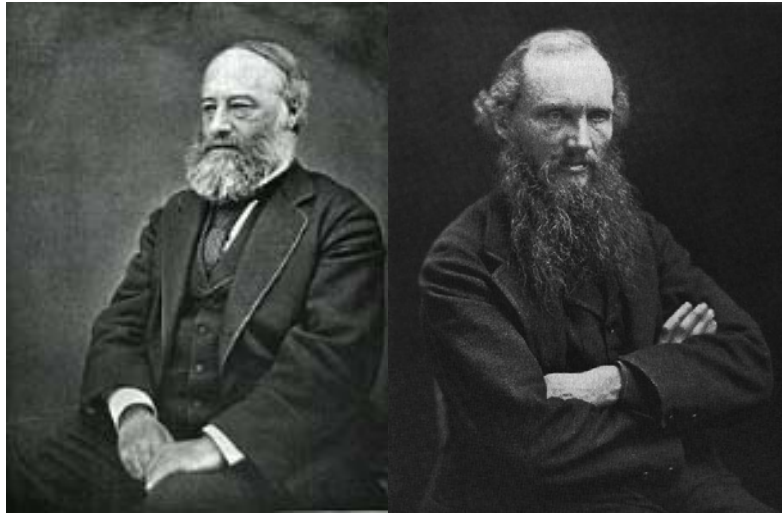


# Untersuchung des Joule-Thomson-Effektes



Wettbewerb „Jugend Forscht“ 2011

Julia Bienert (16 Jahre)

Arbeitsgemeinschaft „Jugend Forscht“  
des Christian-Gymnasiums Hermannsburg

Leitung: StD Thomas Biedermann

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Theorie	2
<b>2</b>	<b>Aufbau</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Messungen</b>	<b>5</b>
3.1	Erste Messreihe (0,5 mm Düse, manuelle Messwertaufnahme)	6
3.2	Zweite Messreihe (0,5 mm Düse, automatisierte Messwertaufnahme)	7
3.3	Dritte Messreihe (1 mm Düse)	9
3.4	Vierte Messreihe (1 mm Düse, Videoanalyse)	11
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>13</b>
4.1	Erste Messreihe (0,5 mm Düse, manuelle Messwertaufnahme)	13
4.2	Zweite Messreihe (0,5 mm Düse, automatisierte Messwertaufnahme)	13
4.3	Dritte Messreihe (1 mm Düse, automatisierte Messwertaufnahme)	14
4.4	Vierte Messreihe (1 mm Düse, Videoanalyse)	14
<b>5</b>	<b>Fazit</b>	<b>14</b>
<b>6</b>	<b>Danksagung</b>	<b>15</b>
<b>7</b>	<b>Quellen</b>	<b>15</b>

## 1 Einleitung

Fast alle von uns haben einen Kühlschrank zu Hause oder sich schon einmal gefragt, warum Haarspray immer kalt ist, egal wo es vorher stand. Erklären lassen sich all diese Phänomene mit der Entdeckung, die Sir William Thomson, später bekannt als Lord Kelvin und James P. Joule 1852 beschrieben: Die meisten Gase kühlen sich bei der Entspannung von einem höheren zu einem niedrigeren Druck ab. Diesen nach ihnen benannten Effekt möchte ich mit relativ einfachen Mitteln nachweisen und untersuchen. Dazu verwende ich einen Aufbau, der aus einem Kühlschrankkompressor, einem leeren Feuerlöscher, zwei Drucksensoren zur Druckmessung und -regelung, einem Manometer, einem Ventil und einer Auslassdüse besteht. Die Temperatur der ausströmenden Luft wird durch einen Nickel-Chrom-Messfühler, der sich vor der Düse befindet, gemessen. Der Kompressor erzeugt einen Druckluftvorrat, der mittels der Regelapparatur mit einem bestimmten Druck durch Öffnen des Ventils auf Umgebungsdruck entspannt wird. So ist es möglich, den Ausströmdruck, die Temperatur und mit einer Stoppuhr die Zeit zu messen.

Das hier ist mein erstes „Jugend Forscht“-Projekt. So war es zunächst nicht ganz einfach, ein Thema zu finden. Bei einem Rundgang durch den Keller, in dem sich eine Vakuumkammer befand, unterhielten sich mein Lehrer und ein weiteres Mitglied der AG darüber, dass auch ein anderes, sich mit Druck befassendes, Thema sicher interessant wäre: Das Linde-Verfahren. Dabei wird Luft zunächst vorgekühlt und durch wiederholtes Komprimieren und anschließendes Entspannen auf einen niedrigeren Druck abgekühlt. Mittels eines Gegenstromkühlers kühlt diese Luft wiederum die nachströmende weiter ab, sodass sie irgendwann kondensiert (s. Abb.1).

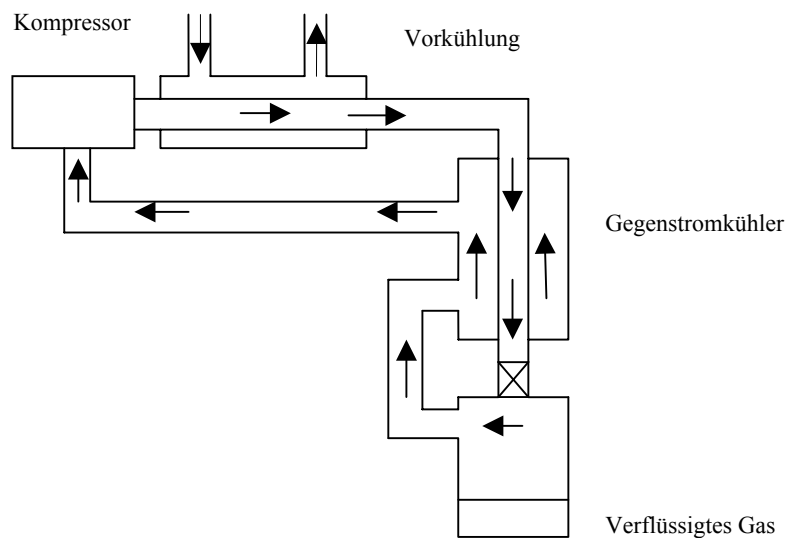


Abb.1: Darstellung des Lindeverfahrens

So ist es u.a. möglich, Gasmische aufgrund der unterschiedlichen Siedetemperaturen zu trennen und reine Gase zu gewinnen. Da das sehr interessant klang und ich mir nicht erklären konnte, wie so etwas zunächst relativ simpel Klingendes dazu führen könnte, dass sich die Luft so stark abkühlt, beschloss ich, das zum Thema meines Projektes zu machen. Nach einiger Recherche stellten sich aber verschiedene Schwierigkeiten ein, wie z.B. die Größe, die eine entsprechende Apparatur haben müsste und die hohen Drücke, die mit wenig aufwendigen Mitteln nicht sicher zu kontrollieren gewesen wären. Daher entschloss ich mich stattdessen, den diesem Verfahren zu Grunde liegenden Effekt zu untersuchen.

