

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W6
Institut für Physik	Joule-Thomson-Effekt	Seite 1

1. Aufgabenstellung

- 1.1. Der Joule-Thomson-Koeffizient μ ist herzuleiten, im Rahmen der üblichen Näherungen sind μ und die Inversionstemperatur T_i für Stickstoff und Kohlendioxid zu berechnen. Die Ergebnisse sind bei Versuchsbeginn vorzulegen.
- 1.2. Für Luft und Kohlendioxid sind bis zu einem Überdruck von $\Delta p = 0,9 \text{ bar}$ die Abhängigkeiten $\Delta T(\Delta p)$ als Folge adiabatischer Entspannung durch ein Drosselventil aufzunehmen und grafisch darzustellen. Für beide Gase ist der experimentell gefundene Wert des Joule-Thomson-Koeffizienten anzugeben.

Literatur:	Demtröder, W.	Experimentalphysik 1, Mechanik und Wärme Springer Verlag Berlin Heidelberg New York 4. Auflage 2006, S. 331-339
	Stroppe, H.	Physik für Studenten der Natur- und Technikwissenschaften Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag 11. Auflage 1999, S. 179-184
	Eichler, H. J. Kronfeldt, H.-D. Sahm, J.	Das Neue Physikalische Grundpraktikum Springer Verlag Berlin Heidelberg New York 2. Auflage 2006, S. 179-180, S. 185-186

2. Grundlagen

Gase lassen sich verflüssigen, indem man ihre Temperatur unter die Siedetemperatur $T_s(p)$ bei gegebenem Druck p bringt. Zur Temperaturniedrigung nutzt man adiabatische Zustandsänderungen aus, bei denen im Idealfall kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet.

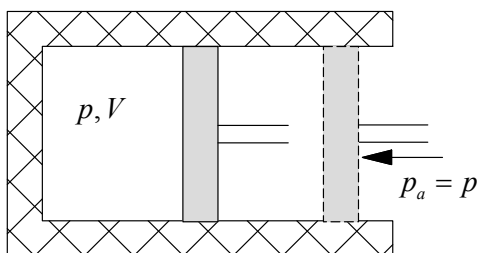


Abb. 1: Adiabatische Expansion ($W = -p_a \Delta V$)

Wird bei einer adiabatischen Expansion ($dQ = 0$) Arbeit gegen den äußeren Druck p_a geleistet (Abb. 1), dann ergibt sich aus dem ersten Hauptsatz der Wärmelehre,

$$dU = dQ + dW, \quad (1)$$

die Änderung der inneren Energie des Gases zu

$$\Delta U = - \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV = - p_a (V_2 - V_1) = W < 0. \quad (2)$$

Dieser Zusammenhang gilt sowohl für ideale als auch für reale Gase.

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W6
Institut für Physik	Joule-Thomson-Effekt	Seite 2

Für ideale Gase stellt die innere Energie die Summe der kinetischen Energien aller Teilchen dar, bezogen auf ein Mol folgt daraus mit f , der Anzahl der Bewegungsfreiheitsgrade

$$\Delta U = \frac{f}{2} \cdot N_A \cdot k \cdot \Delta T = \frac{f}{2} \cdot R \cdot \Delta T = C_{m,V} \cdot \Delta T. \quad (3)$$

Damit ergibt sich eine Temperaturerniedrigung $\Delta T < 0$ bei diesem Vorgang, einfach als Folge der Umwandlung eines Teils der inneren Energie in nach außen geleistete Arbeit.

Bei realen Gasen enthält die innere Energie außer der kinetischen Energie der Teilchen auch einen Anteil potentieller Energie, der aus den abstandsabhängigen Wechselwirkungskräften zwischen den Molekülen/Atomen resultiert. Die van-der-Waals-Gleichung berücksichtigt diese Kräfte durch einen Binnendruck $p_i = -\frac{a}{V^2}$, für die potentielle Energie folgt daraus

$$E_{pot} = \int_{\infty}^{V_1} \frac{a}{V^2} dV = -\frac{a}{V_1}, \quad (4)$$

eine Vergrößerung des Volumens führt also zu einer Zunahme der potentiellen Energie der Teilchen. Im Gegensatz zu idealen Gasen, bei denen $a = 0$ ist, muss daher bei einer Volumenvergrößerung nicht nur Arbeit gegen den äußeren Druck p_a , sondern zusätzlich innere Arbeit gegen den Binnendruck p_i geleistet werden.

