



# Protokoll zum Versuch

## *Temperaturmessung*

(Versuch 41)

Autor: Finn Zeumer (hz334)  
Versuchspatnerin: Annika Künstle  
Versuchsbegleiter: Leonie Frederike Müller  
Datum der Ausführung: 02.09.2025  
Abgabedatum: 09.09.2025

# Inhaltsverzeichnis

<b>I. Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1. Motivation . . . . .	3
1.2. Physikalische Grundlagen . . . . .	3
1.3. Versuchsaufbau . . . . .	4
<b>Messdaten</b>	<b>5</b>
<b>II. Durchführung</b>	<b>8</b>
2.1. Versuchsaufbau . . . . .	8
2.2. Messverfahren . . . . .	8
<b>III. Auswertung</b>	<b>10</b>
3.1. Eichung des Gasthermometers . . . . .	11
3.2. Eichung des PT100-Widerstandsthermometers . . . . .	12
3.3. Gasthermometer vs. Pyrometer . . . . .	13
3.4. Flammenanalyse via Thermoelement . . . . .	17
<b>IV. Diskussion</b>	<b>18</b>
4.1. Zusammenfassung, Diskussion und Kritik . . . . .	18

# I. Einleitung

## 1.1. Motivation

In diesem Versuch beschäftigen wir uns mit verschiedenen Methoden der Temperaturmessung. Zunächst werden ein Gas- und ein Platin-Widerstandsthermometer im Bereich zwischen dem Siedepunkt von Wasser und dem Siedepunkt von flüssigem Stickstoff eingesetzt. Anschließend erfolgen Messungen im Bereich von 0 °C bis 100 °C mit einem Infrarot-Thermometer. Zuletzt wird mithilfe eines Thermoelements die Temperaturverteilung einer Bunsenbrennerflamme untersucht. Ziel des Versuchs ist es, die Ergebnisse der vier Methoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in verschiedenen Temperaturbereichen sowie ihrer Genauigkeit zu überprüfen.

## 1.2. Physikalische Grundlagen

[Wag25a, Dem17]

**Gasthermometer** Die Grundlage bildet die ideale Gasgleichung

$$pV = Nk_{\text{B}}T, \quad (1)$$

wobei  $p$  der Druck,  $V$  das Volumen,  $T$  die absolute Temperatur,  $N$  die Teilchenzahl und  $k_{\text{B}}$  die Boltzmann-Konstante ist. Bei konstantem Volumen folgt das Gesetz von Amontons:

$$T \propto p \quad (V = \text{konstant}). \quad (2)$$

Das im Praktikum verwendete Gasthermometer besteht aus einem Glasballon, der über eine Kapillare mit einem Manometer verbunden ist. Systematische Fehler entstehen durch die thermische Ausdehnung des Ballons und durch das

„schädliche Volumen“ der Luftsäule in der Kapillare, die bei Raumtemperatur bleibt. Diese Effekte sind jedoch klein gegenüber der Temperaturabhängigkeit des Drucks. Luft kann oberhalb des Verflüssigungspunktes und bei niedrigem Druck als ideales Gas angenähert werden.

Zur Korrektur realer Gase könnte die van-der-Waals-Gleichung verwendet werden:

$$\left(p + \frac{n^2a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT, \quad (3)$$

mit den Stoffmengen  $n$ , der Gaskonstante  $R$  sowie den stoffabhängigen Konstanten  $a$  und  $b$ .

**Thermoelement** Die Funktionsweise beruht auf dem Seebeck-Effekt: An der Kontaktstelle zweier unterschiedlicher Metalle entsteht eine Thermospannung

$$U_{\text{th}} = K(T_1 - T_2), \quad (4)$$

wobei  $T_1$  die Temperatur an der Kontaktstelle,  $T_2$  die Referenztemperatur und  $K$  eine materialabhängige Konstante ist. Vorteile: kleiner Messfühler, große Temperaturbereiche, robuste Bauweise, geringe Kosten. Nachteil: Nur relative Messungen möglich, die Referenztemperatur  $T_2$  muss bekannt oder konstant sein. Für präzise Messungen wird eine definierte Vergleichsstelle benötigt.

**Platin-Widerstandsthermometer** Die Temperaturabhängigkeit des Widerstands eines Pt100-Sensors lässt sich durch ein quadratisches Polynom annähern:

$$R(T) = R_0(1 + AT + BT^2), \quad (5)$$

mit dem Nennwiderstand  $R_0 = 100\ \Omega$  bei  $0^\circ\text{C}$  und den Koeffizienten

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3}\ ^\circ\text{C}^{-1} \quad (6)$$

$$B = -5,775 \cdot 10^{-7}\ ^\circ\text{C}^{-2} \quad (7)$$

Ergibt sich eine Gleichung zur Berechnung der Temperatur  $T$  in Abhängigkeit des Widerstandes  $R$ :

$$T(R) = \frac{-R_0 A + \sqrt{R_0^2 A^2 - 4R_0 B(R_0 - R)}}{2R_0 B}. \quad (8)$$

Der Temperaturfehler für ein Pt100 der Klasse B beträgt

$$\Delta T = 0,30\ ^\circ\text{C} + 0,005 \cdot |T|. \quad (9)$$

Die Widerstandsmessung erfolgt im Praktikum mit einer Konstantstromquelle von 1 mA. Um Leitungseinflüsse zu vermeiden, wird eine Vierleiterschaltung verwendet.

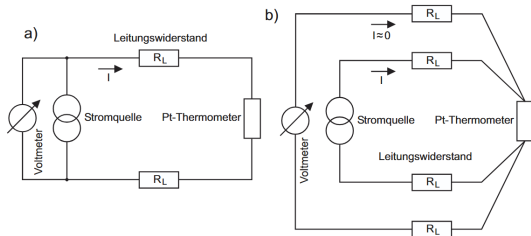


Abbildung I.1.: Schematischer Aufbau einer a) Zweileiterschaltung und b) einer Vierleiterschaltung.

**Pyrometer** Jeder Körper mit  $T > 0\text{ K}$  emittiert Wärmestrahlung. Das Plancksche Strahlungsgesetz beschreibt die spektrale Strahlungsleistung:

$$M_\lambda(\lambda, T) dA d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/(\lambda k_B T)} - 1} dA d\lambda, \quad (10)$$

wobei  $h$  das Plancksche Wirkungsquantum und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit ist.

Die gesamte abgestrahlte Leistung eines Körpers folgt aus dem Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$P = \epsilon(T) \sigma A T^4, \quad (11)$$

mit  $\sigma$  als Stefan-Boltzmann-Konstante und dem Emissionsfaktor  $\epsilon(T) \leq 1$ . Das eingesetzte IR-Pyrometer misst im Bereich von 8 bis  $14\ \mu\text{m}$ . Bei Raumtemperatur ( $T \approx 300\text{ K}$ ) liegt das Strahlungsmaximum bei  $\lambda \approx 10\ \mu\text{m}$ .

