

Physikalisches Anfängerpraktikum II

Sommersemester 2023

Versuch 222

Tutor: Tobias Martiné

Heißluftmotor

1 Einleitung

1.1 Ziel des Versuchs

In diesem Versuch soll die Wirkungsweise des Heißluftmotors als Kältemaschine und Wärmepumpe qualitativ untersucht werden. Durch Bestimmung der "Gefrierwärme" von Wasser soll zusätzlich der Wirkungsgrad der Kältemaschine abgeschätzt werden, dies erfolgt durch die Aufzeichnung des Temperaturverlaufs und die Auswertung des PV-Diagramms mithilfe des Computerprogramms Thermolink. Zum Schluss wird der Heißluftmotor mit Hilfe einer Heizwendel und unter Zufuhr der elektrischen Energie von außen beheizt und als Wärmekraftmaschine betrieben. Der Wirkungsgrad soll auch durch Messung der abgegebenen Arbeit mit Hilfe einer Drehmomentmessung ermittelt werden. Während des Experiments sollen der Durchfließmenge von Kühlwasser, die Drehzahl des Motors, Heiz(Motor)-strom sowie Spannung gemessen werden, um die zugeführte Wärme und die verrichtete Arbeit berechnen zu können.

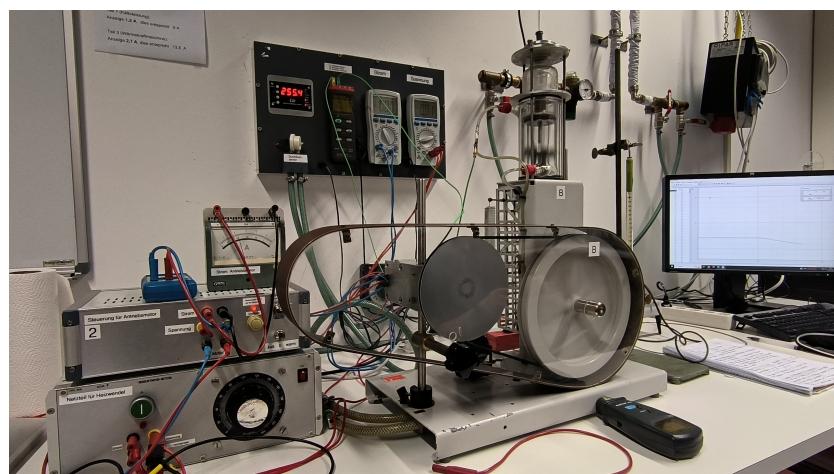


Abbildung 1: Aufbau des Heißluftmotors

1.2 Drei Hauptsätze der Thermodynamik

- Der 1. Hauptsatz: Die gesamte Energie in einem abgeschlossenen System konstant ist. Die zugeführte Wärmemenge dQ führt zu einer Änderung der inneren Energie dU sowie zur Verrichtung einer Volumenarbeit $dW = pdV$. (Energieerhaltung)

$$dQ = dU + pdV \quad (1)$$

- Der 2. Hauptsatz: Es gibt keine Zustandsänderung, deren einziges Ergebnis die Übertragung von Wärme von einem Körper niederer auf einen Körper höherer Temperatur ist. Es ist außerdem unmöglich, eine periodisch arbeitende Maschine zu konstruieren, die weiter nichts bewirkt als Hebung einer Last und Abkühlung eines Wärmereservoirs. (Richtung von Prozessen, Irreversibilität)
- Es ist nicht möglich, ein System bis zum absoluten Nullpunkt abzukühlen. (Definition von Nullpunkt)

$$\lim_{T \rightarrow 0} S(T, p, V, \dots) = S(T = 0) = S_0, \text{ wobei } S \text{ die Entropie ist.} \quad (2)$$

1.3 Carnot-Prozess

Der Carnot-Kreisprozess ist ein Gedankenexperiment, das zur Realisierung einer reversiblen Wärme-Kraft-Maschine zur Umwandlung von Wärme in Arbeit dient. Den Carnot-Kreisprozess bilden vier Zustandsänderungen, die im nebenstehenden T-S- und p-V-Diagramm dargestellt sind:

- **Isotherme Kompression** ($1 \rightarrow 2$): Die isotherme Kompression von Volumen V_1 auf V_2 erfolgt mit konstanter Temperatur T_K , wobei die Wärme Q_{12} abgegeben und die Arbeit W_{12} zugeführt wird. Da bei konstanter Temperatur für ein ideales Gas die Änderung der inneren Energie $dU = 0$ gilt, folgt aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik, dass die gesamte Kompressionsarbeit als Wärme abgeführt wird:

$$-W_{12} = Q_{12} = \int_{S_1}^{S_2} T_k dS = T_k(S_2 - S_1) < 0 \quad (3)$$

$$-Q_{12} = W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} \nu RT_k \frac{1}{V} dV = -\nu RT_k \ln \frac{V_2}{V_1} > 0 \quad (4)$$

wobei ν die Stoffmenge und R die universelle Gaskonstante sind.

- **Adiabatisch Kompression** ($2 \rightarrow 3$): Die adiabatische reversible Kompression (von V_2 auf V_3) erfolgt ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung. Dabei steigt die Temperatur des Arbeitsmediums von T_K auf T_H während das Gasvolumen kleiner wird und Druck und Temperatur steigen. Die Arbeit W_{23} , die benötigt wird, um den Kolben zu bewegen, wird als innere Energie ΔU_{23} im Arbeitsgas gespeichert. Da kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet ($dQ_{23} = 0$), geht die gesamte Kompressionsarbeit in innere Energie über:

$$W_{23} = \Delta U_{23} = - \int_{V_2}^{V_3} p dV = \int_{T_K}^{T_H} C_V dT = \nu c_v (T_H - T_k) > 0 \quad (5)$$

$$\frac{T_H}{T_K} = \left(\frac{V_2}{V_3}\right)^{\gamma-1} \quad pV^\gamma = \text{const.} \quad (6)$$

wobei $\gamma = C_p/C_v$ das Verhältnis der Wärmekapazität von Gasen bei konstantem Druck (C_p) zur Wärmekapazität bei konstantem Volumen (C_V) ist und c_v der molare Wärmekapazität entspricht.

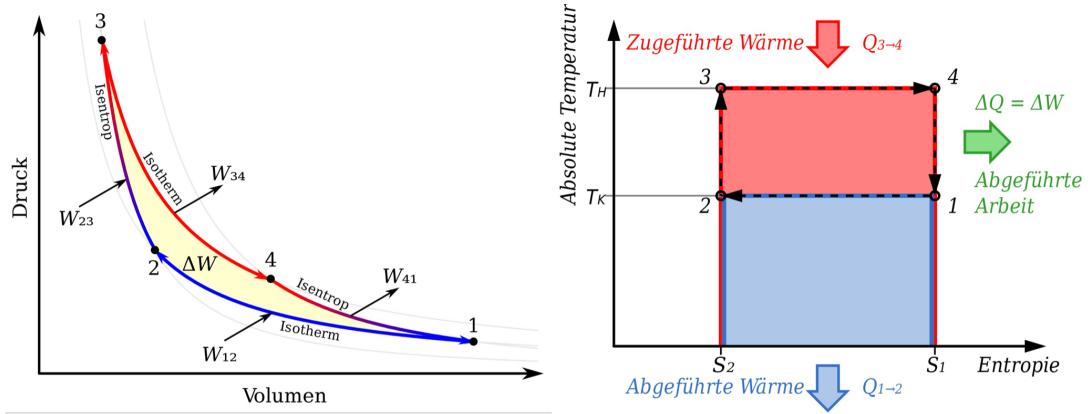


Abbildung 2: Carnotprozess pV- und TS-Diagramm

- **Isotherme Expansion (3 → 4):** Die isotherme Expansion von Volumen V_3 auf V_4 erfolgt mit konstanter Temperatur T_H , wobei die Wärme Q_{34} aufgenommen und die Arbeit W_{34} abgeführt wird:

$$Q_{34} = \int_{S_1}^{S_2} T_H dS = T_H(S_1 - S_2) > 0 \quad (7)$$

$$-Q_{34} = W_{34} = \int_{V_3}^{V_4} \nu R T_H \frac{1}{V} dV = -\nu R T_H \ln \frac{V_4}{V_3} < 0 \quad (8)$$

