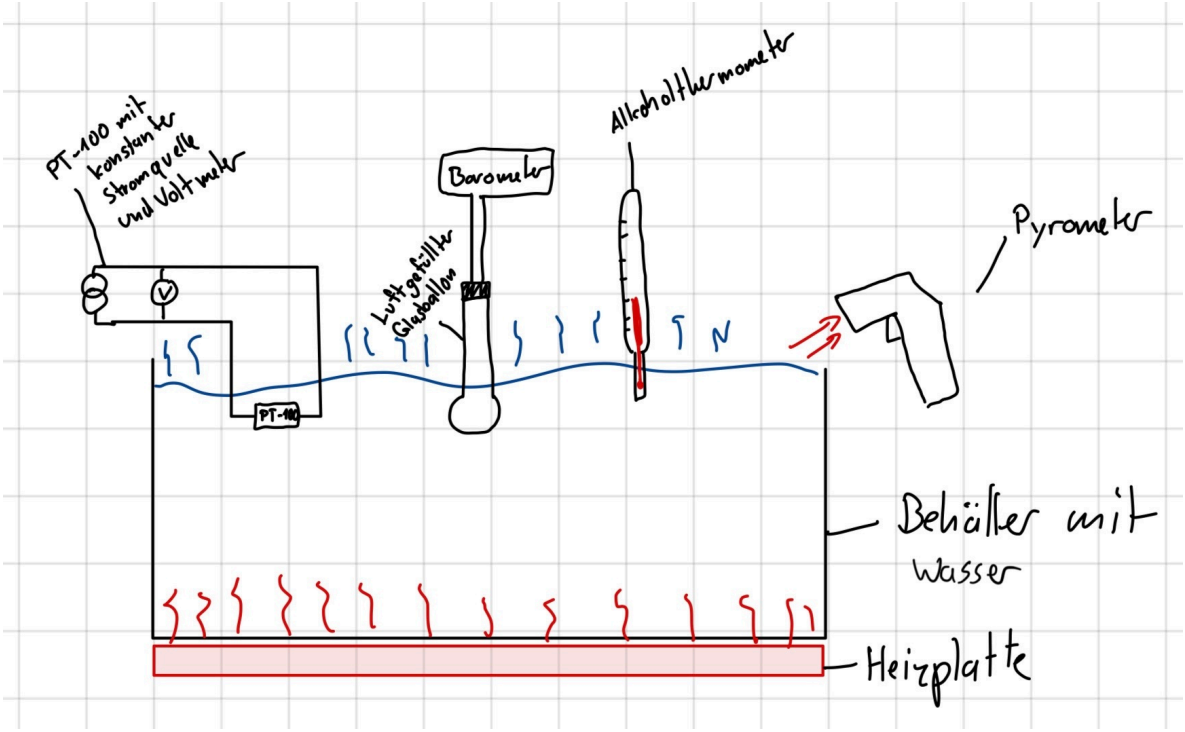


Figure 2: Aufbau der zweiten Messung

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.