## 1.1 Theorie

Der Joule-Thomson-Effekt tritt als Temperaturänderung bei der Expansion realer Gase auf. Bei seinen vorherigen Experimenten zum Zusammenhang zwischen Druck und Energie eines Gases kam Joule jedoch aufgrund seines eher ungünstigen Aufbaus zu dem Schluss, dass eine Volumen- und damit Druckänderung keinen Einfluss auf die Temperatur hätte. In Zusammenarbeit mit Thomson nutzte er einen anderen Aufbau (s. Abb2). Gemeinsam stellten sie so fest, dass nicht nur die Werte für den Druck  $p$  und das Volumen  $V$ , sondern auch die für die Temperatur  $T$  nach der Expansion verschieden von denen zu Versuchsbeginn waren. Diese drei Größen reichen bereits aus, um den Zustand eines Gases eindeutig zu definieren.[2]

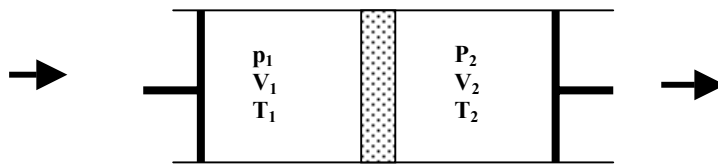


Abb.2: Schematischer Versuchsaufbau von Joule und Thomson

In dem Versuch hat der Kolben zunächst die Arbeit

$$W_1 = p_1 V_1 \quad (1)$$

an dem Gas verrichtet. Auf der rechten Seite muss es dann die Arbeit

$$W_2 = p_2 V_2 \quad (2)$$

gegen den Kolben leisten. Da der Prozess durch die Isolation des Systems adiabatisch verläuft müssen keine weiteren Energien berücksichtigt werden, für die innere Energie gilt damit:

$$U_2 - U_1 = p_2 V_2 - p_1 V_1 \quad (3), \text{ umgeformt}$$

$$U_2 + p_2 V_2 = U_1 + p_1 V_1 \quad (4) \text{ und damit}$$

$$H_2 = H_1 \quad (5)$$

Das bedeutet, dass während der Expansion die Enthalpie gleich geblieben ist, der Vorgang ist also isenthalpisch.[3]

Die Temperaturdifferenz würde sich durch eine Funktion beschreiben lassen, die dabei vorkommende Größe  $\left(\frac{\Delta T}{\Delta p}\right)_H$  wird als Joule-Thomson-Koeffizient bezeichnet. Sein

Vorzeichen gibt darüber Auskunft, in welcher Richtung die Temperaturänderung stattfindet. Ist er positiv nimmt die Temperatur ab, ist er negativ erwärmt sich das Gas bei der Expansion. Für ideale Gase wäre er gleich Null, für diese findet also keine Temperaturänderung statt. Er wechselt das Vorzeichen jedoch bei der sog. Inversionstemperatur, die für jedes Gas spezifisch ist. Die Temperaturänderung hängt von der Druckänderung ab: Je größer die Druckdifferenz  $\Delta p$  desto ausgeprägter ist auch der Joule-Thomson-Effekt.

Die Temperaturänderung ist damit zu erklären, dass zwischen den Molekülen eines realen Gases sowohl anziehende (attraktive), als auch abstoßende (repulsive) Kräfte herrschen, wobei die anziehenden in den meisten Fällen überwiegen. Diese Kräfte bedingen die innere potentielle Energie

$$E = \frac{-a}{V} \quad (6)$$

wobei  $a$  eine für jedes Gas spezifische van-der-Waals-Konstante ist. Für reale Gase ist sie verschieden von Null, für ideale Gase gleich Null, da zwischen diesen Molekülen keine Anziehungskräfte herrschen. Zusammen mit der molekularen Bewegungsenergie bildet die potentielle Energie die innere Energie  $U$  eines Gases. Wenn die potentielle Energie nun durch die Expansion zunimmt, muss die molekulare Bewegungsenergie kleiner werden, da von außen keine weitere Energie hinzu kommt [4]. Sie liefert die Energie die nötig ist um gegen die attraktiven Kräfte zu wirken. Bewegen sich die Moleküle langsamer hat damit auch die Temperatur des Gases abgenommen [1]. Das ist auch der Grund weshalb der Joule-Thomson-Effekt nur bei realen Gasen auftritt, da zwischen den Molekülen eines theoretischen idealen Gases keine Anziehungskräfte herrschen.

## 2 Aufbau

Für die Untersuchung des Effektes ist es damit nötig, eine Luftmenge auf einen bestimmten Druck zu komprimieren und anschließend zu entspannen. Dabei sollten der Druck und die Temperatur messbar sein.

Die Druckluft liefert ein kleiner Kompressor (1) und ein leerer Feuerlöscher (2), der druckdicht ist, dient als Vorratsbehälter, sodass längere Messungen möglich sind. Für die Druckmessung habe ich zunächst ein Zeigermanometer (3) benutzt. Ein elektrisch gesteuertes Ventil sollte dazu dienen die Druckluft dann auf Umgebungsdruck zu entspannen. Die größte Schwierigkeit zu Beginn war hierbei die einzelnen Teile so zu verbinden, dass der Aufbau auch bei höheren Drücken dicht ist. Zur Erleichterung der Messung schien außerdem ein Regelkreis günstig, der den Kompressor wieder anschaltet, sollte der Ausströmdruck unter einen bestimmten eingestellten Wert fallen. Die zu Beginn verwendeten Ventile waren aber nicht in der Lage gegen die höheren Drücke zu öffnen, sodass der Aufbau noch einmal optimiert werden musste. Anstelle der ersten Ventile regelt nun ein ebenfalls elektrisch gesteuertes Gasventil (4) den Auslass. Dieses ist in der Lage bis etwa 9 bar Gegendruck zu öffnen. Außerdem hat es einen so großen Durchmesser, dass es nicht noch für einen zusätzlichen Druckunterschied sorgt, der Druck aus dem Feuerlöscher entspricht etwa ziemlich genau dem Ausströmdruck. Das Zeigermanometer wird weiterhin zur Kontrolle verwendet, die eigentliche Messung findet aber mit zwei Relativdrucksensoren (5) statt. Dabei misst der eine den Druck innerhalb dieses Systems, der zweite den tatsächlichen Ausströmdruck, weshalb er direkt vor der Düse platziert ist. Die Düse ist austauschbar, eine hat eine Bohrung von 0,5 mm, die andere von 1,0 mm. Ein Regelkreis (6), der mit dem Auslassventil, dem Kompressor und den beiden Drucksensoren verbunden ist, erlaubt es, den Druck abzulesen und einen bestimmten Druck vorzugeben, der durch Steuerung des Kompressors relativ konstant gehalten werden kann. Der Schlauch des Kompressors ist mit dem ersten Drucksensor und dem Feuerlöscher verbunden, danach folgt das Zeigermessgerät, das Ventil und der zweite Sensor. Die Luft führenden Leitungen sind dabei so kurz wie möglich, um einen Druckgradienten, also beim Öffnen des Ventils zuerst eine Entspannung im System, zu vermeiden, da dies die Messungen verfälscht hätte. Für die Temperaturmessung ist ein Messgerät nötig, das extrem schnell reagiert, da es die Temperatur des Luftstroms bestimmen soll. Ein NiCr-Messfühler (7) erfüllt diese Voraussetzung. (s. Abb 5). Die Temperatur wird über einen Messwandler in eine Spannung umgewandelt, sodass sie mit einem sehr genauen Messgerät (8) exakt bestimmt werden kann.

