
Versuch 03

**Spezifische Wärme der Luft und
Gasthermometer**

Praktikant/in:	Vladislav Begert
E-Mail-Adresse:	v.begert@stud.uni-goettingen.de
Praktikant/in:	Christoph Kehl
E-Mail-Adresse:	christoph.kehl01@stud.uni-goettingen.de
Betreuer/in:	Mathis Klever
Datum der Durchführung:	19.01.2026

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Theorie	4
2.1	Gasthermometer	4
2.2	Spezifische Wärme	5
3	Durchführung	7
3.1	Gasthermometer	7
3.2	Spezifische Wärme der Luft	8
4	Auswertung	9
4.1	Gasthermometer	9
4.1.1	Erwärmen:	9
4.1.2	Abkühlen:	10
4.2	Spezifische Wärme der Luft	11
5	Diskussion	13
5.1	Gasthermometer	13
5.2	Spezifische Wärme der Luft	13
	Literatur	15

1 Einleitung

Die Motivation für diesen Versuch besteht darin, theoretische Konzepte der Thermodynamik, insbesondere das ideale Gasmodell, durch experimentelle Messungen zu bestätigen und deren physikalische Bedeutung anschaulich zu machen. Dieser Versuch lässt sich insgesamt in zwei folgende Hauptteile und deren Zielstellungen unterteilen:

- **Gasthermometer:** Ziel dieses Versuches besteht hauptsächlich darin, den absoluten Temperatur-Nullpunkt experimentell mithilfe eines **Jollyschen Luftthermometers** (*Gasthermometers*) zu bestimmen. Die Bestimmung des Temperatur-Nullpunktes ermöglicht die Erstellung einer dazugehörigen Temperaturskala, die sich nach diesem Temperatur-Nullpunkt ausrichtet. Des Weiteren bestimmt man den **Ausdehnungskoeffizient** von Luft, welcher auf den Grundsätzen einer idealen Gasgleichung basiert.
- **spezifische Wärme der Luft:** Hierbei wird einem Gasgemisch eine bestimmte Energiemenge mittels elektrischer Spannung zugeführt und die entsprechende Druckänderung wird gemessen.

2 Theorie

2.1 Gasthermometer

Die **Temperatur** ist eine fundamentale physikalische Zustandsgröße eines Stoffes. Sie beschreibt den thermischen Zustand eines Systems und steht in direktem Zusammenhang mit der Bewegung seiner Teilchen. Dabei gilt der Grundsatz: je stärker sich die Teilchen eines Stoffes bewegen, desto höher ist die Temperatur.

Zur Beschreibung der Temperatur werden verschiedene Skalen verwendet:

- Auf der **Celsius-Skala** wird der Schmelzpunkt von Eis auf $0,^{\circ}\text{C}$ und der Siedepunkt von Wasser auf $100,^{\circ}\text{C}$ festgelegt.
- Die **absolute Temperaturskala** verwendet hingegen die Einheit Kelvin und definiert ihren Nullpunkt als den Zustand, in dem die Teilchen keine Bewegungsenergie mehr besitzen.

Ein **ideales Gas** ist ein vereinfachtes physikalisches Modell, bei dem das Gas aus punktförmigen Teilchen besteht, die sich frei bewegen und ausschließlich durch Stöße miteinander wechselwirken.

Unter dieser Annahme ergibt sich ein einfacher Zusammenhang zwischen Druck p , Volumen V und Temperatur T . Dieser Zusammenhang wird durch die **allgemeine Gasgleichung** [2, S. 274] beschrieben:

$$pV = nRT. \quad (2.1.1)$$

Hierbei gibt n die Stoffmenge des Gases an und $R \approx 8.315 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ist die Gaskonstante, die die Beziehung zwischen den makroskopischen Zustandsgrößen festlegt.

Nach dem Gesetz von *Gay-Lussac* gilt für ein **ideales Gas** folgende Gleichung [2, S. 271]:

$$p = p_0 \left(1 + \frac{\vartheta}{\gamma} \right). \quad (2.1.2)$$

Dabei bezeichnet p_0 den Druck des Gases bei einer Temperatur von $0,^{\circ}\text{C}$. Die Konstante $\gamma = 273.15^{\circ}\text{C}$ ist eine experimentell bestimmte Größe und entspricht der Differenz zwischen dem Nullpunkt der **Celsius-Skala** und dem Nullpunkt der **absoluten Temperaturskala**.