### 1.3. Versuchsaufbau

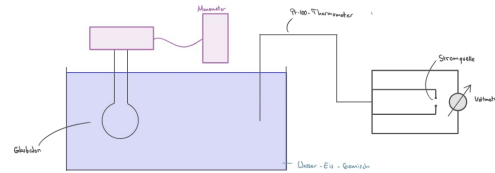


Abbildung I.2.: Versuchsaufbau Eichung bei  $0^\circ\text{C}$  mit Vierteiler Schaltung.

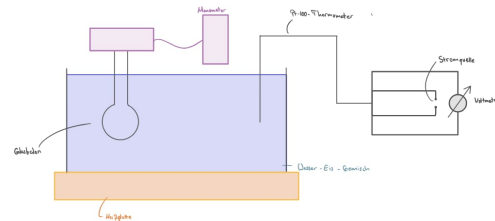


Abbildung I.3.: Versuchsaufbau Temperaturmessung bis  $100^\circ\text{C}$  mit Vierteiler Schaltung.

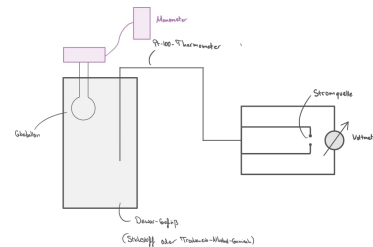


Abbildung I.4.: Druck- und Spannungsmessung von Trockeneis-Alkohol-Gemisch und Flüssigstickstoff.

1.)

Tabelle 1

	Zweileiter	Vierleiter
Spannung	100,5 mV	100,7 mV
Wasserdampfdruck	916 mbar	916 mbar
Pyrometer-temperatur	-0,5°C	-0,6°C
Flüssigkeitstemperatur	0,5°C	0,5°C

Vergleich von Zwei- und Vierleiter bei 0°C bei kurzen Kabeln

2.)

Tabelle 2

Ziel- Temperatur [°C]	Druck [mbar]	Pyrometer [°C]	Pt100-Spannung [mV]
10	964	9,6	106,1
20	931	20,2	108,1
30	1025	31,7	112,3
40	1063	42,6	116,6
50	1097	52,9	120,3
60	1137	65,4	124,4
70	1170	73,7	128,0
80	1203	81,7	132,3
90	1238	87,6	137,1
<del>100</del> 93	1247	92,8	138,3

Werte in Temperaturabhängigkeit in 10°C ± 1,5°C

Luftdruck vorher: 1007

Luftdruck nachher: 1017

02.08.2025

Finn Zauner

Annika Künstele

Benutzte Geräte:

Multimeter: Benning MM 1-2 Eingangsbelastung: 70 kΩ  
3 Digits  
Gleichspannung: bis 200 mV 100 µV ± 0,5% + 2 Digits

Infrarotthermometer: PC5-380 3 1/2 Digits -Anzeige

Bereich: -50°C - 1600°C

Auflösung: 0,1°C bis 2000°C

Genauigkeit: ± 5°C

± 1,5%

± 2,0%

± 3,5%

± 3,8%

-50 ... -20 °C

-20 ... 200 °C ± 2°C

200 ... 538 °C ± 2°C

538 ... 1300 °C ± 5°C

1300 ... 1600 °C ± 5°C

Spannungsbereich:  
8-14 µV

Manometer: GDH-AN

0,1 mbar

Genauigkeit: 1 mbar ± 1 Digit

Immersionstiefe: Unbekannt

Temperatur vorher: 25,1°C

Druck: 1007 mbar

Temperatur nachher: 25,9

Druck: 1017 mbar

Temperatur 15:05 = 25,6°C

3.)

Trockeneis-Alkohol-Gemisch:

Spannung: 77 mV

Druck: 709 mBar

Flüssigstickstoff:

Spannung: 29,7 mV

Druck: 255 mBar

4.)

### Tabelle 3

Type S

Stelle	Temp bei Schwacher Luftzufuhr [mV]	Temp bei starker Luftzufuhr [mV]
1	0,10	0,8
2	0,30	0,8
3	0,45	0,8
4	0,70	0,8
5	0,80	0,8

Vergleich starker vs. schwacher  
Luftzufuhr für Thermoelement Type S  
an 5 Flammenstellen



TABELLE 3 GRUNDWERTE DER THERMOSPANNUNGEN in mV

PIrh „EL18“

Temperatur der Vergleichsstelle (Bezugstemperatur) 0 °C

°C	mV	mV/°C	°C	mV	mV/°C	°C	mV	mV/°C
0	0		610	1,863		1210	6,923	
10	-0,002	0,0001	620	1,924	0,0061	1220	7,027	0,0104
20	-0,003	0,0001	630	1,986	0,0062	1230	7,133	0,0106
30	-0,002	0,0001	640	2,049	0,0063	1240	7,239	0,0106
40	-0,001	0,0003	650	2,113	0,0064	1250	7,345	0,0106
50	+0,002	0,0004	660	2,178	0,0065	1260	7,451	0,0107
60	0,006	0,0005	670	2,243	0,0066	1270	7,558	0,0107
70	0,011	0,0007	680	2,309	0,0067	1280	7,665	0,0108
80	0,018	0,0007	690	2,376	0,0068	1290	7,773	0,0109
90	0,025	0,0010	700	2,444	0,0069	1300	7,882	0,0109
100	0,035	0,0009	710	2,513	0,0069	1310	7,991	0,0109
110	0,044	0,0011	720	2,582	0,0071	1320	8,100	0,0109
120	0,055	0,0012	730	2,653	0,0072	1330	8,209	0,0110
130	0,067	0,0013	740	2,725	0,0072	1340	8,319	0,0110
140	0,080	0,0014	750	2,797	0,0073	1350	8,429	0,0110
150	0,094	0,0015	760	2,870	0,0074	1360	8,539	0,0111
160	0,109	0,0017	770	2,944	0,0075	1370	8,650	0,0111
170	0,126	0,0018	780	3,019	0,0075	1380	8,761	0,0112
180	0,144	0,0018	790	3,094	0,0077	1390	8,873	0,0112
190	0,162	0,0019	800	3,171	0,0077	1400	8,985	0,0112
200	0,181	0,0021	810	3,248	0,0078	1410	9,097	0,0112
210	0,202	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	0,0025	850	3,564	0,0081	1450	9,545	0,0113
250	0,296	0,0026	860	3,645	0,0082	1460	9,658	0,0113
260	0,322	0,0027	870	3,727	0,0083	1470	9,771	0,0113
270	0,349	0,0028	880	3,810	0,0083	1480	9,884	0,0113
280	0,377	0,0029	890	3,893	0,0085	1490	9,997	0,0113
290	0,406	0,0030	900	3,978	0,0085	1500	10,110	0,0113
300	0,436	0,0031	910	4,063	0,0085	1510	10,223	0,0113
310	0,467	0,0033	920	4,148	0,0086	1520	10,336	0,0113
320	0,500	0,0033	930	4,234	0,0087	1530	10,449	0,0112
330	0,533	0,0034	940	4,321	0,0088	1540	10,561	0,0113
340	0,567	0,0036	950	4,409	0,0089	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	0,0090	1570	10,900	0,0112
370	0,676	0,0039	980	4,677	0,0090	1580	11,012	0,0113
380	0,715	0,0039	990	4,767	0,0092	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	0,0112
410	0,836	0,0042	1020	5,043	0,0093	1620	11,463	0,0112
420	0,878	0,0043	1030	5,136	0,0094	1630	11,576	0,0113
430	0,921	0,0045	1040	5,230	0,0095	1640	11,688	0,0112
440	0,966	0,0045	1050	5,325	0,0095	1650	11,801	0,0112
450	1,011	0,0046	1060	5,420	0,0096	1660	11,913	0,0113
460	1,057	0,0048	1070	5,516	0,0097	1670	12,026	0,0112
470	1,105	0,0048	1080	5,613	0,0097	1680	12,138	0,0113
480	1,153	0,0049	1090	5,710	0,0098	1690	12,251	0,0112
490	1,202	0,0050	1100	5,808	0,0098	1700	12,363	0,0113
500	1,252	0,0051	1110	5,906	0,0099	1710	12,476	0,0112
510	1,303	0,0052	1120	6,005	0,0100	1720	12,588	0,0113
520	1,355	0,0053	1130	6,105	0,0100	1730	12,701	0,0112
530	1,408	0,0054	1140	6,205	0,0101	1740	12,813	0,0113
540	1,462	0,0055	1150	6,306	0,0102	1750	12,926	0,0112
550	1,517	0,0055	1160	6,408	0,0102	1760	13,038	0,0113
560	1,572	0,0056	1170	6,510	0,0103	1770	13,151	0,0112
570	1,628	0,0058	1180	6,613	0,0103	1780	13,263	0,0113
580	1,686	0,0058	1190	6,716	0,0103	1790	13,376	0,0112
590	1,744	0,0059	1200	6,819	0,0104	1800	13,488	0,0112
600	1,803	0,0060						

