

# PS9

Heißluftmotor - Stirlingprozess

Version vom 10. Juli 2013

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Allgemeine Grundlagen - Wärmekraftmaschinen</b>	<b>1</b>
1.1	Begriffe . . . . .	1
1.2	Das Prinzip von Wärmekraftmaschinen . . . . .	1
1.3	Carnotprozess . . . . .	3
1.4	Stirlingprozess und Stirlingmaschine . . . . .	4
1.5	Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Der Heißluftmotor als Wärmekraftmaschine</b>	<b>8</b>
2.1	Grundlagen . . . . .	8
2.1.1	Prony'scher Zaum . . . . .	8
2.2	Aufgabenstellung . . . . .	9
2.3	Versuchsaufbau und Durchführung . . . . .	10
2.3.1	Aufbau und Funktion des Heißluftmotors . . . . .	10
2.3.2	Inbetriebnahme und Messvorgang . . . . .	11
2.3.3	Auswertung und Fehlerrechnung . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Die Stirling-Maschine als Kältemaschine</b>	<b>15</b>
3.1	Grundlagen . . . . .	15
3.1.1	Wärmepumpe und Kältemaschine . . . . .	15
3.1.2	Wirkungsgrad der Kältemaschine . . . . .	15
3.2	Aufgabenstellung . . . . .	15
3.3	Versuchsaufbau und Durchführung . . . . .	16

## Lehr/Lernziele

- Vertiefung und Wiederholung der Funktionsweise von Wärmekraftmaschinen bzw. Kreisprozessen.
- Den Stirlingmotor (Heißluftmotor und Kältemaschine) als Anwendung thermodynamischer Kreisprozesse kennen lernen.
- Den Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen berechnen und einschätzen lernen.
- Verstehen und Anwenden komplexer Messaufbauten (z.B. pV-Indikator, Prony'scher Zaum).

## 1 Allgemeine Grundlagen - Wärmekraftmaschinen

### 1.1 Begriffe

Hauptsätze der Wärmelehre, Zustandsänderungen (isotherm, isochor, adiabatisch, reversible und irreversible Vorgänge), Kreisprozesse, Carnot'scher und Stirling'scher Kreisprozess, Wärmekraftmaschine, Kältemaschine, Wärmepumpe, pV-Diagramm, Wirkungsgrad, Prony'scher Zaum

### 1.2 Das Prinzip von Wärmekraftmaschinen

Wärmekraftmaschinen sind Maschinen, welche im Stande sind Energieumwandlungsprozesse durchzuführen. Mit ihnen kann die von einer Wärmequelle zu einer Wärmesenke transportierte Wärme in mechanische oder elektrische Energie umgewandelt werden. Genau so ist es möglich mittels Aufbringung mechanischer oder elektrischer Energie den Wärmetransport in die umgekehrte Richtung durchzuführen.

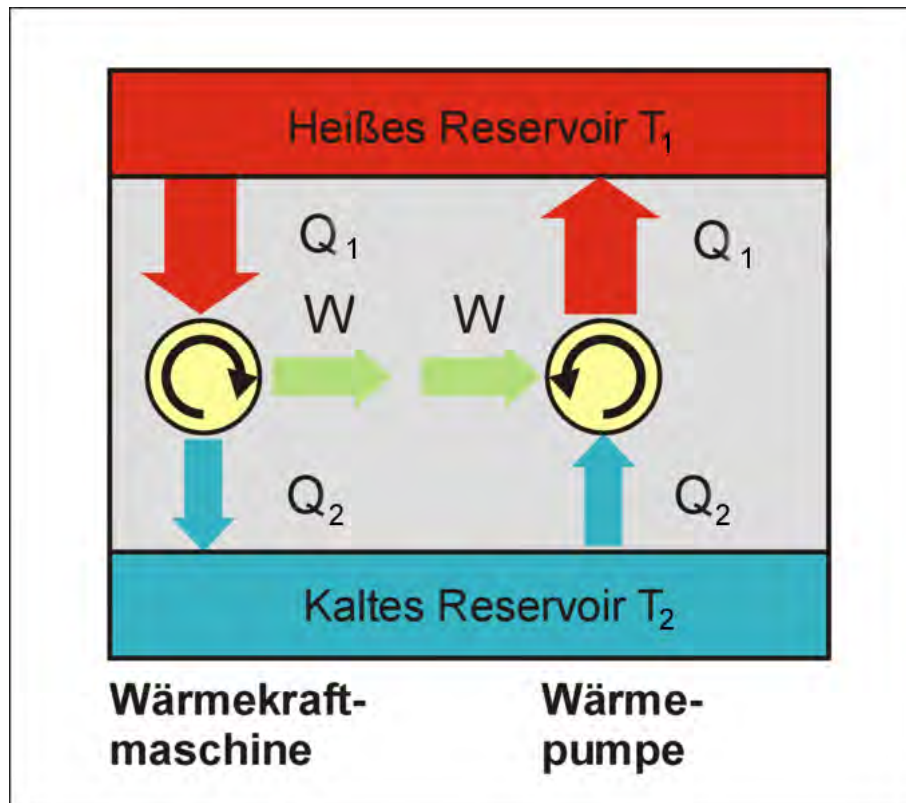
Eine Wärmequelle unterscheidet sich von einer Wärmesenke durch ihre signifikant höhere Temperatur. In Abb. 1 sind die Funktionsprinzipien von Wärmekraftmaschine und Wärmepumpe veranschaulicht:

Die Wärmekraftmaschine nimmt vom wärmeren Reservoir (Wärmequelle) die Wärmemenge  $Q_1$  auf und gibt an das kältere Reservoir (Wärmesenke) die Wärmemenge  $Q_2$  ab. Wobei  $T_1 > T_2$  und  $Q_1 > Q_2$  ist. Dabei wird die Differenz der beiden Wärmemengen in nutzbare mechanische Energie  $W$  (und nicht nutzbare Reibungsenergie<sup>1</sup>) umgewandelt.

Die Wärmepumpe wiederum entnimmt dem kälteren Reservoir die Wärmemenge  $Q_2$  durch Aufbringung mechanischer Energie  $W$  und gibt die Wärmemenge  $Q_1$  an das wärmere Re-

---

<sup>1</sup>eigentlich:  $Q_1 = Q_2 + W + W_{\text{Reibung}}$



**Abbildung 1:** Arbeitsprinzip von Wärmekraftmaschine und Wärmepumpe

servior ab. Dabei wird die mechanische Energie in Wärme (und Reibungsenergie) umgewandelt.

