

Versuch 41 Temperaturmessung

Yuting Shi

Universität Heidelberg

04.09.2023

In diesem Experiment messen wir die Temperaturen von Objekten mit verschiedenen Messgeräten, indem wir den Gasthermometer und den Platin-Widerstandsthermometer für Messungen im Bereich zwischen dem Siedepunkt des Wassers und dem Siedepunkt von flüssigem Stickstoff verwenden, oder messen wir mithilfe eines Thermoelementes PtRh-Element die Temperaturverteilung einer Bunsenbrennerflamme. Wir sammeln alle Daten und zeichnen sie in Diagrammen, man sieht deutlich dann, wie funktioniert genau jedes Gerät und welche Vor- und Nachteile jedes Messgerät besitzt.



Abbildung 1: Aufbau des Versuchs Temperaturmessung

1 Vorbereitungen und Physikalische Grundlagen

1.1 Temperatur und Wärme

- Temperatur: Eine Kennzeichnung des thermischen Zustands von Körpern oder Systemen. Mikroskopisch gilt sie als ein Maß der Messung, wie stark sich die Teilchen des Systems bewegen. Je mehr Bewegungsmöglichkeiten es gibt, desto höher ist die Energie des Systems und damit die Temperatur.

- Wärme: Eine physikalische Größe, die einen Teil der Energie erfasst, die bei einem Vorgang von einem thermodynamischen System aufgenommen oder abgegeben wird.

1.2 Messmethode

Zur Messung dieser Größe benutzt man Instrumente (Thermometer), die die Temperaturabhängigkeit verschiedener physikalischer Größen ausnutzen.

1.3 Messgeräte

Pyrometer, Pt100-Thermometer (Klasse B), Konstantstromquelle 1mA, Dewargefäß, Gasthermometer, Topf für Temperaturbad, Thermoelement für hohe Temperaturen (PtRh, Typ B oder Typ S) mit Eich-tabelle, Multimeter, Butangas-Bunsenbrenner, Schutzbrille und Schutzhandschuhe.

1.4 Thermometer

1) Gasthermometer (Abbildung 2): Befindet sich ein Gas in einem abgeschlossenen Behälter (Glasballon), so kann bei konstant gehaltenem Volumen die Temperatur des Gases durch eine Druckmessung bestimmt werden:

$$PV = Nk_B T \quad (1)$$

2) Thermoelement: Wirkungsweise auf dem Seebeck-Effekt beruht. Eine elektrische Spannung tritt ein, wenn man die zwei unterschiedlichen Metalle zueinander in Kontakt bringt:

$$U_{th} = K(T_1 - T_2) \quad (2)$$

wobei U_{th} die Thermospannung, T_1, T_2 die Temperatur an der Kontaktstelle und an den beiden Enden sind.

- Vorteile: Kleine Dimensionen, gute mechanische und chemische Stabilität, Anwendbarkeit über einen sehr großen Temperaturbereich, geringe Herstellungskosten.
- Nachteile: Misst nur die relativen Temperaturen, braucht Vergleichstemperatur um die präzise Messung durchzuführen.

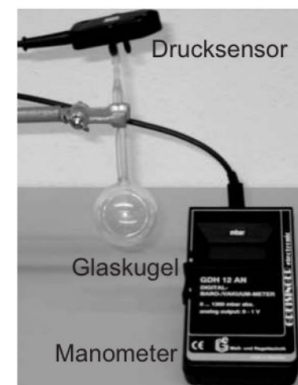


Abbildung 2: Gasthermometer

3) Platin Widerstandsthermometer: Basiert auf temperaturwiderstandsabhängigen Metallen, mit guter Genauigkeit gilt die Widerstandsapproximation durch:

$$R(T) = R_0(1 + AT + BT^2) \quad (3)$$

Folgt daraus:

$$T(R) = \frac{-R_0A + \sqrt{R_0^2A^2 - 4R_0B(R_0 - R)}}{2R_0B} \quad (4)$$

mit den Koeffizienten $A = 3.9083 \times 10^{-3} [^\circ\text{C}^{-1}]$, $B = -5.775 \times 10^{-7} [^\circ\text{C}^{-2}]$ R_0 ist der Nennwiderstand bei 0°C , für ein Pt100-Thermometer gilt $R_0 = 100\Omega$. Bei den Messungen tritt stets eine Eigenerwärmung des Pt-Thermometers auf, die die eigentliche Temperaturmessung verfälscht. Es ist daher sinnvoll, die Widerstandsmessung mit einem möglichst kleinen, konstanten Messstrom durchzuführen (1 mA Stromquelle benutzen).

