

Versuch: Stirling-Maschine (11.6.2002)

Inhalt:

- | | | |
|----|--|---------|
| 1. | Einführung zum Versuch | Seite 1 |
| 2. | Messungen und Bearbeitung der Aufgaben | Seite 1 |

1. Einführung zum Versuch

Bei diesem Versuch sollen die Grundprinzipien thermodynamischer Zustandsänderungen und Kreisprozesse anhand der Stirlingmaschine veranschaulicht werden. Dabei werden Messungen für die drei unterschiedlichen Betriebsarten als Wärmekraftmaschine, Kältemaschine und Wärmepumpe durchgeführt.

2. Messungen und Bearbeitung der Aufgaben

2.1 Wärmekraftmaschine

Im ersten Teil des Praktikumsversuchs wird die Stirling-Maschine als Wärmekraftmaschine (Heißluftmotor) betrieben, d.h. der obere Teil des Kolbens wird elektrisch beheizt und die Maschine kann mechanische Arbeit abgeben.

- **Aufgabe 1: Kalibrierung**

Um diese Arbeit messen zu können, ist es zunächst erforderlich, eine Kalibrierung des sog. p-V-Indikators durchzuführen. Dieser dient der Bewegung des Lichtzeigers bzw. des entsprechenden Spiegels zum Durchlaufen des Zeigerdiagramms, indem er die Kolbenstellung (über eine Schnur) sowie den im Kolben herrschenden Druck (über einen Schlauch) auf die Position des Spiegels überträgt.

Die Druckkalibrierung erfolgt dabei über eine Pumpe (Spritze) sowie ein Manometer, indem man Drücke zwischen 0 und 1 bar (in Schritten von 0,1 bar) mit der Pumpe erzeugt und auf dem Millimeterpapier am Projektionsschirm die jeweilige Lage des Lichtpunktes markiert. Dabei ist darauf zu achten, dass sich der Punkt so weit rechts wie möglich befindet (Verstellung durch Ändern der Kolbenstellung). Das Ergebnis ist dem ersten unserer Diagramme im Protokollheft zu entnehmen (die Kalibrierung wurde für das zweite Diagramm nicht ein zweites Mal durchgeführt; es gilt hier derselbe Maßstab wie in Diagramm 1). Man erkennt, dass die Einteilung der Druckachse nicht genau äquidistant ist, die Intervalle werden nach oben hin größer. Dies dürfte wohl auf die Geometrie des Spiegel-Laser-Systems zurückzuführen sein. Aufgrund der ziemlich groben Messungen im weiteren Verlauf halten wir diese Tatsache jedoch für vernachlässigbar und gehen im folgenden davon aus, dass ein einheitlicher

Maßstab von ca. 24,5cm/bar vorliegt (dies ist gerade der Abstand zwischen den Punkten für 0 und für 1 bar) d.h. $1 \text{ cm} \hat{=} 0,04 \text{ bar}$.

Weiterhin wurde in horizontaler Richtung die Achse für das Volumen eingetragen. Auch hier erkennt man, dass es sich um eine gekrümmte Kurve und nicht um eine Gerade handelt, was wir ebenfalls auf die Geometrie der Anordnung zurückführen und für vernachlässigbar im Rahmen der zu erwartenden Messpräzision halten. Wir gehen von einer Achsengesamtlänge von etwa 23cm aus, was bei einer Gesamtvolumenänderung um 150 cm^3 (siehe Anleitung) zu folgendem Ergebnis führt: $1 \text{ cm} \hat{=} 6,5 \text{ cm}^3$.

• **Aufgabe 2: Messung der mechanischen Leistung, Wirkungsgrade**

Bevor mit diesen Messungen begonnen werden kann, muss man sich darüber klar werden, wie die Drehzahl des Motors bestimmt werden kann: Das Unterbrecherrad der Lichtschranke besitzt 10 Dunkelstellen und der Digitalzähler war so eingestellt, dass bei ansteigendem Signal eine Auslösung erfolgt, also gerade zehnmal pro Umlauf. Somit ist die vom Zähler angezeigte Frequenz durch 10 zu teilen um die gesuchte Drehzahl zu erhalten. Dies wurde bereits bei allen Werten im Protokollheft angewandt.