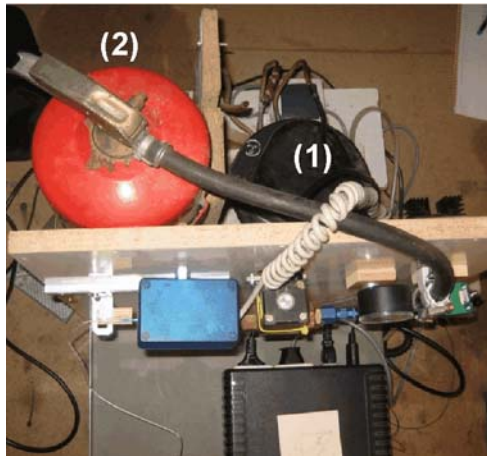


Abb. 3: Aufbau von oben

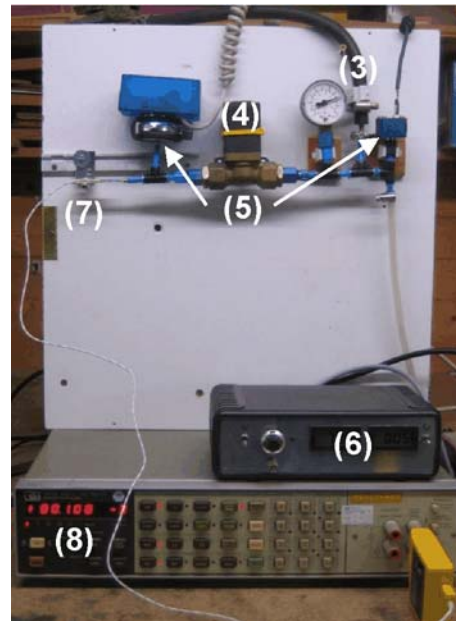


Abb. 4: Endgültiger Aufbau

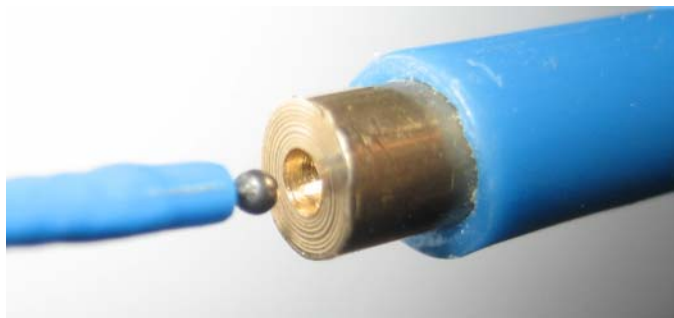


Abb. 5: NiCr-Messkopf vor der 0,5 mm Düse

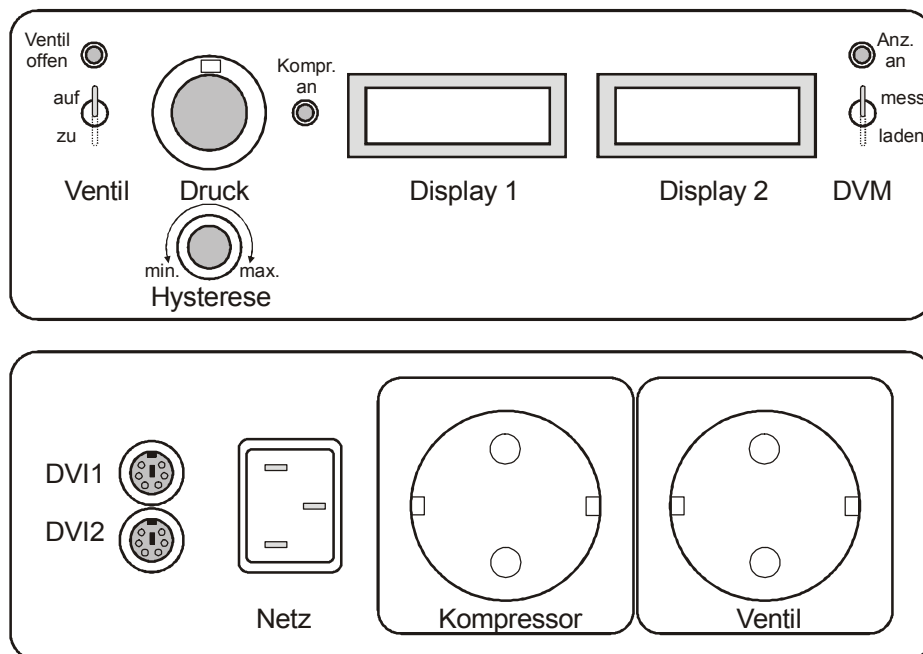


Abb. 6: Frontansicht und Rückansicht des Regelkreises

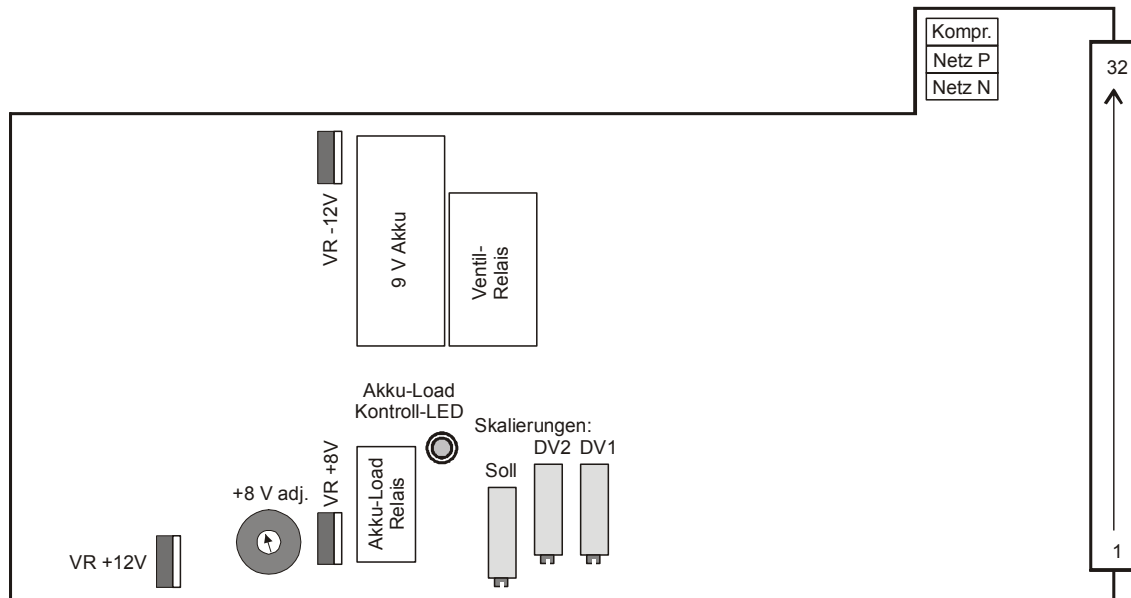


Abb. 7: Platinen-Elemente des Regelkreises

- Skalierung DV1: Einstellen von Display 1 auf korrekte Druckanzeige des Sensors an DVI 1 (voreingestellt auf 10,0 Bar bei 5 V für Vollausschlag)
- Skalierung DV2: Einstellen von Display 2 auf korrekte Druckanzeige des Sensors an DVI 2 (voreingestellt auf 16,0 Bar bei 5 V für Vollausschlag)
- Skalierung Soll: Einstellen des Druckreglers auf Referenzwert (+5,0 V), wobei DVI1 einen Wert zwischen 0 und 5 V liefern muss
- +8V adj.: Einstellen der Versorgungsspannung für DVI 1 bzw. DVI 2 auf optimalen Wert von +8 V (wird auch verwendet für Soll-Wert, ggf. muss dieser nachjustiert werden)

### 3 Messungen

Bei den Messungen wurden jeweils der Druck, die Ausströmtemperatur und die Zeit gemessen. Um sie zu vereinfachen, wurde von einem jeweils gleichen Ausgangsdruck aus nach jeweils 0,5 bar ein Messwert aufgenommen, bis der Druck im Feuerlöscher wieder mit dem Umgebungsdruck übereinstimmte, das Messgerät also 0 bar anzeigte. Da das Ventil nur bis zu einem Druck von 9 bar öffnen kann, betrug dieser Startwert jedesmal 8 bar. Der gemessene Druck entspricht allerdings dem Druck im System, nicht dem tatsächlichen Ausströmdruck. Der Unterschied zwischen dem, was die beiden Sensoren anzeigen, liegt aber bei etwa 0,05 bar, er ist also nicht unbedingt relevant. Zunächst wird die Düse mit 0,5 mm Durchmesser verwendet.