## II. Durchführung

### 2.1. Versuchsaufbau

#### Aufgabe 1: Eichung der Thermometer bei 0 °C

Für die Eichung wird ein Pt100-Thermometer mit Adapterbox verwendet. Die vier Anschlussleitungen können über 4 mm-Buchsen abgegriffen werden. Eine Stromquelle liefert den Messstrom von 1 mA. Die Spannungsmessung erfolgt mit einem Voltmeter, das entweder an die Buchsen der Stromquelle (Zweileiterschaltung) oder direkt an die Adapterbox (Vierleiterschaltung) angeschlossen wird. Zur Erzeugung der Referenztemperatur von 0 °C wird ein Becherglas mit zerkleinertem Eis und Wasser befüllt. Der Glasballon mit dem Messsensor wird vollständig in das Gemisch eingetaucht. Zusätzlich stehen ein Pyrometer zur Messung der Oberflächentemperatur sowie ein Flüssigkeitsthermometer als Vergleich zur Verfügung.

#### Aufgabe 2: Temperaturmessung bis 100 °C

Das Wasserbad wird mit einer Heizplatte erhitzt. Zur Homogenisierung der Temperatur kommt ein Rührmechanismus zum Einsatz. Als Messgeräte dienen das Pt100-Thermometer, das Gasthermometer und ein Pyrometer. Der Umgebungsdruck wird mit einem Barometer erfasst.

#### Aufgabe 3: Temperaturmessung bei tiefen Temperaturen

Ein Dewargefäß wird wahlweise mit einer Trockeneis-Alkohol-Mischung oder mit flüssigem Stickstoff gefüllt. Der Glasballon mit dem

Messsensor wird in das jeweilige Kühlmedium eingebracht. Die Messung erfolgt mit dem Pt100-Thermometer sowie dem Gasthermometer.

#### Aufgabe 4: Temperaturmessung mit dem PtRh-Thermoelement

Zur Untersuchung hoher Temperaturen wird ein Gasbrenner mit regelbarer Luftzufuhr genutzt. Das PtRh-Thermoelement (Typ S oder Typ B) wird in verschiedene Bereiche der Flamme eingeführt. Die Temperaturbestimmung erfolgt über die gemessene Thermospannung unter Zuhilfenahme der passenden Eich-tabelle.

### 2.2. Messverfahren

Nach dem Aufbau der Zwei- und Vierleiterschaltung werden beide Varianten getestet. Bei stabilisierter Temperatur im Wasser-Eis-Gemisch werden die Spannung des Pt100, der Druck des Gasthermometers sowie die Temperatur des Pyrometers aufgezeichnet. Das Flüssigkeitsthermometer dient als zusätzliche Kontrolle. Maßgeblich ist das Minimum der Pt100-Spannung als Eichpunkt.

Anschließend wird das Wasser stufenweise erhitzt. Beginnend bei etwa 10 °C werden in Schritten von ca. 10 °C die Pt100-Spannung, der Gasthermometerdruck und die Pyrometer-temperatur aufgenommen. Als letzter Messpunkt dient die Temperatur des siedenden Wassers. Der Luftdruck wird parallel am Barometer erfasst. Das Pyrometer wird schräg auf die Wasseroberfläche gerichtet, um Verfälschungen durch Wasserdampf zu vermeiden.



Für tiefe Temperaturen wird zunächst die Trockeneis-Alkohol-Mischung eingesetzt. Nach ausreichender Abkühlung und Temperaturstabilisierung werden Pt100-Spannung und Druck gemessen. Anschließend wird der Versuch mit flüssigem Stickstoff wiederholt. Der Glasballon wird vollständig eingetaucht, und die Messwerte werden nach Abklingen der starken Verdampfung notiert. Das Pyrometer wird hier nicht verwendet, da es bei diesen Temperaturen ungeeignet ist.

#### **Aufgabe 4: Temperaturmessung mit dem PtRh-Thermoelement**

Das Thermoelement wird in die Flamme des Gasbrenners eingeführt. Bei schwacher und starker Luftzufuhr werden jeweils mehrere Messpunkte in unterschiedlichen Flammenzonen untersucht. Für jeden Messpunkt wird die Thermospannung ermittelt. Die Flammenform wird zusätzlich skizziert und mit den Messwerten ergänzt. Die Umrechnung in Temperatur erfolgt anhand der für den verwendeten Thermoelementtyp gültigen Eichtablelle.

