

Bestimmung des Wirkungsgrades des Heißluftmotors als Kältemaschine

Versuchsziele

- Messung der dem Zylinderkopf pro Umlauf entzogenen Wärme Q_2 .
- Messung der dem Kühlwasser pro Umlauf zugeführten Wärme Q_1 .
- Bestimmung des Wirkungsgrades (der Leistungszahl) η der Kältemaschine.

Grundlagen

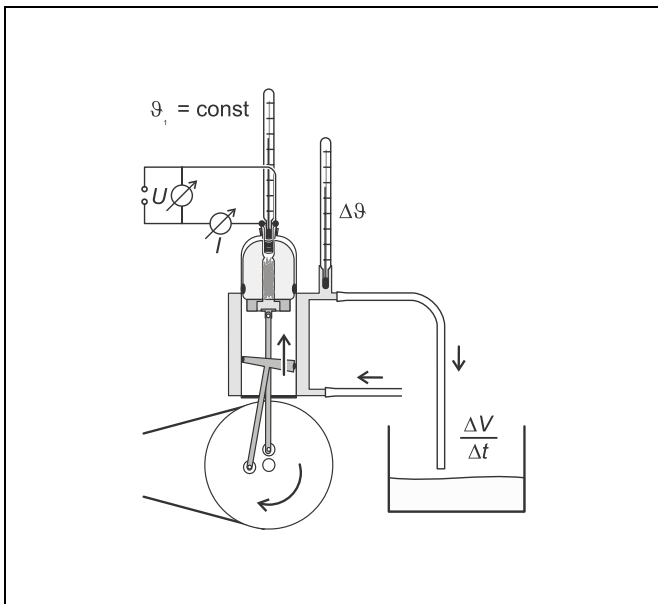
Als Kältemaschine entzieht der Heißluftmotor dem Zylinderkopf pro Umlauf die Wärme Q_2 und führt die Wärme Q_1 dem Kühlwasser zu. Da die Übertragung der Wärme vom kälteren auf das wärmere Reservoir entgegen der spontanen Richtung verläuft, muss pro Umlauf die mechanische Arbeit W aufgewandt werden. Die Kältemaschine ist also im Prinzip eine Wärmekraftmaschine in umgekehrter Arbeitsrichtung. Wenn keine Verluste auftreten, gilt für die beteiligten Größen der Zusammenhang

$$Q_1 = Q_2 + W \quad (I).$$

Der Wirkungsgrad (oder besser die Leistungszahl) einer Kältemaschine ist definiert als

$$\eta = \frac{Q_2}{W} \quad (II).$$

Bestimmung des Wirkungsgrades der Kältemaschine



Zur Bestimmung der Leistungszahl wird die Schwungradscheibe des Heißluftmotors mit einem Elektromotor im Uhrzeigersinn auf eine Drehzahl f angetrieben und in einer Kompensationsmessung die elektrische Heizleistung bestimmt, die die Temperatur des Zylinderkopfes konstant auf Umgebungstemperatur hält. Die pro Umlauf zugeführte elektrische Arbeit entspricht der dem Zylinderkopf von der Kältemaschine entzogenen Wärme Q_2 . Also ist

$$Q_2 = \frac{U \cdot I}{f} \quad (III)$$

U : Heizspannung, I : Heizstrom

Zusätzlich wird der Temperaturanstieg $\Delta\theta$ im Kühlwasser gemessen und die an das Kühlwasser abgegebene Leistung

$$P = c \cdot \rho \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \cdot \Delta\theta \quad (IV)$$

$c = 4,185 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$: spezifische Wärmekapazität von Wasser,
 $\rho = 1 \text{ g cm}^{-3}$: Dichte von Wasser