- **Adiabatisch Expansion (4 → 1):** Bei der adiabatischen Expansion (V_4 auf V_1) ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung, die Temperatur fällt, das Volumen steigt und Druck und Temperatur abnehmen. Die Arbeit (W_{41}) wird geleistet und die innere Energie ($\Delta U_{41} = \Delta U_{23}$) des Arbeitsgases verringert. Da kein Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet ($dQ_{41} = 0$), ergibt sich aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik, dass die gesamte Expansionsarbeit auf den Verlust an innerer Energie zurückzuführen ist:

$$W_{41} = \Delta U_{41} = - \int_{V_4}^{V_1} p dV = \nu c_v (T_K - T_H) = -\Delta U_{23} > 0 \quad (9)$$

$$\frac{T_K}{T_H} = \left(\frac{V_4}{V_1}\right)^{\gamma-1} \quad pV^\gamma = \text{const.} \quad (10)$$

Der ideale thermische Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine ist definiert durch das Verhältnis der Nettoarbeit W_N zur aufgenommenen Wärmemenge Q^+

$$\eta_{th} = \frac{W_N}{Q^+} \quad (11)$$

Für den Carnot-Prozess erhält man somit für alle $T_H \geq T_K$:

$$W_N = |W_{34} + W_{12}| = (Q_{34} + Q_{12}) = (T_H - T_K)(S_1 - S_2) \quad (12)$$

$$\eta_{th,carnot} = \frac{W_N}{Q^+} = \frac{(T_H - T_K)(S_1 - S_2)}{T_H(S_1 - S_2)} = 1 - \frac{T_K}{T_H} \leq 1 \quad (13)$$

Der Carnot-Wirkungsgrad ist unabhängig von der Entropiedifferenz. Daher lässt sich immer ein Carnot-Prozess konstruieren, der zwischen den Temperaturen T_H und T_K läuft und so angepasst werden kann, dass die entsprechende minimale und maximale Entropie den entsprechenden Werten des betrachteten beliebigen Prozesses entspricht.

Darüber hinaus haben wir herausgefunden, dass der Wirkungsgrad nach dem TS-Diagramm so dargestellt werden kann:

$$\eta_{th} = \frac{\text{blaue Fläche}}{\text{rote Fläche} + \text{blaue Fläche}} \quad (14)$$

Für ein beliebiges Kreisprozess mit der gleichen minimalen/maximalen Temperatur/Entropie gibt es immer einen kleineren Flächenquotient. Jeder reale Wärmekraftprozess wird daher aufgrund von unvermeidlichen Verlusten und Ineffizienzen einen niedrigeren Wirkungsgrad haben als der Carnot-Wirkungsgrad.

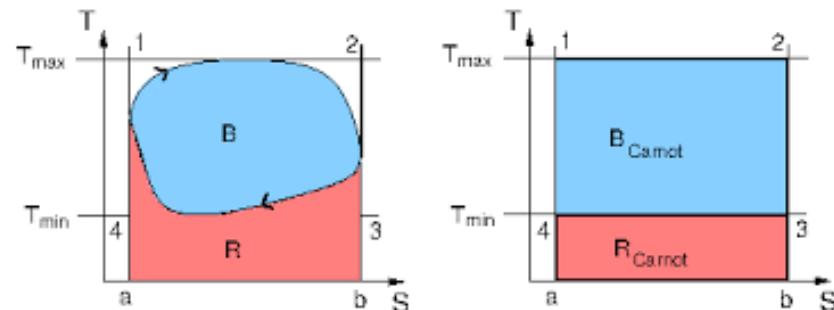


Abbildung 3: Ein anderes Prozess hat immer einen kleineren Flächenquotient

1.4 Stirlingmotor

Der γ -Typ und der β -Typ Stirlingmotor sind beide Wärmekraftmaschinen, die auf dem Stirling-Zyklus-Prinzip basieren. Der γ -Typ besitzt zwei separate Zylinder, die durch ein Rohr miteinander verbunden sind. Beide Zylindern sind mit Luft gefüllt und nach außen abgedichtet. Im Gegensatz zu dem γ -Typ Heißluftmotor besitzt der β -Typ nur einen Zylinder, in dem sowohl Arbeitskolben als auch Verdrängungskolben gemeinsam angeordnet sind.

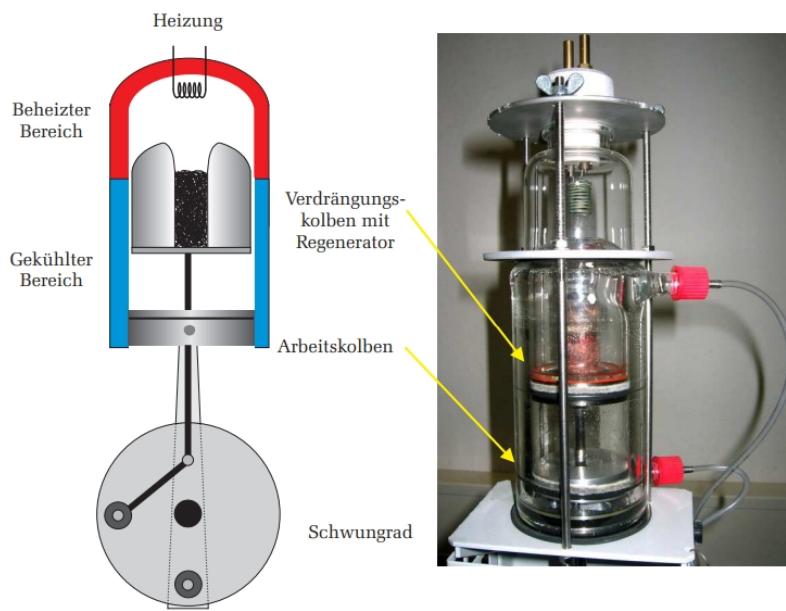


Abbildung 4: Aufbau eines β -Typ Stirlingmotors

1.4.1 Stirling-Prozess

Beim idealen Stirling-Prozess werden vier Zustandsänderungen durchlaufen:

- **Isotherme Expansion** ($1 \rightarrow 2$): Bei der isothermen Expansion nimmt das Arbeitsgas die Wärmemenge Q_1 auf, dehnt sich aus und verschiebt den Arbeitskolben gegen den Atmosphärendruck nach unten, wobei vom Gas die Arbeit W_1 geleistet wird. Nach dem 1. Hauptsatz $dQ = dU + dW = c_v \nu dT + pdV$ ergibt sich:

$$dQ_1 = pdV = \nu RT_1 \frac{dV}{V} \quad (15)$$

Um die Herleitung zu führen haben wir die ideale Gasgleichung benutzt. Da während der isothermen Zustandsänderung die zugeführte Wärmemenge vollständig in Volumenarbeit W umgewandelt wird, ergibt sich für die während dieses Motorzyklus erbrachte Arbeit:

$$Q_1 = \nu R T_1 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = W_1 \quad (16)$$

- **Isochore Abkühlung** ($2 \rightarrow 3$): Der Verdrängungskolben bewegt sich nach oben und drängt das Arbeitsgas in den gekühlten Bereich. Dabei wird das Gas auf die Temperatur T_2 abgekühlt und gibt die Wärmemenge Q_2 an das Kühlungssystem ab. Bei der isochoren Abkühlung, bei der das Volumen konstant bleibt ($dV = 0$), wird keine Volumenarbeit verrichtet. Temperaturänderungen wirken sich daher ausschließlich auf die innere Energie aus:

$$dQ_2 = -c_v \nu dT \quad W_2 = 0 \quad (17)$$

$$Q_2 = -c_v \nu \int_{T_1}^{T_2} dT = -c_v \nu (T_1 - T_2) \quad (18)$$

- **Isothermen Kompression** ($3 \rightarrow 4$): Der Arbeitskolben bewegt sich nach oben und komprimiert die kalte Luft. Dabei wird vom Kolben die Arbeit W_3 verrichtet. Die bei der Kompression freiwerdende Wärmemenge Q_3 wird an das Kühlungssystem abgeführt. Die ist sehr ähnlich wie isoterme Expansion daher ergibt sich die abgeführte Wärme sowie die Volumenarbeit:

$$Q_3 = -\nu R T_2 \ln \frac{V_2}{V_1} = W_3 \quad (19)$$

(20)

- **Isochore Erwärmung** ($4 \rightarrow 1$): Der Verdrängerkolben bewegt sich nach unten und schiebt das Arbeitsgas in den heißen Bereich zurück. Durch Aufnahme der Wärmemenge Q_4 steigt die Temperatur wieder auf den Anfangswert T_1 :

$$Q_4 = c_v \nu (T_1 - T_2) \quad W_4 = 0 \quad (21)$$

Da nur beim Durchlaufen der Isothermen Arbeit geleistet wird, ist die Nutzarbeit gerade die Summe der Teilarbeiten in den Takten $1 \rightarrow 2$ und $3 \rightarrow 4$:

$$W_N = W_1 + W_3 = \nu R T_1 \ln \frac{V_2}{V_1} - \nu R T_2 \ln \frac{V_2}{V_1} = \nu R (T_1 - T_2) \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (22)$$

Die Nutzarbeit ist demnach umso größer, je größer die Temperaturdifferenz und je größer das Kompressionsverhältnis V_2/V_1 ist.