### 3.1 Erste Messreihe (0,5 mm Düse, manuelle Messwertaufnahme)

Bereits bei der ersten Messreihe ließen sich mehrere Dinge feststellen:

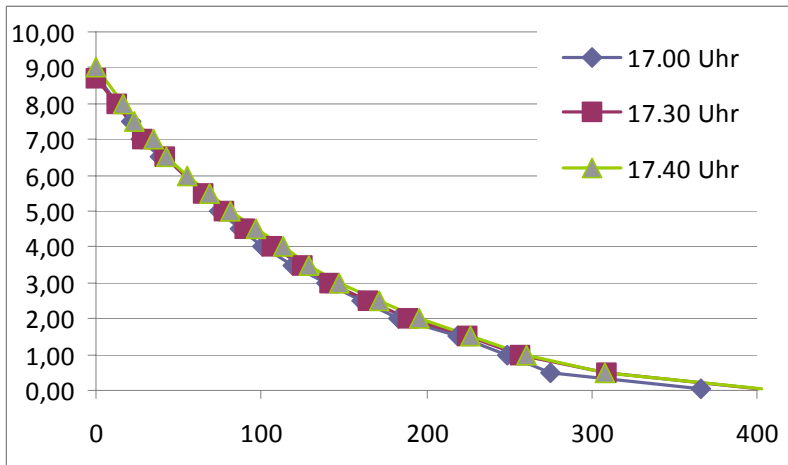


Abb. 8:  $t$ - $p$ -Diagramm, 0,5 mm Düse, manuelle Messung

Da ich die Ausströmgeschwindigkeit unterschätzt habe, fehlen bei der ersten Messung (17.00 Uhr) einige Werte. Die Kurven sind ansonsten annähernd gleich. Der Druck sinkt zunächst schneller, zum Ende der Messung immer langsamer: Der Verlauf ist exponentiell abnehmend.

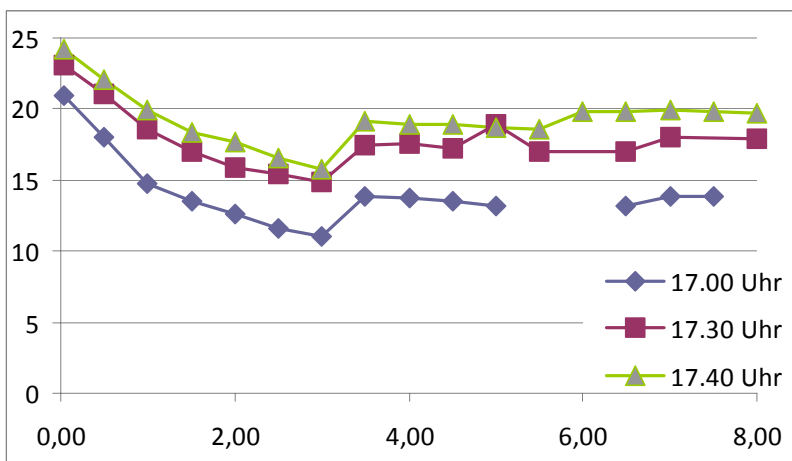


Abb. 9:  $p$ - $T$ -Diagramm, 0,5 mm Düse, manuelle Messung

Die Messung begann bei 8 bar, der Druck fiel dann auf 0 bar, die  $p$ - $T$ -Diagramme zeigen also nur den Zusammenhang zwischen der Druckdifferenz und der Temperatur die damit erreicht wird. Den Verlauf der Temperatur während der Messung zeigen die  $t$ - $T$ -Diagramme.

Für die niedrigeren Drücke verlaufen die Kurven regelmäßig, bei etwa 3,0 bar steigen sie jedoch stark an, danach schwankt die Temperatur um etwa 1 °C. Von 0 - 1 bar sind die Temperaturwerte höher als die Umgebungs-, also Ausgangstemperatur, bei 8 bar. Die Kurve jeder Messung liegt über der vorherigen.

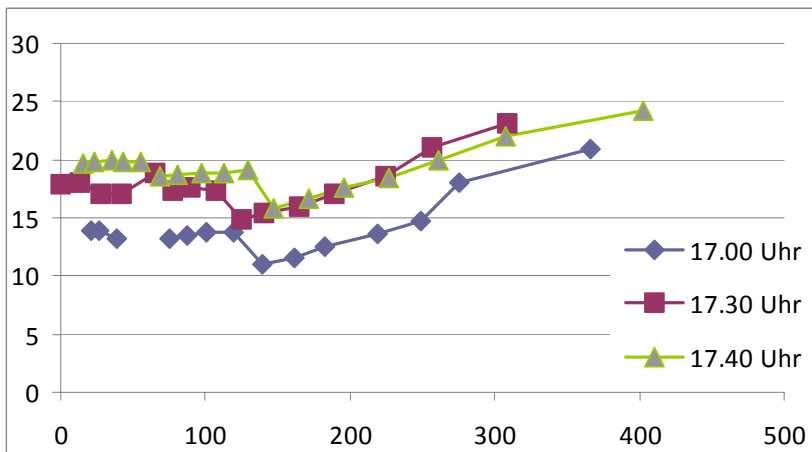


Abb. 10:  $t$ - $T$ -Diagramm, 0,5 mm Düse, manuelle Messung

Die Kurven der einzelnen Messungen verlaufen auch hier ähnlich zueinander. Die Temperatur am Ende übersteigt die Ausgangstemperatur um etwa 1,9 °C bei der ersten und etwa 4,6 °C bei der dritten Messung.

### 3.2 Zweite Messreihe (0,5 mm Düse, automatisierte Messwertaufnahme)

Diese erste Messmethode durch Ablesen mehrerer Werte auf einmal und mittels einer Stoppuhr war vor allem zu Beginn der Messung sehr ungenau. Deshalb wurden die folgenden Messungen mit einem Programm aufgezeichnet, das wie eine Stoppuhr funktioniert, die nach Eingabe eines Temperaturwertes die Daten speichert und den nächsten, vorher festgelegten, Druck vorgibt. Diesmal wurde auch der tatsächliche Ausströmdruck gemessen.

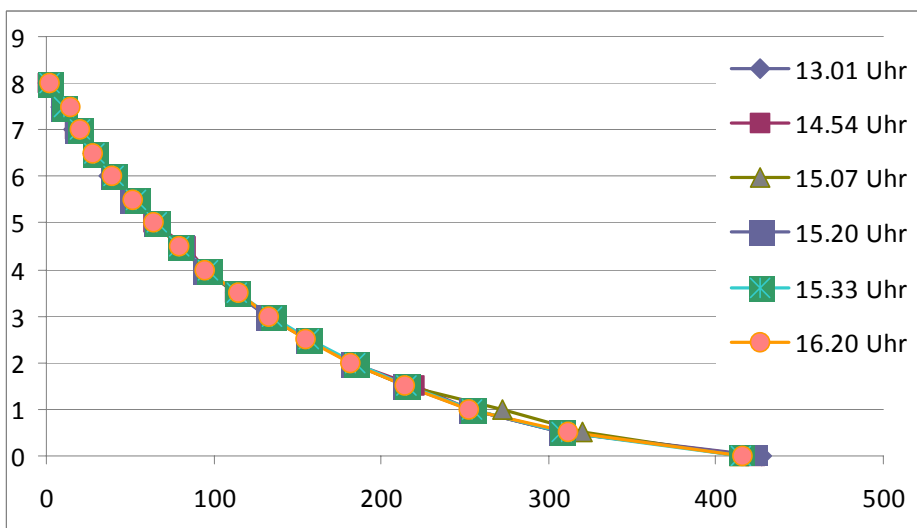


Abb. 11:  $t$ - $p$ -Diagramm, 0,5 mm Düse, automatisierte Messung

Die Messwerte unterscheiden sich jeweils nur um wenige Sekunden und zeigen den schon oben beschriebenen exponentiellen Verlauf.