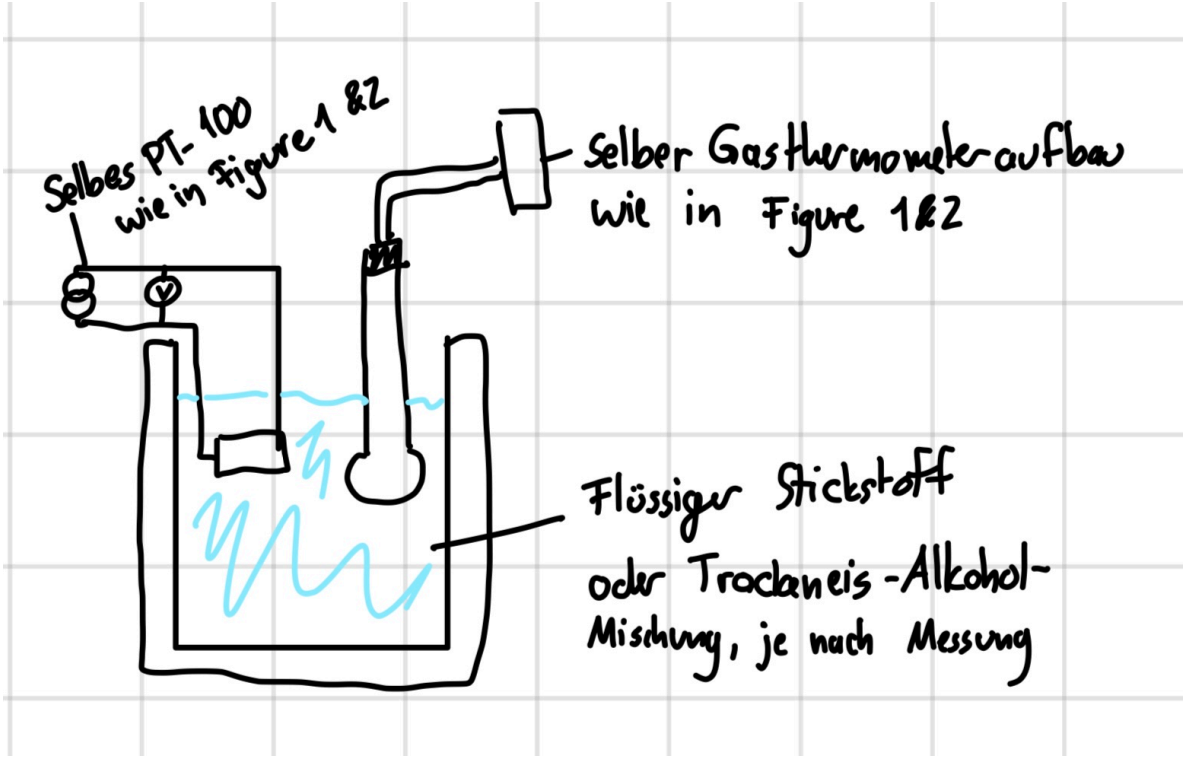


Figure 3: Aufbau der dritten Messung

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.