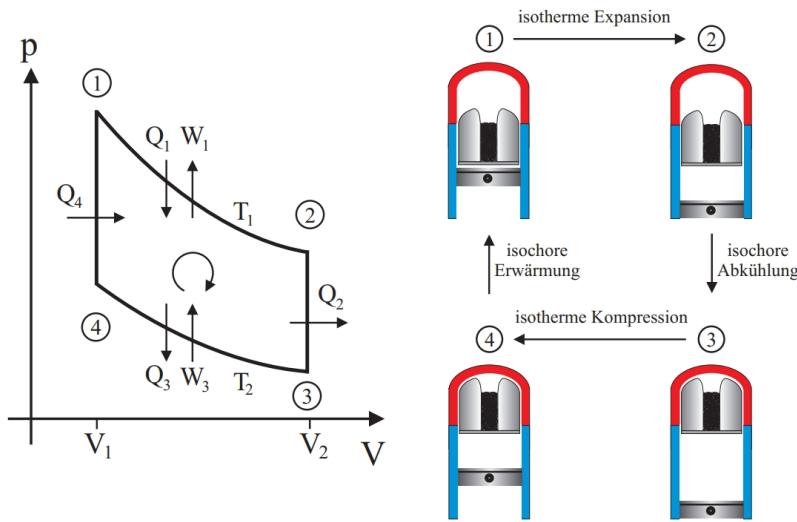


Abbildung 5: pV-Diagramm des idealen Stirling Prozess und korrespondierende Stellungen des Arbeits- und Verdrängungskolbens

Um die zugeführte Wärme zu berechnen wird der Regenerator ins Betracht gezogen.

1.4.2 Funktion des Regenerators

Der Regenerator ist eine entscheidende Komponente im Heißluftmotor, die die Effizienz steigert. Der Verdrängungskolben sorgt dafür, dass das Arbeitsgas zwischen heißem und gekühltem Bereich bewegt wird. Während dieser Bewegung ermöglicht der Regenerator einen schnellen Wärmeaustausch, sodass die von außen zugeführte Wärme dem System nicht völlig verloren geht. Wenn der Kolben sich nach oben bewegt, strömt heiße Luft durch den Regenerator und gibt Wärme an Kupferwolle ab. Diese Wärme wird im Regenerator gespeichert und kann später wiederverwendet werden, wenn das Gas auf dem Rückweg in den heißen Bereich ist. Dadurch geht weniger Wärme an die Umgebung verloren, was den Wirkungsgrad des Stirling-Motors maximiert. Ein idealer Regenerator führt zu einem Wirkungsgrad, der dem theoretischen Maximum für periodisch arbeitende Wärmekraftmaschinen entspricht.

1.4.3 Wirkungsgrad von dem Stirlingmotor

Betrachten wir zunächst einen Heißluftmotor ohne Regenerator und berechnen zur Bestimmung des thermischen Wirkungsgrads die aufgenommene Wärmemenge Q^+ .

Während des Takt 2 → 3 wird das Arbeitsgas isochor abgekühlt, und die dabei freigesetzte Wärme wird dem Kühlsystem zugeführt. Ohne einen Regenerator geht diese Wärme verloren. Folglich muss im Zyklus 4 → 1 erneut Wärme aus dem Heizsystem entnommen werden, um die benötigte Wärme zur isochoren Erwärmung bereit-

zustellen. Während des Prozesses heben sich Q_2 und Q_3 aus. Die aufgenommene Wärmemenge Q^+ setzt sich somit nur aus zwei Beiträgen zusammen:

$$Q^+ = Q_1 + Q_4 = \nu RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} + c_v \nu (T_1 - T_2) \quad (23)$$

Mit Gl.(22), (11) können wir den Wirkungsgrad berechnen:

$$\eta_{th} = \frac{W_N}{Q^+} = \frac{\ln \frac{V_2}{V_1} (1 - \frac{T_2}{T_1})}{\ln \frac{V_2}{V_1} + \frac{c_v}{R} (1 - \frac{T_2}{T_1})} \quad (24)$$

Der Wirkungsgrad hängt von der Temperaturdifferenz, dem Kompressionsverhältnis und der Art des verwendeten Gases ab. Nach Äquipartitionsprinzip:

$$\frac{c_v}{R} = \frac{1}{2} f, \text{ wobei } f \text{ der Freiheitsgrade des Gases entspricht.} \quad (25)$$

Um einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen, werden industriell häufig die einatomigen Edelgase als Arbeitsmedium verwendet, die nur drei Freiheitsgrade besitzen und daher die geringsten molaren Wärmekapazitäten c_v haben.

Mit einem idealen Regenerator können wir die gesamte Abwärme bei der isochoren Abkühlung $2 \rightarrow 3$ speichern und bei der isochoren Erwärmung im Zyklus $4 \rightarrow 1$ dem Arbeitsgas wieder zuführen. Die einzige äußere Wärmezufuhr erfolgt dann nur bei der isothermen Expansion:

$$Q^+ = Q_1 = \nu RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (26)$$

$$\eta_{th}^R = \frac{W_N}{Q^+} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \eta_{th,carnot} \quad (27)$$

Der Stirling-Prozess hat somit denselben Wirkungsgrad wie der Carnot-Prozess erreicht, den maximal möglichen Wirkungsgrad, den eine periodisch arbeitende Wärmekraftmaschine überhaupt erreichen kann!

Um den Wirkungsgrad experimentell zu bestimmen messen wir zuerst die elektrische Energie Q_{el} als die zugeführte Wärme Q^+ , die pro Motorzyklus von außen zugeführte und aus der elektrischen Heizleistung und der Motordrehzahl f bestimmt wird:

$$Q_{el} = \frac{P_{el}}{f} = \frac{IU}{f} \quad (28)$$

Bei der Beheizung des Motors treten bereits Verluste auf. Bezeichnen wir diese Verluste als Q_v , wird nur die Differenz $Q_{el} - Q_v$ in den Kreisprozess eingekoppelt. Ein

Teil dieser Wärme wird in mechanische Energie W_{mech} umgewandelt, während ein beträchtlicher Anteil als ungenutzte Abwärme Q_{ab} im Kühlsystem verbleibt und Reibungsverluste Q_R durch Kolben und Lager auftreten. Die Energiebilanz lautet dann:

$$Q_{el} = Q_v + W_{\text{mech}} + Q_{ab} + Q_R = Q_V + W_{\text{mech}} + Q_{ab} \quad (29)$$

wobei das gesamte Verlust als $Q_V = Q_v + Q_R = Q_{el} - Q_{ab} - W_{\text{mech}}$ bezeichnet.

Die an das Kuhlwasser abgegebene Wärme Q_{ab} wird mit Hilfe der kalorischen Zustandsgleichung bestimmt:

$$Q_{ab} = \frac{c_W \rho_W \Delta T \dot{V}}{f} \quad (30)$$

wobei c_W , ρ_W , ΔT , \dot{V} hier als Wärmekapazität und Dichte des Wassers, Temperaturdifferenz und Durchfließmenge des Wassers bezeichnet werden.

Wir berechnen die mechanische Arbeit entweder durch die Fläche des pV-Diagramms (W_{pV}) oder durch die Drehmomentmessung mit Hilfe eines Pronyschen Bremszaums. Um das Drehmoment zu messen, wird der Bremszaum in einen Kraftmesser gehängt und so ausgerichtet, dass der Bremszaum waagerecht ist und der Kraftmesser senkrecht dazu hängt. In diesem Fall ergibt sich das Drehmoment D :

$$D = lF \quad (31)$$

l ist die Länge des Bremszaums von der Motorachse bis zur Aufhängung des Kraftmessers und F ist die Kraft. Die pro Motorzyklus abgegebene Arbeit W_D bzw. die Leistung P_D gilt somit:

$$W_D = 2\pi D \quad P_D = W_D f \quad (32)$$

1.5 Wärmepumpe und Kältemaschine

Wird das Schwungrad des Motors von außen angetrieben, so kann dieser auch als Kältemaschine oder Wärmepumpe betrieben werden, und der Kreisprozess läuft in umgekehrter Richtung. Für Kältemaschine wird dem zu kühlenden Bereich die Wärmemenge Q_2 entzogen, und dem wärmeren Reservoir wird die Wärmemenge $Q_1 = W_M + Q_2$ zugeführt, wobei W_M die von außen zugeführte mechanische Arbeit ist.