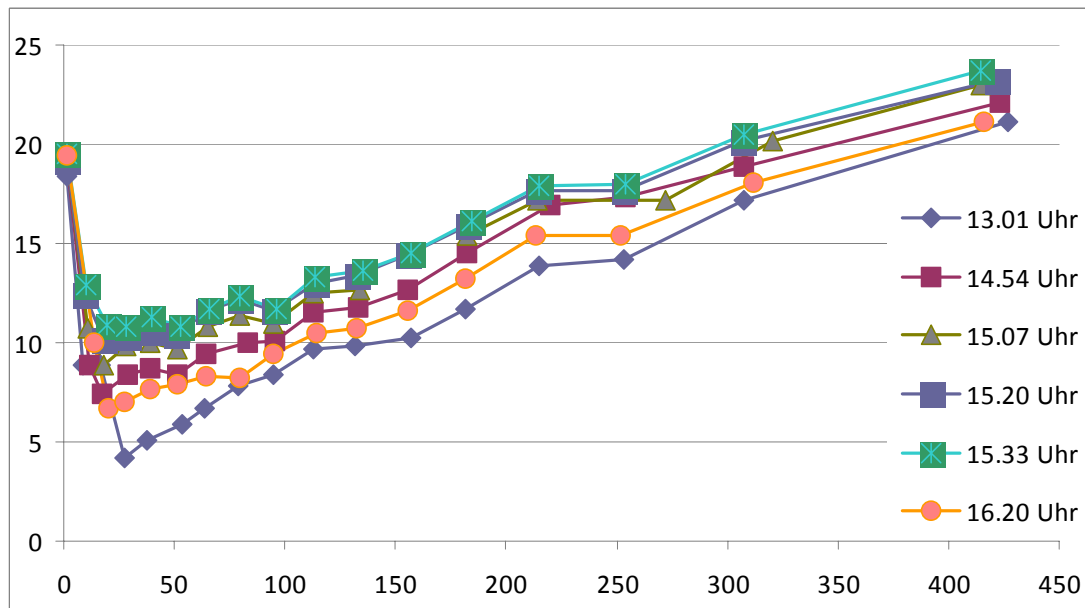


Abb. 12:  $t$ - $T$ -Diagramm, 0,5 mm Düse, automatisierte Messung

Alle Kurven haben, wie auch schon bei den ersten Messungen, einen gleichen Verlauf: Zu Beginn fällt die Temperaturkurve stark ab und steigt danach gleichmäßig an. Im Vergleich zu den ersten Messungen fehlt allerdings das zweite Absinken bei 3,0 bar, der Verlauf ist nach dem starken Absinken annähernd linear. Wie ebenfalls schon bei der ersten Messung zu beobachten war, liegen die Werte für die Temperatur bei jeder Messung höher als bei der Messung davor, das betrifft alle Messwerte, auch die Ausgangstemperatur. Eine Ausnahme hierbei ist die letzte Messung um 16.20 Uhr, allerdings liegt hierbei, im Gegensatz zu den vorherigen Messungen, ein Abstand von ca. 50 min zur letzten Messung vor. Die Temperatur sank zu Beginn um 14,2 °C (13.01 Uhr) bzw. 8,7 °C (15.33 Uhr) und überstieg die Ausgangstemperatur um 2,7 °C bzw. 4,2 °C (15.33 Uhr).

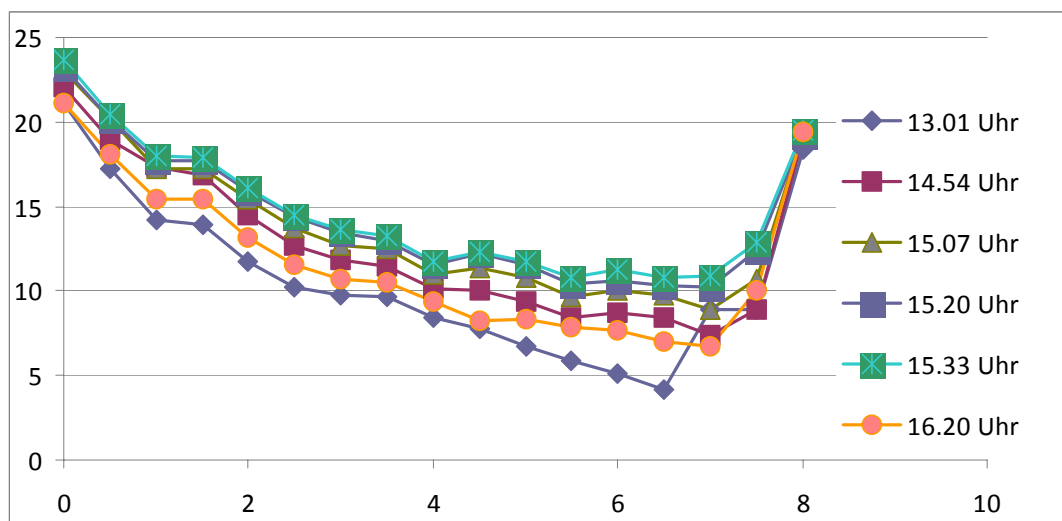


Abb. 13:  $p$ - $T$ -Diagramm, 0,5 mm Düse, automatisierte Messung

Die Kurven hier zeigen ebenfalls einen regelmäßigeren Verlauf als die erste Messung. Je größer der Druckunterschied, desto niedriger liegt der Wert für die Temperatur. Bei der Lage der einzelnen Messkurven bildet die Messung um 16.20 Uhr auch hierbei wieder eine Ausnahme.

### 3.3 Dritte Messreihe (1 mm Düse)

Bei der dritten Messreihe wurde die bisher verwendete Düse durch eine andere mit dem Durchmesser 1,0 mm ersetzt, um zu sehen, welche Auswirkungen dies auf die Werte hat.

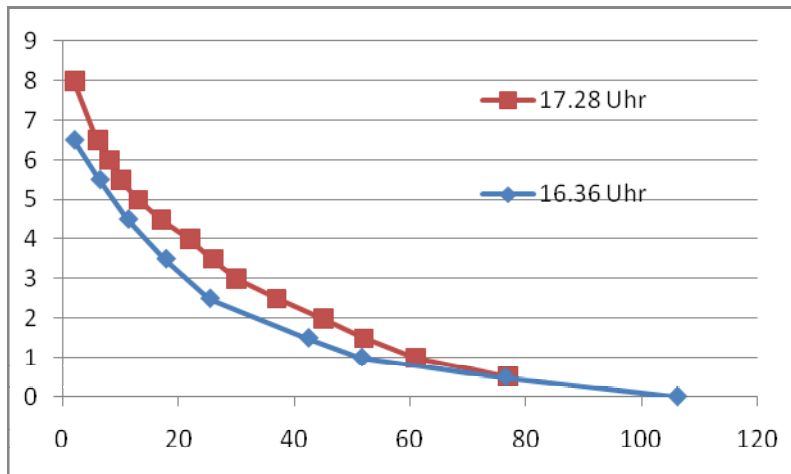


Abb. 14: t-p-Diagramm, 1 mm Düse, automatisierte Messung

Auch hierbei habe ich bei der ersten Messung die Ausströmgeschwindigkeit stark unterschätzt, sodass Werte fehlen und die zweite Messung vermutlich glaubwürdiger ist. Für diese wurden die Messwerte auf einem Video aufgezeichnet und die Tabelle dann nachträglich erstellt. Der Verlauf an sich ist hier ansonsten nicht anders als bei den vorherigen t-p-Diagrammen.

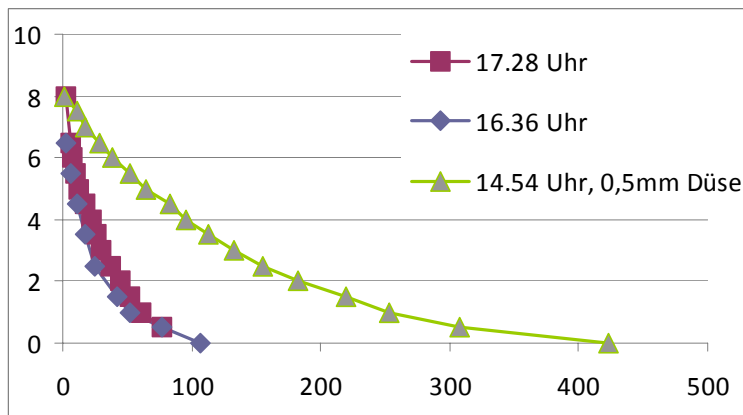


Abb. 15: t-p-Diagramm, 1 mm Düse, automatisierte Messung, zusätzlich mit der 14.54 Uhr Messung aus der zweiten Messreihe (0,5 mm Düse) zum Vergleich

Ein Vergleich mit einer Messung aus der zweiten Messreihe zeigt jedoch, dass zwar der Verlauf gleich ist, die Ausströmdauer bei der Düse mit größerem Querschnitt aber deutlich geringer ist.

