

W40 Heißluftmotor	
Name:	Matrikelnummer:
Fachrichtung:	Versuchsdatum:
Mitarbeiter/in:	Gruppennummer:
Assistent/in:	Endtestat:

Dieser Fragebogen muss von jedem Teilnehmer **eigenständig** (keine Gruppenlösung!) handschriftlich beantwortet und vor Beginn des Versuchs abgegeben werden. Die Vorbereitung wird zusätzlich durch einen Test bzw. eine mündliche Prüfung über die physikalischen Grundlagen des Versuchs kontrolliert.
(Version: 16. Oktober 2021)

Versuchsziel und Versuchsmethode:

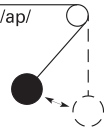
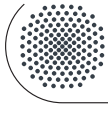
- 1.) Wie lautet der 1. Hauptsatz der Thermodynamik und was bedeutet er?
- 2.) Wie lautet der 2. Hauptsatz?
- 3.) Skizzieren und beschreiben Sie den Carnotschen Kreisprozess im pV-Diagramm. Was ist der Unterschied zum Stirling-Prozess?

4.) Warum braucht jede Wärmekraftmaschine ein Schwungrad?

5.) Was ist der Unterschied zwischen rechts- und linksläufigen Prozessen bei Wärmekraftmaschinen?

6.) Wie groß ist der maximale Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen und wieso wird dieser nie erreicht?

7.) Wie kann man den maximalen Wirkungsgrad steigern?



W Wärmelehre

W40 Heißluftmotor

Diese Anleitung kann und soll kein Lehrbuch ersetzen. Die beschriebenen Grundlagen stellen einen kurzen Überblick dar und sind daher zum Erlernen der physikalischen Grundlagen nicht ausreichend. Genauere Beschreibungen finden sich in:

- [1] *Kapitel 6.3 Ideale Gase, 6.4 Wärmekraftmaschinen und 6.6 Entropie.* In: MESCHÉDE, D.: *Gerthsen Physik*. Springer, 2010. – E-Book
- [2] *Kapitel 16 Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik.* In: TIPLER, P.: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. Springer, 2015. – E-Book
- [3] *Kapitel 10.3 Die Hauptsätze der Thermodynamik.* In: DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 1: Mechanik und Wärme*. Springer, 2015. – E-Book
- [4] *Kapitel 10.1 Temperatur und Wärmeenergie.* In: DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 1: Mechanik und Wärme*. Springer, 2015. – E-Book

Dieser Versuch erfordert eine besonders gründliche Vorbereitung zu Hause!

Zur theoretischen Vorbereitung auf den Versuch ist es notwendig, dass Sie sich über die folgenden Begriffe und Sätze der Wärmelehre informieren:

- I. Hauptsatz der Wärmelehre (Wärmemenge, innere Energie) [3],
- Zustandsänderungen [3]: isotherm, isochor, adiabatisch,
- reversible und irreversible Vorgänge [3],
- Umwandlung von Wärme \rightleftharpoons mechanische Arbeit [3],
- Carnotscher Kreisprozess und Wirkungsgrad von reversiblen Wärmekraftmaschinen [3],
- II. Hauptsatz der Wärmelehre (Entropie) [3],
- spezifische Wärme [4],
- Schmelzwärme, Verdampfungswärme [4],

Thermodynamische (reversible) Kreisprozesse

Grundlagen

Führt man mit einer Gasmenge eine Reihe von Zustandsänderungen durch, die so aneinander anschließen, dass sie wieder zum Ausgangszustand führen, so bezeichnet man diese Folge von Zustandsänderungen als Kreisprozess.