Zunächst wird nun der Motor mit einer Heizspannung von ca. $U_h=11,8\text{V}$ betrieben. Als zugehörigen Heizstrom misst man etwa $I_h=13,6\text{A}$. Daraus ergibt sich sofort eine **elektrische Heizleistung** von $L_h = U_h \cdot I_h \approx 160\text{W}$.

Ohne Belastung lief unser Motor dabei mit einer Drehzahl von etwa $5,1\text{s}^{-1}$ (allerdings schwankte dieser Wert mit der Zeit um ca. $\pm 0,4\text{s}^{-1}$). Damit wurde das entsprechend beschriftete p-V-Diagramm im Protokollheft aufgenommen (erstes Millimeterpapier, graue Kurve).

Es stellte sich heraus, dass der Kurve eine Oszillation überlagert war, deren Ursprung wir nicht genau eingrenzen konnten (der Betreuer vermutete eine defekte Dichtung im Kolben) und deren Auswirkungen sich v.a. im rechten Teil der Kurve bemerkbar machten. Sie hatte zur Folge, dass der Kurvenverlauf sich bei jeder Umdrehung merklich änderte, so dass die gezeichnete Linie leider nicht mehr als eine grobe Abschätzung sein kann.

Nichtsdestotrotz haben wir den **Flächeninhalt in der Kurve** bestimmt. Dabei ist es aufgrund der erwähnten Ungenauigkeit des Versuches nicht notwendig, die Millimeterkästchen einzeln genau auszuzählen, sondern man schätzt die Fläche zweckmäßiger ab, indem man bei Bedarf mehrere geteilte Zentimeterkästchen geeignet zu einem ganzen zusammenfasst (und natürlich die Anzahl vollständiger solcher Kästchen abzählt). Auf diese Weise erhält man eine Fläche von etwa 168cm^2 .

Mit dem oben bestimmten Maßstab berechnet man daraus die **Nettoarbeit** (pro Umlauf):

$$W = 168\text{cm}^2 \cdot 0,04 \frac{\text{bar}}{\text{cm}} \cdot 6,5 \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}} \approx 45 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 10^{-6} \text{m}^3 \approx 4,5\text{J}$$

Bei der vorliegenden Frequenz bzw. Drehzahl ergibt sich daraus eine **Leistung** von

$$L_p = f \cdot W = 5,1 \text{ s}^{-1} \cdot 4,5\text{J} \approx 23 \text{ W}.$$

Mit dieser Kenntnis bestimmen wir den **thermischen Wirkungsgrad** des Stirlingmotors:

$$\eta_i = \frac{L_p}{L_h} \approx \frac{23\text{W}}{160\text{W}} \approx 14\%$$

Bei konstanter Heizleistung wurde nun der Prony'sche Zaum auf die Achse aufgesetzt. Für verschiedene Drehzahlen (die sich durch Ändern der Reibung mithilfe der Schrauben am Zaum einstellen lassen) wurde sodann mit der Federwaage das vom Motor ausgeübte **Drehmoment** indirekt über die Kraft G gemessen.

$$M = G \cdot l$$

Der Hebelarm l ist hier gerade die halbe Länge des Zaums, also ca.: $l = 23 \text{ cm}$. Die Zusatzmasse wurde bei dieser Heizspannung noch nicht benötigt, wohl aber später bei höherem U_h .

Aus dem Drehmoment und der Drehzahl f lässt sich nun die abgegebene **mechanische Leistung** berechnen:

$$L_m = 2\pi f \cdot M$$

Schließlich liefert der Vergleich von L_m und der Heizleistung L_h den **effektiven Wirkungsgrad** der Maschine:

$$\eta_e = \frac{L_m}{L_h}$$

Die folgende Tabelle stellt unsere Ergebnisse zusammen:

| U _h =11,8V | | | | |
|---------------------------|-----------|-------------|--------------|-------------|
| Drehz. [s ⁻¹] | Kraft [N] | Drehm. [Nm] | Leistung [W] | eff. WG [%] |
| 4,0 | 0,65 | 0,15 | 3,8 | 2,3 |
| 4,5 | 0,40 | 0,09 | 2,6 | 1,6 |
| 5,0 | 0,17 | 0,04 | 1,2 | 0,8 |

Leider konnten wir die Messreihe nicht wie gefordert bis zu einer Drehzahl von 6s⁻¹ fortsetzen, da unser Motor nicht einmal ohne Zaum ausreichend hoch drehte.