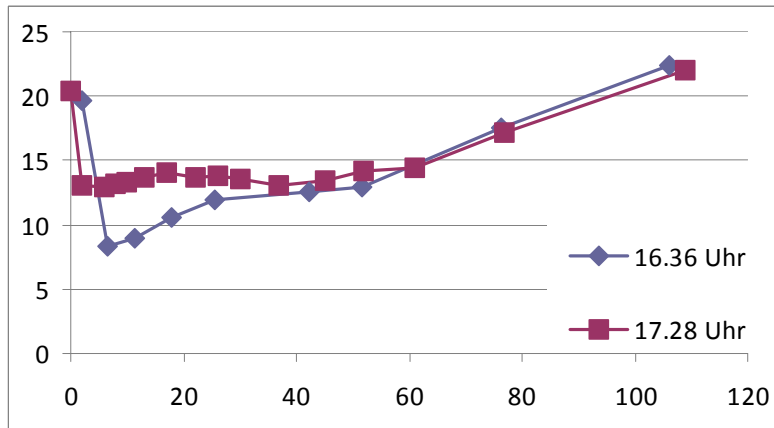


Abb. 16: t-T-Diagramm, 1 mm Düse, automatisierte Messung

Auch das t-T-Diagramm zeigt den üblichen Verlauf, wenn auch die Abkühlung bei der 16.36 Uhr Messung deutlicher zu sehen ist, als bei der zweiten Messung, die Kurve dort verläuft zunächst relativ konstant. Am Ende wird wieder eine ähnliche Endtemperatur erreicht.

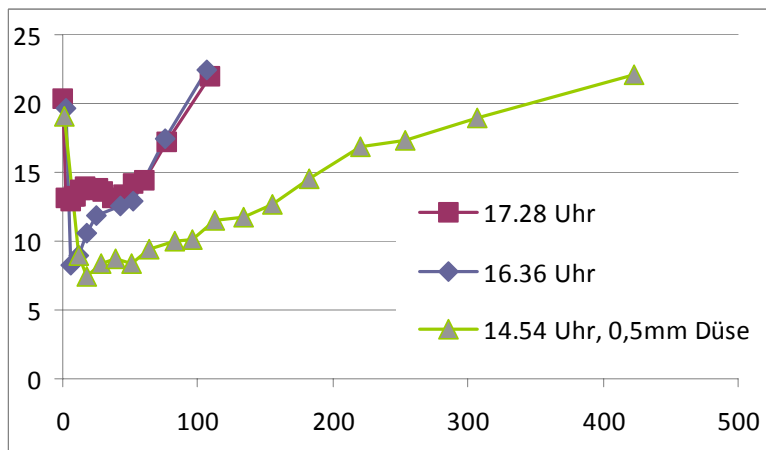


Abb. 17: t-T-Diagramm mit gleicher Vergleichsmessung wie Abb. 15

Die Abkühlung bei der Vergleichsmessung aus der zweiten Messreihe ist zwar stärker, am Ende erreichen alle drei Messungen aber eine ähnliche Endtemperatur von etwa 22 °C.

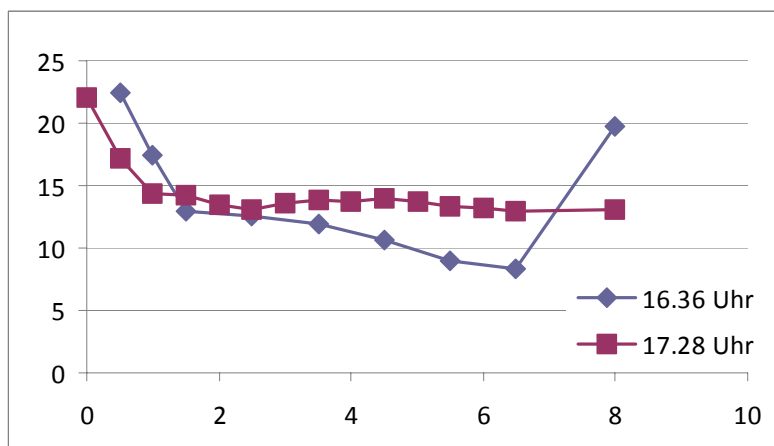


Abb. 18: p-T-Diagramm, 1 mm Düse, automatisierte Messung

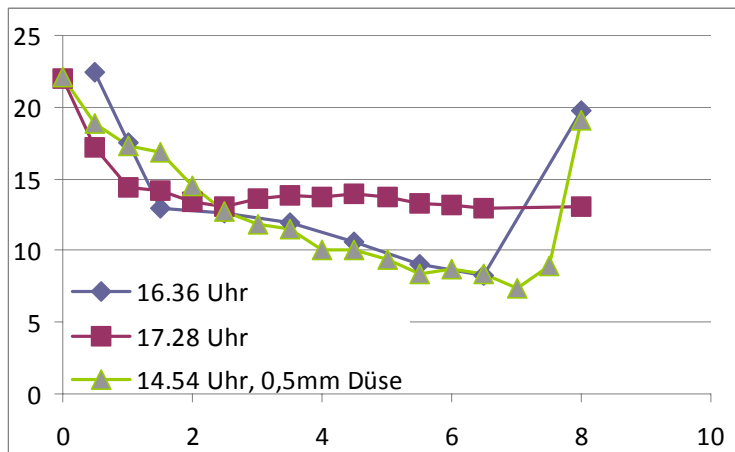


Abb. 19:  $p$ - $T$ -Diagramm mit gleicher Vergleichsmessung wie in Abb. 15

Der Verlauf ist auch hier wieder vergleichbar mit dem aus vorherigen Messungen, bis auf den relativ konstanten Verlauf der zweiten Messung im Bereich von etwa 2 bis 8 bar, es fehlen zu Beginn der Messung jedoch einige Messwerte.

### 3.4 Vierte Messreihe (1 mm Düse, Videoanalyse)

Mit der Methode, die Messwerte auf eine Video aufzuzeichnen waren noch weitere, etwas genauere Messungen möglich.