Man unterscheidet zwischen rechts- und linksläufigen Prozessen im p - V -Diagramm:

rechtsläufige Prozesse (im Uhrzeigersinn) Kraftmaschinenprozesse, liefern mechanische Arbeit, verbrauchen Wärme.	linksläufige Prozesse (entgegen dem Uhrzeigersinn) Arbeitsmaschinenprozesse, verbrauchen mechanische Arbeit, liefern Wärme. (Wärmepumpe oder Kältemaschine)
--	--

Die vom Kreisprozess umfahrene Fläche im p - V -Diagramm entspricht dem Arbeitsbetrag, der nach Durchlaufen des Prozesses entweder im Arbeitsmedium gespeichert wurde (linksläufiger Prozess) oder vom Arbeitsmedium geleistet wurde (rechtsläufiger Prozess). Nach dem 1. Hauptsatz muss ein gleichwertiger Betrag an Wärmeenergie abgeführt (linksläufiger Prozess) oder zugeführt werden (rechtsläufiger Prozess). Die innere Energie hat nach Durchlaufen des Kreisprozesses wieder denselben Wert wie am Anfang (Zustandsgröße). Damit schreibt sich der 1. Hauptsatz für einen Kreisprozess:

$$\begin{aligned}
 \oint dQ &= \oint dU - \oint dW & U &= \text{innere Energie} \\
 \text{mit } \oint dU &= 0 & Q &= \text{aufgenommene Wärmemenge;} & (\text{W40-1}) \\
 \text{wird } \oint dQ &= - \oint dW & W &= \text{am System geleistete äußere Arbeit}
 \end{aligned}$$

$-\oint dW$ wird auch als technische Arbeit A_t bezeichnet.

Im Unterschied zur äußeren Arbeit, die für eine **einmalige** Zustandsänderung ohne Rückkehr in den Anfangszustand die geleistete oder zu leistende Arbeit darstellt, ist die technische Arbeit diejenige Arbeit, die im **Dauerbetrieb** der Maschine entnommen oder dieser zugeführt werden kann.

Bei allen Kreisprozessen — welche Kombination von Einzelprozessen man auch wählt — stellt man fest, dass der Wärmeaustausch stets Wärmezufuhr **und** Wärmeabfuhr enthält. Als thermodynamischen Wirkungsgrad η_{th} eines rechtsläufigen Kreisprozesses definiert man das Verhältnis von technischer Arbeit A_t zur zugeführten Wärmemenge Q_{zu} :

$$\eta_{\text{th}} = \frac{A_t}{Q_{\text{zu}}} \quad (\text{W40-2})$$

Er gibt an, welcher Anteil der zugeführten Wärmemenge in technische Arbeit verwandelt wird.

Aus (W40-1) folgt
$$\oint dQ = Q_{\text{zu}} - Q_{\text{ab}} = A_t \quad ,$$

damit wird (W40-2) zu
$$\eta_{\text{th}} = \frac{Q_{\text{zu}} - Q_{\text{ab}}}{Q_{\text{zu}}} = 1 - \frac{Q_{\text{ab}}}{Q_{\text{zu}}} \quad . \quad (\text{W40-3})$$

Von besonderer theoretischer Bedeutung ist der **Carnotprozess**, der zwischen 2 Isothermen und 2 Adiabaten abläuft. Haben die Isothermen die Temperaturen T_1 und T_3 ($T_1 > T_3$), so ergibt sich für den Wirkungsgrad $\eta_{\text{th}}^{\text{C}}$

$$\eta_{\text{th}}^{\text{C}} = \frac{T_1 - T_3}{T_1} = 1 - \frac{T_3}{T_1} \quad (\text{W40-4})$$

Dies ist der höchste Wirkungsgrad, der mit einer Wärmekraftmaschine erreicht werden kann.

Der im Versuch verwendete Heißluftmotor arbeitet nach dem **Stirlingschen** Kreisprozess, der zwischen Isothermen und Isochoren abläuft.