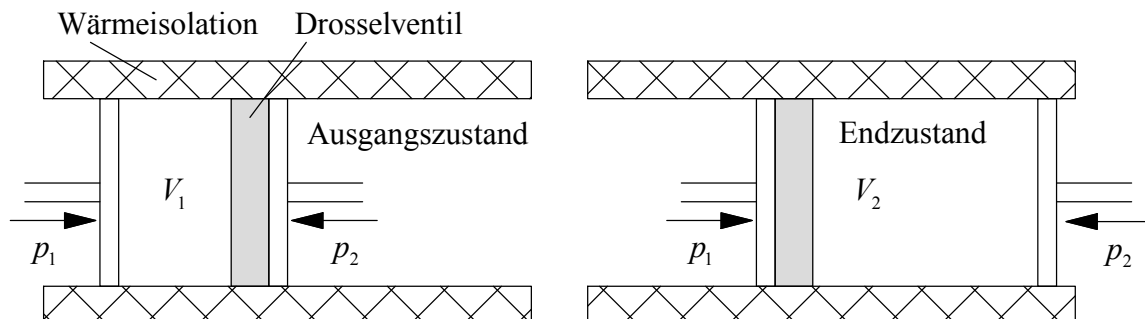


Abb. 2: Adiabatische Expansion durch ein Drosselventil ohne äußere Arbeitsleistung

Lässt man ein Gas vom Volumen V_1 bei einem konstanten Druck p_1 ohne Wärmeabgabe an die Umgebung durch ein Drosselventil (z. B. poröse Wand, Fritte) in ein Volumen V_2 expandieren, in dem der konstante Druck $p_2 < p_1$ herrscht, dann spricht man von adiabatisch gedrosselter Entspannung (Abb. 2). Wegen $dQ = 0$ gilt nach dem ersten Hauptsatz der Wärmelehre wieder $\Delta U = W$. Damit wird

$$U_2 - U_1 = -p_2 \cdot V_2 + p_1 \cdot V_1 \quad \text{oder} \quad U_2 + p_2 \cdot V_2 = U_1 + p_1 \cdot V_1. \quad (5)$$

Die Zustandsgröße *Enthalpie* $H = H(T, V) = U + p \cdot V$ bleibt also konstant. Für ein Mol eines idealen Gases folgt hieraus sofort die Konstanz der Temperatur T :

$$H = const = C_{m,V} \cdot T + R \cdot T = C_{m,p} \cdot T \quad \Rightarrow \quad T = const.$$

Reale Gase hingegen können ihre Temperatur durchaus ändern, obwohl keine äußere Arbeit geleistet oder Wärme an die Umgebung abgegeben wurde.

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W6
Institut für Physik	Joule-Thomson-Effekt	Seite 3

Ausgehend von der van-der-Waals-Gleichung für ein Mol eines Gases

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = R \cdot T \quad (6)$$

sowie mit Gl. (3) und (4) erhält man für die Enthalpie

$$H(V, T) = U + p \cdot V_m = R \cdot T \left(\frac{f}{2} + \frac{V_m}{V_m - b} \right) - \frac{2a}{V_m}. \quad (7)$$

Da diese bei dem betrachteten Prozess konstant bleibt, gilt

$$dH = \frac{\partial H}{\partial V} dV + \frac{\partial H}{\partial T} dT = 0, \quad (8)$$

woraus man

$$dT = - \frac{\frac{\partial H}{\partial V} dV}{\frac{\partial H}{\partial T}} = \frac{\frac{bT}{(V_m - b)^2} - \frac{2a}{RV_m^2}}{\frac{f}{2} + \frac{V_m}{V_m - b}} dV \quad (9)$$

gewinnt. Man sieht, dass es eine Temperatur (die Inversionstemperatur T_i) gibt, oberhalb derer es zu einer Temperaturerhöhung bei gedrosselt adiabatischer Entspannung kommt:

$$T_i = \frac{2a(V_m - b)^2}{b \cdot R \cdot V_m^2} \approx \frac{2a}{b \cdot R}. \quad (10)$$

Möchte man also ein reales Gas durch adiabatische Expansion abkühlen, muss man es u. U. zuerst unter die Inversionstemperatur vorkühlen.

Man definiert einen Joule-Thomson-Koeffizienten, der Richtung und Stärke der Temperaturänderung beschreibt,

$$\mu = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_H \quad (11)$$

und erhält hierfür näherungsweise

$$\mu \approx \frac{1}{C_{m,p}} \left(\frac{2a}{R \cdot T} - b \right). \quad (12)$$

Die Konstante b als Maß für das Eigenvolumen der Gasteilchen wirkt dabei als abstoßender Term den durch a ausgedrückten Kohäsionskräften zwischen ihnen entgegen.