2.2 Spezifische Wärme

Die innere Energie eines Gases mit der Stoffmenge n mol und der absoluten Temperatur T ist definiert [2, S. 294] als:

$$U = \frac{1}{2} n f R T, \quad (2.2.1)$$

wobei f die Zahl der Freiheitsgrade bezeichnet, also die Anzahl der Bewegungsmöglichkeiten eines Gasmoleküls. Für ein ideales Gas gilt $f = 3$, da die Teilchen als punktförmig angenommen werden.

Die spezifische Wärmekapazität eines Stoffes ist durch den Faktor c definiert. Sie gibt an, welche Wärmemenge ΔQ der Masse $m = 1$ kg eines Stoffes zugeführt werden muss, um dessen Temperatur um $\Delta T = 1$ K zu erhöhen. Allgemein gilt der Zusammenhang [2, S. 274]:

$$\Delta Q = c \Delta T. \quad (2.2.2)$$

Ausgehend vom ersten Hauptsatz der Thermodynamik [2, S. 295]:

$$dQ = dU + dW \quad (2.2.3)$$

Für ein ideales Gas mit der Stoffmenge $n = 1$ mol gilt die Gasgleichung

$$pV = nRT = Nk_B T \quad (2.2.4)$$

und in differenzieller Form [2, S. 296]

$$V dp + p dV = R dT, \quad (2.2.5)$$

sowie der Zusammenhang zwischen innerer Energie und Temperatur bei konstantem Volumen [2, S. 296]:

$$dU = c_V dT. \quad (2.2.6)$$

Durch Einsetzen der Glg.(2.2.6) in Glg.(2.2.3) ergibt sich:

$$c_V dT = dQ - p dV. \quad (2.2.7)$$

Löst man Glg.(2.2.5) nach dT auf:

$$dT = \frac{V dp + p dV}{R} \quad (n = 1 \text{ mol}). \quad (2.2.8)$$

Durch Einsetzen der Glg.(2.2.8) in Glg.(2.2.7) erhält man schließlich:

$$\frac{f}{2} = \frac{c_V}{R} = \frac{\Delta Q - p \Delta V}{V \Delta p + p \Delta V}. \quad (2.2.9)$$

Dabei bezeichnet c_V die spezifische Wärmekapazität bei Erwärmung unter konstantem Volumen.

Für diesen Versuch wird noch die Energie eines Kondensators ΔQ der Kapazität C und dazugehöriger Spannung U benötigt [1, S. 23]:

$$\Delta Q = \frac{1}{2} C U^2. \quad (2.2.10)$$

3 Durchführung

3.1 Gasthermometer

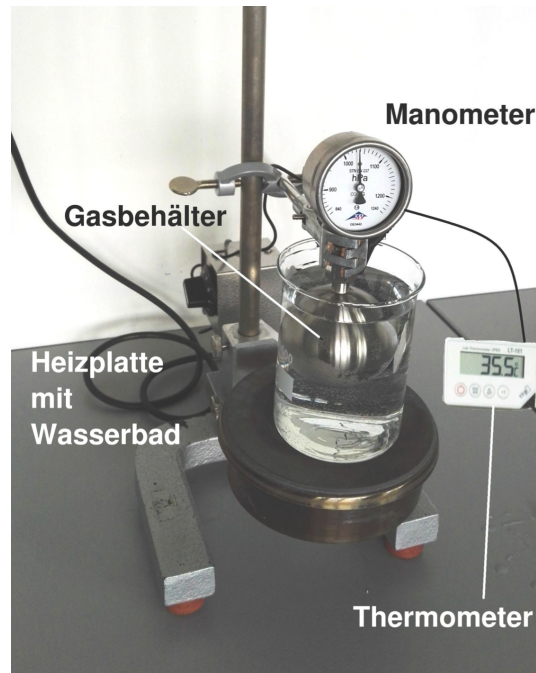


Abbildung 1: Versuchsaufbau zum Gasthermometer [3, S. 68]

Der Gasbehälter (Metallkugel) wird zunächst auf etwa 0°C mithilfe von Eis abgekühlt. Anschließend wird das Wasserbad mithilfe der Heizplatte erhitzt. Sobald der Druck $p = 1180\text{ hPa}$ erreicht wird, wird die Heizplatte abgeschaltet. Der Druck p der Luft im Gasbehälter $p_V(T)$ wird bei konstantem Volumen V für Temperaturen zwischen 0°C und 80°C ermittelt, sowohl beim Erwärmen als auch beim Abkühlen. Die Messungen erfolgen in Schritten von $\Delta T \approx 5^\circ\text{C}$. Während des Experiments wird das Wasser kontinuierlich gerührt.