$\frac{\Delta V}{\Delta t}$: Volumendurchsatz des Kühlwassers

bestimmt. Daraus ergibt sich die dem Kühlwasser pro Umlauf zugeführte Wärme Q_1 :

$$Q_1 = \frac{P}{f} \quad (V).$$

f : Drehzahl des Heißluftmotors

Die Differenz $W' = Q_1 - Q_2$ der so bestimmten Wärmen ist die gesamte pro Umlauf aufzuwendende mechanische Arbeit. Sie enthält auch die mechanische Arbeit W_R , die zur Überwindung der Kolbenreibung aufgewandt werden muss und die eine zusätzliche Erwärmung des Kühlwassers verursacht (siehe Versuch P2.6.2.1). Daher ist die für den Kreisprozess, also für die Übertragung der Wärme vom kälteren ins wärmere Reservoir, aufzuwendende mechanische Arbeit gegeben durch

$$W = Q_1 - Q_2 - W_R \quad (VI).$$

Geräte

1 Heißluftmotor	388 182
1 Zubehör zum Heißluftmotor	388 221
1 Experimentiermotor	347 35
1 Steuer- und Regelgerät	347 36
1 Kleinspannungs-Stelltrafo S	521 35
1 Vielfach-Messgerät METRAMax 2	531 100
1 Vielfach-Messgerät METRAMax 3	531 712
1 Zählgerät P	575 45
1 Gabellichtschranke, infrarot	337 46
1 Transformator, 6 V~, 12 V~/30 VA	562 73
1 Adapterkabel, 4-polig, 1,5 m	501 18
1 Thermometer, -10° bis + 40 °C	382 36
1 Kunststoffbecher, 1000 ml	590 06
1 Handstoppuhr II, 60s/30 min	313 17
1 Kleiner Stativfuß, V-förmig	300 02
2 Stativstangen, 25 cm	300 41

Experimentierkabel (zum Teil mit 2,5 mm² Querschnitt)

zusätzlich erforderlich:

offener Wasserbehälter (mind. 10 l)

1 Tauchpumpe 12 V	388 181
1 Kleinspannungs-Netzgerät	522 16
2 Silikonschläuche i.Ø 7 × 1,5 mm, 1 m	667 194

oder

Kühlwasserzu- und -abfluss

Kühlwasserversorgung:

- Offenen Wasserbehälter mit mindestens 10 l Wasser füllen und Tauchpumpe einhängen.
 - Ausgang der Tauchpumpe an Kühlwasserzulauf des Heißluftmotors anschließen und Kühlwasserablauf in Wasserbehälter leiten.
 - Tauchpumpe an Kleinspannungs-Netzgerät anschließen.
- oder
- Kühlwasserzulauf des Heißluftmotors an Wasserhahn anschließen und Kühlwasserablauf in Wasserabfluss leiten.

Einbau des „Thermometers mit Heizung“:

- Heizwendel des „Thermometers mit Heizung“ (**d**) (aus 388 221) von Kontaktstiften ziehen (siehe Gebrauchsanweisung 388 221).
- Schraubdichtung aus dem „Zylinderkopf-Deckel mit Schraubdichtung“ schrauben und „Thermometer mit Heizung“ einschrauben.
- Heizwendel wieder auf die Kontaktstifte schieben und darauf achten, dass die Heizwendel den Glaskörper des Thermometers nicht berührt.
- Zylinderkopf-Deckel vorsichtig auf dem Zylinder des Heißluftmotors montieren.
- Schwungscheibe des Heißluftmotors drehen und sicherstellen, dass die Heizwendel den Verdrängerkolben des Heißluftmotors in keiner Kolbenstellung berührt.
- Beim Drehen der Schwungscheibe außerdem den Heißluftmotor auf Dichtheit überprüfen; ggf. Schlauchwelle für Drucksensor mit Verschlussstopfen verschließen.
- Kleinspannungs-Stelltrafo S zusammen mit einem Volt- und einem Amperemeter (Messbereich 10 A) an das Thermometer mit Heizung anschließen.

Aufbau

Der Versuchsaufbau ist in Fig. 1 dargestellt.

Temperaturmessung im Kühlwasser:

- GL14-Verschraubung vom Kühlwasserabfluss des Zylinderkopfes lösen und Temperaturadapter (**c**) aus dem Zubehör des Heißluftmotors montieren (siehe Gebrauchsanweisung 388 221).
- Thermometer, -10° bis + 40 °C, in Temperaturadapter einführen und mit GL18-Verschraubung festklemmen.