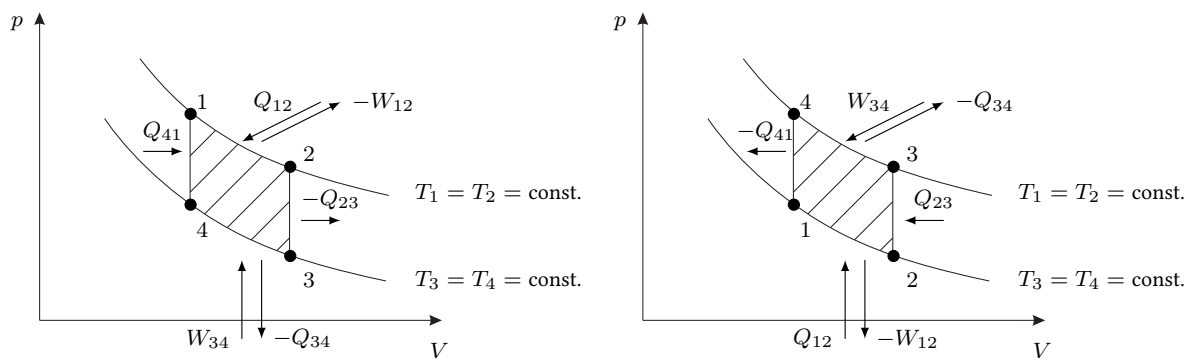


Abb. W40-1: Zustandsdiagramm für den Stirlingschen Kreisprozess (linke Abbildung), sowie für den Betrieb der Stirling-Maschine als Wärmepumpe oder als Kältemaschine (rechte Abbildung). Aus dem Durchgang $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ ergibt sich für das linke Diagramm ein rechtsläufiger Prozess, aus dem rechten Diagramm dagegen ein linksläufiger Prozess.

Energiebilanz für den Stirling-Prozess:

1. Isotherme Expansion von 1 nach 2 ($T_1 \equiv T_2!$)

$$-W_{12} = Q_{12} = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (\text{W40-5})$$

2. Isochore Abkühlung

$$-Q_{23} = C_V (T_1 - T_3) \quad (\text{W40-6})$$

3. Isotherme Kompression von 3 nach 4 ($T_3 \equiv T_4!$)

$$W_{34} = -Q_{34} = -R T_3 \ln \frac{V_4}{V_3} = R T_3 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (\text{W40-7})$$

4. Isochore Erwärmung

$$Q_{41} = C_V (T_1 - T_3) \quad (\text{W40-8})$$

Für die nach außen abgegebene technische Arbeit ergibt sich

$$A_t = -W_{12} - W_{34} = R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} \cdot (T_1 - T_3) \quad (\text{W40-9})$$

Die zugeführte Wärmemenge beträgt

$$Q_{zu} = Q_{12} + Q_{41} = R T_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} + C_V (T_1 - T_3) \quad (\text{W40-10})$$

Damit erhält man für den Wirkungsgrad η_{th}^C des Stirling-Prozesses:

$$\eta_{th}^S = \frac{A_t}{Q_{zu}} = \frac{R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} \cdot (T_1 - T_3)}{R T_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} + C_V (T_1 - T_3)} < \eta_{th}^C \quad (\text{W40-11})$$

Die bei den isochoren Zustandsänderungen umgesetzten Wärmemengen sind gleich. Gelingt es durch besondere Prozessführung, die abgegebene Wärmemenge $-Q_{23}$ zu speichern und nachher dem System bei der isochoren Erwärmung wieder zuzuführen, so hebt sich $-Q_{23}$ gegen $-Q_{41}$ in der Wärmebilanz weg. Der Wirkungsgrad des Stirling-Prozesses beträgt dann

$$\eta_{ideal}^S = \frac{A_t}{Q_{zu}} = \frac{R (T_1 - T_3) \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}}{R T_1 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}} = \eta_{th}^C \quad (\text{W40-12})$$

Technische Realisierung des Stirlingschen Kreisprozesses

Die Maschine besteht aus einem Zylinder, in dem sich sowohl der Arbeitskolben als auch ein sogenannter Verdrängerkolben bewegen. Die obere Hälfte des Zylinders wird mithilfe einer Heizwendel auf die Temperatur T_1 aufgeheizt, die untere über einen Kühlwassermantel auf die Temperatur T_3 gekühlt.