Dann wird das Wasser von 80°C mit Eis wieder auf 0°C abgekühlt, wobei ebenfalls in $\Delta T \approx 5^\circ\text{C}$ -Schritten der Druck dokumentiert wird.

Das Volumen des Wassers bleibt während des gesamten Versuchs konstant.

3.2 Spezifische Wärme der Luft

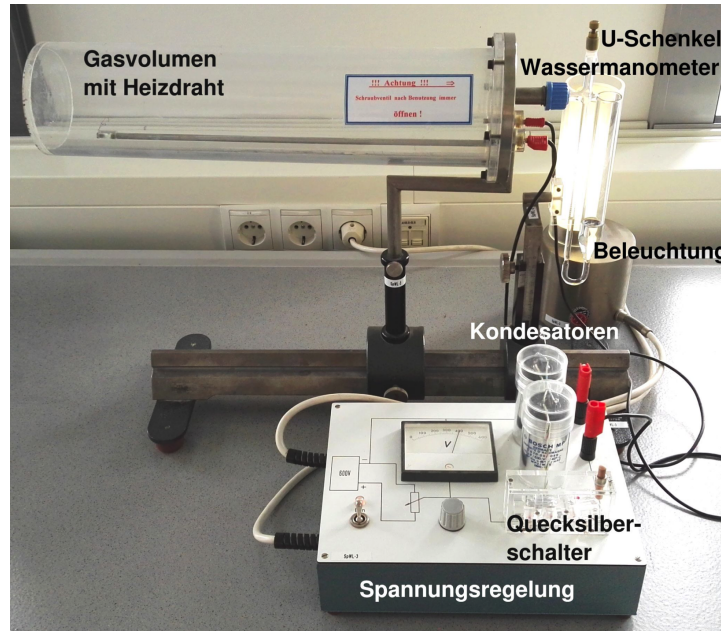


Abbildung 2: Versuchsaufbau zur spezifischen Wärme der Luft [3, S. 68]

Ein Zylinder ist mit Luft gefüllt und über ein Wassermanometer mit der Umgebung verbunden. Über einen Kondensator und einen Glühdraht lässt sich eine definierte Wärmemenge Q an das Gasvolumen übertragen. Die Ablesung der Druckänderung am Manometer erlaubt Rückschlüsse auf die Reaktion des Gases, während das Volumen als konstant angenommen wird.

Die auf das Gas übertragene Wärmemenge erzeugt eine maximale Druckänderung Δp , die vom Manometer erfasst wird. Messungen werden für verschiedene Spannungen zwischen $U_{min} = 100 \text{ V}$ und $U_{max} = 500 \text{ V}$ in $\Delta U \approx 50 \text{ V}$ -Schritten wiederholt, um die Abhängigkeit des Drucks von der zugeführten Energie zu dokumentieren. Für jede Spannung werden drei Messreihen gemessen.

Während der Messungen bleibt die Belüftungsöffnung des Zylinders verschlossen, sodass das Gasvolumen konstant bleibt. Zwischen den einzelnen Messungen wird das Ventil geöffnet, um den Temperatenausgleich zwischen Gas und Umgebung zu ermöglichen.

Zur vollständigen Beschreibung des Systems wird anschließend noch das Innenvolumen V des Zylinders bestimmt.