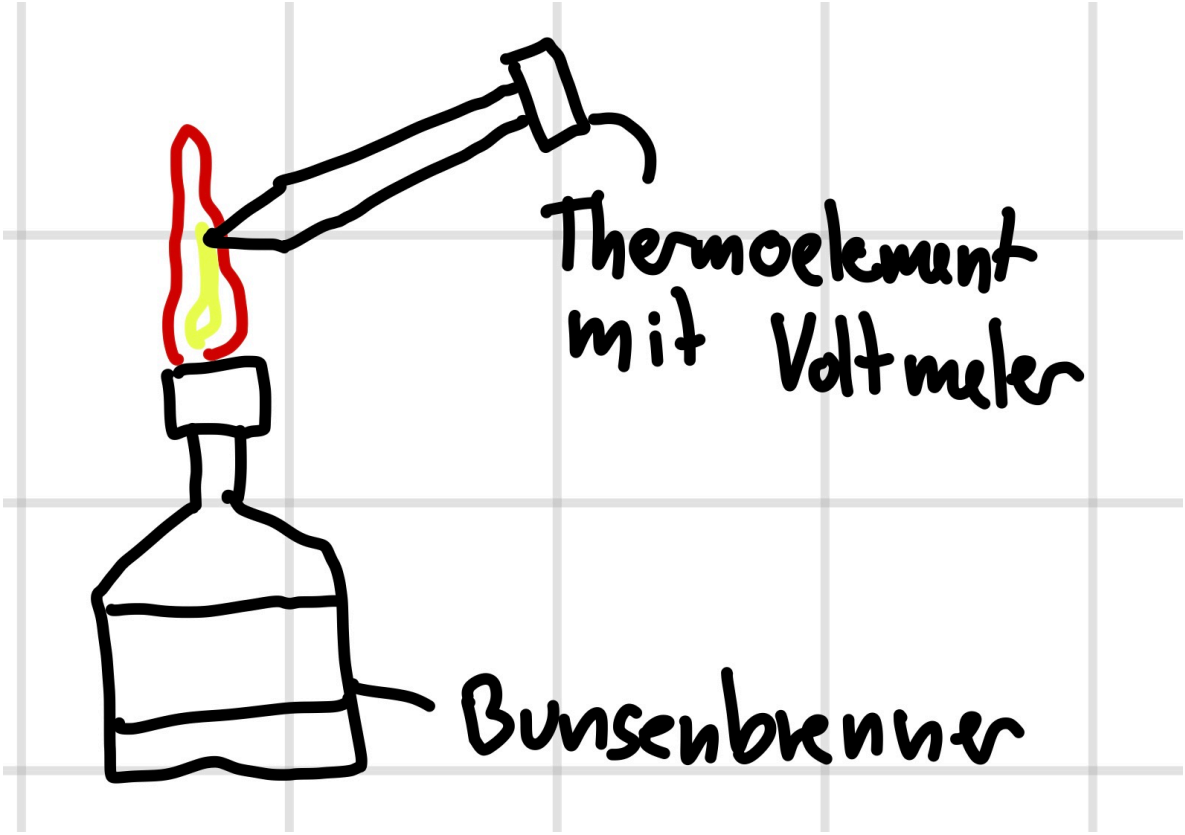


Figure 4: Aufbau der vierten Messung

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

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

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

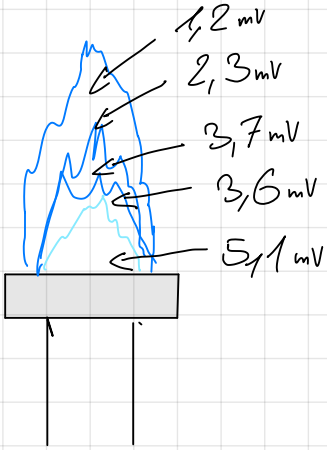
PT-100:	73,7 mV
Barometer:	695 mBar

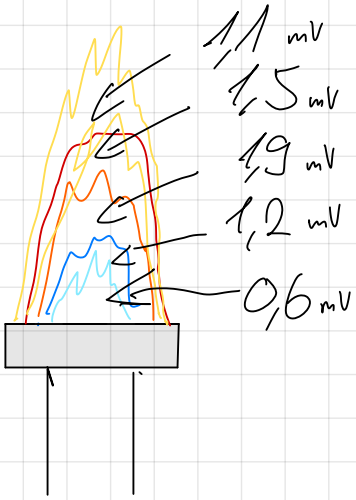
Messgeräte in flüssigem Stickstoff

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	$\pm(0,08\%\, des\, Messwertes + 0,5mV)$	$\pm 2mbar$	$\pm(1,5\%\, des\, Messwertes + 2°C)$

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:

$$p_{NB} = p_{gem}\frac{1013,25hPa}{p_{LD}} \quad (11)$$

✓

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:

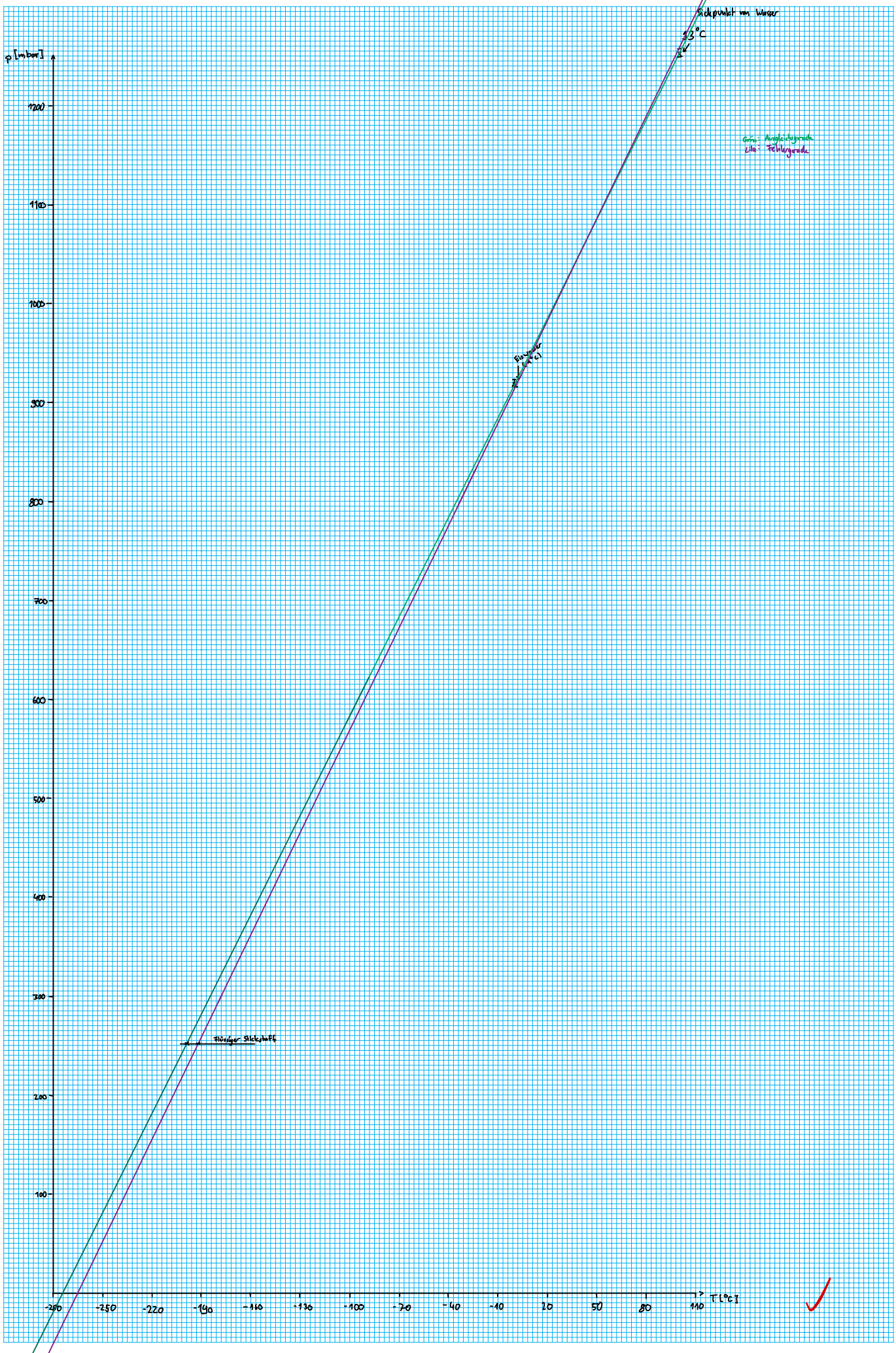
sign. Stellen

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

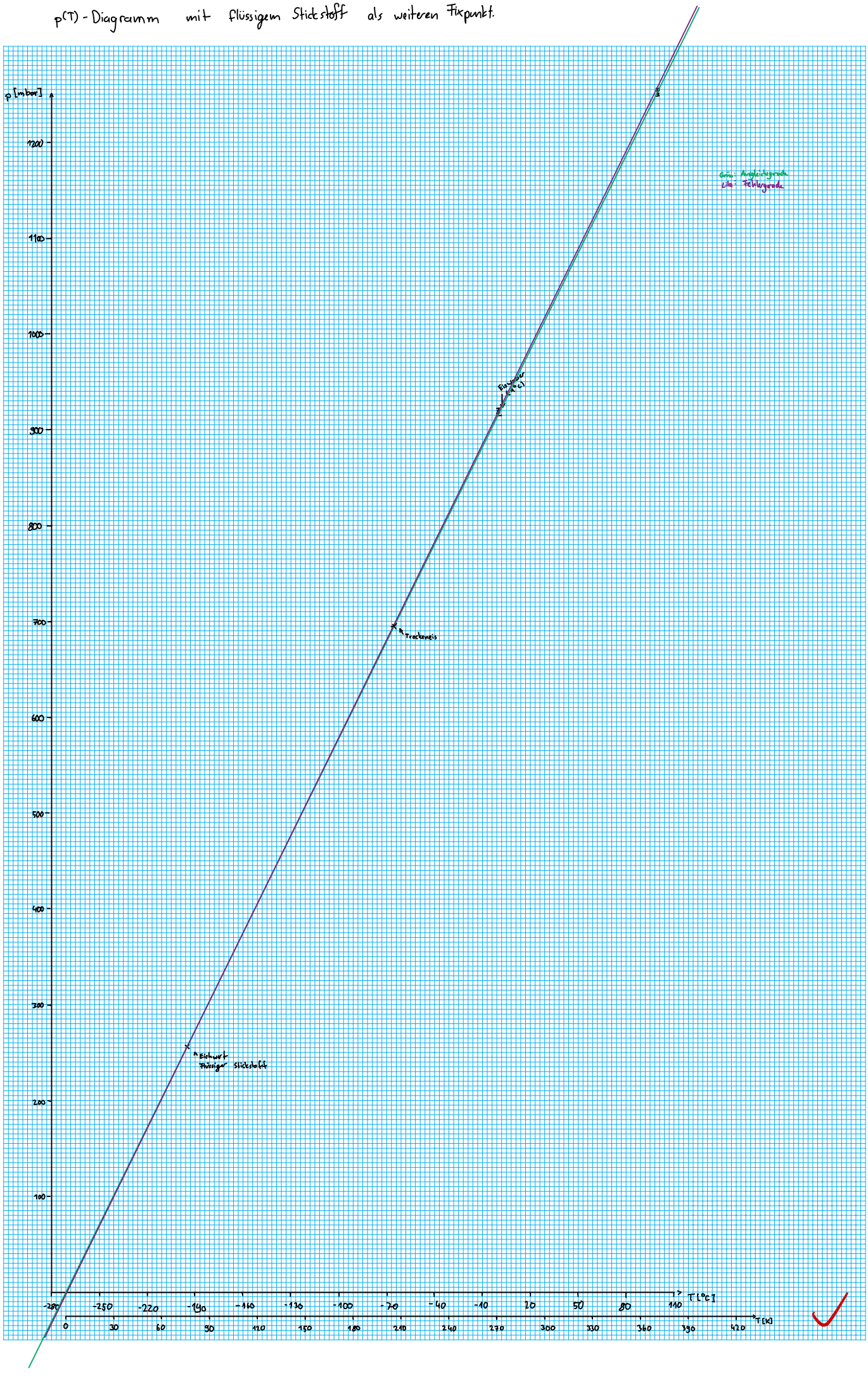
✓

Eingesetzt erhalten wir $\Delta p_{NB} = 2,57mbar$ sign. St.
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 $p = 0 mbar$ und stellen nach der Temperatur um. wir erhalten für die beiden Geraden:

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

Schreibweise: $T_0 = -(273 \pm 4)°\mathrm{C}$

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

Wenn wir nun die Temperatur für den Siedepunkt von flüssigem Stickstoff erhalten wollen, können wir einfach $p = 257 mbar$ 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 $T_{N_{(l)},Fehler} = (-196,91 \pm 3,23)°\mathrm{C}$

sign. St.

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: $T_{CO_{2,(s)}} = (-66,43 \pm 1,48)°\mathrm{C}$ sign. St.