4) Pyrometer: Wirkungsprinzip beruht darauf, dass jeder Körper dessen Temperatur größer als 0 K ist Wärmestrahlung aussendet, deren Intensität nur von der Temperatur abhängt. Bei Zimmertemperatur ($\approx 300\text{K}$) liegt das Strahlungsmaximum im langwelligen Infrarotbereich bei einer Wellenlänge von etwa $10\text{ }\mu\text{m}$. Diese Strahlungen werden von Pyrometer detektiert.

- Plancksches Strahlungsgesetz (Identitätsverteilung der Strahlung von einem schwarzen Strahler):

$$M_\lambda(\lambda, T)dAd\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right)} - 1} dAd\lambda \quad (5)$$

wobei M_λ die Strahlungsleistung beschreibt, die vom Flächenelement dA im Wellenlängenbereich λ bis $\lambda + d\lambda$ in den Halbraum abgestrahlt wird.

- Stefan-Boltzmann-Strahlungsgesetz:

$$P = \epsilon(T)\sigma AT^4 \quad (6)$$

wobei σ die Stefan-Boltzmann-Konstante, T die absolute Temperatur und ϵ das Emissionsvermögen beschreiben. Nach Kirchhoffschem Strahlungsgesetz ist $\epsilon \leq 1$.

- Vorteil: Extern einfach zu bedienen
- Nachteil: Starke Schwankung und Instabilität bei der Messung, relativ größere Fehler

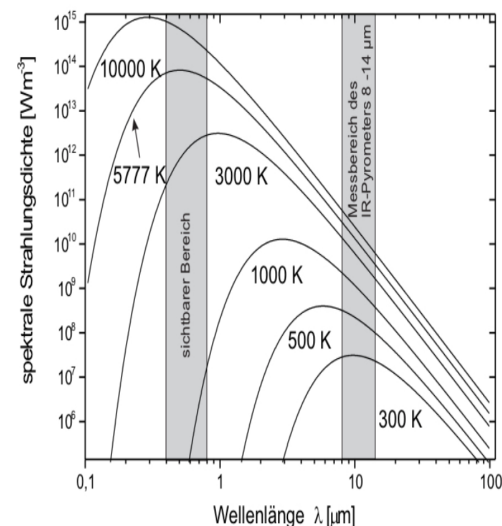


Abbildung 3: Spektrale Intensitätsverteilung eines schwarzen Körpers bei unterschiedlichen Temperaturen

2 Messprotokoll

Messprotokoll PAP 1

Yuting Shi, Yulai Shi

04.09.2023

9:00 ~ 12:00

Versuch 41 - Temperaturmessung

Geräte:

- Pyrometer
- Pt 100 - Thermometer (Klasse B)
- Konstantstromquelle 1 mA
- Dewargefäß
- Gas thermometer
- Topf für Temperaturbad
- Thermoelement für hohe Temperatur (PtRh, Typ B oder Typ C) mit Eich-tabelle
- Multimeter
- Butangas - Bunsenbrenner
- Schutzbrille und Schutzhandschuhe

Aufgabe 1: Eichmessung

Inbetriebnahme des Pt 100 - Thermometers: wir bauen zuerst die Zweileiterschaltung auf, indem wir das Voltmeter an zwei Buchsen

der Stromquelle anschließen, und Pt 100 - Thermometer stecken in die Adapterbox stecken dann mit Stromquelle verbinden. Nun befüllen wir den Becher mit Wasser und Eis und lassen Pt 100 - Widerstand in den Gemisch. Luftballon verbunden mit Gas thermometer ebenso. Sobald die Spannung mit Pt 100 ihr Minimum erreicht, bekommen wir die Vierleiterschaltung zu haben. Messung schließen wir weiter das Voltmeter direkt an die Adapterbox.