Bei der niedrigsten Drehzahl (4,0s⁻¹) wurde schließlich erneut (in dasselbe Millimeterpapier wie bereits im unbelasteten Fall) ein p-V-Diagramm aufgenommen, diesmal also im belasteten Betrieb (vgl. die entsprechend beschriftete grüne Kurve).

Man bestimmt daraus erneut die Fläche und erhält $A \approx 160 \text{ cm}^2$, also einen geringeren Wert als im unbelasteten Fall.

Somit erhält man auch eine geringere **Nettoarbeit pro Umlauf**:

$$W = 160\text{cm}^2 \cdot 0,04 \frac{\text{bar}}{\text{cm}} \cdot 6,5 \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}} \approx 4,3\text{J}$$

Dies liefert uns eine **Leistung** von

$$L_m = f \cdot W \approx 17\text{W}.$$

Der **thermische Wirkungsgrad** beträgt also nur noch

$$\eta_t = \frac{L_p}{L_h} \approx \frac{17\text{W}}{160\text{W}} \approx 11\% .$$

Im zweiten Messdurchgang wurde die Heizspannung auf ca. $U_h=15,3\text{V}$ eingestellt, was einen Heizstrom von etwa $I_h=17,8\text{A}$ zur Folge hatte. Somit wurde der Motor im folgenden mit einer **Heizleistung** von $L_h = U_h \cdot I_h \approx 272\text{W}$ betrieben. Ansonsten wurden dieselben Messungen durchgeführt, wie sie bereits oben bei der kleineren Heizspannung beschrieben wurden.

Die Aufnahme eines p-V-Diagramms im Leerlauf war nicht möglich, weil hier die Drehzahl deutlich über den maximal erlaubten Wert von $6,5\text{s}^{-1}$ anzusteigen drohte. Daher nahmen wir das Diagramm statt dessen im Fall leichter Belastung mit dem Zaum bei einer Drehzahl von etwa 6s^{-1} auf (siehe Protokollheft, graue Kurve des zweiten Millimeterpapiers). Die Fläche darin beträgt ca. $A=232\text{cm}^2$.

Somit ergibt sich als **Nettoarbeit pro Umlauf**:

$$W = 232\text{cm}^2 \cdot 0,04 \frac{\text{bar}}{\text{cm}} \cdot 6,5 \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}} \approx 62 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 10^{-6} \text{m}^3 \approx 6,2\text{J}$$

Daraus berechnet man eine **Leistung** von

$$L_p = f \cdot W = 6 \text{ s}^{-1} \cdot 6,2 \text{ J} \approx 37 \text{ W} .$$

und ein **thermischer Wirkungsgrad** von:

$$\eta_t = \frac{L_p}{L_h} \approx \frac{37\text{W}}{272\text{W}} \approx 14\%$$

Weiterhin wurde erneut mit dem Zaum das Drehmoment für verschiedene Frequenzen bestimmt. Die Ergebnisse der folgenden Tabelle ergeben sich gemäß der oben angegebenen Beziehungen.

| U _h =15,3V | | | | |
|---------------------------|-----------|-------------|--------------|-------------|
| Drehz. [s ⁻¹] | Kraft [N] | Drehm. [Nm] | Leistung [W] | eff. WG [%] |
| 4,0 | 1,20 | 0,28 | 6,9 | 2,5 |
| 4,5 | 1,04 | 0,24 | 6,8 | 2,5 |
| 5,0 | 0,84 | 0,19 | 6,1 | 2,2 |
| 5,5 | 0,60 | 0,14 | 4,8 | 1,8 |
| 6,0 | 0,40 | 0,09 | 3,5 | 1,3 |

Bei den Drehzahlen 4s^{-1} und $4,5\text{s}^{-1}$ musste auch noch das zusätzliche Massenstück (von uns gemessen: $m=49,89\text{g}$) angehängt werden. Die angegebene Kraft ist hier die Summe der entsprechenden Gewichtskraft und der mit der Federwaage gemessenen Kraft.

Schließlich wurde wieder für die niedrigste Drehzahl 4s^{-1} ein p-V-Diagramm im belasteten Zustand aufgenommen (vgl. Protokollheft, die grüne Kurve im zweiten Millimeterpapier). Man erhält daraus eine Fläche von etwa $A=201\text{cm}^2$.