Damit Wärmekraftmaschinen rasch und effektiv arbeiten können, ist es von Vorteil, wenn die Energieumwandlung bzw. der Wärmetransport während eines periodischen Vorgangs abläuft, der beliebig oft wiederholt werden kann. Derartige Vorgänge heißen *thermodynamische Kreisprozesse*. In thermodynamischen Kreisprozessen wird ein Arbeitsstoff (meist Gas oder Gasgemisch) einer Reihe von Zustandsänderungen unterzogen bis am Ende des Zyklus wieder der Ausgangszustand hergestellt ist.

Man unterscheidet:

- Prozesse, bei denen der Arbeitsstoff bzw. ein Teil davon verbraucht wird und daher regelmäßig von außen ergänzt werden muss, wie z.B. das Benzin-Luft-Gemisch in einem Otto-Motor.
- Prozesse, bei denen der Arbeitsstoff abgeschlossen und daher immer der selbe bleibt wie z.B. das Heliumgas bei einer Stirling-Gaskältemaschine zur Luftverflüssigung.

Im hier untersuchten Fall des Heißluftmotors ist der Arbeitsstoff Luft abgeschlossen und darf in guter Näherung als *ideales Gas* behandelt werden.

Je nachdem ob der Kreisprozess rechtsdrehend oder linksdrehend durchlaufen wird, liegt eine Wärmekraftmaschine oder eine Wärmepumpe vor (siehe Abb. 1).

Eine Wärmepumpe ist vom Prinzip her - je nach Betrachtungsweise auch eine *Kältemaschine*, da die Temperatur des kälteren Reservoirs durch Entzug von Wärme weiter gesenkt wird.

### 1.3 Carnotprozess

Der fundamentale Kreisprozess für Wärmekraftmaschinen wurde von Carnot (1796 - 1832) definiert. Als Arbeitsmedium dient ein beliebiges Gas. Die Maschine braucht Zylinder und Kolben um das Gas komprimieren und expandieren zu können, sowie ein wärmeres Reservoir mit der Temperatur  $T_1$  und ein kälteres Reservoir mit der Temperatur  $T_2$ . Der Kreisprozess besteht aus 4 Schritten, wie am pV-Diagramm in Abbildung 2 dargestellt ist:

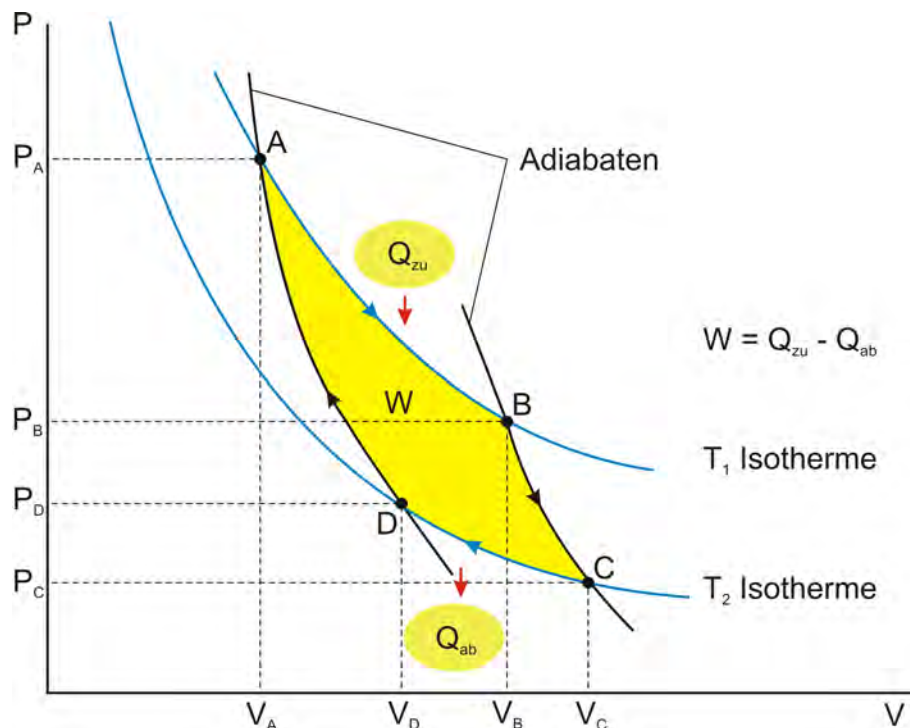


Abbildung 2: pV-Diagramm des Carnot-Kreisprozesses

1. Isotherme Expansion ( $A \rightarrow B$ )

Eine isotherme Expansion des Arbeitsgases erfolgt von Zustand A (mit  $P_A, V_A, T_1$ ) nach Zustand B (mit  $P_B, V_B, T_1$ ). Dabei ist der Gasbehälter in Kontakt mit dem wärmeren Reservoir und das Arbeitsgas nimmt die Wärme  $Q_{zu}$  auf.

2. Adiabatische Expansion ( $B \rightarrow C$ )

Eine adiabatische Expansion des Arbeitsgases erfolgt von Zustand B (mit  $P_B, V_B, T_1$ )

nach Zustand  $C$  (mit  $P_C, V_C, T_2$ ). Dabei ist der Gasbehälter isoliert, sodass jeder Wärmefluss unterbunden ist. Am Ende der Zustandsänderung hat das Arbeitsgas die Temperatur  $T_2$  des kälteren Reservoirs.

3. Isotherme Kompression ( $C \rightarrow D$ )

Eine isotherme Kompression des Arbeitsgases erfolgt von Zustand  $C$  (mit  $P_C, V_C, T_2$ ) nach Zustand  $D$  (mit  $P_D, V_D, T_2$ ). Dabei ist der Gasbehälter in Kontakt mit dem kälteren Reservoir und das Arbeitsgas gibt die Wärme  $Q_{ab}$  ab.

4. Adiabatische Kompression ( $D \rightarrow A$ )

Eine adiabatische Kompression des Arbeitsgases erfolgt von Zustand  $D$  (mit  $P_D, V_D, T_2$ ) nach Zustand  $A$  (mit  $P_A, V_A, T_1$ ). Dabei ist der Gasbehälter isoliert, sodass jeder Wärmefluss unterbunden ist. Am Ende der Zustandsänderung hat das Arbeitsgas die Temperatur  $T_1$  des wärmeren Reservoirs.