Der Wirkungsgrad einer Kältemaschine lässt sich durch das Verhältnis der der kalten Seite entzogenen Wärmemenge Q_2 zur zugeführten mechanischen Arbeit W definieren:

$$\eta = \frac{Q_2}{W_M} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \quad (33)$$

Und der Wirkungsgrad von Wärmepumpe definieren wir als:

$$\epsilon = \frac{Q_1}{W_M} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} > 1 \quad (34)$$

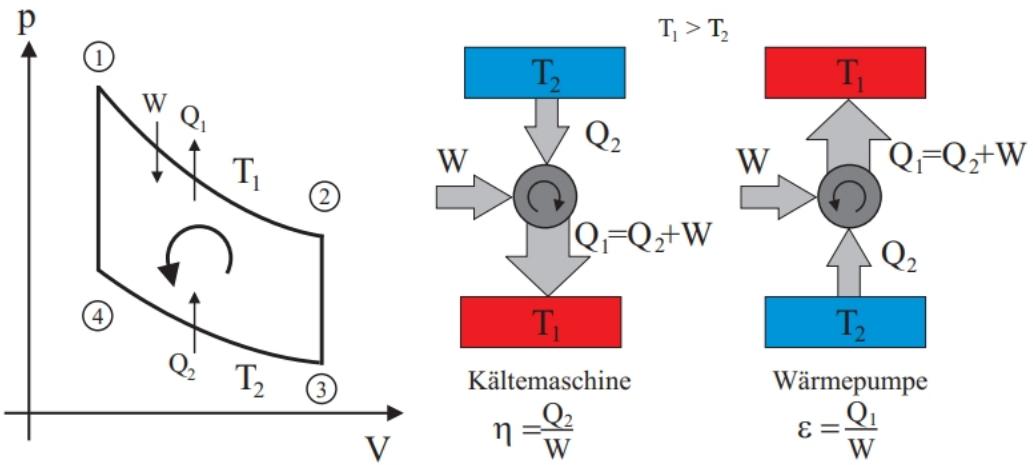


Abbildung 6: pV-Diagramm der Kältemaschine oder Wärmepumpe (links herum durchlaufen) und Energiebilanz

Die dem oberen Teil des Zylinders entzogene Wärme Q_2 wird durch eine Kompressionsmessung bestimmt, indem wir mit einer Heizwendel die Temperatur konstant halten:

$$Q_2 = W_H = \frac{U_H I_H}{f} \quad (35)$$

wobei U_H und I_H die Heizspannung und den Heizstrom bezeichnen und f für die Motordrehzahl steht. Die an das Kühlwasser abgegebene Wärme Q_1 ergibt sich auch wie Gl.(30):

$$Q_1 = \frac{c_W \rho_W \Delta T \dot{V}}{f} \quad (36)$$

Die pro Umdrehung übertragene mechanische Arbeit kann durch die Messung des Stroms und der Spannung des elektrischen Antriebsmotors ermittelt werden:

$$W_M = \frac{U_M I_M}{f} \quad (37)$$

2 Versuchsdurchführung

2.1 Versuchsaufbau, Versuchsdurchführung und Messprotokoll

Siehe folgende Seiten.

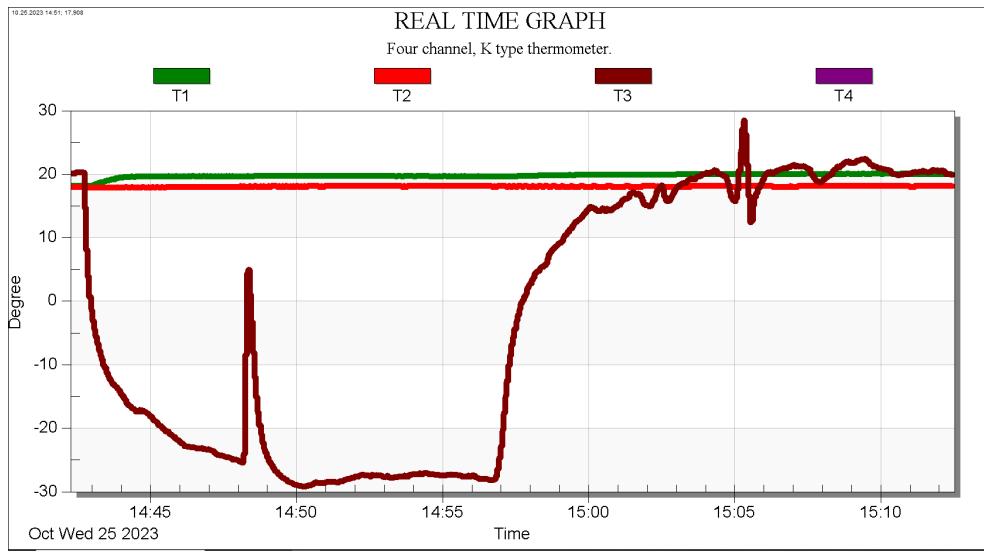


Abbildung 7: Kompensationsmessung der Kälteleistung: Temperaturverlauf auf Thermolink

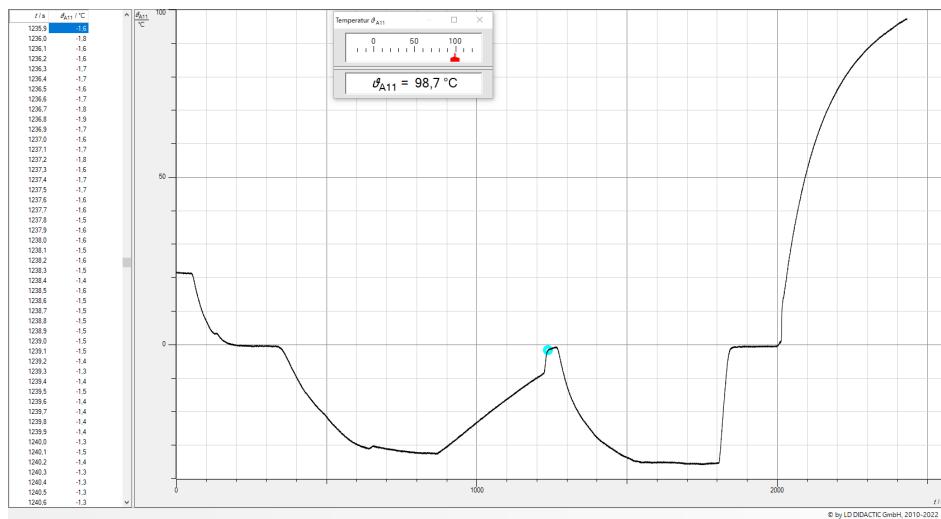


Abbildung 8: Betrieb des Motors als Kältemaschine und Wärmepumpe: Temperaturverlauf auf CASSY Lab

Messgeräte:

- Heißluftmotor
- Regelbares Netzteil
- Sensorsystem „Cassy“ mit Druck-, Temperatur- und Wegsensoren
- PC mit Drucker
- Durchflussmengen-Messgerät des Kühlwassers
- Dreikant-Thermometer
- Multimeter
- Elektrischer Antriebsmotor mit regelbarem Netzteil

1. Betrieb des Heißluftmotors als Kältemaschine und quantitative Bestimmung der Kälteleistung

Es wird der Heißluftmotor als Kältemaschine konfiguriert.

Der Heizkopf wird durch den Teflon-Zylinderkopf mit einem eingebauten Thermoelement ersetzt. Der Motor wird bei maximaler Drehzahl im Uhrzeigersinn gestartet. Nach etwas Zeit wird der Heizwendel eingeschaltet, um wieder auf die Ursprungstemperatur zu heizen.

$$\text{Heizstrom } I_H = (5.55 \pm 0.25) \text{ A}$$

$$\text{Motordrehzahl } f = (316.0 \pm 0.5) \text{ rpm}$$

$$\text{Heizspannung } U_H = (5.73 \pm 0.03) \text{ V}$$

$$\text{Durchfluss } V = (253.2 \pm 2.5) \text{ ml/min}$$

Temperaturdifferenz von Zu- und Ablauf des Kühlwassers:

$$\Delta T = 20.0^\circ\text{C} - 18.1^\circ\text{C} = 1.9^\circ\text{C} \quad \Delta(\Delta T) = \pm 0.3^\circ\text{C}$$

Nun werden die Temperaturen von Zu- und Ablauf sowie die Temperatur im Motor gegen die Zeit aufgetragen.

2. Betrieb als Kältemaschine und Wärmequelle

Es wird nun der Heizkopf durch ein mit 1 ml Wasser gefülltes Reagenzglas ersetzt und die Gefrierzeit gemessen. Ein Thermometer wird auch zentralisch hineingesteckt.