Der Verdrängerkolben hat im Zentrum eine von oben nach unten durchgängige Öffnung, die so mit feiner Kupferwolle ausgefüllt ist, dass Gas noch leicht hindurchströmen kann. Im Laufe eines vollständigen Zyklus befindet sich der Verdränger mal ganz oben und schiebt (durch Verdrängung) das Gas in die kalte Zone des Zylinders oder ganz unten und schiebt dabei das Gas in die heiße Zone. Idealerweise wäre das nur an den isochoren Übergängen $1 \rightarrow 2$ und $3 \rightarrow 4$ erforderlich. In der praktischen Realisierung durch ein exzentrisch gelagertes Gestänge ist der Verdränger immer in Bewegung, aber mit etwa 90° Phasenverschiebung zum Arbeitskolben, wodurch der Stirlingsche Kreisprozess nach Abb. W40-1 näherungsweise erfüllt wird: In Phasen geringer Geschwindigkeit des Arbeitskolbens ("isochore" Zustandsänderung an den Umkehrpunkten) ist der Verdrängerkolben in schneller Bewegung und umgekehrt.

Beim Durchgang des Gases nach unten durch den Verdränger gibt es die Wärmemenge $-Q_{23}$ an die Kupferwolle ab, die als Wärmespeicher (Regenerator) dient. Beim umgekehrten Durchgang nimmt das Gas die Wärmemenge Q_{41} vom Wärmespeicher auf. Mit diesem Trick wird vermieden, dass die Wärmemenge $-Q_{23}$ nach außen abgeführt und als Q_{41} von außen wieder zugeführt werden muss. Sie bleibt im System und erhöht damit den Wirkungsgrad.

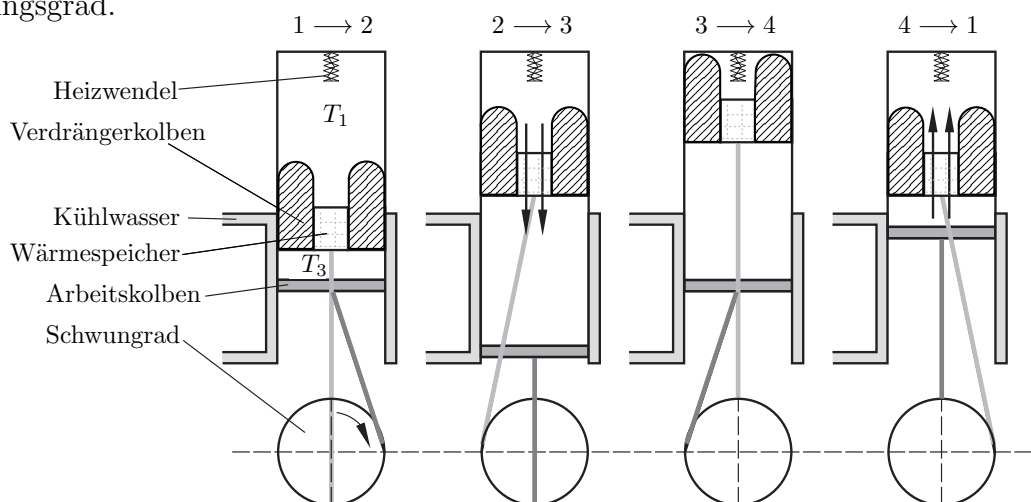


Abb. W40-2: Arbeitstakte beim Heißluftmotor

Unter der Annahme reversibler Zustandsänderungen erhält man (Abb. W40-2):

1. Isotherme Expansion

Das Gas hat sich isotherm (bei T_1) unter Aufnahme von Q_{12} ausgedehnt und bewegt den Kolben nach unten, d.h. gibt die mechanische Arbeit $-W_{12}$ an das Schwungrad ab.

2. Isochore Abkühlung

Der Verdränger schafft das Gas in den kalten Zylinderteil. Hierbei gibt das Gas an den Regenerator $-Q_{23}$ ab.

3. Isotherme Kompression

Der Kolben wird durch das Schwungrad (dieses gibt W_{34} an das Arbeitsgas ab)

nach oben geschoben und verdichtet das Gas isotherm. Das Gas muss dabei die Wärmemenge $-Q_{34}$ an das Kühlwasser abführen.

4. Isochore Erwärmung

Der Verdränger schafft das Gas in den heißen Zylinderteil. Hierbei nimmt das Gas vom Regenerator Q_{41} auf.