4 Auswertung

4.1 Gasthermometer

4.1.1 Erwärmen:

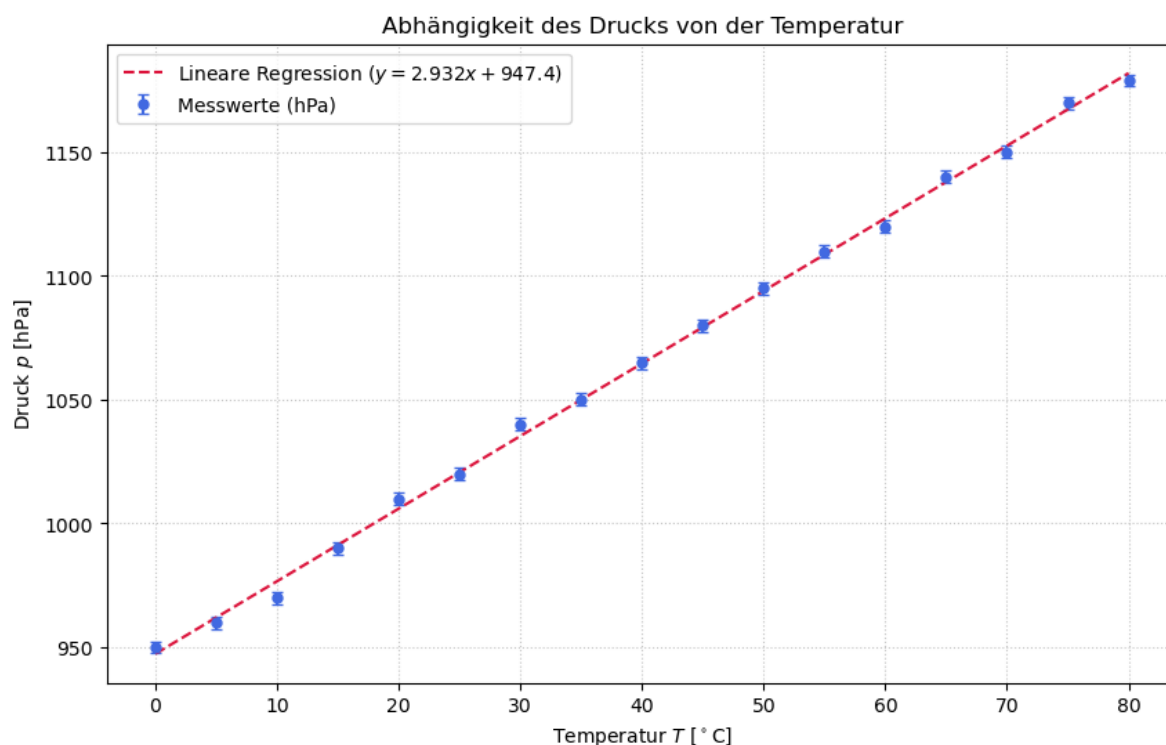


Abbildung 3: Messergebnisse Erwärmung

Aus den Messwerten der ersten Versuchsreihe (Erwärmen) wurden mittels einer linearen Regression die Parameter a (Achsenabschnitt) und b (Steigung) der Geradengleichung $p(T) = a + b \cdot T$ bestimmt. Die statistische Auswertung ergab folgende Werte:

$$a = (942,5 \pm 1,8) \text{ hPa}$$

$$b = (3,053 \pm 0,038) \text{ hPa/}^\circ\text{C}$$

Der absolute Nullpunkt T_0 ist definiert als die Temperatur, bei der der Druck eines idealen Gases theoretisch auf Null absinkt ($p(T_0) = 0$). Durch Umstellen der Geradengleichung ergibt sich:

$$T_0 = -\frac{a}{b} = -\frac{942,54 \text{ hPa}}{3,0526 \text{ hPa/}^\circ\text{C}} \approx -308,8^\circ\text{C} \quad (4.1.1)$$

Die Unsicherheit σ_{T_0} wird über das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz berechnet. Da T_0 von den fehlerbehafteten Größen a und b abhängt, gilt:

$$\sigma_{T_0} = \sqrt{\left(\frac{\partial T_0}{\partial a} \cdot \sigma_a\right)^2 + \left(\frac{\partial T_0}{\partial b} \cdot \sigma_b\right)^2} \quad (4.1.2)$$

Mit den partiellen Ableitungen $\frac{\partial T_0}{\partial a} = -\frac{1}{b}$ und $\frac{\partial T_0}{\partial b} = \frac{a}{b^2}$ folgt:

$$\sigma_{T_0} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_a}{b}\right)^2 + \left(\frac{a \cdot \sigma_b}{b^2}\right)^2} \quad (4.1.3)$$