In Abb. 2 ist dieser idealisierte, thermodynamische Kreisprozess für ein ideales Gas dargestellt. Alle vier Schritte verlaufen stets auf den entsprechenden Zustandskurven und sind reversible Prozesse.

Der Carnotprozess ist in der Praxis nicht realisierbar, da eine direkte Abfolge von isothermen und adiabatischen Zustandsänderungen ein großes technisches Problem darstellt. Darüber hinaus sind in den meisten Wärmekraftmaschinen (Ottomotor, Dieselmotor,...) die Prozesse nicht exakt reversibel, da das Arbeitsgas keine idealen Gaseigenschaften besitzt und außerdem ständig ausgetauscht wird.

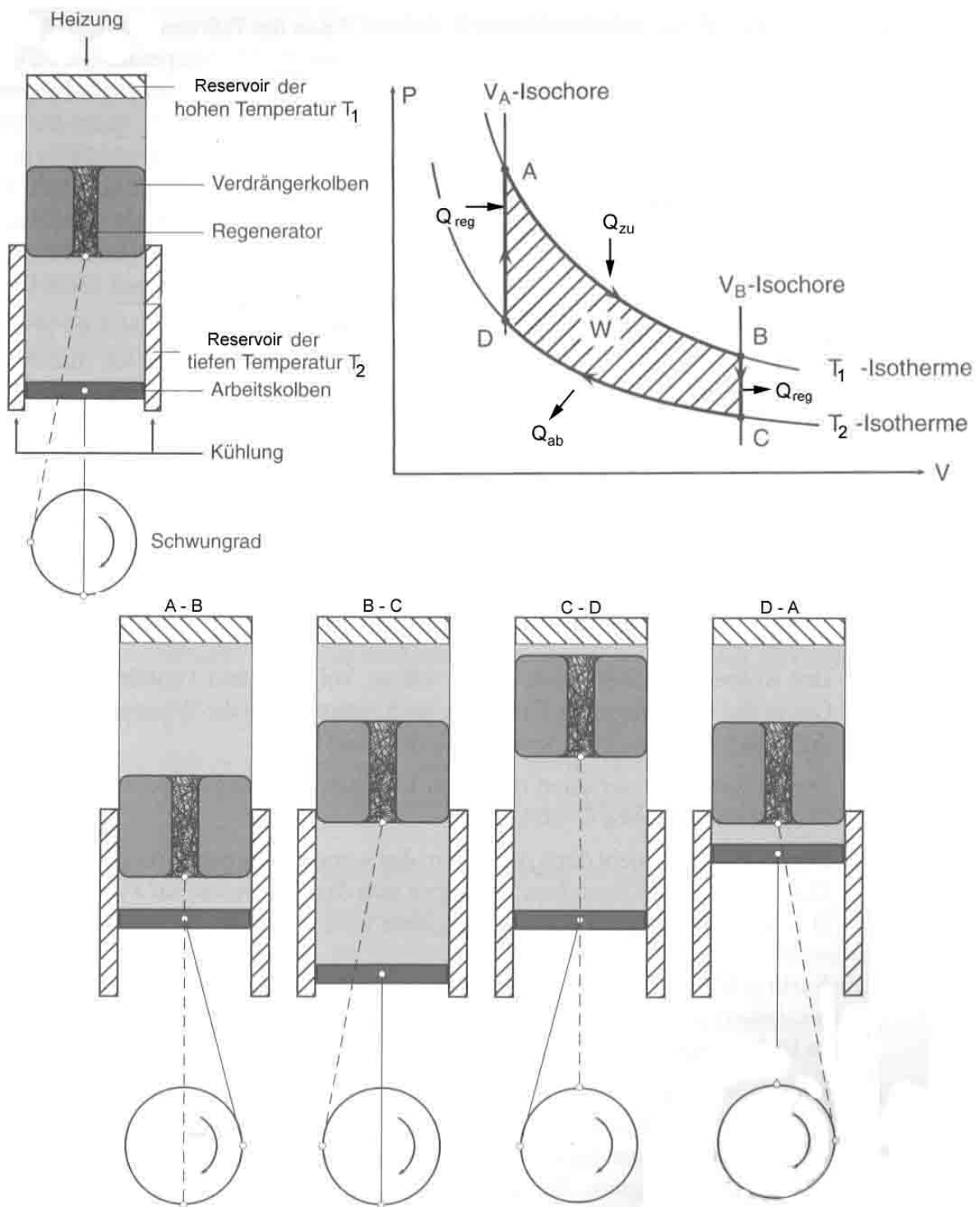
## 1.4 Stirlingprozess und Stirlingmaschine

Der Stirlingprozess bzw. die Stirlingmaschine arbeiten mit einem abgeschlossenen Arbeitsgas, etwa mit Luft. An Stelle der adiabatischen Zustandsänderungen treten im idealen Stirlingprozess *isochore* Zustandsänderungen (siehe Abb. 3) auf. Das hat den Nachteil, dass für die Hebung der Arbeitstemperatur von  $T_2$  auf  $T_1$  die Wärmemenge  $Q_{reg}$  benötigt wird, was den Wirkungsgrad gegenüber einer Carnot-Maschine erheblich senken würde. Jedoch wird diese abgegebene Wärmemenge beim Schritt  $B \rightarrow C$  in einem (Kupferwolle-)Regenerator zwischengespeichert und beim Schritt  $D \rightarrow A$  wieder aufgenommen, was im idealisierten Fall verlustfrei geschieht. Die Temperaturen der Wärmereservoirs  $T_1$  und  $T_2$  werden durch eine Heizung bzw. einen Kühler konstant gehalten.

Der Stirling-Kreisprozess besteht aus 4 Schritten, wie am pV-Diagramm in Abbildung 3 dargestellt ist:

1. Isotherme Expansion  $A \rightarrow B$

Eine isotherme Expansion des Arbeitsgases erfolgt von Zustand  $A$  (mit  $P_A, V_A, T_1$ ) nach Zustand  $B$  (mit  $P_B, V_B, T_1$ ). Dabei ist der Gasbehälter in Kontakt mit dem wärmeren Reservoir und das Arbeitsgas nimmt Wärme ( $Q_{zu}$ ) auf.