Sicherheitshinweise

Die Glasbauteile des Heißluftmotors dürfen thermisch nicht zu stark belastet werden.

- Gebrauchsanweisung zum Heißluftmotor beachten.
- Heißluftmotor nicht ohne Kühlwasser betreiben und einwandfreien Kühlwasserumlauf überprüfen.
- Temperatur des eintretenden Kühlwassers nicht über 30 °C ansteigen lassen.

Antrieb:

- Elektromotor montieren und an das Steuer- und Regelgerät anschließen.
- Antriebsriemen über Schwungscheibe und Antriebsscheibe legen und durch Schwenken des Elektromotors spannen.

Frequenzmessung:

- Lochscheibe aus dem Zubehör zum Heißluftmotor auf die Kurbelwelle heften.
- Gabellichtschranke auf Stativmaterial montieren und auf ein Loch der stehenden Lochscheibe ausrichten.
- Gabellichtschranke mittels 4-poligem Adapterkabel zur Spannungsversorgung (schwarze Stecker) an 6-V-Ausgang des Transformators und zur Frequenzmessung (roter und grauer Stecker) an Starteingang des Zählgerätes P anschließen.
- Starteingang zum Stoppeingang schleifen, Schalter auf „f“ stellen und Zählgerät P einschalten.

Messung des Kühlwasserdurchflusses:

- Kunststoffbecher und Handstoppuhr bereit legen.