Einsetzen der berechneten Werte:

$$\sigma_{T_0} = \sqrt{\left(\frac{1,845}{3,0526}\right)^2 + \left(\frac{942,54 \cdot 0,0377}{3,0526^2}\right)^2} \approx 3,9^\circ\text{C} \quad (4.1.4)$$

Das experimentelle Ergebnis für den absoluten Nullpunkt lautet somit:

$$T_0 = (-308,8 \pm 3,9)^\circ\text{C} \quad (4.1.5)$$

4.1.2 Abkühlen:

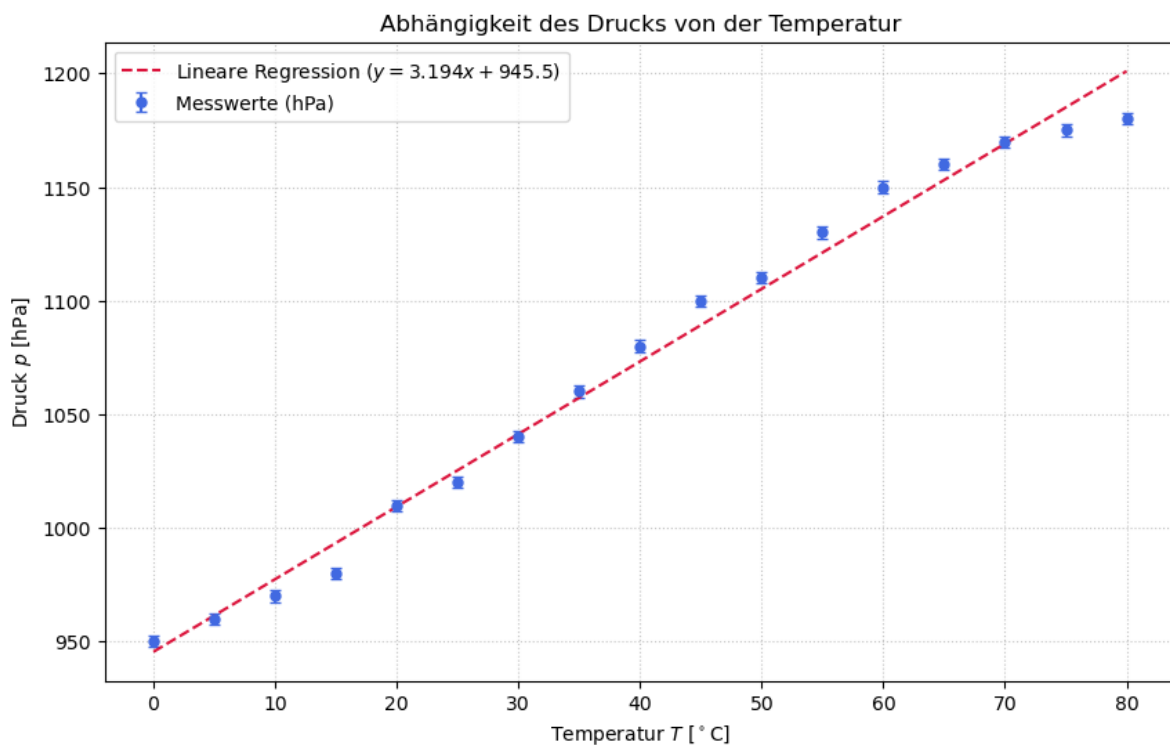


Abbildung 4: Messergebnisse Abkühlung

Für die zweite Messreihe (Abkühlen) wurden analog zur ersten Reihe die Regressionsparameter und deren Unsicherheiten bestimmt:

$$\begin{aligned} a &= (952,1 \pm 2,2) \text{ hPa} \\ b &= (3,026 \pm 0,045) \text{ hPa/}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Daraus berechnet sich der absolute Nullpunkt zu:

$$T_0 = -\frac{a}{b} = -\frac{952,11 \text{ hPa}}{3,0263 \text{ hPa/}^\circ\text{C}} \approx -314,6^\circ\text{C} \quad (4.1.6)$$

Die Fehlerfortpflanzung nach Gauß ergibt mit den entsprechenden Ableitungen:

$$\sigma_{T_0} = \sqrt{\left(\frac{2,197}{3,0263}\right)^2 + \left(\frac{952,11 \cdot 0,0449}{3,0263^2}\right)^2} \approx 4,7^\circ\text{C} \quad (4.1.7)$$