**Abbildung 3:** o.li.: Schematischer Aufbau der 1-zyldrigen Stirlingmaschine, o. re.:pV-Diagramm des Stirling-Kreisprozesses, u.: Kolbenbewegungen während der 4 Takte im Stirlingprozess

2. isochore Abkühlung  $B \rightarrow C$ 

Eine isochore Abkühlung des Arbeitsgases erfolgt von Zustand  $B$  (mit  $P_B, V_B, T_1$ ) nach Zustand  $C$  (mit  $P_C, V_B, T_2$ ). Dabei wird die Wärmemenge  $Q_{reg}$  an den Regenerator abgegeben. Am Ende der Zustandsänderung hat das Arbeitsgas exakt die Temperatur  $T_2$  des kälteren Reservoirs.

3. Isotherme Kompression  $C \rightarrow D$ 

Eine isotherme Kompression des Arbeitsgases erfolgt von Zustand  $C$  (mit  $P_C, V_B, T_2$ ) nach Zustand  $D$  (mit  $P_D, V_A, T_2$ ). Dabei ist der Gasbehälter in Kontakt mit dem kälteren Reservoir und das Arbeitsgas gibt Wärme ( $Q_{ab}$ ) ab.

4. isochore Erwärmung  $D \rightarrow A$ 

Eine isochore Erwärmung des Arbeitsgases erfolgt von Zustand  $D$  (mit  $P_D, V_A, T_2$ ) nach Zustand  $A$  (mit  $P_A, V_A, T_1$ ). Dabei wird die Wärmemenge  $Q_{reg}$  vom Regenerator wieder aufgenommen. Am Ende der Zustandsänderung hat das Arbeitsgas exakt die Temperatur  $T_1$  des wärmeren Reservoirs.

## 1.5 Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen

Der Wirkungsgrad  $\eta$  einer Maschine ist ganz allgemein definiert als:

$$\eta = \frac{\text{verwertete Energie}}{\text{zugeführte Energie}} \quad (1)$$

Wobei bei einer Wärmekraftmaschine die Energiezufuhr  $Q_{zu}$  in Form von Wärme erfolgt. Die Energieabgabe setzt sich zusammen aus der gewünschten Abgabe mechanischer Arbeit  $W$  sowie aus Reibungsenergie<sup>2</sup>  $W_r$  und der ans Kühlmedium abgegebenen Energie  $Q_{ab}$ .

$$|Q_{zu}| = |Q_{ab}| + W + W_r \quad (2)$$

### Idealer Wirkungsgrad:

Mit Hilfe des pV-Diagramms errechnet sich der Wirkungsgrad eines idealen Stirling-Motors (unter Vernachlässigung der Reibung):

$$\eta_{ideal} = \frac{|Q_{zu}| - |Q_{ab}|}{|Q_{zu}|} = \frac{\oint p dV}{Q_{zu}} \quad (3)$$

Die pro Umdrehung abgegebene mechanische Energie wird durch die im pV-Diagramm eingeschlossene Fläche angegeben. Die vom Regenerator aufgenommene und wieder abgegebene Energie  $Q_{reg}$  ist im idealen Fall gleich groß und fließt in diese Bilanz nicht mit ein. Die isotherm aufgenommenen bzw. abgegebenen Energien  $Q_{zu}$  bzw.  $Q_{ab}$  sind mit Hilfe des 1. Hauptsatzes der Wärmelehre berechenbar:

<sup>2</sup>Pauschale Zusammenfassung aller Energieverluste: durch Wärmestrahlung, Konvektion, Reibung innerhalb der Maschine und an der Motor-Kupplung



$$dQ = p \cdot dV + dU \quad (4)$$

Dabei gilt für die Änderung der inneren Energie  $dU = 0$ , da bei isothermer Zustandsänderung sich die Temperatur nicht ändert ( $dT = 0$ ). Der Druck lässt sich mit Hilfe der idealen Gasgleichung  $p \cdot V = R \cdot n \cdot T$  als Funktion des Volumens schreiben. So erhält man als Lösung:

Isotherme Expansion  $A \rightarrow B$  :

$$Q_{zu} = \int_{V_A}^{V_B} p \, dV = \int_{V_A}^{V_B} \frac{(RnT_1)}{V} \, dV = RnT_1 \ln \left( \frac{V_B}{V_A} \right) > 0 \quad (5)$$

Isotherme Kompression  $C \rightarrow D$  :

$$Q_{ab} = \int_{V_B}^{V_A} p \, dV = \int_{V_B}^{V_A} \frac{(RnT_2)}{V} \, dV = RnT_2 \ln \left( \frac{V_A}{V_B} \right) < 0 \quad (6)$$

Für den gesamten Kreisprozess erhält man dann als Differenz zwischen zugeführter und abgeführter Energie:

$$\oint dQ = Q_{zu} + Q_{ab} = Rn \ln \left( \frac{V_B}{V_A} \right) (T_1 - T_2) \quad (7)$$

Daher ergibt sich für den idealen (thermodynamischen) Wirkungsgrad:

$$\eta_{ideal} = \frac{\oint p dV}{Q_{zu}} = \frac{Rn \ln \left( \frac{V_B}{V_A} \right) (T_1 - T_2)}{Rn \ln \left( \frac{V_B}{V_A} \right) T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (8)$$

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
dQ	J	Änderung der Wärmeenergie
p	Pa	Druck
V	m <sup>3</sup>	Volumen
dV	m <sup>3</sup>	Änderung des Volumens
dU	J	Änderung der inneren Energie
$p \cdot dV$	J	Volumenarbeit
R	J · mol <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup>	universelle, molare Gaskonstante
T	K	Temperatur
n		Molzahl (relativ)