Damit ist die **Nettoarbeit pro Umlauf**

$$W = 201\text{cm}^2 \cdot 0,04 \frac{\text{bar}}{\text{cm}} \cdot 6,5 \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}} \approx 5,4\text{J}$$

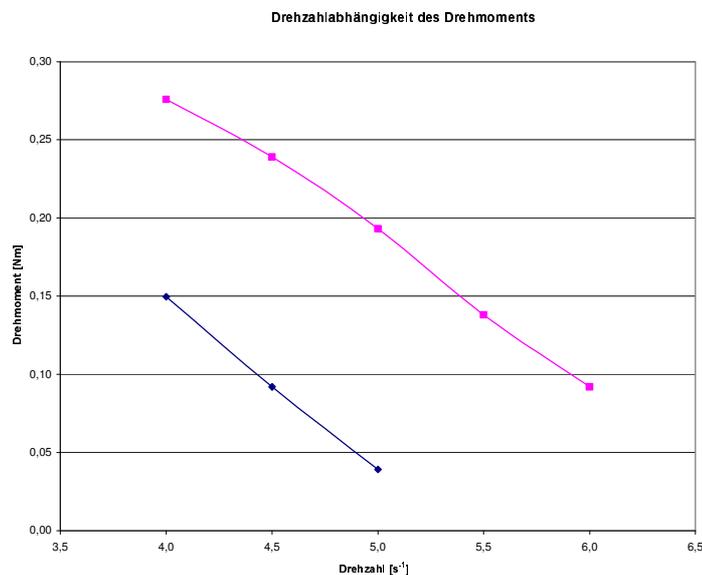
und die **Leistung** demzufolge

$$L_p = f \cdot W = 4 \text{ s}^{-1} \cdot 5,4 \text{ J} \approx 21 \text{ W}.$$

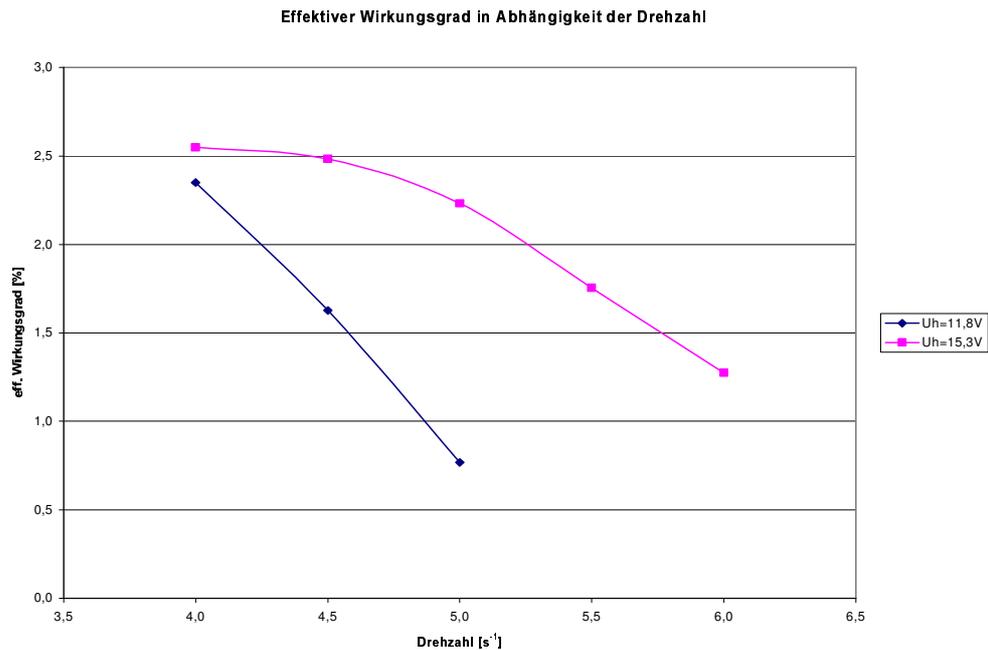
Der **thermische Wirkungsgrad** beträgt also:

$$\eta_t = \frac{L_p}{L_h} \approx \frac{21\text{W}}{272\text{W}} \approx 7,9\%$$

Betrachten wir nun einige unserer Ergebnisse noch etwas näher: Zum einen kann man versuchen, einen Zusammenhang zwischen den gemessenen Drehmomenten und den zugehörigen Drehzahlen herzustellen. Dieser ist im folgenden Diagramm grafisch dargestellt:



Man erkennt, dass das Drehmoment bei steigender Drehzahl annähernd linear abfällt. Geht man anfangs (fälschlicherweise, siehe unten) davon aus, dass die abgegebene Leistung (also das Produkt von Drehzahl und Drehmoment) über den Drehzahlbereich konstant bleibt, so ist dies zunächst etwas verwunderlich, denn dann sollte ja der Drehmomentabfall mit $1/\text{Drehzahl}$ erfolgen, also gerade nicht linear. Die Lösung des Problems liegt darin, dass die abgegebene Leistung eben gerade nicht drehzahlunabhängig ist. Sehen wir uns dazu das folgende Diagramm an.

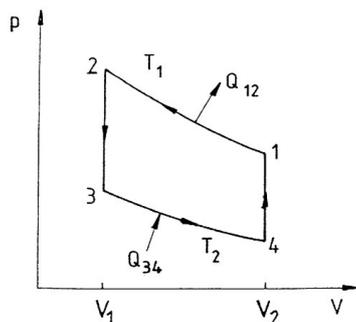


Man erkennt daraus, dass mit steigender Drehzahl der effektive Wirkungsgrad des Motors sinkt, d.h. die abgegebene Leistung wird bei fester Heizleistung geringer. Bei der niedrigeren Heizspannung ist der Zusammenhang nahezu linear (was allerdings vermutlich durch die wenigen Messpunkte bedingt ist), bei der höheren Spannung verläuft die Kurve gekrümmt. Ohne auf die genaue mathematische Form des Zusammenhangs eingehen zu können, ist es einsichtig, warum der Wirkungsgrad abnimmt: mit zunehmender Drehzahl (d.h. höherer Geschwindigkeit der bewegten Motorenteile) nimmt der Einfluss der Reibung zu. Die dadurch verbrauchte Leistung steht dann nicht mehr als mechanische Leistung an der Welle zur Verfügung und geht daher in den effektiven Wirkungsgrad nicht ein.

2.2 Kältemaschine

Treibt man die Stirlingmaschine im geg. Aufbau mechanisch im Uhrzeigersinn an, anstatt sie als Motor zu verwenden, so kann man Wasser in einem (im Maschinendeckel integrierten) Reagenzglas abkühlen. Bei einem Kreisdurchlauf wird bei dieser Anordnung unter anderem dem kälter werdenden Wasser im Glas Wärme entzogen (Siehe p-V-Diagramm unten, Schritt 3 \rightarrow 4). Das für den Kreisprozess nötige warme Reservoir ist im vorliegenden Versuch die Wasserkühlung der Maschine; der Antrieb für die Maschine ist ein Elektromotor, der die Maschine so antreibt, dass ihre Arbeitsfrequenz bei ca. 3,0 Hz liegt.

Das p-V-Diagramm des Vorganges sieht folgendermaßen aus:



Der Durchlaufsinn ist gegen den Uhrzeiger, also entgegengesetzt wie bei einer Wärmekraftmaschine. Besonderes Augenmerk ist im p-V-Diagramm, wie schon erwähnt, auf den Prozess 3 -> 4 zu legen, da dieser es ist, der dem kalten Reservoir Wärme entzieht. Da sich nämlich bei der isothermen Expansion des Gases von 3 nach 4 die Temperatur und damit die innere Energie U des Gases nicht ändern darf, muss gelten: $\Delta Q = -\Delta W$, sprich, die mechanische Arbeit, die das Gas während der Expansion an der Schwungscheibe der Apparatur verrichtet, muss durch eine Energie- bzw. Wärmeaufnahme aus dem kalten Reservoir ausgeglichen werden. Hiermit wird das kalte Reservoir weiter abgekühlt, da seine innere Energie sich um den abgegebenen Wärmebetrag verringert. Man beachte, dass, wenn das kalte Reservoir kälter wird, damit auch das Integral