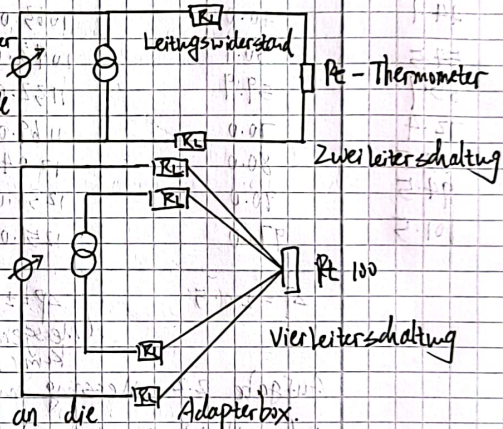


Tabelle 1: Eichung bei $0^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$

	Spannung am Pt 100 [mV]	Pyrometer $T [^\circ\text{C}]$	Thermometer $T [^\circ\text{C}]$	Druck P [mbar]
2-Schaltung	$101,0 \pm 0,2$	$-1,2 \pm 2,0$	$0 \pm 0,5$	$918,0 \pm 0,1$
4-Schaltung	$100,0 \pm 0,2$	$-1,2 \pm 2,0$	$0 \pm 0,5$	$918,0 \pm 0,1$

Da 4-Schaltung sich von mehr Widerstände handelt ist die Spannung kleiner Problem: Der Gasballon kann sich nicht in der Mitte des Gefäßes befinden.

Es gibt Kontakt mit der Wand

→ inhomogene Temperaturverteilung (trotz Magnetrührer)

wir machen folgende Experimente mit Vierleiterschaltung

Aufgabe 2.1 Messung von 10° bis 100°C

Wir schalten die Heizplatte ein und nehmen alle 10°C Messungen für 2 Thermometer. Allerdings können sich das Wasser nicht zu 100°C sieden lassen; Je höher die Temperatur geht, desto langsamer wird das Wasser erhitzt, bis 97°C. Für die Temperatur des Pt 100 wurde die Spannung in Widerstand umgerechnet und die Temperatur anhand Tabelle abgegeben.

Tabelle 2: Messreihe 10°C bis 97°C

T von Pt 100 [°C]	Temperatur [°C]	T	Druck P [mbar]	Pyrometer T [°C]	Spannung U [mV]
12.9	10.0		958.0	9.4	105.0
20.5	20.2		994.0	19.8	108.0
31.1	30.0		1031.0	29.8	112.0
44.1	40.0		1063.0	39.2	117.0
54.5	50.1		1098.0	50.3	121.0
65.7	59.9		1132.0	57.0	125.0
72.4	70.0		1169.0	68.7	128.0
85.5	80.0		1204.0	73.4	133.0
94.5	90.0		1236.0	78.6	136.0
101.5	97.0		1251.0	83.2	139.0
$\Delta T = \pm 0.5$		$\Delta P = \pm 1.0$ (Messgerätsschwankung)		$\Delta T = \pm 2.0$	$\Delta U = \pm 1.0$

Aufgabe 2.2 Messung mit Trockeneis und flüssigem Stickstoff

Nach Abkühlung von Luftballon füllen wir das Dewargefäß mit Trockeneis und Alkohol und lassen den Ballon sowie Pt 100 wieder drin. Sobald die Messwerte stabilisiert haben, notieren wir Spannung und Druck, schütten den Trockeneis-Alkohol-Gemisch zurück in die Dewargefäße auf dem Waschbecken. Füllen nun Dewargefäß mit N₂ (flüssig) und wir schieben den Ballon sowie Pt 100 wieder. Wenn die starke Verdampfung aufgehört hat, protokollieren Spannung und Druck wieder.

Tabelle 3: Stickstoff und CO₂ + Alkohol

Stoff	Druck P [mbar]	Spannung U [mV]
CO ₂ + Alkohol	663.0 ± 1.0	72.1 ± 0.5
N ₂	245.0 ± 1.0	21.0 ± 0.5