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: $T = mp + c$

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

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

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

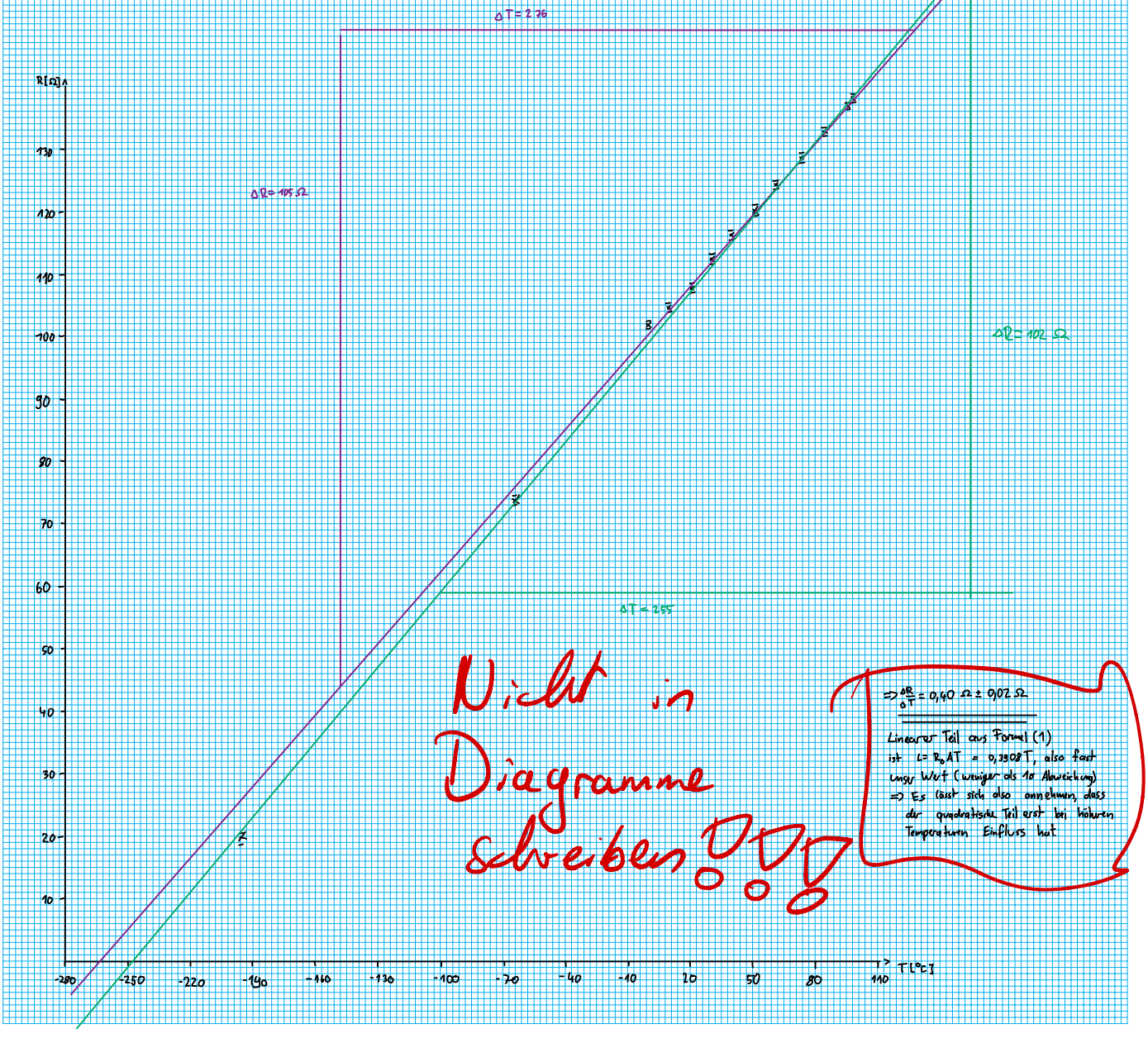
Als Fehler bleibt jetzt die Druckmessung bei 1°C