$$\int_3^4 p \cdot dV = -\Delta W_{mech} = \Delta Q_{Arbeitsgas}$$

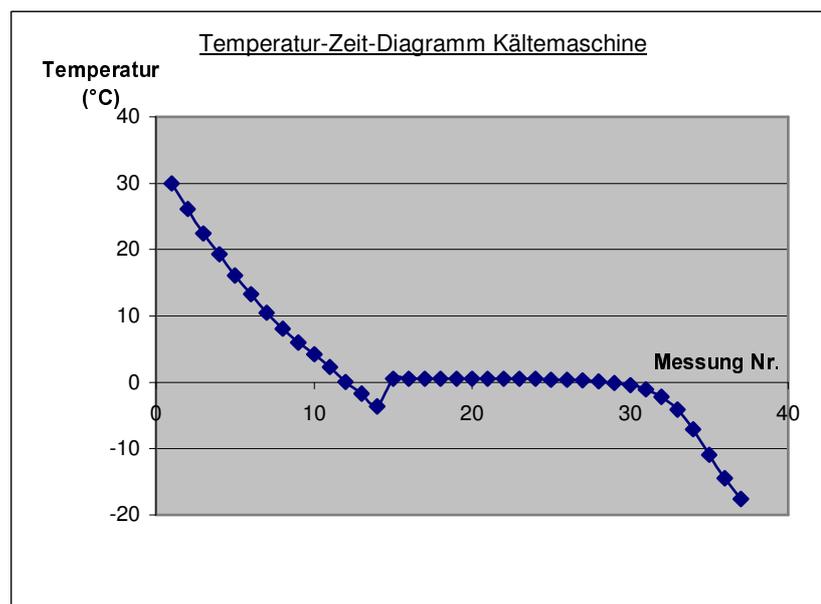
immer kleiner wird (d.h. die Fläche unter der Isotherme 3-4,

welche bei kleinerer Temperatur „niedriger“ im Diagramm liegt). Wenn also schon eine geringere Temperatur des kalten Reservoirs vorliegt, so kann diesem nicht mehr so viel Wärme pro Prozessschritt (bzw. bei gleichbleibender Prozessfrequenz auch Wärme pro Zeiteinheit) entzogen werden, die Temperatur wird also (nach dieser theoretischen Betrachtung) langsamer fallen.

Noch einmal zusammengefasst: **Betrachtet man die Temperatur des kälteren Reservoirs für z.B. 2 Prozessschritte als konstant, so wird dem kälteren Reservoir bei beiden Schritten jeweils dieselbe Wärmemenge $-\Delta Q_{Arbeitsgas} = \Delta Q_{kaltes\ Reservoir}$ entzogen. Vergleicht man jedoch 2 Prozessschritte mit unterschiedlicher Temperatur des kalten Reservoirs, so wird bei dem Schritt mit niedrigerer Reservoirtemperatur dem Reservoir weniger Wärme entzogen.**

Beim Versuch wurde 9 Minuten lang alle 15 Sekunden die Temperatur des Wassers mittels eines Digitalthermometers bestimmt. Die optisch-mechanische Apparatur zum Aufzeichnen des p-V-Diagramms blieb beim Betrieb der Apparatur als Kältemaschine und auch als Wärmepumpe (siehe nächster Abschnitt) abgeschaltet.

Aus den Messungen und deren Eintragung in einer Tabelle auf dem PC (die allerdings recht groß ist und deswegen hier weggelassen werden soll) ergibt sich im Versuch das folgende Diagramm, das die Abhängigkeit zwischen Messzeit (bzw. Messungsnummer) und Temperatur des Wassers zeigt:



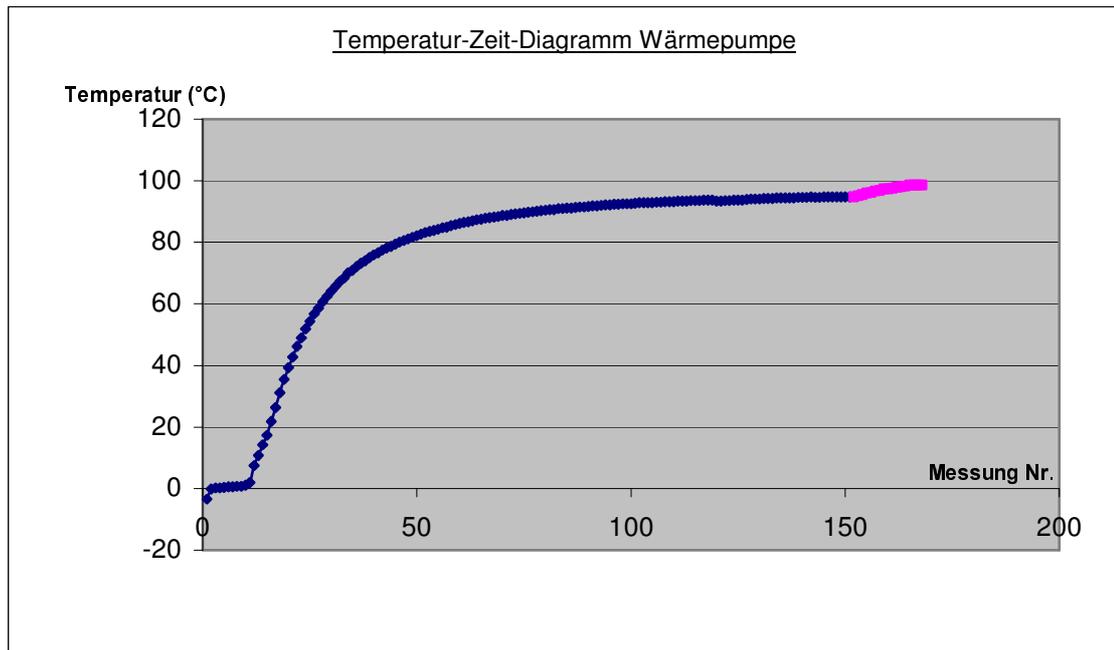
Betrachten wir zunächst den Kurventeil von links bis zum ersten (lokalen) Minimum. In diesem Bereich ist das Wasser flüssig. Es ist normal, dass sich Wasser zunächst unter den Gefrierpunkt abkühlen lässt, bevor es, ausgehend von einem „Keim“, d.h. einigen sich zur (Eis-) Kristallstruktur zusammenlagernden Wasserteilchen, schlagartig zu einem Eiskristall gefriert. Das liegt daran, dass sich eben initial ein paar Moleküle des Wassers zur Kristallisation geeignet anordnen müssen, wenngleich die nötige tiefe Temperatur bereits erreicht ist. Die Abkühlung verläuft bis zum ersten Minimum näherungsweise linear, d.h. dem Wasser wird bei jedem Prozessschritt ungefähr die gleiche Wärmemenge $\Delta Q = m_{H_2O} \cdot c_{H_2O} \cdot \Delta \vartheta$ (wo c_{H_2O} die spezifische Wärme des Wassers und $\Delta \vartheta$ die (messbare) Temperaturdifferenz) entzogen. Die oben besprochene Verlangsamung des Abkühlens bzw. Wärmeentzugs ist im Diagramm also leider höchstens undeutlich (d.h. im Bereich der Fehlertoleranz bzw. des Einwirkens sonstiger Effekte) sichtbar; man hätte zur Verifizierung des Effektes bei gleichbleibendem Aggregatzustand evtl. länger messen und überlagernde, evtl. ähnlich wirkende Wärmeaustauscheffekte mit der Umgebung minimieren müssen. Diese Bedingungen können allerdings mit der gegebenen Anordnung nicht erreicht werden.

Nach dem ersten (lokalen) Temperaturminimum nun beginnt das Wasser, wie schon gesagt, schlagartig zu gefrieren und nimmt dabei Erstarungswärme ab (d.h. „entgegengesetzte Schmelzwärme“), um seinen Aggregatzustand zu ändern. Diese Wärmeabgabe hebt die Wasser-/Eis-Mischungs-Temperatur im Versuch auf ca. $0,5^\circ$ (theoretischer Temperaturwert einer Eisschmelze: 0°); diese Temperatur der Eisschmelze bleibt so lange konstant, bis die Maschine der Schmelze genug Wärme entzogen hat, also sie durchgefroren ist. Dann fällt die Kurve etwas steiler ab als bei der Wasserabkühlung ab. Das liegt daran, dass die Wärmekapazität von Eis geringer ist als die vom Wasser, auch wenn dieser Unterschied von Effekten wie vergrößertem Temperaturexchange mit der Umgebung (wg. vergrößerter Temperaturdifferenz) sowie genannter Verlangsamung der Abkühlung aufgrund niedrigerer Temperatur des kühlen Reservoirs abgeschwächt wird. (Idealisiert und ohne Berücksichtigung des Verlangsamungseffektes sollte aufgrund ungefähr halber spez. Wärme des Eises ggü. Wasser die Abkühlung von Eis ca. doppelt so schnell verlaufen, da nach oben geg. Zusammenhang zwischen $\Delta \vartheta$ und ΔQ bei gleich angenommenem ΔQ und ungefähr halbem c_{H_2O} ca. doppeltes $\Delta \vartheta$ zustandekommt.)