Die Heizleistung kann manuell an einem Stelltransformator geregelt werden, an dessen Eingang sich ein digital anzeigendes Leistungsmessgerät P befindet. Aus Sicherheitsgründen wird die noch hohe Spannung am Ausgang des Stelltransformators durch einen weiteren Transformator mit festem Übertragungsverhältnis 10 : 1 auf eine niedrige Wechselspannung transformiert und der Heizwendel zugeführt.

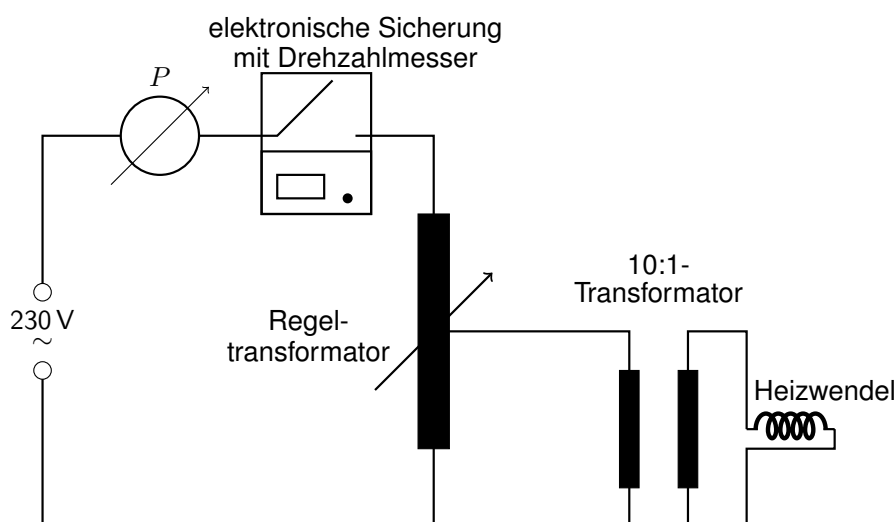


Abb. W40-3: Regelung der Heizleistung

Um eine Überlastung und damit ein Durchbrennen der Heizwendel zu verhindern, ist die gesamte Stromversorgung elektronisch abgesichert. Die Sicherung wird aktiv, wenn der Stirlingmotor zu langsam läuft (≤ 80 U/min) und deshalb zu wenig Wärme von der Heizwendel abgeführt wird. Zum Starten des Motors muss die Heizung über eine Taste („Heizung“) eingeschaltet und der Motor von Hand angedreht werden.

Zur Aufzeichnung der Zustandsgrößen mit dem Computer werden drei Sensoren verwendet, die am CASSY-Interface einzustecken sind:

- Druckmessung (CASSY INPUT B)
Der Druck p im Arbeitsvolumen wird über eine Schlauchleitung einem Drucksensor zugeführt.
- Volumenmessung (CASSY INPUT A)
Das Gestänge am Arbeitskolben ist über einen Seilzug mit einem Drehbewegungs-

sensor verbunden, der eine der Position des Kolbens und damit auch dem Arbeitsvolumen V proportionale Spannung ausgibt.

- **Temperaturmessung (CASSY INPUT A)**
Beim Betrieb als Wärmepumpe oder Kältemaschine wird die Temperatur des Wasserbads mit einem elektrischen Kontaktthermometer gemessen.
Beim Betrieb als Wärmekraftmaschine wird die Temperatur der Heizwendel T_1 anhand der Heizleistung aus einem Eichdiagramm entnommen, die Kühlwassertemperatur T_2 wird direkt gemessen.

Hinweise für den Betrieb:

- **Der Versuch darf nur nach Überprüfung durch Ihren Assistenten in Betrieb genommen werden!**
- **Der Motor darf nicht mit einer Drehzahl von mehr als 300 Umdrehungen pro Minute betrieben werden.**
- **Die Aufsätze für die Glühwendel bzw. das Thermometer gleichmäßig und nicht zu fest verschrauben. Es ist darauf zu achten, dass sowohl die Heizwendel als auch das Reagenzglas sorgfältig zentriert sind und keinesfalls an den Verdrängerkolben stoßen können. Richtige Positionierung durch manuelles Hochfahren des Kolbens bis zum oberen Umkehrpunkt prüfen!**
- **Vorsicht: Heizung nur beim Betrieb als Wärmekraftmaschine einschalten, Regeltransformator immer von Null aus aufdrehen und am Ende wieder zurückstellen! Bei unsachgemäßem Umgang kann die Heizwendel durchbrennen.**
- **Kühlwasser nur so weit aufdrehen bis sich der Durchflussanzeiger langsam dreht, da ansonsten die Schläuche, die Kühlwasser führen, lecken können.**
- **Nicht in den laufenden Motor greifen. Der Motor darf NUR gestartet werden, wenn der Hebel sich in horizontaler Lage (zusammen geklappt) befindet. Die Einsätze mit dem Verdrängerkolben nicht berühren.**
- **Zug , Druck- oder Biegebelastungen auf die Kabel zwischen dem Hebel und der schwarzen Box sind zu vermeiden.**

Messprogramm

1. **Betreiben Sie den Motor als Kältemaschine. Kühlen Sie das Wasser im Reagenzglas bei max. 150 U/min bis auf -10°C ab und messen Sie die Temperatur in Abhängigkeit der Zeit. Beschreiben und erklären Sie Ihre Beobachtungen anhand eines Diagramms. Berechnen Sie die Schmelzwärme von Eis und überprüfen Sie die Plausibilität etwaiger dazu verwendeter Annahmen. Zeichnen Sie die folgende Erwärmung im selben Diagramm auf!**

2. Kehren Sie die Laufrichtung des Motors um und nehmen Sie weiterhin die Temperaturkurve bis hin zu 70 °C auf. Erklären Sie Ihre Beobachtungen und berechnen Sie wiederum die Schmelzwärme von Eis.
3. Betreiben Sie den Motor mithilfe der Heizwendel als Wärmekraftmaschine. Bestimmen Sie die Leerlaufdrehzahl n_0 nach einer ca. 10 min dauernden Einlaufphase.
4. Nehmen Sie bei der Leerlaufdrehzahl ein p - V - Diagramm auf. Bestimmen Sie die pro Umlauf verrichtete Arbeit.
5. Bestimmen Sie die abgegebene mechanische Leistung P_B durch 3 unterschiedliche Bremsversuche. Dazu verwenden Sie den Bremshebel mit dem Kupferband (s. Hinweise). Dabei soll die Bremskraft so gewählt werden, dass die Drehzahl nicht kleiner als 120 U/min wird. Der Durchmesser der Motorachse beträgt 25 mm.
6. Nehmen Sie bei einem der Bremsversuche ein p - V - Diagramm auf und bestimmen Sie die induzierte Leistung P_{ind} . Vergleichen Sie die p - V - Diagramme von belasteter und unbelasteter Wärmekraftmaschine. Was wäre theoretisch zu erwarten?
7. Berechnen Sie die folgenden Wirkungsgrade (mit der korrigierten Heizleistung!):

$$\eta_{\text{ideal}}^{\text{S}} = \frac{T_1 - T_3}{T_1} \quad (T_1 \text{ aus beim Versuch liegenden } T(P_e)\text{-Diagramm bestimmen})$$

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{P_B}{P_e} \quad \begin{array}{l} P_B: \text{ mechanische Bremsleistung} \\ P_e: \text{ an die Heizwendel abgegebene Leistung} \end{array}$$

$$\eta_i = \frac{P_{\text{ind}}}{P_e} \quad \text{innerer Wirkungsgrad } (P_{\text{ind}}: \text{ induzierte Leistung aus } p\text{-}V\text{-Diagramm})$$

$$\eta_m = \frac{P_B}{P_{\text{ind}}} \quad \text{mechanischer Wirkungsgrad}$$

$$\eta_{\text{eff}} = \eta_i \cdot \eta_m$$

Vergleichen Sie die Wirkungsgrade $\eta_{\text{ideal}}^{\text{S}}$ mit η_{eff} und erklären Sie die Unterschiede.

8. Erklären Sie, warum das gemessene p - V -Diagramm des Heißluftmotors vom idealen p - V -Diagramm gemäß Abb. W40-1 abweicht.