### Realer Wirkungsgrad:

Beim idealen Wirkungsgrad werden reversible Prozesse vorausgesetzt, was in der Realität

vor allem bei der Wärmeaufnahme und -abgabe in den Regenerator nicht gegeben ist. Hinzu kommen die bereits erwähnten Verluste durch Reibung, Konvektion und Wärmestrahlung, sodass der reale Wirkungsgrad  $\eta_{real}$  merklich kleiner ist. Wie bereits ausgeführt, wird als Wirkungsgrad der Prozentanteil der letztlich verwerteten Energie bestimmt. Dazu muss die Motorleistung unter Belastung bestimmt werden, dann werden alle möglichen Reibungsverluste mitberücksichtigt. Somit ergibt sich der reale Wirkungsgrad zu:

$$\eta_{real} = \frac{P_{Motor}}{P_{zu}} \quad (9)$$

Um abzuschätzen welchen Prozentsatz an idealerweise zur Verfügung stehender mechanischer Energie der Motor in der Lage ist, tatsächlich in Form von mechanischer Arbeit zu leisten, wird der Wirkungsgrad des Motors bestimmt:

$$\eta_{Motor} = \frac{P_{Motor}}{\oint p dV \cdot f} \quad (10)$$

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
$P_{Motor}$	W	Motorleistung
$P_{zu}$	W	zugeführte Leistung

**Eine ausführliche Aufarbeitung zur Thermodynamik von Wärmekraftmaschinen finden Sie in der Selbstlerneinheit „Wärmekraftmaschinen“ unter „Links“ auf der eLearning-Seite dieser Praktikumseinheit.**

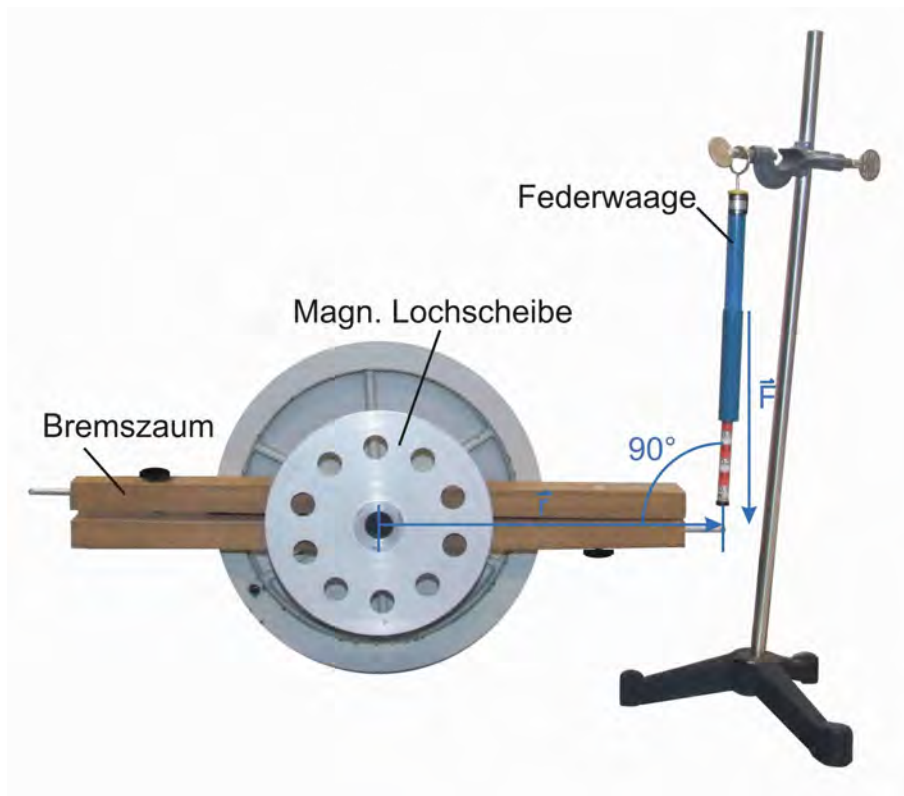
## 2 Der Heißluftmotor als Wärmekraftmaschine

### 2.1 Grundlagen

#### 2.1.1 Prony'scher Zaum

Zur Bestimmung der mechanischen Leistung von Motoren kann man einen *Bremszaum* (oder auch *Prony'scher Zaum*) verwenden. Abb. 4 zeigt einen Prony'schen Zaum.

Die mechanische Leistung ergibt sich durch:



**Abbildung 4:** Prony'scher Bremszaum am Stirlingmotor

$$P = \vec{M} \cdot \vec{\omega} \quad (11)$$

Da die Leistung über ein Skalarprodukt bestimmt wird, können für Bremsdrehmoment  $\vec{M} = \vec{F} \times \vec{r}$  und die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  auch die Absolutbeträge herangezogen werden. Man muss nur darauf achten, dass mit dem Kreuzprodukt ein Vektor erzeugt wird, der genau parallel zu  $\omega$  verläuft. Das erreicht man, wenn  $\vec{F}$  und  $\vec{r}$  normal zu einander stehen.

## 2.2 Aufgabenstellung

1. Bestimmen Sie die mechanische Energie  $W$ , die der Stirlingmotor aus Wärmeenergie umwandeln kann, aus dem pV-Diagramm und den idealen Wirkungsgrad des Sterlingmotors  $\eta_{ideal}$ . Geben Sie dazu die Leerlauf-Kreisfrequenz an.
2. Bestimmen Sie den realen Wirkungsgrad  $\eta_{real}$  und geben Sie die Kreisfrequenz unter Belastung an.
3. Bestimmen Sie den Wirkungsgrad des Motors  $\eta_{Motor}$ .

## 2.3 Versuchsaufbau und Durchführung

### 2.3.1 Aufbau und Funktion des Heißluftmotors

Es gibt unterschiedliche technische Realisierungsmöglichkeiten für den Heißluftmotor. Der Heißluftmotor, welcher im Praktikum zur Verfügung steht, ist der sogenannte  $\beta$  - Bautyp, ein einzylindrischer Hubkolbenmotor, der an seiner Oberseite geheizt und an seiner Unterseite gekühlt wird. In dem Zylinder laufen zwei Kolben 90°-phasenverschoben: Der eigentliche *Arbeitskolben* und ein sogenannter *Verdrängerkolben*, der die isochoren Prozesse unterstützt und der Zwischenspeicherung thermischer Energie dient. Dieser Typ ist auf Abb. 3 schematisch dargestellt.