Begibt die Aufzeichnung von T des Wassers im Reagenzglas und des Kühlwassers zunächst ohne den Motor läuft.



$$\text{Motor : } I_M = (2.20 \pm 0.10) \text{ A}$$

$$U_m = (24.00 \pm 0.05) \text{ V}$$

$$\dot{V} = (254.5 \pm 2.5) \text{ ml/min} \quad f = (313.6 \pm 1.5) \text{ rpm}$$

$$T_{Zufluss} = (17.6 \pm 0.1)^\circ\text{C} \quad T_{Abluss} = (19.3 \pm 0.1)^\circ\text{C} \quad \Delta T = (1.7 \pm 0.1)^\circ\text{C}$$

Der Motor als Kältemaschine läuft ~~ab~~ mindest. 10 - 15 min bis die Temperatur deutlich unter 0°C gefallen ist.

$$\text{Die minimal temperature: } (-35.3 \pm 0.3)^\circ\text{C}$$

Um den Motor als Wärme pumpe zu verwenden, wird die Drehrichtung geändert. Es wird in die Wärme pumpe konfiguration umgeschaltet, und wieder die Wassertemperatur zeitlich aufgetragen.

3. Betrieb als Wärmekraftmaschine (keramik-Zylinderkopf)

- Das Reagenzglas wird durch den Heizkupf ausgetauscht, der Heizwandler (elektrisch) wird eingeschaltet, und der Motor startet. ~~Und~~ der Elektromotor wird demontiert. Die Multimeter werden benutzt, um die elektrische Heizleistung zu bestimmen ($P_{el} = U \cdot I$), damit die von außen zugeführte Wärme berechnet werden kann.

$$U = (14.74 \pm 0.03) \text{ V}$$

$$I = \frac{13.25}{12.65 \pm 0.03} \text{ A}$$

$$\dot{V} = (254.5 \pm 1.5) \text{ ml/min}$$

$$T_{Zufluss} = (17.4 \pm 0.1)^\circ\text{C}$$

$$T_{Abluss} = (21.3 \pm 0.1)^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = (3.90 \pm 0.15)^\circ\text{C}$$

Es werden Druck und Volumenmessungen am Druck vorgenommen und fassen die beiden in einem PV-Diagramm zusammen.

	Motorzahl ^{dreh}	Fläche des PV-Diagramm
1	281.5	19670 hPa · cm ³
2	290.3	20150 hPa · cm ³
3	295.4	19810 hPa cm ³



- Wo, die real abgegebene Arbeit berechnen: Es wird nun ein pronyischer Bremszaum genutzt, der sich aus zwei hölzernen Brembacken zusammensetzt, die an der Motorwelle montiert werden. Durch zwei Schrauben lässt sich die Bremskraft variieren. Man lässt den Motor einige Zeit einlaufen und korrigiert die waagrechte Lage des Prony Zaums nach

Tabelle 1: Messparameter und -daten mit dem Prony-Zaum

Nr.	$F[N]$	$\Delta F[N]$	$I[A]$	$U[V]$	$f[\text{rpm}]$	$\alpha f[\text{rpm}]$
1	0.8	0.03	13.25	14.75	237.2	2.5
2	0.6	0.02	12.95	14.78	270.0	4
3	0.4	0.02	13.25	14.75	302.2	3
4	0.2	0.01	12.95	14.77	322.0	1.5

Nr.	$A_1[\text{hPa} \cdot \text{cm}^3]$	$A_2[\text{hPa} \cdot \text{cm}^3]$	$A_3[\text{hPa} \cdot \text{cm}^3]$
1	27690	27640	27810
2	26180	26540	26610
3	24730	24260	23870
4	22160	22390	22240

A_i : Fläche des PV-Diagramms

J.M.
25.10.23



扫描全能王 创建

3 Auswertung

Die im Experiment gemessenen Daten sollen ausgewertet und ermittelt werden. Zur Messung des Stroms sollen wir beachten, dass zwischen dem Amperemeter und dem Netzteil ein Stromwandler geschaltet ist, weshalb der tatsächliche fließende Strom um einen Faktor fünf höher als das Amperemeter anzeigt.

Die Zufuhr und Abfuhr des Kühlwassers erfolgt durch ein koaxiales Rohr in der Pleuelstange. Diese zusätzliche Kühlung erhöht die Effizienz des Wärmeaustauschs mit dem kühlen Wärmereservoir.

3.1 Betrieb des Heißluftmotors als Kältemaschine und quantitative Bestimmung der Kälteleistung

Der Heißluftmotor ist mit einem abnehmbaren Zylinderkopf ausgestattet. Bei Verwendung als Kältemaschine kann der beheizte Kopf durch den Teflon-Zylinderkopf mit der Heizwendel auf den Motor benutzt werden, in dem ein Thermoelement eingebaut ist, mit dem die Temperatur im Zylinder gemessen werden kann.

Die abgezogene Wärme Q_2 wird nun mit der Kompensationsmessung durchgeführt. Wie Abbildung 7 versuchen wir die Temperatur wieder auf den ursprünglichen Wert zurückzusetzen, indem wir langsam die Heizleistung erhöhen, nach jeder Leistungseinstellung abwarten bis sich die Temperatur wieder stabilisiert hat. Dabei beträgt der Heizstrom $I_H = (5,55 \pm 0,25) A$, Heizspannung $U_H = (5,73 \pm 0,03) V$, die Motordrehzahl $f = (316,0 \pm 0,5) rpm$, der Durchfluss des Kühlwassers $\dot{V} = (253,2 \pm 2,5) mL/min$, und die Temperaturdifferenz von Zu- und Ablauf $\Delta T = (1,9 \pm 0,3)^\circ C$.

Mit den Literaturwerten von Wärmekapazität $c_W = 4180 J/kg \cdot K$ sowie Dichte des Wassers $\rho_W = 1000 kg/m^3$ und Gleichungen (35), (36) können wir die dem oberen Teil des Zylinders entzogene Wärme Q_2 und die an das Kühlwasser abgegebene Wärme Q_1 berechnen:

$$Q_2 = \frac{U_H I_H}{f} \approx 6,04 J \quad (38)$$

$$Q_1 = \frac{c_W \rho_W \Delta T \dot{V}}{f} \approx 6,36 J \quad (39)$$

Außerdem berechnen wir die Fehler von den beiden Wärmen mit der Gauss-Fehlerfortpflanzung:

$$\Delta Q_1 = c_W \rho_W \sqrt{\left(\frac{\dot{V} \Delta(\Delta T)}{f}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T \Delta \dot{V}}{f}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T \dot{V} \Delta f}{f^2}\right)^2} \approx 1,0 \text{ J} \quad (40)$$

$$\Delta Q_2 = \sqrt{\left(\frac{U_H \Delta I_H}{f}\right)^2 + \left(\frac{I_H \Delta U_H}{f}\right)^2 + \left(\frac{U_H I_h \Delta f}{f^2}\right)^2} \approx 0,3 \text{ J} \quad (41)$$

Somit sind die Wärme:

$$\Rightarrow \underline{\underline{Q_1 = (6,4 \pm 1,0) \text{ J}}} \quad \underline{\underline{Q_2 = (6,0 \pm 0,3) \text{ J}}} \quad (42)$$

(43)

Die Kälteleistung sowie ihre Fehler werden durch Heizstrom- und Spannung bestimmt:

$$P_K = P_H = I_H U_H = (31,8 \pm 1,4) \text{ W} \quad (44)$$

wobei der Fehler $\Delta P_H = \sqrt{(I_H \Delta U_H)^2 + (U_H \Delta I_H)^2}$ gegeben ist.

Der Zylinderkopf wird nun mit einem eingebauten Reagenzglas, das in den Motor hineinragt, ausgetauscht. Das Reagenzglas wird mit Wasser befüllt, und die Wassertemperatur wird mit einem zusätzlichen Thermometer gemessen. Die mechanische Arbeit, die pro Umdrehung übertragen wird, kann durch die Messung des Stroms und der Spannung des elektrischen Antriebsmotors ermittelt werden:

$$W_M = \frac{U_M I_M}{f} = 10,10 \text{ J} \quad (45)$$

$$\Delta W_M = \sqrt{\left(\frac{I_M \Delta U_M}{f}\right)^2 + \left(\frac{U_M \Delta I_M}{f}\right)^2 + \left(\frac{I_M U_M}{f^2}\right)^2} \approx 1,99 \text{ J} \quad (46)$$

$$\Rightarrow W_M = (10,10 \pm 1,99) \text{ J} \quad (47)$$

Es scheint, dass Q_1 viel kleiner als $Q_2 + W_M$ ist. Q'_1 wird nun mit quadratischer Addition der Relativfehler ermittelt als:

$$Q'_1 = Q_2 + W_M = (16,1 \pm 2,0) \text{ J} \quad (48)$$

Sowie beträgt die Fehlerabweichung:

$$\frac{|Q'_1 - Q_1|}{\sqrt{Q'^2_1 + Q^2_1}} \approx 4,34 \quad (49)$$

Mit einer Abweichung von $4,34\sigma > 3\sigma$ ist der Fehler schon signifikant. Da der Demonstrationsmotor aus dem Glas zusammengesetzt wird treten sehr große Verluste bedingt durch Wärmeabstrahlung und Wärmeleitung auf.