Hinweise

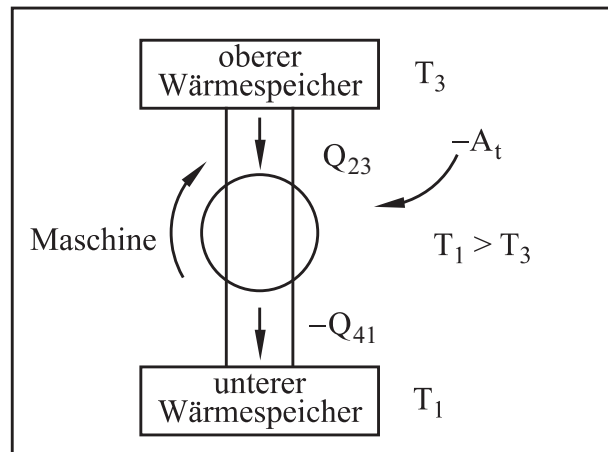
- Das Reagenzglas enthält 1 cm³ Wasser. Die Schmelzwärme von Eis erhalten Sie aus den Steigungen der Temperatur-Zeit-Kurve und der Haltezeit während der Erstarrung. Dabei soll angenommen werden, dass die pro Zeiteinheit abgeführte Wärmemenge konstant ist.
- Die verrichtete Arbeit ergibt sich im p - V -Diagramm aus der Fläche unter der Kurve. Öffnen Sie zur Berechnung die CASSY-Vorlage zur Aufzeichnung von p - V - Diagrammen. Nach abgeschlossener Messung kann in der CASSY-Vorlage durch Rechtsklick in das Diagramm das Integral berechnet werden.

- Zur Steuerungsbox: Nutzen Sie den roten Taster um die Messwerte einzufrieren, den schwarzen Taster, um den Anzeigemodus zu wechseln. Um “Tare” durchführen zu können drücken sie im Taremodus den roten Taster.
- Um die Bremsleistung zu bestimmen müssen Sie zunächst die Kraftsensoren nullen. Bewegen Sie dazu den Hebel in die 90° Stellung und fixieren Sie ihn in dieser Stellung mit dem Kunststoffbolzen durch das Loch über dem Drehpunkt. Führen Sie einmalig die “Tare”-Funktion durch, sodass anschließend der angezeigte Kraftwert in vertikaler Stellung näherungsweise Null ist.
- Zur Durchführung der Bremsversuche entfernen Sie die Fixierung und hängen das Kupferband um die Motorwelle. Um die Kräfte sinnvoll zu messen, versuchen Sie über Ihre händische Zugkraft am Hebel für etwa 5 Sekunden einen konstanten Drehzahlwert zu halten. Achten Sie darauf, bei welcher Auslenkung des Hebels aus der 90°-Stellung die Messungen stattfinden. Warum spielt dies eine Rolle?
- Die Differenzkraft der Zugkräfte entspricht der Reibungskraft, mit welcher der Motor mechanisch gebremst wird.
- Die Kraftsensoren sind abhängig von der Krafteinleitungsrichtung. Es handelt sich um Biegebalkenwägezellen. Welche Einflussfaktoren gibt es?
- Die angezeigten Kraftwerte sind Mittelwerte über 16 Messwerte innerhalb von etwa 0,67 s.

Erklärungen zu den Betriebsarten

1. Der Heißluftmotor als Kältemaschine (linksläufiger Prozess)

Bei diesem Versuch wird der Heißluftmotor dazu benutzt, das Wasser in einem Reagenzglas zum Gefrieren zu bringen. Dies ist ein linksläufiger Prozess, wie in Abbildung W40-1 beschrieben. Für das Reagenzglas existiert ein spezieller Einsatz, der ggf. gegen die Glühwendel getauscht werden muss, und ein Thermoelement, welches an das CASSY-Interface INPUT A angeschlossen werden muss. Auf dem Desktop des Messrechners befindet sich eine passende Vorlage, mit der die Temperatur des Wasser in dem Reagenzglas in Abhängigkeit von der Zeit aufgezeichnet wird. Antrieb des Gerätes mittels des Elektromotors, das Schwungrad läuft dabei im Uhrzeigersinn bei Blick auf die Pfeilmarkierungen. Die Drehzahl des Motors soll langsam erhöht werden bis max. 200 Umdrehungen pro Minute. Beobachten Sie den Gefriervorgang und den Temperaturverlauf sorgfältig und notieren Sie Ihre Beobachtungen.