2.3 Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe ist, thermodynamisch gesehen, nichts anderes als eine Kältemaschine, lediglich interessiert man sich hier nicht so sehr für das kälter werdende kalte Reservoir, sondern eher für die weitere Aufheizung des wärmeren Reservoirs. Das p-V-Diagramm wird auch in derselben Richtung wie bei einer Kältemaschine durchlaufen. Da jedoch im vorliegenden Versuch das Wasser im Reagenzglas aufgeheizt werden soll, ist das warme Wärmereservoir für den Kreisprozess jetzt das Reagenzglas, sowie das kalte Reservoir die Wasserkühlung der Apparatur. Diese Umkehrung gegenüber dem Kältemaschinen-Aufbau bewirkt in der Praxis, dass auch die Laufrichtung des Elektromotors geändert werden muss. Die Frequenz des E-Motors wurde mit 3.0Hz beibehalten; die Temperaturmessung geschah weiterhin alle 15 Sekunden und wurde ca. 38 Minuten lang durchgeführt. Da sich dann die Temperatur aber nicht mehr weiter steigern ließ, hängten wir noch eine ca. 3-minütige Messung bei einer Motorfrequenz von ca. 4.0Hz an um beim Siedepunkt anzukommen.

Das folgende Temperaturdiagramm (wieder in Abhängigkeit von der Messungsnummer, d.h. letztendlich von der verstrichenen Messzeit), basiert wiederum auf einer PC-Tabelle der Messdaten, die viel zu lang zum Einfügen ist. Dort ist der Teil bei einer Frequenz von 4.0Hz rosa eingefärbt, er soll hier nicht lange diskutiert, sondern eigentlich nur aus Interesse gezeigt werden, da er in Wirklichkeit eine gesonderte Messung unter anderen Bedingungen darstellt.



Man sieht am Diagramm von links kommend zunächst, dass hier keine der Unterkühlung von Wasser analoge „Überwärmung“ des Eises stattfindet, sondern das Eis beim Erreichen einer Temperatur von 0° kontinuierlich aufzutauen beginnt, da sich von der Außenseite des Eiskristalls angefangen immer mehr Wassermoleküle ihres „Gittergefängnisses“ im Eis entziehen können. Die Temperatur blieb auch hier für einige Messungen fast konstant bei 0 bis 1 Grad, um dann nach Auftauen des gesamten Eises steil anzusteigen. Man beachte, dass sich mit steigender Temperatur des Wassers im Reagenzglas (nach einer ganz analogen Integral-Überlegung wie oben) die pro Prozessschritt an das Wasser abgegebene Wärmemenge erhöhen müsste, also auch der Temperaturanstieg pro Prozessschritt bzw. auch pro Zeiteinheit. Dies wird mit wachsender Wassertemperatur im Reagenzglas jedoch offensichtlich von der steigenden Wärmeleitung aus der Probe heraus in die Umgebung so stark überlagert (die abgegebene Wärmeleistung ist hier linear von der Temperaturdifferenz abhängig), dass die Abgabe der Wärme an die Umgebung bereits den Wärmeeinfluss aus der Stirlingmaschine (bzw. ihrem Arbeitsgas) größtmäßig erreicht. Man sieht diesen Effekt an dem Abflachen der Kurve hin zu steigender Messungsnummer; die Kurve steigt am Ende fast nicht mehr. Erhöht man die Motorfrequenz, so erhöht sich die aus der Maschine in die Probe abfließende Wärmeleistung (Wärmemenge pro Zeiteinheit); die Wärmepumpe kann wieder etwas gegen die Verlusteffekte ankämpfen, d.h. die Temperatur der Probe erhöhen, bis die Kurve bald bei einer Temperatur von ca. $98,5^\circ$ erneut abflacht; dieses wird allerdings evtl. nicht nur durch Wärmeabgabe an die Umgebung sondern auch durch den einsetzenden Phasenübergang zu Wasserdampf verursacht, welcher analog dem Auftauen Energie verschlingt.