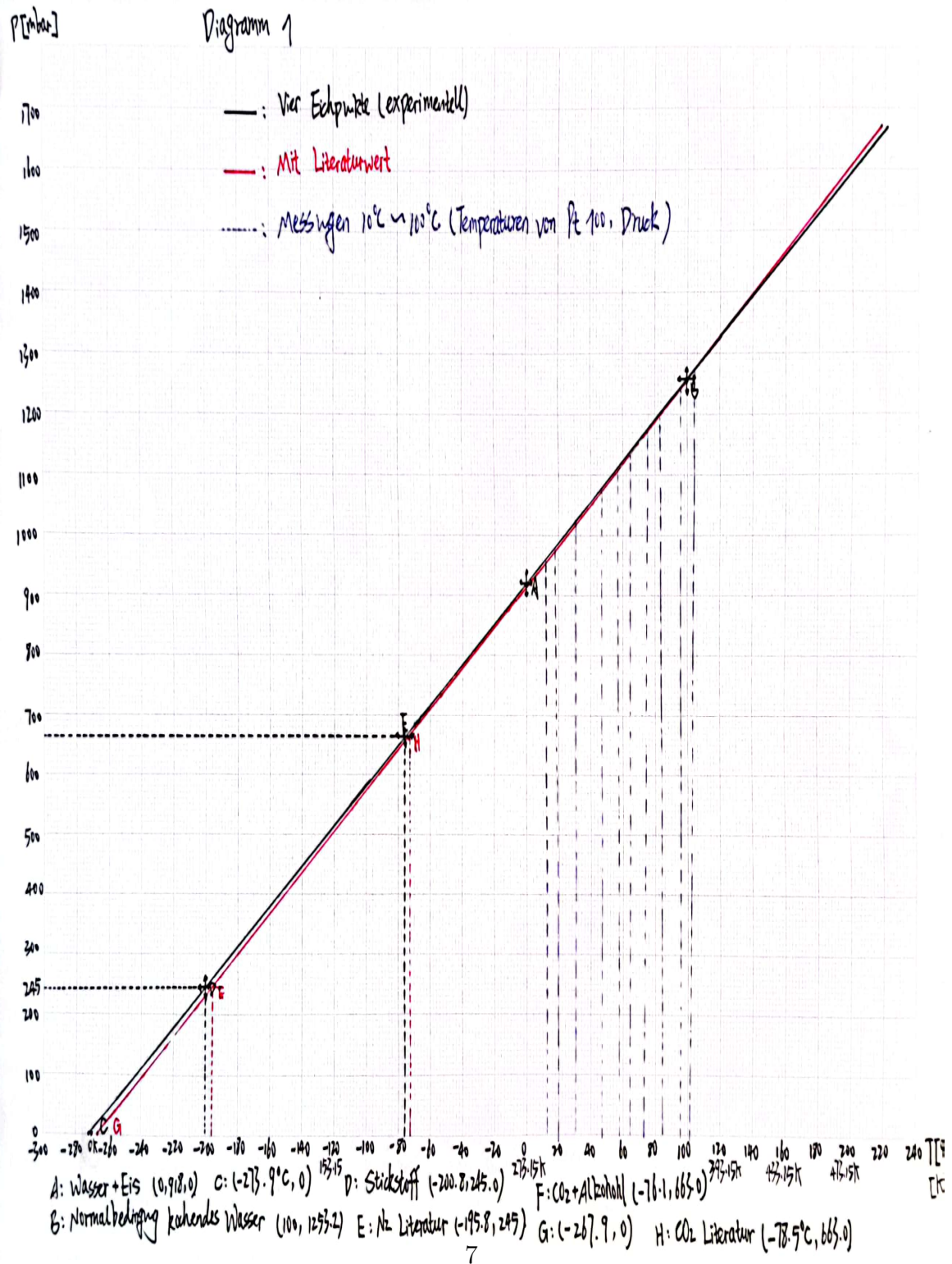
Aufgabe 3: Messung der Temperaturverteilung in Bunsenbrennerflamme
 Der Brenner wird eingeschaltet. Wir stecken PtRh-Thermoelement
 bei starker und schwacher Luftzufuhr in die Flamme und messen
 die Spannung. Aus Tabelle wird die Temperatur abgegeben.

Tabelle 4: Spannung und Temperatur in Flamme

Unten	Nr.	Spannung [mV]	T [°C]	Nr.	Spannung [mV]	T [°C]
↓ oben	1	2.0 ± 0.5	264.2	1	2.5 ± 0.5	320.0
	2	3.3 ± 0.5	404.3	2	4.6 ± 0.5	536.8
	3	4.5 ± 0.5	526.8	3	5.4 ± 0.5	615.8
	4	3.9 ± 0.5	466.1	4	5.0 ± 0.5	576.5
	5	2.8 ± 0.5	368.5	5	4.5 ± 0.5	526.8
	Viel Luft			Wenig Luft		