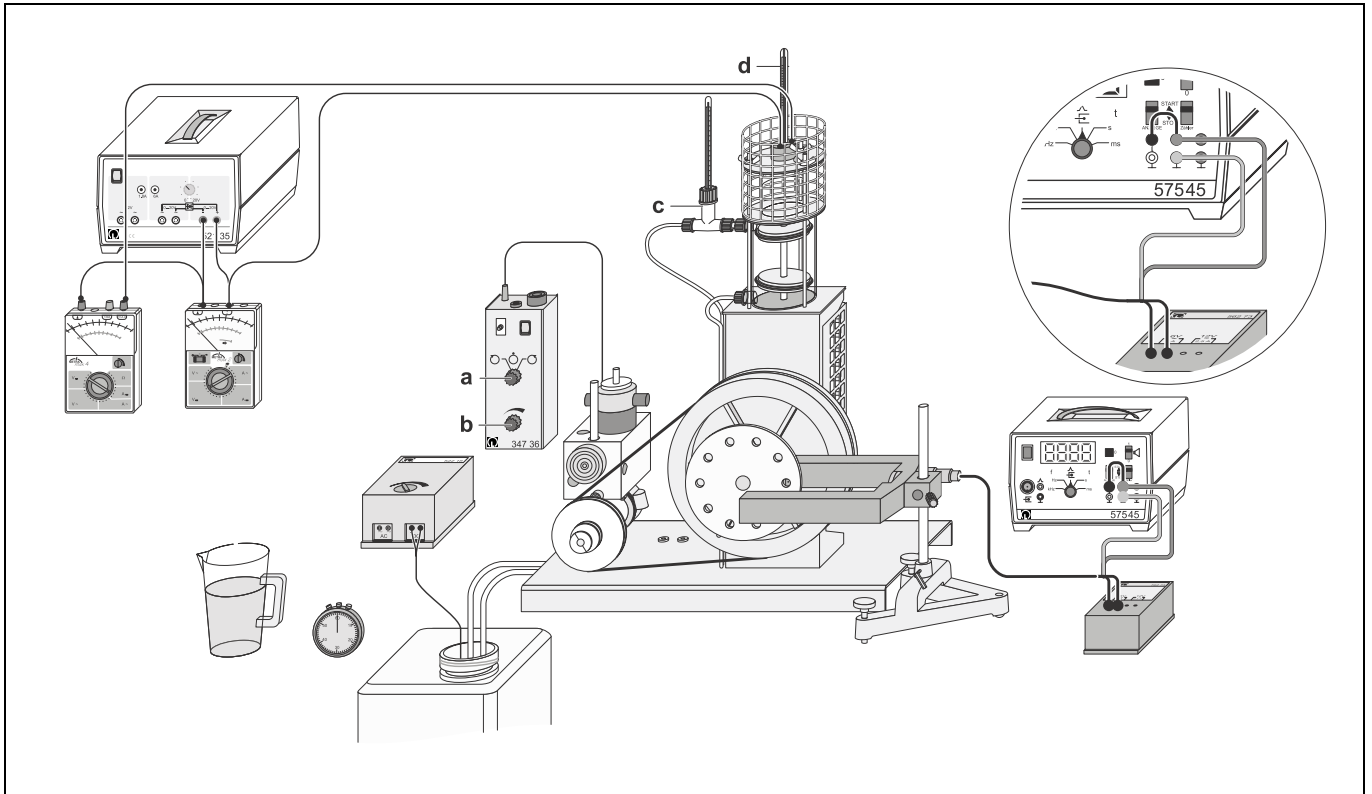


Fig. 1 Versuchsaufbau zur Bestimmung des Wirkungsgrades des Heißluftmotors als Kältemaschine.

Durchführung

zunächst:

- Kühlwasserversorgung einschalten (dazu z. B. Kleinspannungs-Netzgerät für Tauchpumpe auf Stufe 2 stellen), Durchfluss überprüfen und abwarten, bis Wasser durch den Ablaufschlauch zurückläuft.
- Ablaufschlauch in Kunststoffbecher führen und Volumendurchsatz ΔV des Kühlwassers pro Zeitintervall Δt bestimmen (siehe Fig. 2).
- Temperatur ϑ_1 im Zylinderkopf messen.
- Drehrichtungsschalter **(a)** in Mittelstellung (Stillstand) schalten, Drehzahlsteller **(b)** auf mittlere Position stellen und Steuer- und Regelgerät einschalten.
- Temperatur ϑ des Kühlwassers in Abständen von 2 min messen und warten, bis der Verlauf eindeutig extrapolierbar ist.

danach:

- Mit Drehrichtungsschalter den Rechtslauf des Heißluftmotors (im Uhrzeigersinn) starten und Drehzahl des Heißluftmotors messen.

Die Drehzahl des Motors ergibt sich aus der gemessenen Frequenz und der Zahl der Löcher in der Lochscheibe.

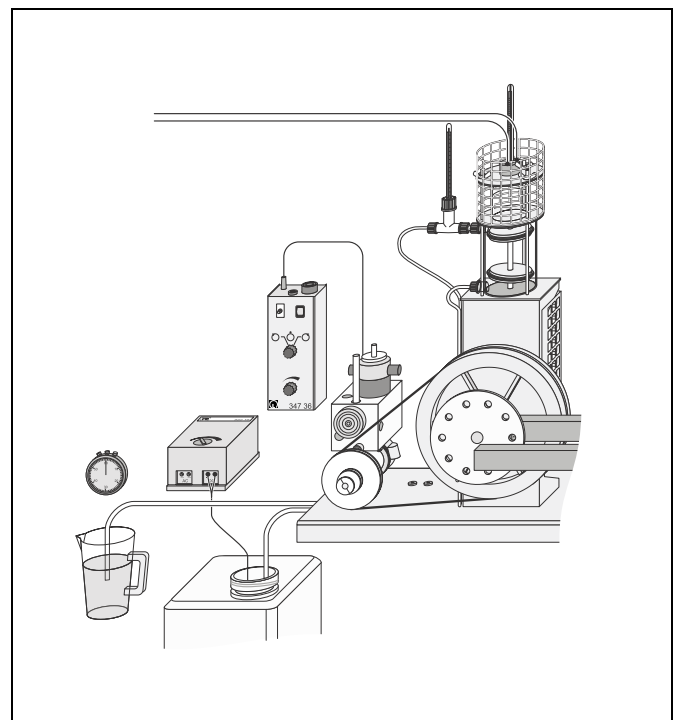
gleichzeitig:

- Den Kleinspannungs-Stelltrafo S einschalten und Heizspannung U so wählen, dass die Temperatur ϑ_1 trotz Betrieb des Heißluftmotors als Kältemaschine konstant bleibt.
- Heizspannung U ggf. nachregeln und zusammen mit der Heizstromstärke I notieren.

und:

- Weiterhin Temperatur ϑ des Kühlwassers in Abständen von 2 min messen, Temperaturzunahme beobachten und warten, bis der Maximalwert erreicht ist.