Durch Gl.(33) lautet der Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{Q_2}{W_M} = \underline{\underline{(0,59 \pm 0,2)}}$$
 (50)

$$\Delta\eta = \sqrt{\left(\frac{\Delta Q_2}{W_M}\right)^2 + \left(\frac{Q_2 \Delta W_M}{W_M^2}\right)^2} \approx 0,2$$
 (51)

3.2 Betrieb als Kältemaschine und Wärmepumpe

Wir lassen den Motor nun als Kältemaschine mindestens 10 bis 15 Minuten laufen, und betrachten den in Abbildung 8 dargestellten Temperaturverlauf von 1 ml Wasser im Reagenzglas, ist ein Absinken des Wertes bis auf etwas unter 0 °C zu erkennen. Diese Temperatur bleibt erhalten, bis das Wasser vollständig gefroren ist dann sinkt sie weiter bis die Temperatur deutlich unter 0°C gefallen ist und sich nicht mehr ändert ($-35,3^\circ\text{C}$). An diesem Punkt ist ein Gleichgewicht der Kälteleistung und der Wärmezufuhr von außen erreicht, weshalb keine weitere Abkühlung stattfindet.

Mit Thermolink wurden die Temperaturen des Kühlwassers gemessen. Die 2 Werte bei Zulauf und Ablauf sind ganz stabil, was gleich bedeutet, dass die entzogene Wärme konstant bleiben muss. Um die Kälteleistung zu berechnen, betrachten wir den konstanten Verlauf um 0 °C. Bis das Wasser gefriert ist muss die latente Wärme des Wassers überwinden werden. Mit der spezifischen Schmelzwärme des Wassers $\lambda_{\text{H}_2\text{O}} = 335 \text{ J/g}$ sowie der bis zum Gefrieren abgelaufenen Zeit $t = (125 \pm 10) \text{ s}$ lässt sich die Kälteleistung berechnen als:

$$P'_K = \frac{Q}{t} = \frac{\rho_W V_W \lambda_{\text{H}_2\text{O}}}{t} \approx 2,68 \text{ W}$$
 (52)

Der ergibt sich wieder durch die Fehlerfortpflanzung:

$$\Delta P'_K = \sqrt{\left(\frac{\rho_W \Delta V_W \lambda_{\text{H}_2\text{O}}}{t}\right)^2 + \left(\frac{\rho_W V_W \lambda_{\text{H}_2\text{O}} \Delta t}{t^2}\right)^2} \approx 1,36 \text{ W}$$
 (53)

$$\Rightarrow P'_K = (2,68 \pm 1,36) \text{ W}$$
 (54)

Die Abweichung zwischen P'_K und P_K ist:

$$\frac{|P_K - P'_K|}{\sqrt{(\Delta P_K)^2 + (\Delta P'_K)^2}} \approx 14,9$$
 (55)

Mit einer Abweichung von $14,9\sigma$ ist der Fehler sehr signifikant, selbst wenn wir den Fehler von P'_K schon überschätzt. Der Fehler von P'_K beträgt mehr als die Hälfte des eigenen Wertes, was offensichtlich nicht eine vernünftige Fehlerabschätzung ist.

Betrachten wir den Betrieb als Wärmepumpe in Abbildung 8, so lässt sich feststellen, dass die Temperatur anfänglich allmählich fast linear steigt danach folgt ein konstanter Abschnitt, in dem dem Wasser zusätzliche Wärme zugeführt werden muss, um die latente Wärme zu überwinden. Nach dem Auftauen steigt die Temperatur zunächst linear an. Bei etwa 14°C tritt jedoch eine bemerkenswerte Veränderung auf: Ab diesem Punkt erhöht sich die Temperatur exponentiell bis auf etwa 98°C , und das Wasser beginnt zu sieden. Der Knick entsteht, da an diesem Punkt die Umgebungstemperatur genau gleich die Temperatur in der Maschine ist, für das weitere Aufheizen muss daher eine gewisse Energiemenge an die Umgebung abgegeben werden.

Im Vergleich dazu verlief der Aufheizvorgang schneller als der Abkühlvorgang. Die Anfangstemperatur des Abkühlvorgangs wurde schon nach 620 Sekunden erreicht, während das Abkühlen zu Beginn etwa 960 Sekunden dauerte. Der Grund liegt daran, dass das Heizgerät eine höhere Leistung hat und daher mehr Wärmeenergie pro Zeiteinheit abgibt. Dieser Unterschied lässt sich auch wahrscheinlich auf die Wechselwirkung mit der Umgebung zurückführen. Beim Aufheizen unterstützt die relative Wärme der Umgebung den Prozess, während sie beim Abkühlen dem Prozess entgegenwirkt. Zusätzlich muss die überschüssige Wärme durch die Kältemaschine an die Umgebung abgeführt werden.

3.3 Betrieb als Wärmekraftmaschine

Beim Betrieb als Wärmekraftmaschine wird auf den Zylinder ein elektrisch beheizbarer Kopf montiert, der den oberen Bereich des Motors heizt. Die Multimeter wurde eingesetzt, um die elektrische Heizleistung und die pro Motorzyklus von außen zugeführte Wärme sowie ihre Fehler zu bestimmen:

$$Q_{el} = \frac{P_{el}}{f} = \frac{UI}{f} \quad (56)$$

$$\Delta Q_{el} = \sqrt{\left(\frac{U\Delta I}{f}\right)^2 + \left(\frac{I\Delta U}{f}\right)^2 + \left(\frac{UI\Delta f}{f^2}\right)^2} \quad (57)$$

Aus Messprotokoll berechnen wir den Mittelwert der Drehzahl und den mittleren Fehler des Mittelwerts als Fehler: $f = (289,07 \pm 1,06) \text{ rpm}$. Somit gilt die zugeführte Wärme:

$$\Rightarrow \underline{\underline{Q_{el} = (40,54 \pm 9,04) J}} \quad (58)$$

Die elektrische Leistung beträgt:

$$P_{el} = Q_{el} \cdot f = \underline{\underline{(195, 32 \pm 43, 56) W}} \quad (59)$$

wobei der Fehler $\Delta P_{el} = \sqrt{(\Delta Q_{el}f)^2 + (Q_{el}\Delta f)^2}$ ist.

Die abgegebene Wärme Q_{ab} an das Kühlwasser wird mithilfe der kalorischen Zustandsgleichung, ähnlich wie in Aufgabe 1, berechnet:

$$Q_{ab} = \frac{c_W \rho_W \Delta T \dot{V}}{f} \quad (60)$$

$$\Delta Q_{ab} = \sqrt{\left(\frac{c_W \rho_W \Delta(\Delta T) \dot{V}}{f}\right)^2 + \left(\frac{c_W \rho_W \Delta \dot{V} \Delta T}{f}\right)^2 * \left(\frac{c_W \rho_W \Delta T \dot{V} \Delta f}{f^2}\right)^2} \quad (61)$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{Q_{ab} = (14, 35 \pm 0, 77) J}} \quad (62)$$

Die Leistung der abgegebenen Wärme beträgt:

$$P_{ab} = Q_{ab} \cdot f = \underline{\underline{(68, 99 \pm 3, 71) W}} \quad (63)$$

wobei der Fehler $\Delta P_{ab} = \sqrt{(\Delta Q_{ab}f)^2 + (Q_{ab}\Delta f)^2}$ ist.

Die verrichtete Arbeit entspricht dem Flächeninhalt des Kreisprozesses im pV-Diagramm. Wir berechnen den Mittelwert der Fläche und nutzen ihren mittleren Fehler des Mittelwerts als Fehler:

$$W_{pV} = (19877 \pm 143) hPa \cdot cm^3 \approx \underline{\underline{Q_{pV} = (1, 99 \pm 0, 01) J}} \quad (64)$$

Die Leistung der mechanischen Arbeit beträgt:

$$P_{pV} = Q_{pV} \cdot f = \underline{\underline{(9, 57 \pm 0, 08) W}} \quad (65)$$

wobei der Fehler $\Delta P_{pV} = \sqrt{(\Delta Q_{pV}f)^2 + (Q_{pV}\Delta f)^2}$ ist.