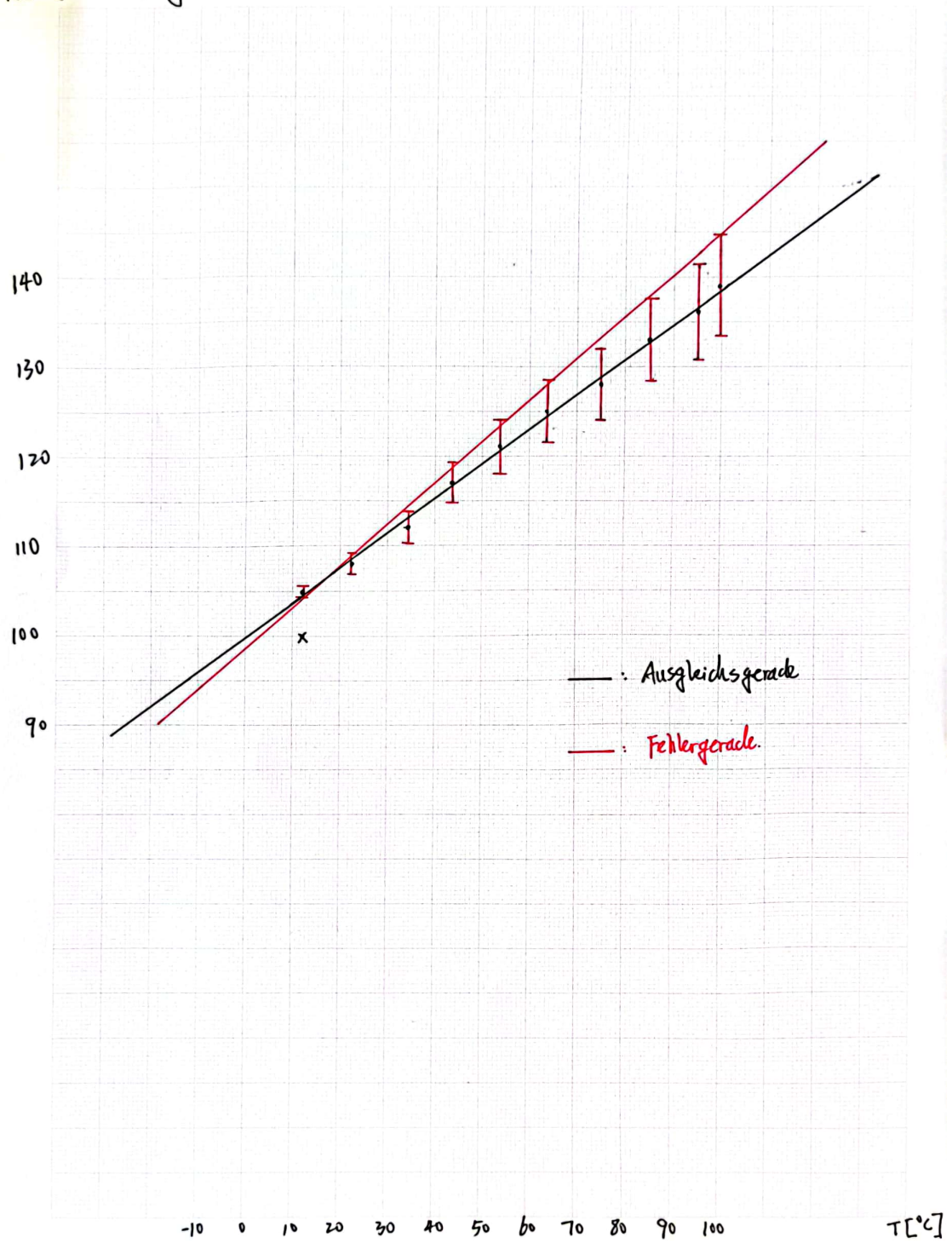
S. K.
 4.9.28

3 Graphische Darstellung



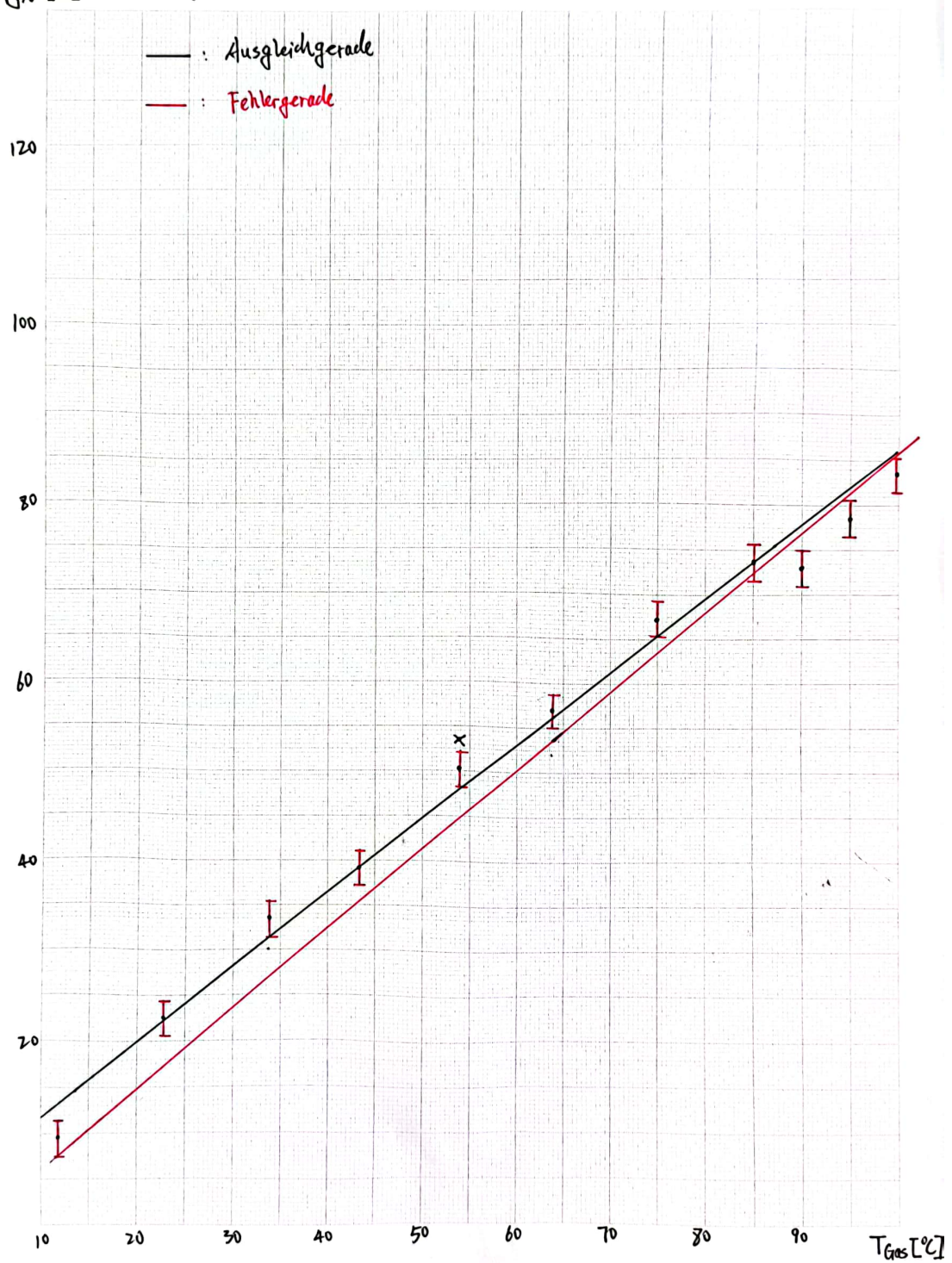
R[α]

Diagramm 2



$T_{\text{gas}} [^{\circ}\text{C}]$

Diagramm 3



4 Auswertung und Zusammenfassung

4.1 Auswertung für die Messung 1 und 2

Messung von 0 Grad bis 100 Grad sowie Messung der Temperaturen von Trockeneis und Stickstoff

- Eichung bei 0 Grad: Während der Eichung bei 0 Grad Celsius wird das Pt 100 Thermometer kalibriert, um eventuelle Abweichungen von den erwarteten Werten zu korrigieren, damit die Genauigkeit des Pt 100 Thermometers überprüft werden kann. Dies ist wichtig, um sicherzustellen, dass das Thermometer korrekte Messwerte bei dieser spezifischen Temperatur liefert.
- 2) Zuleitungen besitzen selbst einen elektrischen Widerstand, der Spannungsverlust verursachen könnte. Mithilfe der Vierleiterschaltung kann dieser Messfehler möglichst behoben werden. Dabei dienen zwei Leiter der Stromzufuhr und zwei weitere zur Messung des Spannungsabfalls. Da die Spannungsmessung mit hochohmigen Voltmetern (Innenwiderstand einige $M\Omega$) erfolgt, fließt nur ein sehr kleiner Strom durch die Leitungen und der Spannungsabfall an den Zuleitungen ist vernachlässigbar klein.
- Der heutige Luftdruck in Heidelberg (9:34 04.09.2023) beträgt $P_{LD} = (1011.50 \pm 1.0) hPa$. Da wir nun maximal 97 °C mit siedendem Wasser erreicht haben, um den Rechenprozess zu vereinfachen, können wir dann mithilfe der mathematischen Formel:

$$P_{NB} = P_{gem} \frac{1013.25 hPa}{P_{LD}}, \quad (7)$$

den Druck P_{NB} unter Normalbedingungen (100 °C) umrechnen (1253.2 mbar). Mit den Punkten von T=0 Grad und T=100 Grad können wir die Eichgerade zeichnen, mit der wir die Temperaturen von Trockeneis und flüssigem Stickstoff ablesen können.

- Fehlerrechnung:

$$\Delta P_{NB} = \sqrt{\left(\frac{\partial P_{NB}}{\partial P_{gem}} \Delta P_{gem}\right)^2 + \left(\frac{\partial P_{NB}}{\partial P_{LD}} \Delta P_{LD}\right)^2} \quad (8)$$

Folgt daraus: $\Delta P_{NB} = 1.6 mbar$

- Aus der Eichgerade ergibt sich $T = -273.9\text{ °C}$ (Literaturwert: -273.15 Grad) bei $P=0$, wegen der Zustandsgleichung des idalen Gases $PV = NRT$ ist T deswegen genau der Absolute Nullpunkt in Thermodynamik.
Stickstoff: $T = -200.8\text{ °C}$ (Literaturwert: -195.8 °C)
Trockeis: $T = -76.1\text{ °C}$ (Literaturwert: -78.5 °C)
- Gründe für die Unterschiede zwischen den beiden Geraden:
 - a) Die unvermeidbare Systemmatische Fehler z.B. Volumenverlust, wegen der Ausdehnung des Glasballons bei Erwärmung, und die eingeschlossene Luft in der Kapillare bleibt annähernd auf Zimmertemperatur.
 - b) Die Luft ist kein 100% ideales Gas.
 - c) Nullpunktversatz: Bei der Eichung bei 0 °C zeigt das Pt100 Thermometer eigentlich nicht bei der erwarteten Temperatur 0 °C wie Thermometer an, sondern wegen unserer Spannungsfehler $\pm 0.2\text{ mv}$ (0 ± 0.1) °C entspricht.
 - d) Hysterese: Hysterese tritt auf, wenn das Thermometer unterschiedliche Werte für die gleiche Temperatur anzeigt, abhängig davon, ob die Temperatur steigt oder fällt. Dies kann auf interne mechanische Spannungen oder Materialienigkeiten im Thermometer zurückzuführen sein.
 - e) Andere Fehler aus Messgeräten, Umweltfaktoren, Thermoelektrische Effekte, Statistik usw.

4.2 Auswertung für die Bestimmung der Temperaturwerte des Gasthermometers und Widerstand des Pt100-Elements

4.2.1 Tabelle

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Temperatur[°C]	11.9	22.6	33.7	43.2	53.7	63.8	74.9	85.0	94.8	99.3
Widerstand[Ω]	105.0	108.0	112.0	117.0	121.0	125.0	128.0	133.0	136.0	139.0
Fehler ΔR [Ω]	0.5	1.1	1.8	2.3	2.9	3.5	4.1	4.7	5.3	5.5

Tabelle 5: Temperaturwerte des Gasthermometers

Bemerkung: Der Widerstand R wird durch Ohmsches Gesetz $R = \frac{U}{I}$ ausgerechnet

4.2.2 Rechenprozess

$$R(T) = R_0(1 + AT + BT^2) \quad (9)$$

$$\Delta R = (R_0A + 2R_0BT)\Delta T \quad (10)$$

K_1 : Steigung der Ausgleichsgerade

K_2 : Steigung der Fehlergerade

$$K_1 = \frac{133.0 - 105.0}{85.0 - 11.9} = 0.383 [\Omega \cdot ^\circ\text{C}^{-1}] \quad K_2 = \frac{144.5 - 104.5}{99.3 - 11.9} = 0.458 [\Omega \cdot ^\circ\text{C}^{-1}] \quad (11)$$

$$\implies |\Delta K| = |K_1 - K_2| = 0.075 [\Omega \cdot ^\circ\text{C}^{-1}] \implies K = (0.383 \pm 0.075) [\Omega \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$$

Unsere Steigung entspricht dem linearen Glied des Polynoms in Gl.9 ($R_0 \cdot A = 0.391$).