Fig. 2 Bestimmung des Volumendurchsatzes ΔV pro Zeiteinheit Δt



anschließend:

- Rechtslauf des Motors ausschalten und weiterhin den Temperaturverlauf des Kühlwassers beobachten.
- Temperaturänderung $\Delta\vartheta$ des Kühlwassers bestimmen und notieren.

Hinweis:

Wenn das Volumen des Kühlwasservorrats zu gering ist, wird die Temperatur im Vorratsbehälter ebenfalls ansteigen. Dann muss die gemessene Temperaturänderung $\Delta\vartheta$ entsprechend korrigiert werden.

- Mit Drehzahlsteller (**a**) eine neue Drehzahl einstellen und Messung wiederholen.

Messbeispiel

Volumendurchsatz des Kühlwassers: 780 cm³ in 5 min

Temperatur ϑ_1 im Zylinderkopf: 20,0 °C.

Tab. 1: Heizspannung U , Heizstrom I und Temperaturzunahme $\Delta\vartheta$ des Kühlwassers in Abhängigkeit von der Drehzahl f .

$\frac{f}{s^{-1}}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{A}$	$\frac{\Delta\vartheta}{^\circ C}$
2,7	7,5	1,7	2,4
2,9	7,6	1,8	2,5
3,2	8,0	1,9	2,7
3,4	8,2	2,0	2,9
3,7	8,6	2,1	3,2
4,0	9,0	2,2	3,5

Auswertung und Ergebnis

Tab. 2: Dem Kühlwasser zugeführte Wärme Q_1 , Kolbenreibrungsarbeit W_R , dem Zylinderkopf pro Umlauf entzogene Wärme Q_2 und mechanische Arbeit W für den Kreisprozess in Abhängigkeit von der Drehzahl f .

$\frac{f}{s^{-1}}$	$\frac{Q_1}{J}$	$\frac{W_R}{J}$	$\frac{Q_2}{J}$	$\frac{W}{J}$
2,7	9,7	1,1	4,7	3,9
2,9	9,4	1,1	4,7	3,6
3,2	9,2	1,0	4,8	3,4
3,4	9,3	1,0	4,8	3,5
3,7	9,4	1,0	4,9	3,5
4,0	9,5	1,0	5,0	3,5

Tab. 3: Wirkungsgrad (Leistungszahl) η der Kältemaschine in Abhängigkeit von der Drehzahl f .

$\frac{f}{s^{-1}}$	η
2,7	1,2
2,9	1,3
3,2	1,4
3,4	1,4
3,7	1,4
4,0	1,4

In Tab. 2 sind die dem Kühlwasser pro Umlauf zugeführte Wärme Q_1 (nach (V) berechnet), die Kolbenreibrungsarbeit W_R (aus Versuch P2.6.1.1 entnommen), die dem Zylinderkopf pro Umlauf entzogene Wärme Q_2 (nach (III) berechnet) und die mechanische Arbeit W für den Kreisprozess (nach (VI) berechnet) aufgeführt. Fig. 3 zeigt die Abhängigkeit der beiden letzten Größen von der Drehzahl f in einer graphischen Darstellung.

Aus den beiden Größen wird gemäß (II) die Leistungszahl η berechnet. Sie ist im Rahmen der Messgenauigkeit für Drehzahlen über $f = 3,0 s^{-1}$ konstant (siehe Tab. 3), liegt aber weit unter den bei praktisch angewendeten Kältemaschinen erreichten Werten.

Fig. 3 Wärme Q_2 (●) und mechanische Arbeit W (■) in Abhängigkeit von der Motorfrequenz f .