Der Versuchsaufbau *Heißluftmotor* umfasst folgende Teile (siehe dazu Abb. 5):

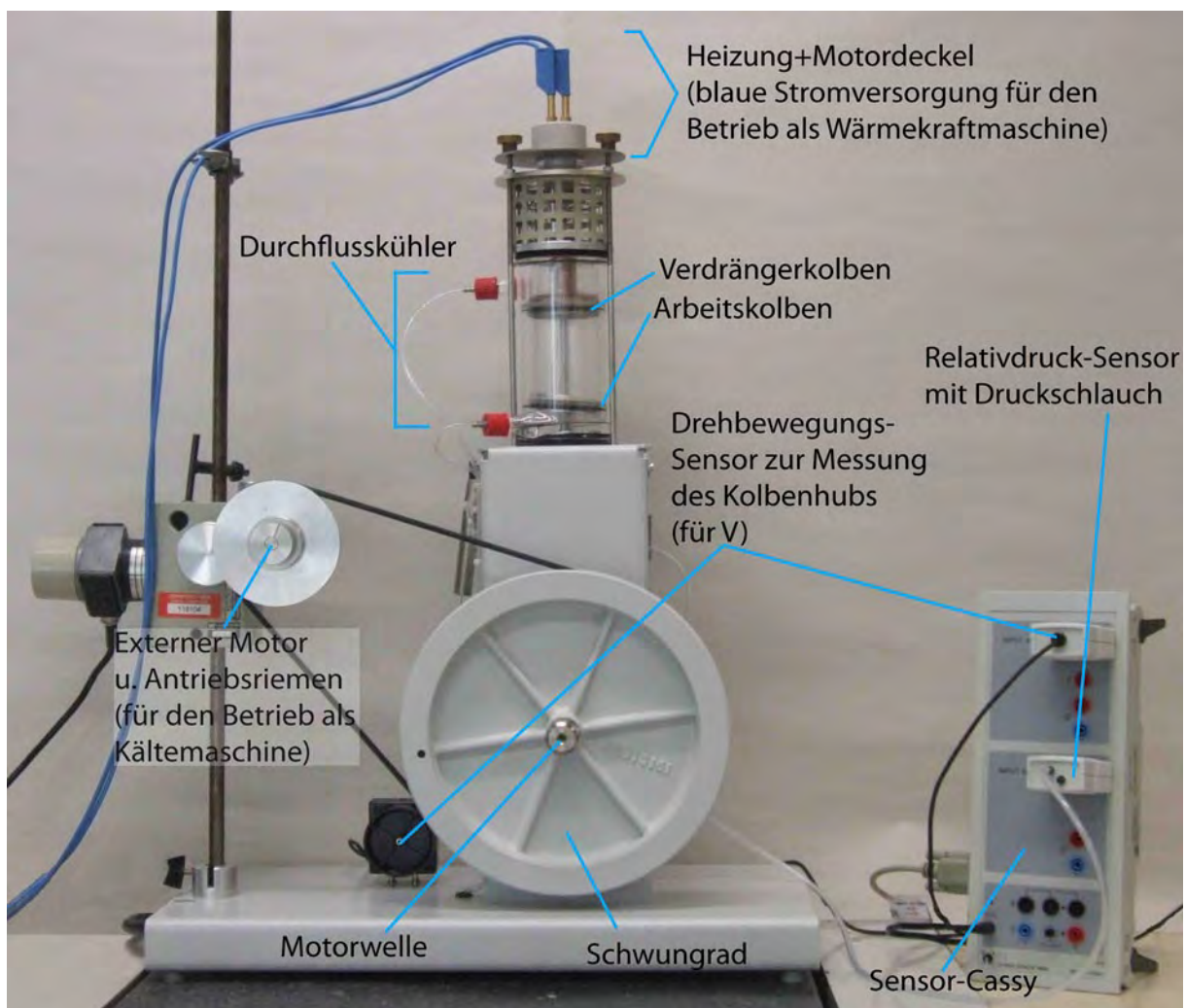


Abbildung 5: Stirlingmotor und diverses Zubehör für Experimente

- **Heißluftmotor**,  $\beta$  - Bautyp mit Schwungrad, Durchflusswasserkühlung und elektri-

scher Heizwendel im Motordeckel

- **Stromversorgung** (blau) für den Betrieb der Heizwendel mit integriertem Volt- und Amperemeter [nicht abgebildet]
- **Druck und Volumenmessung** mit Relativdrucksensor und Druckschlauch (für p) bzw. Drehbewegungssensor zur Messung des Kolbenhubs (für V). Diese sind mit einem Sensor-Cassy verbunden und können mittels Cassy Lab digital aufgezeichnet werden.
- **Lochscheibe** mit 10 Löchern und Magnethalterung zur Bestimmung der Umdrehungszahl [siehe Abb. 4]
- **Stroboskop** zur Bestimmung der Umdrehungszahl mit der Lochscheibe [nicht abgebildet]
- **Bremszaum** mit Stativ und Federwaage zur Bestimmung der Motorleistung [siehe Abb. 4]

Technische Daten des Stirlingmotors:

$V_A$	$195 \cdot 10^{-6} m^3$	Arbeitsvolumen A
$V_B$	$345 \cdot 10^{-6} m^3$	Arbeitsvolumen B

**Tabelle 1:** Technische Daten des Heißluftmotors

**Sehen Sie sich dazu auch Video zum Aufbau des Heißluftmotors (baugleicher Typ) auf der eLearning-Umgebung von PS9 an.**

### 2.3.2 Inbetriebnahme und Messvorgang

**Vorbereitung von Druck und Volumenmessung** Um mit Hilfe des Drucksensors und des Volumensensors das Arbeitsdiagramm des Heißluftmotors in Cassy Lab aufzunehmen, müssen die Sensoren eingestellt werden. Öffnen Sie dazu die Cassy-Lab-Datei „Heißluftmotor“ am Desktop des Messcomputers. Die angeschlossenen Sensoren sollten automatisch erkannt werden. Die Messparameter sind voreingestellt. Wenn das nicht der Fall ist, müssen Sie die Anordnung aktualisieren.

**Für den Umgang mit CASSY Lab studieren Sie das Dokument „Erste Schritte mit CASSY und ULAB auf der eLearning Seite dieses Kurses.**

Der *Relativdrucksensor*  $p$  ist ein Differenzdrucksensor. Sie können seinen Nullpunkt manuell setzen mit dem Button „ $\rightarrow 0 \leftarrow$ “. Dazu öffnen Sie die Sensoranzeige mit einem Klick (linke Maustaste) auf das entsprechende Symbol ( $p$ ) in der Menüleiste (oberhalb des Diagramms). Es öffnet sich die Druckanzeige. Mit einem Rechtsklick über dieser Anzeige gelangen Sie in das Sensormenü, wo Sie nicht nur den Nullpunkt setzen können, sondern auch im Menüpunkt „Korrektur“ Offset und Faktor korrigieren können. So kann man mit den entsprechenden Einstellungen auch den absoluten Druck anzeigen lassen.