## III. Auswertung

### Fehlerrechnung

Für die statistische Auswertung von  $n$  Messwerten  $x_i$  werden folgende Größen definiert [Wag25b]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Arithmetisches Mittel} \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{Varianz} \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Standardabweichung} \quad (3)$$

$$\Delta \bar{x} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} \quad \text{Fehler des Mittelwerts} \quad (4)$$

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \Delta y\right)^2} \quad \text{Gauß'sches Fehlerfortpflanzungsgesetz für } f(x, y) \quad (5)$$

$$\Delta f = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} \quad \text{Fehler für } f = x + y \quad (6)$$

$$\Delta f = |a| \Delta x \quad \text{Fehler für } f = ax \quad (7)$$

$$\frac{\Delta f}{|f|} = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2} \quad \text{relativer Fehler für } f = xy \text{ oder } f = x/y \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{|a_{lit} - a_{gem}|}{\sqrt{\Delta a_{lit}^2 + \Delta a_{gem}^2}} \quad \text{Berechnung der signifikanten Abweichung} \quad (9)$$

### 3.1. Eichung des Gasthermometers

Wir beginnen mit der Eichung des Gasthermometers. Hierfür nutzen wir Tabelle 1 des [Protokolls](#):

Tabelle III.1.: Vergleich von Zwei- und Vierleiter

	Zweileiter	Vierleiter
Spannung	100,5 mV	100,1 mV
Wasserdruck	916 mBar	916 mBar
Pyrometer-temperatur	-0,5°C	-0,6°C
Flüssigkeits-temperatur	0,5°C	0,5°C

Außerdem ist dem Protokoll ein Luftdruck von 1007 hPa bei 25,1°C zu entnehmen. Dieser Druck entspricht in der [Abbildung zur Eichung des Gasthermometers](#) dem Punkt bei 0°C. Dies ist unser erster Eichpunkt. Den zweiten bestimmen wir über eine Gleichung zur Normierung des Siededrucks von Wasser [[Wag25a](#)]:

$$p_{NB} = \frac{1013,5 \text{ hPa}}{p_{LD}} \cdot p_{gem} \quad (10)$$

In dieser Gleichung steht  $p_{gem}$  für den gemessenen Wasserdruck bei Siedetemperatur,  $p_{LD}$  für den Luftdruck und  $p_{NB}$  für den auf Normalbedingungen umgerechneten Druck, da der Siedepunkt druckabhängig ist. Benutzen wir also die Gleichung für die [Normalbedingung](#), so erhalten wir:

$$\frac{1013,25}{1007,0} \cdot 1247 = p_{NB} = 1254,7396 \text{ [hPa]}. \quad (11)$$

Wir können den Wert nicht als exakt annehmen und müssen daher seine Ungenauigkeit bestimmen. Dafür verwenden wir die [Gauß'sche Fehlerfortpflanzung](#):

$$\Delta p_{NB} = \sqrt{\left(\frac{\Delta p_{LD}}{p_{LD}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p_{gem}}{p_{gem}}\right)^2} \cdot p_{NB}. \quad (12)$$

Für die Ungenauigkeit des Wasserdruckes nehmen wir den Manometerfehler  $\Delta p_{gem} = 0,1 \text{ hPa}$  an. Für die Ungenauigkeit des Luftdruckes werden 50% der Skaleneinheit angenommen, also  $\Delta p_{LD} = 0,5 \text{ hPa}$ . Setzen wir diese Werte in [Gleichung 12](#) ein, so ergibt sich:

$$\begin{aligned} \Delta p_{NB} &= \sqrt{\left(\frac{0,5}{1007}\right)^2 + \left(\frac{0,1}{916}\right)^2} \cdot p_{NB} \\ &= 0,63789 \text{ hPa}. \end{aligned} \quad (13)$$

Damit liegt unser zweiter Eichpunkt bei:

$$E_{100^\circ\text{C}} = (1254,7 \pm 0,6) \text{ hPa}. \quad (14)$$

Die beiden Eichpunkte wurden in der [Abbildung](#) eingezeichnet und eine Eichkurve durch beide gezogen. Bei einem Druck von 0 hPa läge nach den Messwerten der absolute Nullpunkt bei -275,8°C. Die Abweichung bestimmt man, indem man die Fehlergerade (orange) betrachtet und die Differenz der beiden Temperaturen bei 0 hPa bildet. So erhält man:

$$T_0 = (-275,8 \pm 13)^\circ\text{C}. \quad (15)$$

Wir können auch die Temperaturen für Flüssigstickstoff  $T_{N_2}$  und Trockeneis  $T_{TE}$  bestimmen:

$$T_{N_2} = (-197,16 \pm 10,4)^\circ\text{C} \quad (16)$$

$$T_{TE} = (-58,346 \pm 5,2)^\circ\text{C} \quad (17)$$

Auch hier wurde der Fehler über die Fehlergerade (orange) bestimmt. Wir wollen nun den errechneten Wert des Flüssigstickstoffs mit dem Literaturwert vergleichen und seine [σ-Abweichung](#) bestimmen:

$$\frac{|T_{N_2, \text{lit}} - T_{N_2, \text{gem}}|}{\Delta T_{N_2}} = 0,13\sigma \quad (18)$$

Wir haben den Literaturwert hier als „perfekt“ -195,8°C angenommen, was natürlich

eine Annahme ist. Nun nutzen wir den Literaturwert des Flüssigstickstoffs als neuen Eichpunkt, um eine verbesserte Eichkurve (blau) zu erhalten. Unser neuer Nullpunkt liegt bei

$$T_{0,2} = (-271,68 \pm 9,1)^\circ\text{C}. \quad (19)$$

Wir vergleichen diesen Nullpunkt mit dem Literaturwert des Nullpunkts  $-273,15^\circ\text{C}$  und erhalten eine  $\sigma$ -Abweichung von:

$$\frac{|T_{0,lit} - T_{0,2}|}{\Delta T_{0,2}} = 0,16\sigma. \quad (20)$$

Zusätzlich vergleichen wir unseren neuen Messwert für die Temperatur des Trockeneises  $T_{TE} = (-61,0 \pm 3)^\circ\text{C}$  mit dem Literaturwert  $T_{TE,lit} = -78,4^\circ\text{C}$  und erhalten eine Abweichung von

$$\frac{|T_{TE,lit} - T_{TE,2}|}{\Delta T_{TE}} = 5,8\sigma. \quad (21)$$

### 3.2. Eichung des PT100-Widerstandsthermometers

Als Nächstes wollen wir in eine zweite [Abbildung](#) weitere Messwerte einbeziehen. Dafür verwenden wir das PT100-Thermometer und seine [Temperaturbestimmungsgleichung des PT100 \(1.8\)](#). Hierfür ist besonders der Zusammenhang zwischen Spannung, Strom und Widerstand wichtig:

$$U = R \cdot I \quad \Rightarrow \quad R = \frac{U}{I} \quad (22)$$

Wir legen dabei einen konstanten Strom von 1 mA an. Somit ist der Widerstand nur noch von der Spannung abhängig. Wir betrachten den Strom als fehlerfrei und gehen nur von einer Ungenauigkeit der Spannung aus. Die Ungenauigkeit des Widerstands folgt dann zu

$$\Delta R = \frac{\Delta U}{I}. \quad (23)$$

Die Messgenauigkeit des benutzten Multimeters beträgt

$$\Delta_1 U = \pm(0,05\% \text{ vom Messwert} + 2 \text{ Digits}).$$

Inklusive des Ablesefehlers von  $\Delta_2 U = 0,1 \text{ mV}$  ergibt sich eine Gesamtungenauigkeit von

$$\Delta R = \sqrt{(\Delta_1 U)^2 + (\Delta_2 U)^2} \cdot \Omega. \quad (24)$$

Die Temperatur  $T_E$  bestimmen wir über die Eichkurve und den gemessenen Druck  $p$ . Zudem entnehmen wir die PT100-Spannungen der [Tabelle 2 des Protokolls](#). Über die [Gleichung zur Berechnung des Widerstandes \(22\)](#) wurden den verschiedenen Temperaturen Widerstandswerte  $R$  zugeordnet. Diese Werte sind der [Tabelle 3.2](#) zu entnehmen.