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

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

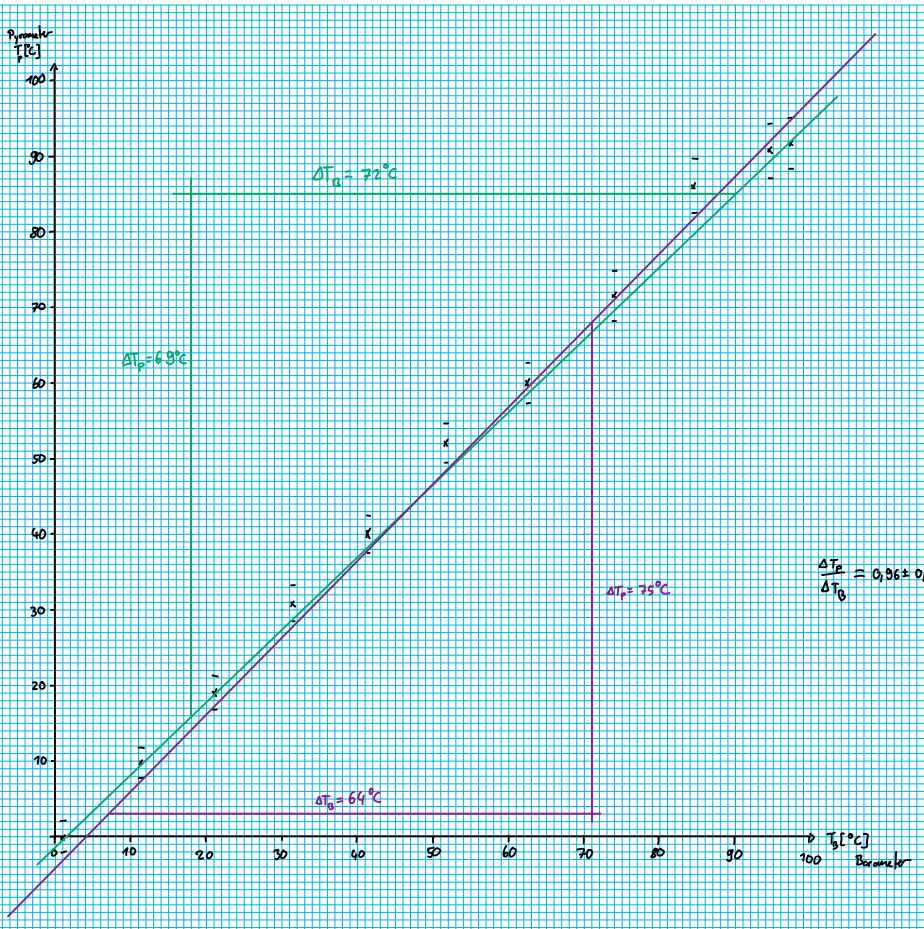
Skalierung 1



Nicht in Diagramme schreiben!!!

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

Linearer Teil aus Formel (1) ist $L = R_0 \Delta T = 0{,}3908\,T$, also fast linear w/r/t (weniger als 1σ Abweichung)
⇒ Es lässt sich also annehmen, dass der quadratische Teil erst bei höheren Temperaturen Einfluss hat



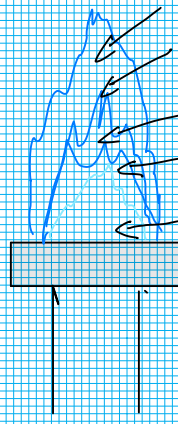
Per Handbuch

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

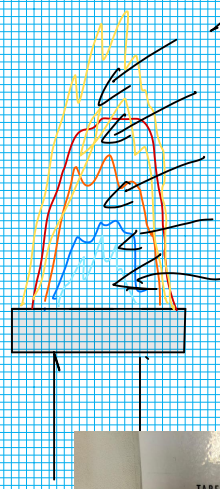
↳ Fehler Pyrometer

$\frac{\Delta T_F}{\Delta T_B} = 0,96 \pm 0,21$, 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:

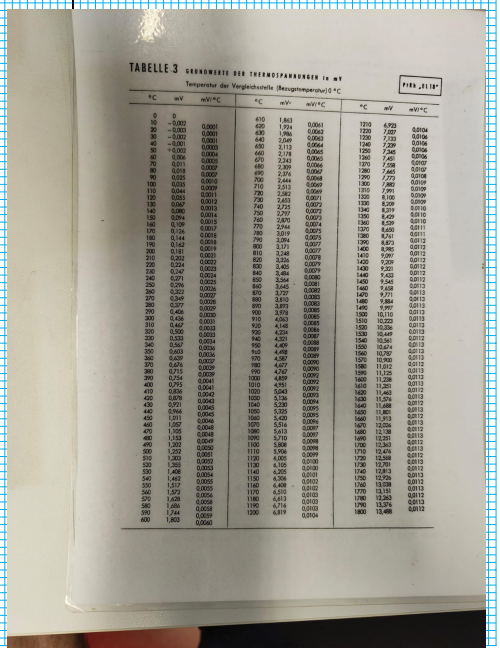


TABELLE 3 GRUNDWERTE DER THERMOSPANNUNGEN in mV

Temperatur der Vergleichsstelle (Bezugstemperatur) 0 °C

°C	mV	mV/°C
0	0	
10	−0,002	0,0001
20	−0,003	0,0001
30	−0,002	0,0001
40	−0,001	0,0001
50	+0,000	0,0002
60	0,006	0,0006
70	0,011	0,0007
80	0,018	0,0007
90	0,025	0,0010
100	0,035	0,0009
110	0,044	0,0011
120	0,055	0,0012
130	0,067	0,0013
140	0,080	0,0014
150	0,094	0,0015
160	0,109	0,0017
170	0,126	0,0018
180	0,144	0,0018
190	0,163	0,0019
200	0,183	0,0021
210	0,203	0,0021
220	0,224	0,0022
230	0,247	0,0023
240	0,271	0,0024
250	0,296	0,0025
260	0,322	0,0026
270	0,349	0,0027
280	0,377	0,0028
290	0,406	0,0029
300	0,436	0,0030
310	0,467	0,0031
320	0,500	0,0033
330	0,533	0,0034
340	0,567	0,0034
350	0,603	0,0036
360	0,639	0,0037
370	0,676	0,0039
380	0,715	0,0039
390	0,754	0,0041
400	0,795	0,0041
410	0,836	0,0042
420	0,878	0,0043
430	0,921	0,0043
440	0,966	0,0045
450	1,011	0,0045
460	1,057	0,0046
470	1,105	0,0048
480	1,153	0,0048
490	1,203	0,0050
500	1,252	0,0049
510	1,303	0,0051
520	1,355	0,0053
530	1,408	0,0054
540	1,462	0,0055
550	1,517	0,0055
560	1,572	0,0056
570	1,628	0,0058
580	1,686	0,0058
590	1,744	0,0059
600	1,803	0,0060
610	1,863	0,0061
620	1,924	0,0062
630	1,986	0,0062
640	2,049	0,0063
650	2,113	0,0064
660	2,178	0,0065
670	2,243	0,0065
680	2,309	0,0066
690	2,376	0,0067
700	2,444	0,0068
710	2,513	0,0069
720	2,582	0,0069
730	2,653	0,0071
740	2,725	0,0072
750	2,797	0,0073
760	2,870	0,0073
770	2,944	0,0074
780	3,019	0,0075
790	3,094	0,0075
800	3,171	0,0077
810	3,248	0,0078
820	3,326	0,0078
830	3,405	0,0079
840	3,484	0,0079
850	3,564	0,0080
860	3,645	0,0081
870	3,727	0,0082
880	3,810	0,0083
890	3,893	0,0083
900	3,978	0,0085
910	4,063	0,0085
920	4,148	0,0085
930	4,234	0,0086
940	4,321	0,0087
950	4,409	0,0088
960	4,498	0,0089
970	4,587	0,0089
980	4,677	0,0090
990	4,768	0,0091
1000	4,859	0,0092
1010	4,951	0,0092
1020	5,043	0,0092
1030	5,136	0,0093
1040	5,230	0,0094
1050	5,325	0,0095
1060	5,420	0,0095
1070	5,516	0,0096
1080	5,613	0,0097
1090	5,710	0,0097
1100	5,808	0,0098
1110	5,906	0,0098
1120	6,005	0,0099
1130	6,105	0,0100
1140	6,205	0,0100
1150	6,306	0,0102
1160	6,408	0,0102
1170	6,510	0,0102
1180	6,613	0,0103
1190	6,716	0,0103
1200	6,819	0,0104
1210	6,923	0,0104
1220	7,027	0,0104
1230	7,131	0,0104
1240	7,235	0,0105
1250	7,340	0,0106
1260	7,451	0,0106
1270	7,558	0,0107
1280	7,665	0,0107
1290	7,772	0,0108
1300	7,880	0,0109
1310	7,991	0,0109
1320	8,100	0,0109
1330	8,209	0,0110
1340	8,319	0,0110
1350	8,429	0,0110
1360	8,539	0,0110
1370	8,650	0,0111
1380	8,761	0,0111
1390	8,873	0,0112
1400	8,985	0,0112
1410	9,097	0,0112
1420	9,209	0,0112
1430	9,321	0,0112
1440	9,433	0,0112
1450	9,545	0,0112
1460	9,658	0,0113
1470	9,771	0,0113
1480	9,884	0,0113
1490	9,997	0,0113
1500	10,110	0,0113
1510	10,223	0,0113
1520	10,336	0,0113
1530	10,449	0,0113
1540	10,561	0,0112
1550	10,674	0,0113
1560	10,787	0,0113
1570	10,900	0,0113
1580	11,012	0,0113
1590	11,125	0,0113
1600	11,238	0,0113
1610	11,351	0,0113
1620	11,463	0,0112
1630	11,576	0,0113
1640	11,688	0,0112
1650	11,801	0,0112
1660	11,913	0,0112
1670	12,026	0,0113
1680	12,138	0,0112
1690	12,251	0,0113
1700	12,363	0,0112
1710	12,476	0,0113
1720	12,588	0,0113
1730	12,701	0,0113
1740	12,813	0,0112
1750	12,926	0,0113
1760	13,038	0,0112
1770	13,151	0,0113
1780	13,263	0,0112
1790	13,376	0,0113
1800	13,488	0,0112

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.