Das Ergebnis für die zweite Messreihe lautet somit:

$$T_0 = (-314,6 \pm 4,7)^\circ\text{C} \quad (4.1.8)$$

4.2 Spezifische Wärme der Luft

Tabelle 1: Messwerte der drei Versuchsreihen und berechnete Mittelwerte

Länge I [cm]	Länge II [cm]	Länge III [cm]	Mittelwert [cm]
0.1	0.1	0.1	0.10
0.2	0.2	0.2	0.20
0.2	0.4	0.4	0.33
0.4	0.6	0.6	0.53
1.0	1.0	1.0	1.00
1.4	1.6	1.6	1.53
1.8	2.0	2.0	1.93
2.6	2.6	2.6	2.60
3.4	3.4	3.2	3.33

Die im Kondensator gespeicherte Energie ΔQ berechnet sich aus $\Delta Q = 0,5 \cdot C \cdot U^2$. Bei einer Kapazität von $C = 20 \mu\text{F}$ und einer geschätzten Unsicherheit von $\sigma_U = 2 \text{ V}$ gilt:

$$\sigma_{\Delta Q} = \sigma_U \cdot C \cdot U \quad (4.2.1)$$

Für das Volumen des Zylinders ($l = 0,394 \text{ m}$, $d = 0,09 \text{ m}$) ergibt sich $V = 0,00251 \text{ m}^3$ mit einem Fehler $\sigma_V = 0,00003 \text{ m}^3$. Die gesamte Höhenänderung am Manometer folgt

aus der Ablesung h_1 und dem Flächenverhältnis der Schenkel ($r_1 = 0,002\text{ m}$, $r_2 = 0,0092\text{ m}$):

$$\Delta h = h_1 \left(1 + \frac{r_1^2}{r_2^2} \right) \quad (4.2.2)$$

Die Druckänderung im Zylinder beträgt somit $\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h$. Die Freiheitsgrade f bestimmen sich über:

$$f = 2 \cdot \left(\frac{\Delta Q - p \cdot \Delta V}{V \cdot \Delta p + p \cdot \Delta V} \right) \quad (4.2.3)$$

Tabelle 2: Zusammenfassung der berechneten Freiheitsgrade und Molwärmern

U [V]	h1 [cm]	dQ [J]	dp [Pa]	f	sig-f	cv	sig-cv
100	0,10	0,100	10,3	7,33	4,21	30,45	17,49
150	0,20	0,225	20,5	8,25	2,38	34,31	9,88
200	0,33	0,400	34,2	8,81	1,53	36,62	6,35
250	0,53	0,625	54,8	8,60	0,94	35,75	3,90
300	1,00	0,900	102,7	6,58	0,39	27,37	1,64
350	1,53	1,225	157,5	5,83	0,24	24,25	0,98
400	1,93	1,600	198,6	6,05	0,20	25,14	0,83
450	2,60	2,025	267,1	5,69	0,15	23,63	0,62
500	3,33	2,500	342,5	5,47	0,12	22,75	0,50

Endergebnis: $f = 5,73 \pm 0,08$ | $c_v = (23,83 \pm 0,32) \text{ J}/(\text{mol K})$

5 Diskussion

5.1 Gasthermometer

Die experimentelle Bestimmung des absoluten Nullpunktes lieferte für die beiden Messphasen Werte von $T_0 = (-308,8 \pm 3,9)^\circ\text{C}$ (Erwärmen) und $T_0 = (-314,6 \pm 4,7)^\circ\text{C}$ (Abkühlen). Beide Resultate weichen signifikant vom Literaturwert ($-273,15^\circ\text{C}$) ab, was auf systematische Fehlerquellen zurückzuführen ist.

Totvolumen und Geometrie: Ein primärer Faktor für die zu flache Steigung der Druckkurven ist das **Totvolumen** der Kapillaren und Schläuche. Da dieser Teil des Gases nicht dem Wasserbad ausgesetzt war, expandierte er nicht im gleichen Maße wie das Gas im Kolben. Dies verringerte die Steigung b der Regressionsgeraden künstlich, was rechnerisch zu einem tieferen Schnittpunkt mit der Temperaturachse ($T_0 = -a/b$) führt.