Hinweis zur Herleitung des Joule-Thomson-Koeffizienten

Machen Sie von der gerechtfertigten Näherung $V_m - b \approx V_m$ und der Tatsache Gebrauch, dass der Joule-Thomson-Versuch weit oberhalb der kritischen Temperatur T_k erfolgen soll ($p \cdot V_m \approx R \cdot T$).

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W6
Institut für Physik	Joule-Thomson-Effekt	Seite 4

3. Messanleitung und Auswertung

Der Joule-Thomson-Versuch wird in einer gläsernen Apparatur durchgeführt, deren Hochdruckteil durch eine Glasfritte vom Niederdruckteil getrennt ist. Auf zwei Tragrohren sind Widerstandsthermometer so montiert, dass sie die Temperatur unmittelbar vor und nach dem Drosselventil messen können. Das von der Druckgasflasche oder der Druckleitung kommende Gas passiert einen einstellbaren Druckminderer (Reduzierventil) und muss danach wegen der auftretenden Abkühlung wieder auf die Umgebungstemperatur T_U gebracht werden. Hierzu durchströmt es eine Wendel aus Kupferkapillarrohr als Wärmetauscher. Der Druck p_1 in der linken Messkammer wird von einem Manometer als Differenzdruck gegen den Umgebungsdruck $p_U = p_2$, der auch in der rechten Messkammer herrscht, angezeigt.

Schalten Sie als erstes das Temperaturmessgerät ein und vergewissern sich, dass es korrekt über die Standardschnittstelle (RS 232) mit dem Computer verbunden ist. Entfernen Sie vorsichtig den Strahlungsschirm (Aluminiumfolie) vom Messrohr und kontrollieren Sie den Sitz der Temperaturfühler. Diese sollen im Abstand von (1... 2) mm rechts und links der Fritte positioniert sein und dürfen diese nicht berühren. Danach wird der Strahlungsschirm wieder angebracht.

Das Temperaturmessgerät kann empfindlich Temperaturdifferenzen im mK -Bereich zwischen den beiden Sensoren anzeigen. Eine detaillierte Anleitung zur Bedienung und Steuerung durch den PC finden Sie in der Hilfedatei des Praktikumsprogramms *PhysPract*. Beachten Sie, dass Sie die Messungen erst dann beginnen können, wenn der Nullpunktgleich des Gerätes nach ca. 15 bis 20 min Einlaufzeit durchgeführt wurde.

Die Messung wird zuerst mit Luft durchgeführt, die einer Druckluftleitung entnommen wird. Bevor Sie die Schlauchverbindung zur Apparatur herstellen, vergewissern Sie sich, dass das Hauptventil noch geschlossen und das Einstellventil des Druckminderers ganz herausgedreht ist. An der CO_2 -Flasche ist später zusätzlich noch der Absperrhahn zur Schlauchleitung zu öffnen. Bei Fragen wenden Sie sich bitte an den/die Versuchsbetreuer(in) oder die aufsichtführende Laborantin.

Nun wird das Hauptventil geöffnet und durch Hereindreihen des Reduzierventils ein Überdruck von 0,9 bar in der linken Messkammer eingeregelt. Die sich einstellende Temperaturdifferenz ΔT des untersuchten Gases kann im Bedienfenster des Praktikumsprogramms zum Versuch W6 gut grafisch verfolgt und bei hinreichender Konstanz über einen wählbaren Zeitbereich gemittelt werden. Notieren Sie sich das Wertepaar ΔT und Δp auch in Ihrem handschriftlich erstellten Messprotokoll.

Druckbereich für diesen Versuch: (0,9 ... 0,2) bar in Schritten von 0,1 bar

Anschließend wird die analoge Messung mit CO_2 durchgeführt, wobei eine zügige Arbeitsweise zur Verringerung der Betriebskosten gewünscht ist.

Zur Auswertung werden für jede Gassorte die gefundenen Temperaturänderungen über den Druckdifferenzen grafisch dargestellt und aus dem Anstieg des erwarteten linearen Zusammenhanges der Joule-Thomson-Koeffizient bestimmt. Die Ursachen möglicherweise auftretender Messabweichungen sind zu diskutieren, μ und T_i sind nach (12) bzw. (10) zu berechnen.