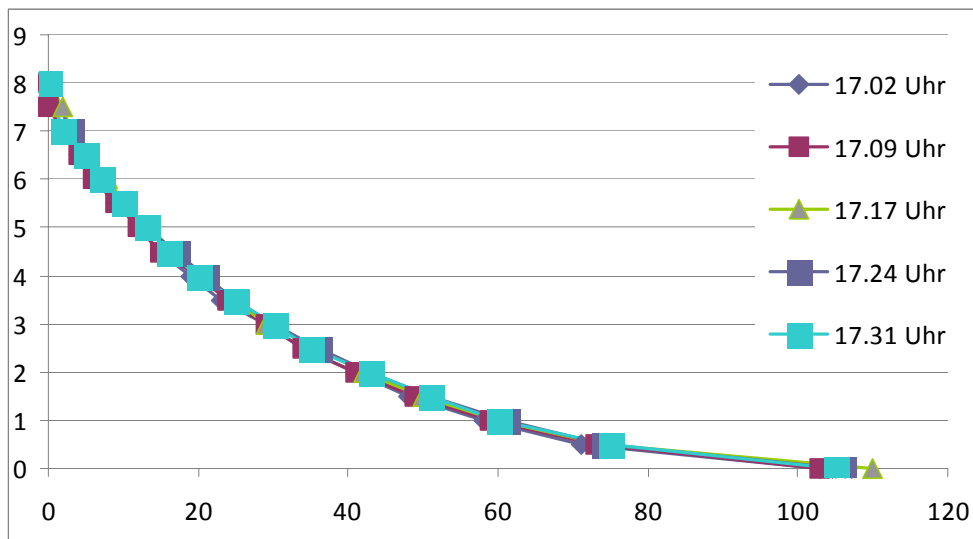


Abb. 20:  $t$ - $p$ -Diagramm, 1 mm Düse, Videoanalyse

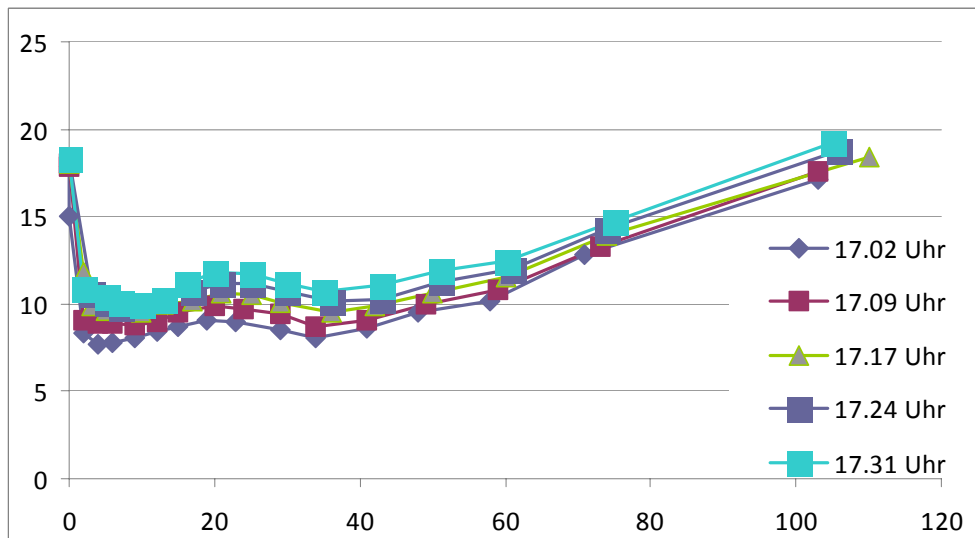


Abb. 21:  $t$ - $T$ -Diagramm, 1 mm Düse, Videoanalyse

Die Temperaturkurven fallen zunächst stark ab, steigen dann bis 20s wieder kurzzeitig an und zeigen danach den, schon in der zweiten Messreihe beobachteten, linearen Verlauf.

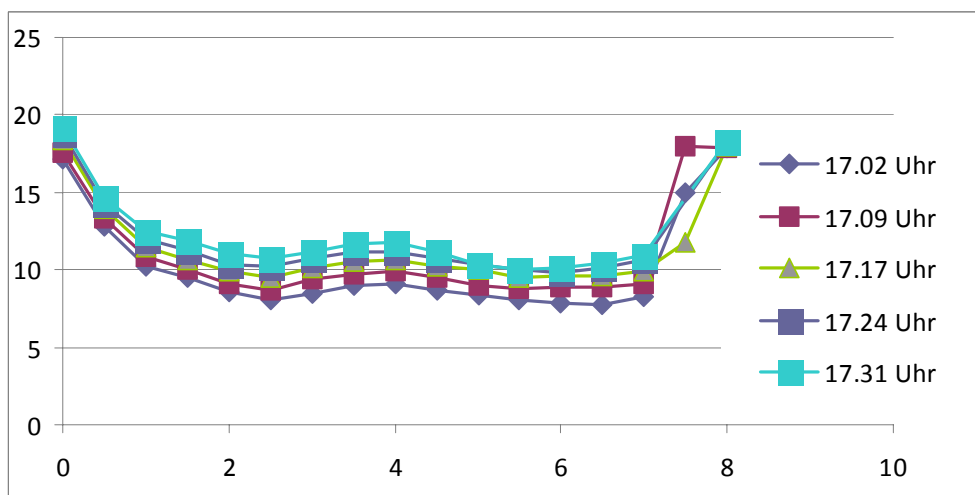


Abb. 22:  $p$ - $t$ -Diagramm, 1 mm Düse, Videoanalyse

Bis auf die schon in Abb. 21 auffällige Erhebung der Kurve bei 3,5 bar sind auch diese Kurven mit denen der zweiten Messreihe vergleichbar. Im Gegensatz zu allen anderen Messreihen wird wenn überhaupt (was auch nur bei den letzten drei Messungen der Fall ist) die Ausgangstemperatur nur geringfügig überschritten,

## 4 Auswertung

Alle Messreihen liefern ähnliche Ergebnisse was einen Nachweis des Joule-Thomson-Effektes betrifft, verweisen gleichzeitig aber auf verschiedene Probleme, was die Messung an sich betrifft.

### 4.1 Erste Messreihe (0,5 mm Düse, manuelle Messwertaufnahme)

Bei diesen Daten handelt es sich um die erste Messreihe, sie sind deshalb teilweise unvollständig und die Werte alle per Hand notiert, also mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet.

Das t-p-Diagramm zeigt den selben Verlauf wie bei den anderen Messreihen. Die Kurven der einzelnen Messungen unterscheiden sich auch nicht, da der Ausströmvorgang, der damit beschrieben wird, nicht durch äußere Einflüsse beeinträchtigt wurde. Der exponentielle Verlauf der Kurve ist damit zu erklären, dass mit fortschreitender Zeit, also sinkendem Druck, auch der Unterschied zwischen Ausströmdruck und Umgebungsdruck sinkt. Die Druckluft muss gegen den Umgebungsdruck expandieren, was umso langsamer passiert, je geringer der Druckunterschied ist.

Das p-T-Diagramm gibt an, welcher Druck welche Temperatur hervorruft. Der Verlauf von 8 bis 3 bar ist vermutlich damit zu erklären, dass der Kompressor eingeschaltet war, oder einfach aus einer gewissen Messungenauigkeit resultiert. Da die Abkühlung umso größer ist, je größer der Druckunterschied ist, (s. „1.1 Theorie“) hätte die Kurve ähnlich wie bei der zweiten Messung verlaufen müssen.

Das t-T-Diagramm verläuft im Grunde spiegelverkehrt wie das p-T-Diagramm: Mit fortschreitender Zeit, d.h. sinkendem Druck steigt die Temperaturkurve an. Der Zusammenhang zwischen Zeit und Temperatur ist jedoch linear, der Zusammenhang zwischen Druck und Temperatur nicht. Dass die Temperatur am Ende größer ist als die eigentliche Umgebungstemperatur liegt an dem Gasventil. Dadurch, dass sich im Laufe der Messungen seine Magnetspule und damit auch der Ventilkopf erwärmt hat, hat es auch Einfluss auf die Messwerte gehabt. Dies erklärt auch warum die Temperatur nach jeder Messung größer war als zuvor.

### 4.2 Zweite Messreihe (0,5 mm Düse, automatisierte Messwertaufnahme)

Bei der zweiten Messreihe sind die Zusammenhänge durch das genauere Messverfahren deutlich besser zu erkennen. Das t-T-Diagramm zeigt einen starken Abfall der Temperaturkurve zu Beginn, die Druckdifferenz ist hierbei am größten. Wird diese Differenz mit fortschreitender Zeit aber immer kleiner, liegen auch die Werte für die Temperatur immer etwas höher. Da das Gas im Feuerlöscher allerdings immer noch Umgebungstemperatur, also Ausgangstemperatur (~18 ... 19°C) hat, bedeutet dies aber durchgehend bis etwa 0,3 bar eine Abkühlung der Luft aus dem Feuerlöscher, nur eben eine mit sinkendem Druck geringer werdende. Das gilt für alle drei der Messreihen: Solange das Gas nicht mit Umgebungstemperatur oder höherer ausströmt, reicht die Druckdifferenz aus, um trotz der Erwärmung durch das Gasventil eine Abkühlung des Gases zu bewirken. Ein positiver Joule-Thomson-Effekt tritt auf. Die durchgehende Erwärmung von Messung zu Messung ist wieder auf das Gasventil zurückzuführen. Dadurch haben alle Messungen auch eine, zuletzt ungefähr gleiche, zunächst größere Endtemperatur die über der Umgebungstemperatur liegt. Diese Vermutung wird dadurch unterstützt, dass bei der fast 50-minütigen Pause zwischen der 15.33 Uhr-Messung und der 16.20 Uhr-Messung das Ventil nicht in Betrieb war, sich also nicht

weiter erwärmt, sondern langsam wieder abgekühlt hat. Nach dieser Pause lagen die Messwerte ja auch wieder deutlich niedriger als zuvor.

