



# 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>7</b>
2.1. Versuchsaufbau . . . . .	7
2.2. Messverfahren . . . . .	7
<b>III. Auswertung</b>	<b>9</b>
3.1. Eichung des Gasthermometers . . . . .	10
<b>IV. Diskussion</b>	<b>13</b>
4.1. Zusammenfassung . . . . .	13
4.2. Diskussion . . . . .	13
4.3. Kritik . . . . .	13

# 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  $1\ \text{mA}$ . Um Leitungseinflüsse zu vermeiden, wird eine Vierleiterschaltung verwendet.

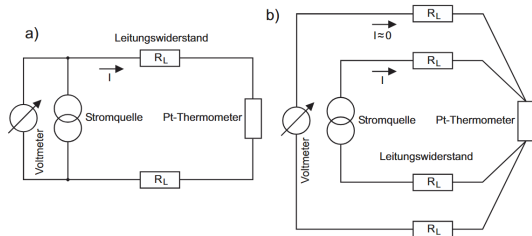


Abbildung I.1.: Schematischer Aufbau einer a) Zweileiterschaltung und b) einer Vierleiterschaltung.

**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

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 Künstle

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 -50 ... -20 °C  
± 1,5% -20 ... 200 °C ± 2°C  
± 2,0% 200 ... 538 °C ± 2°C  
± 3,5% 538 ... 1300 °C ± 5°C  
± 3,8% 1300 ... 1600 °C ± 5°C

Spannungsbereich:  
8-14 µm

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



## 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. Ein Voltmeter dient zur Spannungsmessung und kann wahlweise an die Buchsen der Stromquelle (Zweileiterschaltung) oder direkt an die Adapterbox (Vierleiterschaltung) angeschlossen werden. 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 zur Verfügung.

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

Das Wasserbad wird mit einer Heizplatte erhitzt. Zur Temperaturhomogenisierung wird ein Rührmechanismus verwendet. Als Messgeräte dienen das Pt100-Thermometer, das Gasthermometer und ein Pyrometer. Der Umgebungsdruck wird mit einem Barometer bestimmt.

#### Aufgabe 3: Temperaturmessung bei tiefen Temperaturen

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

Messsensor wird in das jeweilige Kühlmedium eingebracht. Für die Messung stehen das Pt100-Thermometer sowie das Gasthermometer zur Verfügung.

#### 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 ausprobiert. Bei stabilisierter Temperatur im Wasser-Eis-Gemisch wird die Spannung des Pt100, der Druck des Gasthermometers sowie die Pyrometertemperatur aufgezeichnet. Das Flüssigkeitsthermometer wird als zusätzliche Kontrolle herangezogen. Maßgeblich ist das Minimum der Pt100-Spannung als Eichpunkt.

Das Wasser wird stufenweise erhitzt. Beginnend bei etwa 10 °C werden in Schritten von ca. 10 °C die Pt100-Spannung, der Gasthermometerdruck und die Pyrometertemperatur 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.

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

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

Das Thermoelement wird in die Flamme des Gasbrenners eingeführt. Bei starker und schwacher Luftzufuhr werden jeweils mehrere Messpunkte in unterschiedlichen Flammenzonen untersucht. Für jeden Punkt wird die Thermo-spannung bestimmt. Die Flammenform wird zusätzlich skizziert und mit den Messwerten ergänzt. Die Umrechnung in Temperatur erfolgt anhand der für den verwendeten Thermoelementtyp gültigen Eich-tabelle.