Thermisches Ungleichgewicht: Ein entscheidender systematischer Fehler resultierte aus der **Versuchsdurchführung**. Da die Kolben im Wasserbad relativ schnell erhitzt und abgekühlt wurden, konnte sich kein vollständiges thermisches Gleichgewicht einstellen. Da ausschließlich die Temperatur des Wassers gemessen wurde, entsprach diese nicht der tatsächlichen Gastemperatur im Kolbeninneren.

Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von Luft hinkte die Gastemperatur der des Wasserbads hinterher. Beim Abkühlen war das Gas im Inneren somit noch wärmer als das gemessene Wasser, was erklärt, warum die Abkühlreihe mit $-314,6^\circ\text{C}$ noch stärkere Abweichungen zeigt als die Erwärmungsphase. Das Gasgesetz wurde somit über ein fehlerhaftes Temperaturintervall extrapoliert.

Fazit: Trotz dieser Einflüsse konnte die Linearität des Zusammenhangs zwischen Druck und Temperatur bestätigt werden. Zur Steigerung der Genauigkeit wäre eine deutlich langsamere Temperaturführung sowie eine Minimierung des Totvolumens zwingend erforderlich.

5.2 Spezifische Wärme der Luft

Die experimentelle Bestimmung der Freiheitsgrade der Luft lieferte über den gemessenen Energiebereich einen gewichteten Mittelwert von $f = 5,73 \pm 0,08$. Daraus resultiert eine Molwärme von $c_v = (23,83 \pm 0,32) \text{ J}/(\text{mol K})$.

Vergleich mit dem Literaturwert: Für zweiatomige Gase wie Stickstoff und Sauerstoff, die die Hauptbestandteile der Luft bilden, wird theoretisch ein Wert von $f = 5$ erwartet (drei translatorische und zwei rotatorische Freiheitsgrade). Der Literaturwert für die Molwärme liegt bei ca. $20,8 \text{ J}/(\text{mol K})$. Unser experimentelles Ergebnis von $f \approx 5,7$ liegt über diesem Idealwert, was auf spezifische Einflüsse während der Messung zurückzuführen ist.

Problematik bei geringen Spannungen: Ein signifikanter Faktor für die Abweichung ist die Messungenauigkeit bei kleinen Spannungen ($U \leq 250 \text{ V}$). In diesem Bereich ist die im Kondensator gespeicherte Energie ΔQ so gering, dass die resultierende Auslenkung am Wassermanometer kaum wahrnehmbar war. Die geringen Ausschläge im Millimeterbereich ließen sich nur schwer präzise ablesen, was zu den hohen berechneten Freiheitsgraden ($f > 8$) und den sehr großen Unsicherheiten σ_f in der ersten Hälfte der Tabelle führte. Erst bei höheren Spannungen wurde der Ausschlag deutlich genug, um eine verlässliche Ablesung zu ermöglichen, wodurch sich die Werte stabilisierten.

Zusätzliche Fehlerquellen: Neben der schwierigen Ablesbarkeit bei kleinen Signalen wurde das Ergebnis durch die mechanischen Eigenschaften der Apparatur beeinflusst. Die Reibung des Kolbens im Zylinder dämpft die Reaktion auf den Energieeintrag, was die Druckänderung Δp verfälscht. Da zudem die Temperatur des Wassers im Manometer und der exakte tagesaktuelle Luftdruck nicht verifiziert wurden, ergeben sich weitere systematische Unsicherheiten.

Fazit: Insgesamt zeigt das Experiment, dass die Bestimmung der Freiheitsgrade bei ausreichend großen Energien ($U \geq 300 \text{ V}$) zuverlässigere Ergebnisse liefert. Um die Genauigkeit zu steigern, sollte künftig der Fokus auf den Bereich höherer Spannungen gelegt werden, in dem die Messsignale deutlich über der Ablesetoleranz des Manometers liegen.

Literatur

- [1] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*. 6., überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2013. ISBN: 978-3-642-29944-5.
- [2] Wolfgang Demtröder. *Experimentalphysik 1: Mechanik und Wärme*. 8., überarb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2018. ISBN: 978-3-662-54847-9.
- [3] Jörn Große-Knetter und Peter Schaaf. *Das physikalische Praktikum I*. Göttingen: Universitätsverlag Göttingen, 2025. ISBN: 978-3-86395-683-7.