Das Volumen wird mittels *Drehbewegungssensor*  $s$  gemessen, der die gemessene Drehbewegung in die Weglänge des Kolbenhubs umsetzen kann. Da die Querschnittsfläche des zylindrischen Kolbens bekannt ist ( $A = 28,3 \text{ cm}^2$ ), kann das Volumen als  $V = s \cdot A$  berechnet werden, was auch so voreingestellt ist. Auch hier können Sie das Volumen mit dem Button „ $\rightarrow 0 \leftarrow$ “ manuell auf Null setzen.

Das Volumen kann auch absolut angezeigt werden. Das kleinste Kolbenvolumen beträgt  $195 \text{ cm}^3$ .

(Für die Bestimmung des pV-Diagrammes und der eingeschlossenen Fläche reicht jedoch, dass sowohl Druck also auch Volumen im auf den Achsen dargestellten Bereich vollständig abgebildet sind. Ob Absolutskalen verwendet werden, bleibt Ihnen bzw. Ihren Betreuern überlassen).

### Inbetriebnahme des Motors

Vergewissern Sie sich, dass die richtige Heizwendel (blaue Stromversorgung) (hand)fest montiert ist und tauschen Sie diese gegebenenfalls (vorsichtig aus dem Glaszylinder heben). Während des Motorstartes sollte immer ein/e Betreuer/in anwesend sein. Üben Sie das Anwerfen des Motors mit dem Schwungrad vor der Inbetriebnahme. Sie müssen wahrscheinlich anfänglich mehrmals Anwerfen, denn der Motor sollte bei eingeschalteter Glühwendel nicht zum Stillstand kommen. Weiters soll der Motor auf der Steinplatte nicht verrutschen.

Wenn Sie den Motor schließlich in Betrieb nehmen, sollte ihr/e Kollege/in die Stromversorgung jederzeit rasch abdrehen können, falls der Motor doch ungewollt zum Stillstand kommt. Vor jeder weiteren Messaktivität benötigt der Motor ca. 10 - 15 min Zeit zum Warmlaufen.

**Die Heizwendel darf nicht ohne Beisein eines/r Betreuers/in eingeschaltet werden und während des Motorstarts muss ein/e Betreuer/in anwesend sein!**

### Messung der pV-Kurve

Nach dem Warmlaufen ist die Form der abgebildeten pV-Kurve relativ stabil und näherungsweise unabhängig von der Frequenz. Da eine reale Maschine kontinuierlich läuft und der Arbeitskolben daher ständig in Bewegung ist, lassen sich echte isochore Prozesse nicht erreichen. Die einzelnen Takte gehen daher mehr oder weniger fließend ineinander über. Folglich weicht auch das Arbeitsdiagramm der realen Maschine von dem des idealen

Kreisprozesses ab. Sie können nun mit der taste „F9“ die Messung durchführen. Gegebenenfalls müssen Sie noch die Achsenskalierung optimieren. In das entsprechende Menü gelangen Sie mit einem Rechtsklick über den Achsen. Die Messparameter in Cassy Lab sind so voreingestellt, dass 1 - 2 Zyklen abgebildet werden. Sobald das pV-Diagramm aufgenommen ist, können Sie die Fläche bestimmen, indem Sie im Auswertungsmenü (Klick mit der rechten Maustaste über dem Diagramm) **Integral berechnen** → **Peakfläche** wählen. nun markieren Sie einen beliebigen Punkt der Kurve mit einem Klick auf die linke Maustaste (gedrückt halten!) ziehen Sie nun bei gedrückter linker Maustaste ein paar Messpunkte weiter, bis ein ganzer Umlauf Messpunkte markiert ist (hellblau aufleuchtet). Wenn Sie nun die linke Maustaste loslassen, so erscheint die Fläche, welche berechnet wurde schwarz. In der Statuszeile unten links im Programm erscheint das Ergebnis. Sie können es mit dem Mauszeiger bei gehaltener linker Maustaste ins Diagramm ziehen. Nun müssen lediglich die Einheiten noch umgerechnet werden.

### **Bestimmung der Leerlauf-Frequenz**

Platzieren Sie die Lochscheibe mit dem Magnethalter auf der Motorwelle. Nun müssen Sie mit dem Stroboskop auf die Lochscheibe blitzen, um die Frequenz zu messen. Es empfiehlt sich die Messung bei der 10-fachen Frequenz. *Überlegen Sie sich, bei welchen Stroboskopfrequenzen die 10 Löcher auf der Scheibe „ruhen“ und wie Sie diese Frequenz sicher bestimmen können.* Die Frequenz des Motors im Leerlaufbetrieb sollte nicht weniger als 5 Hz haben. Falls doch, melden Sie diesen Umstand ihrem/ihrer Betreuer/in, denn dann muss der Motor bald geschmiert werden.

### **Bestimmung der Motorleistung mit dem Prony'schen Bremszaum**

Bringen Sie den Bremszaum wie in Abb. 4 gezeigt an der (sich drehenden) Motorwelle an. und sichern Sie diese durch Anbringen der Lochscheibe. Bremsen Sie durch vorsichtiges Zudrehen der Schrauben am Bremszaum.

Überwachen Sie dabei die Frequenz des Motors unter Belastung: Sie soll nicht unter  $\frac{1}{2}f_{\text{Leerlauf}}$  sinken. Gleichzeitig soll die gemessene Kraft an der Federwaage 1 N nicht überschreiten. Wenn der Motor versehentlich zum Stillstand gebracht wird, öffnen Sie umgehend den Bremszaum und schalten Sie die Stromversorgung ab!

Bestimmen Sie nun die Frequenz des Motors unter Belastung, die Bremskraft und den Radius. Daraus können Sie die Leistung des Motors errechnen.

### **Bestimmung der zugeführten Leistung**

Die zugeführte Leistung an der Heizwendel bestimmen Sie über die elektrische Leistung durch Ablesen von Strom und Spannung am Netzgerät.