Tabelle III.2.: Messwerte von Druck, Pyrometer-Temperatur und Pt100-Spannung

$p[\text{hPa}]$	$T_E[^\circ\text{C}]$	$\Delta T_E[^\circ\text{C}]$	$R[\Omega]$	$\Delta R[\Omega]$
964	13,0	2	106,1	0,11
991	23,4	1	108,1	0,11
1025	32,5	1	112,3	0,11
1063	44,2	1	116,6	0,12
1087	50,7	1	120,3	0,12
1137	65,0	2	124,4	0,12
1170	75,4	2	128,0	0,12
1203	85,8	3	132,5	0,12
1238	96,2	3	137,1	0,12
1247	101,4	3	138,3	0,12

Wir entnehmen zunächst aus der [Abbildung 3.2](#) die Steigungen der Ausgleichsgeraden  $m_A$  und der Fehlergeraden  $m_F$ :

$$m_A = \frac{25,75\Omega}{78^\circ\text{C}} = 0,330 \frac{\Omega}{^\circ\text{C}} \quad (25)$$

$$m_F = \frac{32,19\Omega}{88,4^\circ\text{C}} = 0,364 \frac{\Omega}{^\circ\text{C}} \quad (26)$$

Über diese beiden Steigungen können wir die Ungenauigkeit der Steigung  $\Delta m$  bestimmen:

$$\Delta m = |m_A - m_F| = 0,034 \frac{\Omega}{^\circ\text{C}}. \quad (27)$$

Fassen wir  $m_A$  und seine Ungenauigkeit  $\Delta m$  zu einem Gesamtergebn zusammen, so ergibt sich:

$$m = (0,330 \pm 0,034) \frac{\Omega}{^\circ C}. \quad (28)$$

Dieser Wert wurde rein graphisch bestimmt; diese Methode ist besonders anfällig. Wir verwenden zusätzlich die [Gleichung 1.5](#) und bestimmen den Wert rechnerisch. Die genutzten Werte sind der Einleitung unter Gleichung 1.5 zu entnehmen. Wir vergleichen hierbei nur den linearen Teil des Polynoms mit unserer Steigung. Dazu bestimmen wir die Widerstände bei  $0^\circ C$ ,  $R_{0^\circ C}$ , und bei  $100^\circ C$ ,  $R_{100^\circ C}$ :

$$R_{100^\circ C} = 100\Omega \quad (29)$$

$$R_{0^\circ C} = 139,089\Omega. \quad (30)$$

Damit lässt sich die Steigung der Geraden bestimmen:

$$m_{pt100} = \frac{39,089\Omega}{100^\circ C} = 0,39089 \frac{\Omega}{^\circ C}. \quad (31)$$

Um die Übereinstimmung zu prüfen, nutzen wir die [signifikante Abweichung  \$\sigma\$](#) :

$$\frac{|0,330 - 0,39089|}{0,034} = 1,7909\sigma. \quad (32)$$

### 3.3. Gasthermometer vs. Pyrometer

Wir entnehmen die Werte aus der [Tabelle 2 des Protokolls](#) und tragen die Werte des Gasthermometers und des Pyrometers auf:

Die Ungenauigkeit des Pyrometers setzt sich aus der Ablesungenauigkeit  $\Delta_1 T_{Pyro} = 0,1^\circ C$  und aus der Messungenauigkeit des Pyrometers  $\Delta_2 T_{Pyro} = \pm 1,5\% \pm 2^\circ C$  zusammen:

$$\Delta T_{Pyro} = \sqrt{(\Delta_1 T_{Pyro})^2 + (\Delta_2 T_{Pyro})^2}. \quad (33)$$

Diese Werte wurden in [Abbildung 3.3](#) graphisch dargestellt.

Tabelle III.3.: Vergleich zwischen Soll-Temperatur und gemessener Pyrometer-Temperatur

$T_{Gas} [^\circ C]$	$\Delta T_{Gas} [^\circ C]$	$T_{Pyro} [^\circ C]$	$\Delta T_{Pyro} [^\circ C]$
13,0	2	9,60	2,15
23,4	1	20,2	2,3
32,5	1	31,7	2,5
44,2	1	42,6	2,6
50,7	1	52,9	2,8
65,0	2	65,4	3,0
75,4	2	73,700	3,107
85,8	3	81,700	3,227
96,2	3	87,6	3,3
101,4	3	92,8	3,4

Wir bestimmen wieder die Steigungen:

$$m_A = \frac{78^\circ C}{85^\circ C} = 0,9176 \quad (34)$$

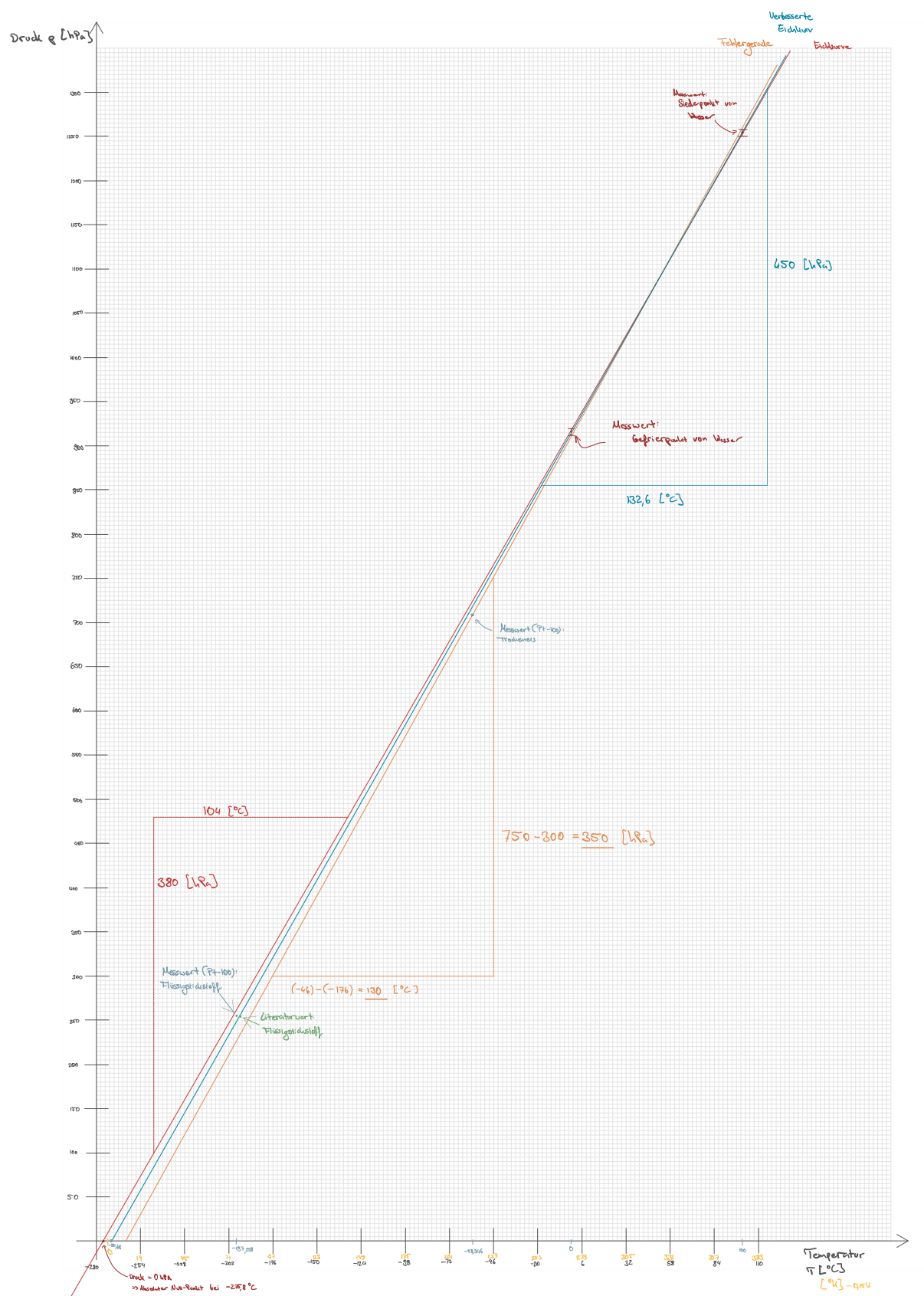
$$m_F = \frac{84,45^\circ C}{88,4^\circ C} = 0,9553. \quad (35)$$

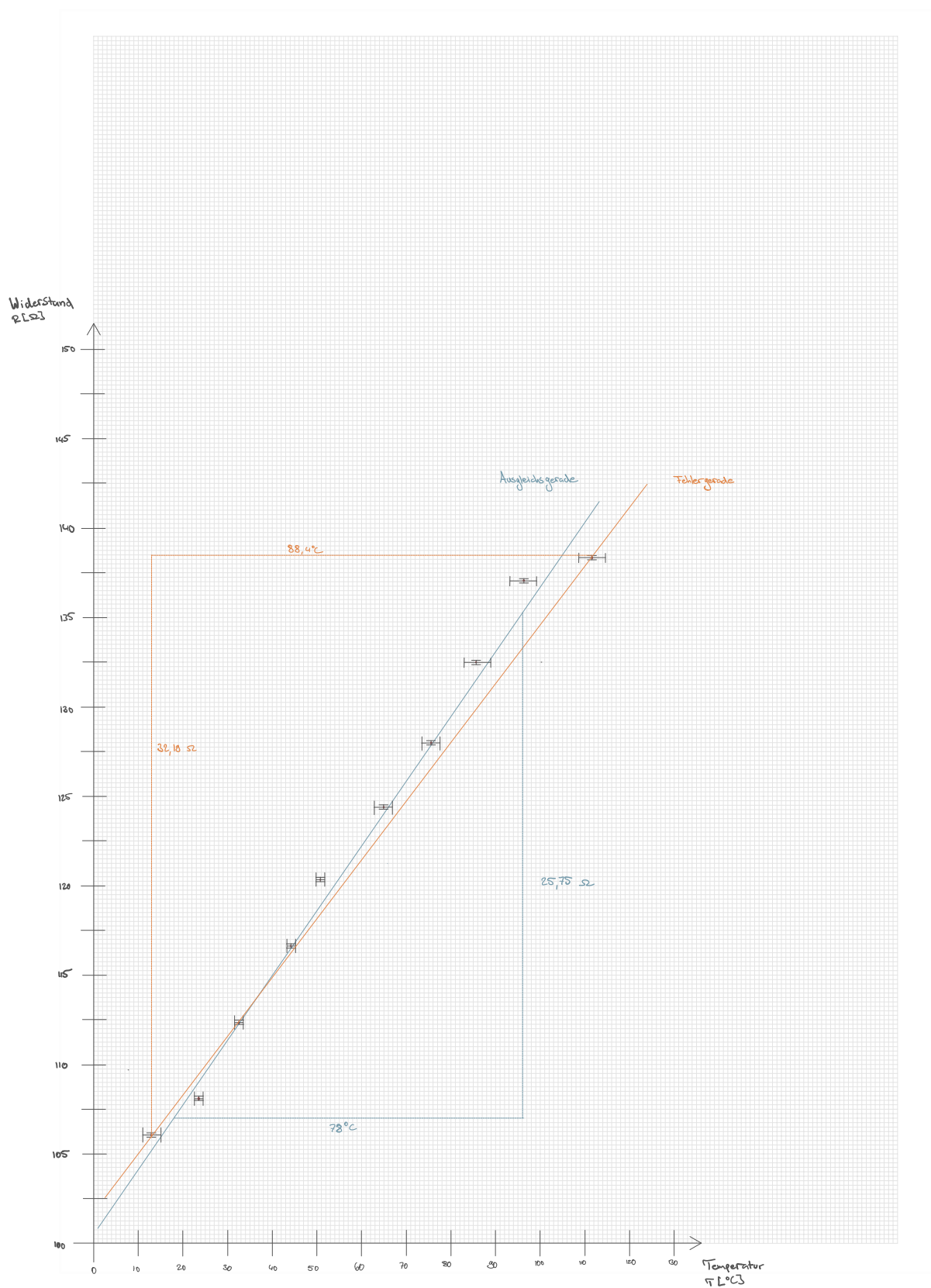
Subtrahieren wir zur Bestimmung des Fehlers:

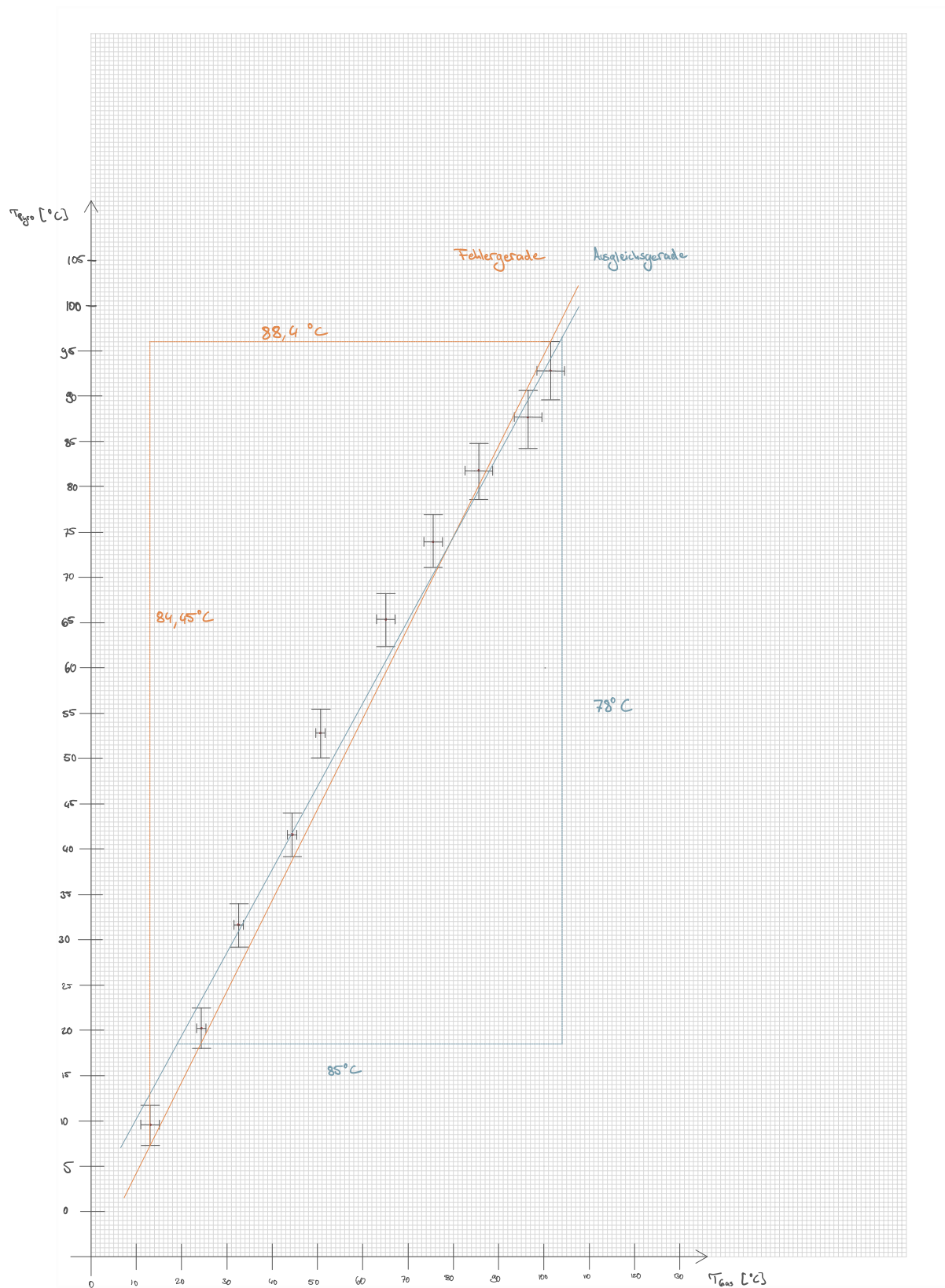
$$\Delta m = |0,9176 - 0,9553| = 0,0377. \quad (36)$$

Fassen wir das Ergebnis zusammen, so ergibt sich:

$$T_{Pyro} = (91,76 \pm 3,77)\% \cdot T_{Gas}. \quad (37)$$









### 3.4. Flammenanalyse via Thermoelement

Im letzten Aufgabenteil untersuchen wir die Temperatur einer Flamme an verschiedenen Stellen. Dafür wurde ein Thermoelement vom Typ S verwendet. Wir haben dabei die Luftzufuhr des Bunsenbrenners variiert. Nachfolgend werden die Messwerte aus dem [Protokoll](#) aufgelistet und ergänzt. Die Werte sind in [Tabelle 3.4](#). Die Fehler der Spannung ergeben sich aus dem Gerätefehler des Multimeters  $\pm(0,5\% + 2 \text{ Digits})$ , wobei der Gerätefehler für jeden Wert gegenüber dem Ablesefehler unerheblich ist. Aus der Spannungstabelle für Thermoelemente Typ S (Pt10/Rh-Pt), die im Labor auslag, lassen sich die gemessenen Thermospannungen betragsmäßig in Temperaturen umrechnen. Dabei wurde als Temperaturwert jeweils der nächstgelegene Eichwert verwendet.  $T_{TE}$  entspricht der aus der Tabelle bestimmten Temperatur an der jeweiligen Flammenstelle.  $\Delta_{min}T$  ist die Temperatur, die man erhält, wenn man von der Spannung  $U$  deren Ungenauigkeit  $\Delta U$  subtrahiert und diese Spannung zur Temperaturbestimmung verwendet. Der Temperaturfehler ist dann definiert als  $\Delta T = T_{TE} - \Delta_{min}T$ .

und Diskussion detaillierter analysiert und bewertet. Bereits an dieser Stelle ist jedoch erkennbar, dass bei diesen Messwerten offensichtlich etwas falsch gelaufen ist.

Tabelle III.4.: Berechnete Temperaturen der Flamme bei starker und schwacher Luftzufuhr an den fünf eingezeichneten Positionen des Protokolls.

Luftzufuhr	Position	$U[mV]$	$\Delta U[mV]$	$T_{TE}[^{\circ}C]$	$\Delta_{min}T[^{\circ}C]$	$\Delta T[^{\circ}C]$
Schwach	1	0,10	0,0205	17,78	14,24	3,54
	2	0,30	0,0215	50,17	46,84	3,33
	3	0,45	0,02225	72,52	69,29	3,23
	4	0,70	0,0235	107,31	104,15	3,16
	5	0,80	0,024	120,59	117,43	3,16
Stark	1	0,80	0,024	120,59	117,43	3,16
	2	0,80	0,024	120,59	117,43	3,16
	3	0,80	0,024	120,59	117,43	3,16
	4	0,80	0,024	120,59	117,43	3,16
	5	0,90	0,0245	133,58	130,42	3,16

Die Werte werden in der Zusammenfassung

## IV. Diskussion

### 4.1. Zusammenfassung, Diskussion und Kritik

#### Eichung Gasthermometer

In der ersten Aufgabe wurde eine Eichkurve des Gasthermometers erstellt. Dafür wurden die Eichpunkte bei  $0^\circ\text{C}$  und bei:

$$E_{100^\circ\text{C}} = (1254,7 \pm 0,6) \text{ hPa} \quad (1)$$

nach [Gleichung 3.14](#) verwendet.

Über diese Kurve ergaben sich die Werte für Flüssigstickstoff und Trockeneis (3.16/3.17) sowie für den [absoluten Nullpunkt \(3.15\)](#):

$$T_0 = (-275,8 \pm 13)^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$T_{N_2} = (-197,16 \pm 10,4)^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$T_{TE} = (-58,346 \pm 5,2)^\circ\text{C} \quad (4)$$

Der Wert für den Flüssigstickstoff liegt in der  $0,13\sigma$ -Umgebung des Literaturwerts. Mit der »verbesserten« Eichkurve ergab sich eine Abweichung von  $0,16\sigma$ , also ein ähnlicher, aber etwas größerer Wert. Dies hängt vermutlich mit der geringeren Unsicherheit des zweiten Werts bei  $T_{0,2} = (-271,68 \pm 9,1)^\circ\text{C}$  zusammen.