Der Wirkungsgrad ergibt sich nun aus dem Verhältnis von der mechanischen Arbeit und der Differenz zwischen Q_{el} und Q_{ab} , da nur dieses Wärmesteil ins System fließt:

$$\eta_{th} = \frac{W_{pV}}{Q_{el}} \quad \Delta \eta_{th} = \sqrt{\left(\frac{\Delta W_{pV}}{Q_{el}}\right)^2 + \left(\frac{W_{pV} \Delta Q_{el}}{Q_{el}^2}\right)^2} \quad (66)$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{\eta_{th} = (0, 0490 \pm 0, 0115)}}$$

Um den Motorverlust Q_V zu berechnen, betrachtet man den idealen Stirlingprozess, für den gilt:

$$Q_V = Q_{el} - Q_{ab} - W_{pV} \quad (68)$$

$$\Delta Q_V = \sqrt{(\Delta W_{pV})^2 + (\Delta Q_{ab})^2 + (\Delta Q_{el})^2} \quad (69)$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{Q_V = (24, 20 \pm 9, 07) J}} \quad (70)$$

Es ergibt sich für alle hergeleiteten Werte die Tabelle:

Tabelle 1: Errechnete Größen für die Wärmekraftmaschine

f / [rpm]	P_{el} / [W]	Q_{el} / [J]	P_{ab} / [W]	Q_{ab} / [J]
$289,07 \pm 1,06$	$195,32 \pm 43,56$	$40,54 \pm 9,04$	$68,99 \pm 3,71$	$14,35 \pm 0,77$

P_{pV} / [W]	Q_{pV} / [J]	η_{th}
$9,57 \pm 0,08$	$1,99 \pm 0,01$	$0,0490 \pm 0,0115$

Anschließend wird ein Bremszaum der Länge 25 cm an der Achse angelegt, und wir messen dann die real abgegebene Arbeit W_D durch eine Drehmomentmessung. Wir protokollieren die Drehzahl f, die elektrische Leistung und die Fläche des pV-Diagramms und messen zusätzlich die Bremskraft. Für jede Bremskraft haben wir die Mittelwerte von Drehzahl sowie pV-Diagramm Fläche bestimmt und ihre mittleren Fehler des Mittelwertes als Fehler betrachtet:

Tabelle 2: Parameter des Heißluftmotors unter verschiedener Bremskraft

Nr.	F[N]	ΔF [N]	I[A]	U[V]	f[rpm]	Δf [rpm]	A[hPa · cm ³]	ΔA [hPa · cm ³]
1	0,8	0,03	13,25	14,76	237,2	2,5	27713	50
2	0,6	0,02	12,95	14,78	270,0	4	26443	133
3	0,4	0,02	13,25	14,75	302,2	3	24287	248
4	0,2	0,01	12,95	14,77	322,0	1,5	22263	67

Mit den Gl.(31), (32) berechnen wir jeweils das Drehmoment der Kraft D und die Arbeit durch einen Motorzyklus W_D :

$$D = lF \quad W_D = 2\pi D = 2\pi lF \quad (71)$$

Wir nehmen dazu, dass die Länge des Bremszaums unverändert bleibt, daher hängt der Fehler nur von der Kraft ab:

$$\Delta W_D = 2\pi l \Delta F \quad (72)$$

Es lassen sich so der effektive Wirkungsgrad η_{eff} sowie sein Fehler bestimmen:

$$\eta_{eff} = \frac{W_D}{Q_{el}} \quad \Delta\eta_{eff} = \sqrt{\left(\frac{\Delta W_D}{Q_{el}}\right)^2 + \left(\frac{W_D \Delta Q_{el}}{Q_{el}^2}\right)^2} \quad (73)$$

Die mechanische Arbeit W_{pV} und der Wirkungsgrad η_{th} werden analog zur Leerlaufmessung berechnet. Die ausgerechneten Daten sind in der folgenden Tabelle enthalten:

Tabelle 3: Wirkungsgrad sowie Arbeit

Kraft [N]	$0,8 \pm 0,03$	$0,6 \pm 0,02$	$0,4 \pm 0,02$	$0,2 \pm 0,01$
W_D [J]	$1,257 \pm 0,047$	$0,943 \pm 0,031$	$0,628 \pm 0,031$	$0,314 \pm 0,016$
η_{eff}	$0,031 \pm 0,007$	$0,023 \pm 0,005$	$0,016 \pm 0,004$	$0,008 \pm 0,002$
W_{pV} [J]	$2,771 \pm 0,005$	$2,644 \pm 0,013$	$2,429 \pm 0,025$	$2,226 \pm 0,007$
η_{th}	$0,068 \pm 0,015$	$0,065 \pm 0,015$	$0,060 \pm 0,013$	$0,055 \pm 0,012$

Im Folgenden werden Diagramme für den thermischen Wirkungsgrad (η_{th}) und den effektiven Wirkungsgrad (η_{eff}) in Abhängigkeit von der Frequenz (f) dargestellt. Dies führt zu den folgenden Grafiken:

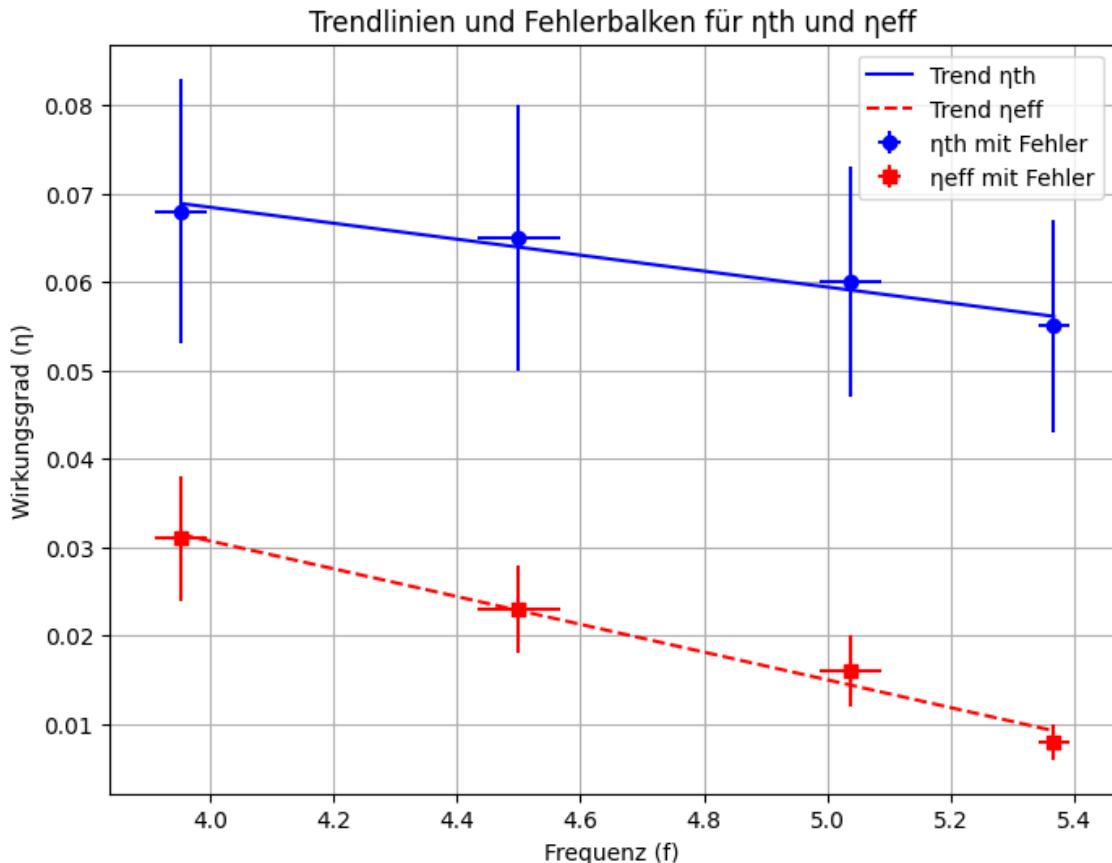


Abbildung 9: η_{th} und η_{eff} als Funktion der Frequenz

Mit steigender Drehzahl des Rades haben wir beobachtet, dass der Wirkungsgrad des Geräts abnimmt. Dies geschieht aufgrund der positiven Korrelation zwischen der Geschwindigkeit und dem Widerstand. Mit zunehmender Geschwindigkeit steigt die Frequenz, was wiederum den Widerstand erhöht. Dies führt dazu, dass weniger Wärmeenergie im System in mechanische Arbeit umgewandelt wird.

Gleichzeitig führt die Beschleunigung der Kolbenbewegung zu einem unzureichenden Wärmeaustausch im Gas, was zu einer Verengung des pV-Diagramms führt, da die Temperaturdifferenz ($|T_1 - T_2|$) kleiner wird. Aus Gl.(24) wissen wir dann der Wirkungsgrad sich verringert.