#### **4.3 Dritte Messreihe (1 mm Düse, automatisierte Messwertaufnahme)**

Betrachtet man Abb. 15 stellt man fest, dass die Ausströmzeit etwa ein Viertel der Ausströmzeit der zweiten Messreihe beträgt. Es besteht also ein Zusammenhang zwischen der Bohrung der Düse und der Ausströmgeschwindigkeit. Die Düse, die für die zweite Messreihe verwendet wurde (0,5 mm Durchmesser) hat eine viermal so kleine Öffnungsfläche wie die Düse bei dieser Messung (1,0 mm Durchmesser). Tatsächlich ist die Ausströmgeschwindigkeit dem Quadrat des Radius, damit der Öffnungsfläche der Düse, umgekehrt proportional. Je größer die Bohrung, desto kürzer ist die Zeit die für die Ausströmung benötigt wird.

#### **4.4 Vierte Messreihe (1 mm Düse, Videoanalyse)**

Die für die vierte Messreihe verwendete Idee, die Messgeräte zu filmen und das Video hinterher auszuwerten, vermeidet menschliche Messfehler und ermöglicht es so verlässlichere Werte trotz der höheren Ausströmgeschwindigkeit zu erhalten. Die Temperaturdiagramme (Abb. 21 und Abb. 22) zeigen aber einen nach der Theorie unerwarteten Temperaturanstieg bei 3,5 bar. Auch wurden die Ausgangstemperaturen, wenn überhaupt, um weniger als ein 1 °C überschritten. Da die Kurven aber mit fortschreitender Zeit wieder übereinander liegen, hat das Ventil auch hier einen Einfluss auf die Messwerte gehabt. Auch ist die Abkühlung nicht so stark ausgeprägt wie bei z.B. der zweiten Messreihe. Eine mögliche Erklärung für diesen Verlauf ist eine ungünstige Positionierung des Messkopfes. Schon bei vorherigen, hier nicht aufgeführten Messungen hat sich gezeigt, dass unterschiedliche Positionen des Messkopfes direkt vor der Düse einen Unterschiede von 4 ... 5 °C bei den Messwerte bedeuten können. Berührt der Messkopf die Düse sogar, verfälscht das die Messwert noch weiter. Dass die Abkühlung bei der zweiten Messreihe zumindest zu Beginn stärker ausgeprägt war als bei der dritten und vierten, kann also genauso auch durch den Einfluss der Düse bedingt sein wie auch durch eine Fehlpositionierung des Messkopfes, wobei letzteres wahrscheinlicher scheint, da die Druckänderung trotzdem die selbe ist. Zusätzlich dazu kam es, dadurch, dass der Aufbau keinen Ölabscheider beinhaltet, bei einigen der Messungen auch immer wieder dazu, dass Öl aus dem Kompressor und Flüssigkeit im System war und teilweise sogar an der Düse austrat. Die Verdunstung und die damit verbundene Abkühlung hatte auch Einfluss auf die Messungen.

## **5 Fazit**

Bei diesen Messungen gab es verschiedene Fehlerquellen, die die Messungen beeinflusst haben. Der Messfühler reagiert aufgrund seiner extremen Empfindlichkeit auch auf kleine Veränderungen, wie z.B. eine zusätzliche Person im Raum. Die Messwerte veränderten sich auch stark, wenn der Messkopf die Düse direkt berührte oder nicht mehr genau in der Mitte des Luftstroms war. Das Gasventil hat sich im Laufe der Messung erwärmt, was auch Auswirkung auf die Temperatur der Düse und des Messfühlers und damit auf die Ergebnisse, hatte. Auch die Messmethode zu Beginn war sehr ungenau, da zwei Werte auf einmal abgelesen werden und zumindest zu Beginn der Messung, in relativ kurzen Zeitabständen notiert werden mussten. Das die Kurven ansonsten nicht so verlaufen, wie sie es der Theorie nach müssten, liegt an Messungenauigkeiten und Veränderungen in der Umgebung. Insgesamt zeigen die Messwerte, vor allem die zweite Messreihe, aber deutlich den Zusammenhang zwischen Druckdifferenz und Temperaturänderung. Mit der dritten Messreihe lassen sich, wenn auch nur begrenzt, Aussagen über den Einfluss der Düse auf solche Messungen treffen. Der Joule-Thomson-Effekt ist jedesmal erwartungsgemäß

aufgetreten. Die Messwerte zeigen jedoch, wie wichtig die Berücksichtigung der verschiedenen Faktoren ist, wie z.B. Störungen bei der Temperaturmessung und Möglichkeiten zur Dokumentation der Messwerte, um verwertbare Ergebnisse zu erhalten.

Zu Fortführung des Projektes wäre es zum Einen möglich, die Auswirkung von Düsen mit anderem Durchmesser zu betrachten. Interessant wäre auch, welche Temperaturen bei höheren Drücken noch erzielt werden. Auch die hinter diesem Phänomen stehende Theorie könnte noch weiter vertieft werden, da sie hier nur ansatzweise aufgeführt wurde. Es wäre also nötig, den Versuchsaufbau noch so zu verändern, dass auch höhere Drücke kontrolliert werden können. Dazu gehört eine Isolierung für das Ventil, da dessen Erwärmung doch stärkeren Einfluss auf die Messungen hatte. Auch ein Ölabscheider wäre sinnvoll, um zusätzliche Verdunstungskälte zu vermeiden. Die Methode mit der Videoaufzeichnung erwies sich als genau, durch einige Ergänzungen zum Regelkreis und den Druckmesswandlern könnten die Messwerte auch sofort elektronisch gespeichert werden. Bei weiteren Messungen müsste vor allem die exakt in der Mitte liegende Position des Messkopfes gewährleistet werden. Der Messfühler als solcher müsste aber gerade aufgrund seiner hohen Empfindlichkeit und niedrigen Reaktionszeit beibehalten werden.

## 6 Danksagung

Mein Dank gilt zuerst Thomas Biedermann für seine Geduld und Unterstützung und obwohl ich sie aufgrund des Platzes nicht alle namentlich erwähnen kann, natürlich auch all den Menschen die dieses Projekt durch Denkanstöße, Literaturempfehlungen, besorgte Bauteile, motivierende Tassen Tee und vieles Andere ermöglicht haben.

## 7 Quellen

- [1] [www.ex.physik.uni-ulm.de/lehre/gk2-2007/node37.html](http://www.ex.physik.uni-ulm.de/lehre/gk2-2007/node37.html), 08.01.11,  
Der Joule-Thomson-Effekt
- [2] [www.chemistry.mcmaster.ca/~ayers/chem2PA3/labs/2PA36.pdf](http://www.chemistry.mcmaster.ca/~ayers/chem2PA3/labs/2PA36.pdf), 08.01.11,  
The Joule-Thomson-Experiment
- [3] Dieter Meschede (Hrsg.): Gerthsen Physik, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 2003,  
S.271
- [4] Stuart & Klages (Hrsg.): Kurzes Lehrbuch der Physik, Springer, Wiesbaden 2003  
S.111

### Literatur:

Bertelsmann Universallexikon 2008 (digitale Form)

Dorn (Hrsg.) Physik Lehrbuch Oberstufe, Schroedel Verlag, Hannover 1970

J. Grehn, J. Krause (Hrsg.): Metzler Physik, Schroedel Verlag, Hannover 1998

W. Kuhn (Hrsg.): Kuhn Physik, Westermann Schroedel Verlag, Braunschweig 2006

Carl Linde: Aus meinem Leben und von meiner Arbeit, Oldenbourg Verlag, München 1998  
(Neudruck, erstmals 1916)

D. Mende: Wir wiederholen Physik: Band 4 Wärmelehre, Verlag Harri Deutsch, Thun u.  
Frankfurt/M. 1986