## III. Auswertung

### Fehlerrechnung

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3.1. Eichung des Gasthermometers

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

	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

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

Außerdem ist dem Protokoll der Luftdruck von 1007 hPa zu entnehmen, bei 25,1 °C. Dieser Druck stellt in der [Abbildung zur Eichung des Gasthermometers](#) den Punkt bei 0 °C dar. Dies ist unser erster Eichpunkt. Den zweiten bestimmen wir über eine Gleichung zur Normierung der Siedetemperatur 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,  $p_{LD}$  den Luftdruck und das Ergebnis  $p_{NB}$  den gemessenen Luftdruck umgerechnet auf Normalbedingung, da der Siedepunkt (von Wasser) druckabhängig ist. Benutzen wir also die Gleichung für die [Normalbedingung](#), so kommen wir auf einen Wert von

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

Wir können aber den Wert nicht als genau annehmen und müssen daher seine Ungenauigkeit bestimmen. Dafür nutzen wir die

Gauß'sche Fehlfortpflanzung.

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

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

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

Damit liegt unser zweiter Eichpunkt bei:

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

Die beiden Eichpunkte wurden in der [Abbildung](#) eingezeichnet, und eine Eichkurve durch beide gezogen. Beim Druck von 0 hPa wäre nach den Messwerten der Absolute Nullpunkt bei -275,8 °C. Die Abweichung bekommen wir, wenn wir die Fehlergerade (orange) anschauen und die Differenz der beiden Temperaturen bei 0 hPa betrachten. Dann kommen wir auf ein Ergebnis von:

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

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 haben wir den Fehler über die Fehlergerade (orange) bestimmt. Wir wollen nun den errechneten Wert des Flüssigstickstoffes

mit dem Literaturwert verglichen und seine  $\sigma$ -Abweichung bestimmen:

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

Wir haben den Literaturwert hier als »perfekt«  $-195,8^\circ\text{C}$  angenommen, was dieser natürlich nicht ist. Nun nutzen wir den Literaturwert des Flüssigstickstoffes als neuen Eichpunkt, um eine verbesserte Eichkrurve (blau) zu erlangen. Unser neuer Nullpunkt liegt bei

$$T_{0,2} = (-171,68 \pm 9,1)^\circ\text{C}. \quad (19)$$

Wir wollen diesen Nullpunkt nun vom Literaturwert des Nullpunktes von  $-273,15^\circ\text{C}$  vergleichen und kommen auf eine  $\sigma$ -Abweichung von:

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

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

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

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

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

Wir legen dabei einen konstanten Strom von  $1\text{mA}$  an. Somit ist der Widerstand nur noch von der Spannung abhängig. Wir nehmen dabei den Strom als fehlerfrei an und gehen nur von einer Ungenauigkeit der Spannung aus. Somit würde sich unsere Ungenauigkeit auf

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

belaufen.

Die Messungsgenauigkeit des benutzten Multimeters beläuft sich auf  $\Delta_1 U = \pm(0,05\%^1 + 2 \text{ Digets})$ . Inklusive des Ablesefehlers von  $\Delta_2 U = 0,1\text{mV}$  ergibt sich eine Gesamtungenauigkeit von

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

$p[\text{hPa}]$	$T_{Eich}[^\circ\text{C}]$	$\Delta T_E[^\circ\text{C}]$	$R[\Omega]$	$\Delta R[\Omega]$
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

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

<sup>1</sup>beziehen sich auf den Messwert

Abbildung III.1.: Eichkrurve des genutzen Gasthermometers mit  $0^{\circ}\text{C}$  bei 1007 hPa.

## IV. Diskussion

### 4.1. Zusammenfassung

### 4.2. Diskussion

### 4.3. Kritik

## Abbildungsverzeichnis

I.1. Schematischer Aufbau einer a) Zweileiterschaltung und b) einer Vierleiterschaltung.	4
III.1. Eichkrurve des genutzen Gasthermometers mit $0^{\circ}\text{C}$ bei 1007 hPa. . . . .	12

## Tabellenverzeichnis

I.1. Vergleich Zwei- und Vierleiter . . . . .	7
III.1. Vergleich von Zwei- und Vierleiter . . . . .	10
III.2. Messwerte von Druck, Pyrometer-Temperatur und Pt100-Spannung . . . . .	11

## 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.