Außerdem ist der effektive Wirkungsgrad deutlich kleiner als der von pV-Diagramm bestimmte Wirkungsgrad. Der Grund liegt daran, dass es eine erhebliche mechanische Reibung zwischen dem Federprüfstand und anderen Geräteanschlüssen gibt, wodurch die gemessene Bremskraft deutlich geringer ausfällt als der tatsächliche Widerstand, den der Stirling-Motor erfährt.

Da wir höchstwahrscheinlich den Bremszaum nicht in der Horizontalen gehalten hatten, wird eine niedere Hooke'sche Kraft benötigt, um den Motor zu bremsen, da der Kraftarm bei der Bremskraft schon kleiner wird.

4 Zusammenfassung und Diskussion

In diesem Experiment haben wir zuerst die Kälteleistung mithilfe einer Kompensationsmessung ermittelt, indem wir den Heizstrom und die Heizspannung miteinander verrechnet haben. Wir haben dann anhand einer Energiebilanz den Wirkungsgrad berechnet. Im zweiten Teil haben wir auch den Wirkungsgrad der Kältemaschine sowie ihre Kälteleistung ausgewertet, indem wir die latente Wärme des Wassers durch eine Zeitmessung beim Gefrieren berücksichtigt haben. Zum Schluss wurde eine Leerlaufmessung am Motor vorgenommen, danach eine Messung mit angelegtem Bremszaum. Die Werte wie der Durchfluss oder die Zu- und Ablauftemperatur wurden gemessen, um daraus verschiedene Leistungen und Energien zu bestimmen, auch wurde der Motorverlust berechnet, um den Wirkungsgrad aus pV-Diagramm sowie den effektiven Wirkungsgrad zu bestimmen.

Mit 59% ist Der Wirkungsgrad des Heißluftmotors als Kältemaschine an sich sehr hoch, erwartungsgemäß wird allerdings nicht der maximal mögliche Carnot-Wirkungsgrad erreicht. Dies wird zum einen durch die aufgrund der nicht idealen Isolation von außen zugeführte Wärme verhindert, was schon aus $Q_1 < Q_2 + W_M$ erkennbar ist, zum anderen am Verlust mechanischer Arbeit durch Reibung der Motorkomponenten. Die Genauigkeit der Methode ließe sich somit beispielsweise durch bessere thermische Isolation des Aufbaus verbessern. Es ist außerdem wichtig zu beachten, dass auch der Elektromotor einen Wirkungsgrad kleiner als Eins besitzt. Dabei ist zu beachten, dass

auch der Elektromotor einen Wirkungsgrad kleiner als Eins besitzt, Dadurch können wir die Kühlung mit weniger thermischer Leistung ausgleichen und laut Gl.(45) sollte W_M tatsächlich größer als die Messung sein, was wiederum zu einem kleineren Wirkungsgrad führt.

Bei der Herleitung der Wirkungsgradformeln haben wir die Annahme getroffen, dass die Luftmoleküle sich wie ideale Gase verhalten. Es ist jedoch möglich, dass diese Vereinfachung zu einem gewissen Fehler führt, da Luftmoleküle nicht als ideale Gase betrachtet werden können, aufgrund ihrer zusammengesetzten Struktur und des nicht vernachlässigbaren molekularen Volumens. Die Verwendung der Van-der-Waals-Gleichung könnte eine genauere Annäherung ermöglichen, da sie die anziehenden und abstoßenden Kräfte zwischen den Gasteilchen und viele weitere Eigenschaften berücksichtigt hat.

Besonders auffällig ist die signifikante Abweichung von $14,9\sigma$ zwischen den im ersten und zweiten Teil berechneten Kälteleistungen. Dies ist auf die unterschiedlichen Methoden der Berechnung zurückzuführen. Im zweiten Teil wurde die Kälteleistung durch die Messung der Gefrierzeit mit latenter Wärme Gleichung ermittelt, wobei es nur zwei Fehlerquellen gibt (Volumen des Wassers und die Zeit). Im Gegensatz dazu wurde im ersten Teil die Heizleistung als Kälteleistung angenommen, wobei mögliche Abweichungen durch Interaktion mit der Umgebung und mechanische Reibung vernachlässigt wurden. Die durch Interaktion mit der Umgebung sowie die mechanische Reibung verlorenen Energie muss auch zusätzlich entzogen werden. Heizspannung, Strom, Motordrehzahl, Durchfließmenge des Wassers, Temperatur Messung... alle führen zu den Abweichungen der Messung und üben somit einen großen Einfluss auf das Endergebnis aus. Basierend auf diesen theoretischen Überlegungen können wir daher feststellen, dass die zweite Methode, die die Schmelzwärme als Grundlage verwendet, genauer angesehen werden kann. Dies liegt daran, dass die erste Methode viele potenzielle Fehlerquellen vernachlässigt, was zu erheblichen Abweichungen von den Ergebnissen der zweiten Methode führen kann.

Im dritten Teil haben wir den Fehler deutlich überschätzt, z.B. für die elektrische Leistung beträgt der Fehler fast ein Viertel von sich selbst. Dies liegt daran, dass bei der Betrachtung der Strom- und Spannungsfehler die Fehler deutlich überschätzt werden und der Strom und die Spannung selbst aber sehr stabil sind, was zu einem immer steigenden Anteil von Fehlern in der Fehlerfortpflanzung führt.

Die berechneten thermischen Wirkungsgrade im dritten Versuchsteil liegen alle unter 7%, und die effektiven Wirkungsgrade sind sogar alle unter 2%. Dies ist plausibel, angesichts der zuvor diskutierten Verluste und Ungenauigkeiten. Diese Verluste können auf mehrere Faktoren zurückgeführt werden, darunter die nicht ideale Isolation, wie bereits erwähnt. Zudem zeigt sich, dass im Motor, wie zu Beginn angemerkt, kein idealer Stirlingprozess stattfindet. Die Realisierung eines idealen Stirling Prozesses ist technisch nicht möglich: Die Arbeits- und Verdränger Kolben sind direkt an die Kurbelwelle gekoppelt und weisen eine annähernd sinusförmige Bewegung auf, was

einen ruhigen und belastungssarmen Betrieb ermöglicht. Allerdings hat dieser kontinuierliche Kurbeltrieb den Nachteil, dass der Kreisprozess nicht in vier diskreten Zustandsänderungen durchlaufen wird, sondern es zu einer Überlappung der einzelnen Takte kommt, was dann zu Reduzierung des Wirkungsgrads führt. Zudem erfordert ein ausreichender Wärmeaustausch mit dem Heiz- und Kühlsystem, dass die Isothermen sehr langsam durchlaufen werden. Dies macht eine kontinuierliche Maschine mit niedriger Drehzahl gar nicht möglich, sonst führt es zu einem unruhigen Betrieb und hohen mechanischen Belastungen.

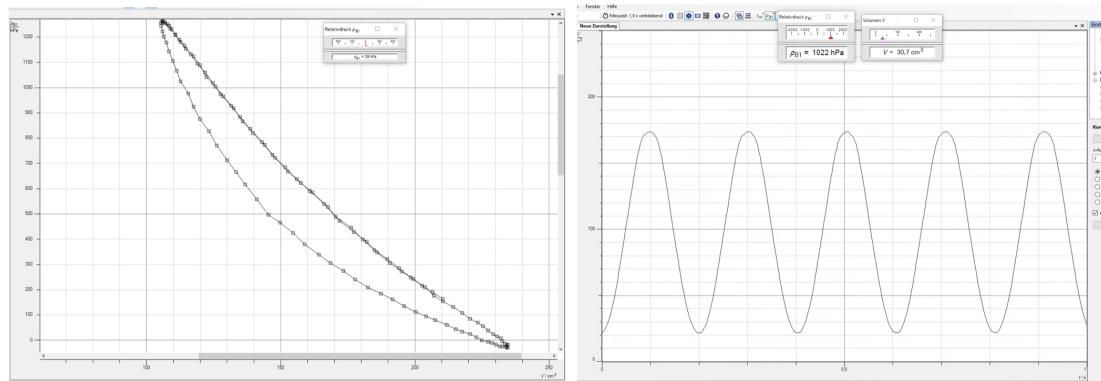


Abbildung 10: pV-Diagramm sowie die sinusförmige Bewegung

5 Quelle

- Wagner, J. (April 2022). Physikalisches Praktikum PAP 2.1 für Studierende der Physik [Praktikumsanleitung]. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. Abgerufen am 29. Oktober 2023, von https://www.physi.uni-heidelberg.de/Einrichtungen/AP/info/Corona/PAP2_1_2023.pdf
- Abbildung 2: <https://de.wikipedia.org/wiki/Carnot-Prozess> (Carnot-Prozess)