4.3 Auswertung für den Vergleich von Temperaturmessung zwischen Pyrometer und Gasthermometer

K_3 : Steigung der Ausgleichsgerade

K_4 : Steigung der Fehlergerade

$$K_3 = \frac{29.8 - 9.4}{33.7 - 11.9} = 0.936 \quad K_4 = \frac{85.2 - 7.4}{99.3 - 11.9} = 0.890 \quad (12)$$

$$\implies |\Delta K'| = |K_3 - K_4| = 0.046 [\Omega \cdot ^\circ\text{C}^{-1}] \implies K' = 0.936 \pm 0.046$$

Wir sehen, dass die Steigungen der beiden Geraden nahe an 1 liegen, und es wird eine erhebliche Abweichung des einzelnen Punkts bei hoher Temperatur dargestellt. Ein Pyrometer funktioniert in der Regel auf der Grundlage des Prinzips der Infrarotstrahlungsmessung. Das bedeutet, dass ein Pyrometer die von einem Objekt ausgestrahlte Infrarotstrahlung misst und daraus die Temperatur des Objekts ableitet. Der Emissionsgrad des Körpers kann sich bei hoher Temperatur ändern, was die Messung komplizierter machen kann. Außerdem gibt ein Objekt Wärme in Form von Infrarotstrahlung an seine Umgebung an, der Wärmeverlust führen dazu, dass die gemessene Strahlung geringer ist als erwartet. Je höher die Temperatur geht, desto größer wird der Wärmeverlust und damit der Fehler der Messung.

4.4 Auswertung Flammengestalt

Man sieht, dass bei starker Luftzufuhr die Form der Flamme gleichmäßiger und voller ist als bei der schwachen Luftzufuhr, außerdem ist es auch bemerkenswert, dass bei der schwachen Luftzufuhr die Flamme die höheren lokalen Temperaturen besitzt. Die Temperaturverteilung gilt so dann: Von unten nach oben steigt die Temperatur zunächst auf dann fällt ab.

4.5 Diskussion und Zusammenfassung

Durch den Einsatz verschiedener Messgeräte und Thermometer haben wir präzise Temperaturmessungen durchgeführt. Trotz zahlreicher Störfaktoren und möglicher

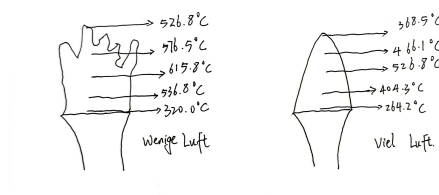


Abbildung 4: Temperaturverteilung der Flamme

systematischer Fehler konnten wir äußerst genaue Ergebnisse erzielen, die eng an den Literaturwerten lagen. Wir sind äußerst zufrieden mit dem Resultat.

Während des Experimentierens konnten wir wertvolle praktische Erfahrungen sammeln. Dies umfasste das Kennenlernen und die Anwendung verschiedener Messgeräte, das Einrichten von Schaltungen und die sorgfältige Dokumentation des Versuchsprotokolls. Besonders aufregend war unsere erstmalige Verwendung von LaTeX zur Protokollerstellung, obwohl dies zu Beginn zeitaufwendig war, bereitete es uns gleichzeitig viel Freude. Für die Fehlerabschätzung waren wir eher konservativ und haben einen sehr engen Fehlerbereich in unserem Protokoll festgelegt, da während des Experiments leichte Schwankungen auftraten, wie aus den fast überlappenden Kurven ersichtlich. Bei der schnellen Erwärmung des Wassers von 10 Grad auf 100 Grad sollten wir eigentlich die Heizplatte kurz vor Erreichen der gewünschten Temperatur abgeschalten und das Wasser gründlich umrühren, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung sicherzustellen. Dies könnte jedoch zu geringfügigen Fehlern in unseren Messungen geführt haben.

Unser Hauptfokus im Experiment lag auf der Messung der Änderungen des Pt100-Widerstands in Abhängigkeit von der Temperatur und seiner Reaktion bei extremen Temperaturen. Dabei haben wir simultan verschiedene Instrumente mit unterschiedlichen Temperaturmessprinzipien eingesetzt. Zusätzlich haben wir die Temperaturverteilung in der Flamme analysiert. Dies stellte aufgrund der instabilen Flamme und der geringen Genauigkeit des Thermometers eine bemerkenswerte Herausforderung dar.