Antrieb des Gerätes mittels des Elektromotors, das Schwungrad läuft dabei im Uhrzeigersinn bei Blick auf die Pfeilmarkierungen. Die Drehzahl des Motors soll langsam erhöht werden bis max. 200 Umdrehungen pro Minute. Beobachten Sie den Gefriervorgang und den Temperaturverlauf sorgfältig und notieren Sie Ihre Beobachtungen.

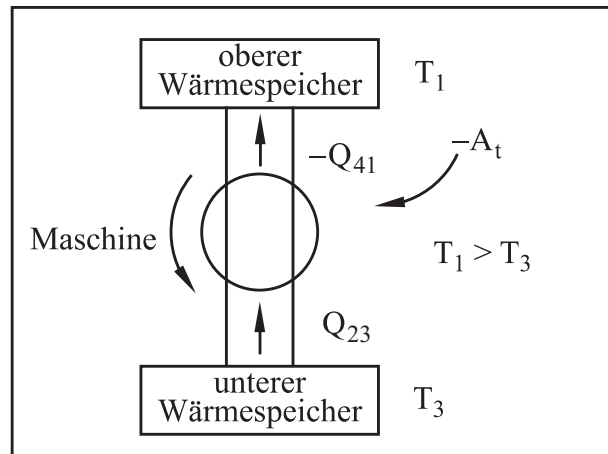
Wenn das Wasser gefroren ist, betreiben Sie den Heißluftmotor weiter im gleichen Modus.

Beim weiteren Kühlen die Temperatur bis etwa $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ fallen lassen. Bei Erreichen dieser Temperatur die Drehzahl des Motors auf 0 stellen und unmittelbar mit dem zweiten Versuch (Wärmepumpe) beginnen. Die CASSY-Vorlage nicht schließen bzw. die Messung nicht stoppen, die anschließende Erwärmung soll in **einem** Diagramm aufgezeichnet werden!

2. Der Heißluftmotor als Wärmepumpe (linksläufiger Prozess)

Sofort nach Beendigung von Versuch 1 wird der Motor in entgegengesetzter Drehrichtung betrieben (Schwungrad dreht sich gegen den Uhrzeigersinn). Erneut die Drehzahl langsam erhöhen bis max. 200 Umdrehungen pro Minute. Der obere Teil der Apparatur wärmt sich auf, das Eis schmilzt und das Wasser wird erwärmt. Die Wassertemperatur nicht über $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ansteigen lassen: Sobald diese Temperatur erreicht ist, die Drehzahl auf 0 stellen.

Solange der obere Apparaturteil eine tiefere Temperatur besitzt als der untere, handelt es sich um einen rechtsläufigen Kreisprozess, also um eine Wärmekraftmaschine. Erst oberhalb des Temperatenausgleichs ist der Prozess linksläufig, also als Wärmepumpe zu verstehen (Abbildung W40-1).



3. Der Heißluftmotor als Wärmekraftmaschine (rechtsläufiger Prozess)

Den Keilriemen abnehmen und den Reagenzglashalter ausbauen. Die Heizwendel einbauen und an den Transformator anschließen. Den Temperatursensor am CASSY-Interface abnehmen und den Bewegungssensor auf INPUT A, den Drucksensor auf INPUT B stecken. Öffnen Sie die Vorlage zur Aufzeichnung von pV -Diagrammen auf dem Desktop. Das Kühlwasser so weit aufdrehen bis sich der Durchflussanzeiger dreht. Taste "Heizung" drücken und den Heizstrom am Regeltransformator langsam erhöhen bis die Heizwendel rot glüht. Unmittelbar danach die Schwungscheibe im Uhrzeigersinn von Hand andrehen bis der Stirlingmotor selbstständig läuft. Die Taste "Heizung" sofort loslassen.