Mit bekannter Motorleistung und bekannter zugeführter Leistung können Sie den realen Wirkungsgrad errechnen.

### 2.3.3 Auswertung und Fehlerrechnung

Zur Messgenauigkeit der CASSY-Sensoren liegen am Arbeitsplatz die technischen Daten der verwendeten Sensoren auf.

Vergessen Sie nicht die Genauigkeit Ihrer Messungen zu bestimmen/abzuschätzen und zu diskutieren.



## 3 Die Stirling-Maschine als Kältemaschine

### 3.1 Grundlagen

#### 3.1.1 Wärmepumpe und Kältemaschine

Wie bereits in Kapitel 0.2 diskutiert, kann eine Maschine, die einen thermodynamischen Kreisprozess durchführt auch als Wärmepumpe betrieben werden. Hier wird durch Investition mechanischer Arbeit  $W$  Wärme aus einem kälteren in ein wärmeres Reservoir gepumpt. Hierbei wird der Kreisprozess jedoch gegen den Uhrzeigersinn durchlaufen (vgl. Abb. 1).

Man kann aber genau so Wärme vom wärmeren in das kältere Reservoir bewegen, etwa um dieses zu kühlen. Dabei wird die Maschine extern angetrieben und durchläuft den Kreisprozess - genau wie die Wärmekraftmaschine - im Uhrzeigersinn.

Der Theorie nach könnte man Wärmereservoirs weder kühlen (Kältemaschine) noch erwärmen (Wärmepumpe), da ideale Reservoirs unerschöpfliche Wärmequellen bzw. Senken sind und sich daher ihre Temperatur auch bei noch so großer Wärmezufuhr oder Wärmeentnahme nicht ändert. Jedoch macht sich die Technik gerade hier die Tatsache zunutze, dass es eben keine idealen Reservoirs gibt. Verringert man die Wärmekapazität der Reservoirs von nahezu unendlich auf kleinere Werte (z.B. Innenraum des Kühlschranks, Heizkreislauf eines Einfamilienhauses,...), dann erzielt man deutliche Temperaturänderungen durch Zufuhr oder Entnahme von Wärme.

#### 3.1.2 Wirkungsgrad der Kältemaschine

Der Wirkungsgrad der Kältemaschine lässt sich mit Hilfe der generellen Definition des Wirkungsgrades aus Gl. 1 von Maschinen bestimmen. Die zugeführte Energie entspricht der Motorleistung (des externen Motors) und die verwertete Energie der Kühlleistung des Stirling-Motors. Diese wiederum lässt sich durch die Energiezufuhr in den zu kühlenden Raum bestimmen (Leistung einer Heizwendel), wenn die Temperatur konstant gehalten wird.

### 3.2 Aufgabenstellung

1. Bestimmen Sie den Wirkungsgrad des Stirlingmotors im Betrieb als Kältemaschine. Messen Sie dazu Kühlraumtemperatur, Leistung des externen Motors, Kühlleistung des Stirlingmotors und Umdrehungsfrequenz.

### 3.3 Versuchsaufbau und Durchführung

Der Versuchsaufbau *Kältemaschine* umfasst folgende Teile (siehe dazu Abb. 5):

- **Heißluftmotor**,  $\beta$  - Bautyp mit Schwungrad, Durchflusswasserkühlung und elektrischer Heizwendel und Temperaturfühler im Motordeckel
- **Stromversorgung** (gelb) für den Betrieb der Heizwendel mit Temperaturfühler und integriertem Volt- und Amperemeter [nicht abgebildet]
- **Lochscheibe** mit 10 Löchern und Magnethalterung zur Bestimmung der Umdrehungszahl [siehe Abb. 4]
- **Stroboskop** zur Bestimmung der Umdrehungszahl mit der Lochscheibe [nicht abgebildet]
- **externer Motor** mit Antriebsriemen
- **Motorsteuerung und Stromversorgung** für den externen Motor

#### Inbetriebnahme der Kältemaschine

Vergewissern Sie sich, dass die richtige Heizwendel (gelbe Stromversorgung) fest montiert ist und tauschen Sie diese gegebenenfalls (vorsichtig aus dem Glaszylinder heben). Spannen Sie den Riemen des externen Motors über das Schwungrad des Stirlingmotors, wie auf Abb. 5 zu sehen ist. Schließen Sie den Temperaturfühler im Motordeckel an das Sensor-CASSY an (an Stelle des Druck- oder Wegsensors). Klicken Sie in der Registerkarte „CASSY“ auf *Anordnung aktualisieren*, damit der Sensor erkannt wird. Bei Bedarf vergrößern Sie sich die Anzeige. Starten Sie den externen Motor (**Drehrichtung im Uhrzeigersinn, maximale Umdrehungszahl**) und kühlen Sie das Arbeitsgas im Arbeitszylinder auf eine Temperatur unter der Kühlwassertemperatur (die üblicherweise ca. 10 °C beträgt). Schalten Sie rechtzeitig auch die Stromversorgung der (gelben) Heizwendel ein um die erreichte Temperatur dann konstant zu halten. Kühlen Sie das Arbeitsgas nicht unter 0 °C!

#### Messung der Kühlleistung und der Leistung des externen Motors

Die Stromversorgung der Heizwendel verfügt über einen Regeltransformator, der die Heizleistung stufenlos einstellbar macht. Beobachten Sie die Temperatur im Kühlraum und versuchen Sie diese durch Regelung der Heizleistung konstant zu halten. Dann gilt als Näherung: *Heizleistung der Heizwendel = Kühlleistung des Stirlingmotors*.

Mit den eingebauten Messgeräten für Strom und Spannung können Sie sodann die Leistung des externen Motors und die Heizleistung der Heizwendel ermitteln. Den Wirkungsgrad des externen (Elektro-)Motors können Sie vereinfacht als 1 annehmen. Elektromotoren haben sehr hohe Wirkungsgrade von üblicherweise > 95 %.

Mit diesen Daten berechnen Sie den Wirkungsgrad der Kältemaschine. Die Umdrehungsfrequenz der Kältemaschine bestimmen Sie wie im vorhergehenden Versuch beschrieben.

Ihr Ergebnis wird durch einen systematischen Fehler verfälscht, der sich auf Grund der schlechten Isolation des Arbeitszylinders ergibt. Diskutieren Sie kurz seine Auswirkungen.