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W6
Institut für Physik	Joule-Thomson-Effekt	Anhang

1. Van-der-Waals-Konstanten a , b und spezifische Molwärme $C_{m,p}$

$$\begin{array}{ll}
 CO_2 : & a = 3,656 \cdot 10^5 \frac{N \cdot m^4}{kmol^2} & N_2 : & a = 1,366 \cdot 10^5 \frac{N \cdot m^4}{kmol^2} \\
 & b = 4,282 \cdot 10^{-2} \frac{m^3}{kmol} & & b = 3,858 \cdot 10^{-2} \frac{m^3}{kmol} \\
 & C_{m,p} = 36,928 \frac{J}{mol \cdot K} & & C_{m,p} = 28,604 \frac{J}{mol \cdot K}
 \end{array}$$

2. Kurzbeschreibung des Temperaturmessgerätes UST Thermo-Control

Mit diesem Gerät können absolute Temperaturen mit einer Genauigkeit von $0,01 K$ und Temperaturdifferenzen im mK -Bereich gemessen werden. Als Temperatursensoren wurden Pt1000-Messwiderstandspaare gewählt, die in 4-Leiterschaltung angeschlossen sind.

Die Temperatursensoren werden aus Gründen der Stabilität des Messsignals immer gepaart betrieben, wobei der Messstrom über beide Sensoren in Serie geführt wird. Weiterhin gibt es die Möglichkeit, vor einer Differenzmessung das Sensorsignal auf die momentane Umgebungstemperatur zu normieren.

Mit der automatischen Nullpunktsetzung wird eine hohe Signalauflösung erreicht.

Es ist wichtig, dass die Zuordnung Temperatursensor und Kanal entsprechend der Beschriftung an der Frontplatte eingehalten wird, da die Sensoren am jeweiligen Kanal kalibriert worden sind.

Die Messwerte werden numerisch und grafisch in Form eines Zeitdiagramms ausgegeben. Über das Tastenfeld können Funktionen wie

- Nullpunkt setzen (Taste „ZERO“)
- Fokus setzen bei grafischer Darstellung der Messsignale (Taste „FOCUS“)

ausgeführt werden.

Nach Betätigen des Netzschalters auf der Rückseite des Gerätes wird ein Hardware-Selbsttest durchgeführt, in dem Schaltungsteile und Kalibrierdatenspeicher auf Funktionalität überprüft werden. Im Fehlerfall erscheint eine entsprechende Fehlermeldung auf dem Bildschirm. Es schließt sich das Messprogramm an. Über die serielle Schnittstelle erfolgt die Kommunikation mit dem Steuer-PC. Auf diesem Wege können Parametereinstellungen sowie Kalibrierdaten abgefragt bzw. verändert werden. Damit gibt es die Möglichkeit einer Nachkalibrierung der Temperatursensoren. Die wichtigsten technischen Daten sind:

Messbereich ($^{\circ}C$)	0 ... 50
Signal-Rauschen (Streuung)	<1% des Messbereichsendwertes
Empfindlichkeit	absolut $10 mK$, relativ $1 mK$
Nullpunktdrift/Verstärkerlinearität	<1% des Messbereichsendwertes
Digitale Schnittstelle	RS 232
Zulässige Umgebungstemperatur ($^{\circ}C$)	10 ... 40

TU Ilmenau	Physikalisches Grundpraktikum	Versuch W6
Institut für Physik	Joule-Thomson-Effekt	Anhang

3. Starten des Praktikumsprogramms

Zuerst muss das Temperaturmessgerät eingeschaltet werden. Das Praktikumsprogramm *PhysPract* überprüft bei seinem Start, ob das Gerät antwortet und liest danach alle benötigten Kalibrierdaten, um eine genaue Umrechnung der vom Messgerät gelieferten Rohdaten in Temperaturwerte zu ermöglichen

Nach dem Programmstart öffnet man das Fenster zum Versuch W6 (*Datei|Auswertung|...*) und überzeugt sich davon, dass das Temperaturmessgerät gefunden wurde. Im Steuerfeld des Bedienfensters ist dann die Schaltfläche Messmodus aktiviert. Falls dem nicht so ist, muss nachgesehen werden, ob das Gerät eingeschaltet und ordnungsgemäß mit dem Steuer-PC über serielle Schnittstelle verbunden ist. Danach startet man das Praktikumsprogramm noch einmal neu.

Weitere, üppig illustrierte Hinweise zur Bedienung des Programms erhalten Sie in der Hilfe-datei (*Hilfe|Übersicht*).