Der Wert für das Trockeneis weicht hingegen um  $5,8\sigma$  ab und ist damit nicht statistisch signifikant.

#### PT100-Thermometer

Auch in dieser Aufgabe wurde ein Thermometer geeicht, diesmal ein Widerstandsthermometer. Der graphisch bestimmte Wert wurde mit dem rechnerisch angenäherten Wert verglichen. Die Abweichung betrug  $1,79\sigma$ . Damit liegt zwar eine Abweichung vor, diese ist aber noch im erwartbaren Bereich. Zu beachten ist, dass die Rechnung nur eine Annäherung

darstellt und graphische Bestimmungen grundsätzlich ungenau sind. Eine etwas größere Abweichung war daher zu erwarten. Als Fehlerquellen kommen vor allem ungenaue Graphen, begrenzte Messgeräte, wenige Messreihen und Ableseungenauigkeiten infrage.

#### Gasthermometer vs. Pyrometer

In diesem Aufgabenteil sollte das Pyrometer im Vergleich zum geeichten Gasthermometer bewertet werden. Das Ergebnis lautete:

$$(91,76 \pm 3,77)\%. \quad (5)$$

Das Pyrometer zeigte also im Durchschnitt etwa den 0,92-fachen Wert des Gasthermometers an. Für die meisten Anwendungen wäre dies unzureichend, da Werte im Bereich von 98% bis 99,9% wünschenswert wären. Ein Teil der Abweichung dürfte bereits durch die Eichung des Gasthermometers entstehen. Zudem weist das Pyrometer eine eigene Messunsicherheit auf. Insgesamt ist der Vergleich auf einer graphischen Auswertung basiert, die grundsätzlich mit Unsicherheiten behaftet ist.

#### Flammenanalyse

Im letzten Aufgabenteil wurde die Flammentemperatur an fünf verschiedenen Positionen bei schwacher und starker Luftzufuhr bestimmt. Die Ergebnisse weichen jedoch stark von den Literaturwerten ab, die für die meisten Bunsenbrenner angegeben sind [[Wik25](#)]:

$$T_{\text{Brenner}} = \{350; 1300\}^\circ\text{C}. \quad (6)$$

Die gemessenen Werte lagen lediglich im Bereich von:

$$T_{\text{Gem}} = \{18; 121\}^\circ\text{C}. \quad (7)$$

Dies entspricht Abweichungen von:

$$\frac{|350 - 18|}{3,54} = 93,79\sigma \text{ und} \quad (8)$$

$$\frac{|1300 - 133,58|}{3,16} = 369,12\sigma. \quad (9)$$

Eine detaillierte Auswertung dieser Abweichungen ist nicht sinnvoll, da die Ergebnisse offensichtlich nicht konsistent sind. Vermutlich trat bei der Messung ein Fehler auf. Wenn die gemessenen Spannungen um den Faktor 10 vergrößert werden, ergeben sich folgende Werte:

Tabelle IV.1.: Korrigierte Werte (mit Faktor 10)

Luftzufuhr	Position	$U[mV]$	$\Delta U[mV]$	$T_{TE}[^{\circ}C]$	$\Delta_{min}T[^{\circ}C]$	$\Delta T[^{\circ}C]$
Schwach	1	1,0	0,025	146,31	143,15	3,16
	2	3,0	0,035	372,75	369,05	3,70
	3	4,5	0,0425	526,82	522,51	4,31
	4	7,0	0,055	768,01	762,98	5,03
	5	8,0	0,06	859,69	854,27	5,42
Stark	1	8,0	0,06	859,69	854,27	5,42
	2	8,0	0,06	859,69	854,27	5,42
	3	8,0	0,06	859,69	854,27	5,42
	4	8,0	0,06	859,69	854,27	5,42
	5	9,0	0,065	948,77	943,05	5,72

Die Werte sind zwar noch relativ niedrig, und bei starker Luftzufuhr tritt kaum Variation auf, was eigentlich zu erwarten wäre.

Die Abweichungen fallen jedoch bereits deutlich geringer aus:

$$\frac{|350 - 146,31|}{3,16} = 65,40\sigma \text{ und} \quad (10)$$

$$\frac{|1300 - 948,77|}{5,72} = 61,40\sigma. \quad (11)$$

Die Ergebnisse sind zwar weiterhin unzureichend, könnten jedoch plausibel sein, wenn der verwendete Bunsenbrenner tatsächlich im Bereich von 150 bis 1000 Grad Celsius arbeitet.

## Abbildungsverzeichnis

I.1. Schematischer Aufbau einer a) Zweileiterschaltung und b) einer Vierleiterschaltung. . . . .	4
I.2. Versuchsaufbau Eichung bei $0^{\circ}\text{C}$ mit Vierteiler Schaltung. . . . .	4
I.3. Versuchsaufbau Temperaturmessung bis $100^{\circ}\text{C}$ mit Vierteiler Schaltung. . . . .	4
I.4. Druck- und Spannungsmessung von Trockeneis-Alkohol-Gemisch und Flüssigstickstoff. . . . .	4
III.1. Eichkurve des genutzten Gasthermometers mit $0^{\circ}\text{C}$ bei 1007 hPa. . . . .	14
III.2. Widerstand $R$ gegen Temperatur $T$ des geeichten PT100-Thermometers. . . . .	15
III.3. Pyrometer-Temperatur $T_{Pyro}$ gegen Gas-Temperatur $T_{Gas}$ des geeichten Gasthermometers, mit Fehlergeraden (orange) und Ausgleichsgeraden (blau). . . . .	16

## Tabellenverzeichnis

I.1. Vergleich Zwei- und Vierleiter . . . . .	7
III.1. Vergleich von Zwei- und Vierleiter . . . . .	11
III.2. Messwerte von Druck, Pyrometer-Temperatur und Pt100-Spannung . . . . .	12
III.3. Vergleich zwischen Soll-Temperatur und gemessener Pyrometer-Temperatur . . .	13
III.4. Berechnete Temperaturen der Flamme bei starker und schwacher Luftzufuhr an den fünf eingezeichneten Positionen des Protokolls. . . . .	17
IV.1. Korrigierte Werte (mit Faktor 10) . . . . .	19

## Literaturverzeichnis

- [Dem17] Jochen Demtröder. *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 7 edition, 2017.
- [Wag25a] Dr. J. Wagner. *Physikalisches Praktikum PAP 1 für Studierende der Physik*, chapter 41. Universität Heidelberg, 2025.
- [Wag25b] Dr. J. Wagner. *Physikalisches Praktikum PAP 1 für Studierende der Physik*, pages 4–28. Universität Heidelberg, 2025.
- [Wik25] Wikipedia-Autoren. Bunsenbrenner – wikipedia, 2025. Zugriff am 10. September 2025.