

## Bestimmung des Wirkungsgrades des Heißluftmotors als Wärmekraftmaschine

### Versuchsziele

- Messung der dem Kühlwasser pro Umlauf zugeführten Wärme  $Q_2$ .
- Messung der pro Umlauf verrichteten mechanischen Arbeit  $W$ .
- Bestimmung des Wirkungsgrades  $\eta$  der Wärmekraftmaschine.

### Grundlagen

Eine Wärmekraftmaschine entnimmt einem Reservoir pro Umlauf die Wärmemenge  $Q_1$ , verrichtet die mechanische Arbeit  $W$  und gibt die Wärme  $Q_2$  an ein zweites Reservoir ab. Wenn keine thermischen Verluste auftreten, hat die innere Energie des Systems zu Beginn und am Ende denselben Wert; dann ist

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

Der Heißluftmotor zeigt dieses ideale Verhalten nicht, da er für Unterrichtszwecke optimiert wurde. Hier ermöglichen durchsichtige Maschinenteile den Einblick in den Funktionsablauf und auf eine thermische Isolierung des Zylinderkopfes wurde vollständig verzichtet. Ein erheblicher Teil der zugeführten elektrischen Leistung geht durch Wärmeleitung und -strahlung „verloren“. D.h.

$$Q_1 > Q_2 + W \quad (II)$$

Als Wirkungsgrad der Wärmekraftmaschine bezeichnet man normalerweise das Verhältnis

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \quad (III)$$

Beim Heißluftmotor ist es jedoch sinnvoller, das Verhältnis

$$\eta = \frac{W}{Q_2 + W} \quad (IV)$$

als Wirkungsgrad zu betrachten.

Die Wärme  $Q_2$  wird an das Kühlwasser des Heißluftmotors abgegeben und macht sich dort als Temperaturanstieg bemerkbar. Einen solchen Temperaturanstieg verursachen jedoch auch die Reibungsverluste  $W_R$  des Heißluftmotors, jedenfalls soweit es sich um die Kolbenreibung im Zylinder handelt (siehe P2.6.2.2). Diese Reibungsverluste müssen in einer Energiebilanz als mechanische Arbeit verbucht werden und zu der an der Schwungradscheibe verrichteten mechanischen Arbeit hinzugerechnet werden.

Im Versuch übt ein Pronyscher Zaum ein Drehmoment  $N$  auf die Kurbelwelle des Heißluftmotors aus (siehe Fig. 1). Der Heißluftmotor wird dadurch auf eine Drehzahl  $f$  abgebremst. Hier ist

$$W' = 2\pi \cdot N \quad (V)$$

die pro Umlauf an die Achse abgegebene mechanische Arbeit und

$$W = W' + W_R \quad (VI)$$

die gesamte pro Umlauf verrichtete mechanische Arbeit.

Die an das Kühlwasser abgegebene Leistung  $P$  wird aus der Temperaturänderung  $\Delta\vartheta$  bestimmt:

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

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

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

Daraus ergibt sich die dem Kühlwasser pro Umlauf zugeführte Wärme

$$Q'_2 = \frac{P}{f} \quad (VIII)$$

und die auf den eigentlichen Kreisprozess zurückzuführende Wärme  $Q_2$

$$Q_2 = Q'_2 - W_R \quad (IX)$$

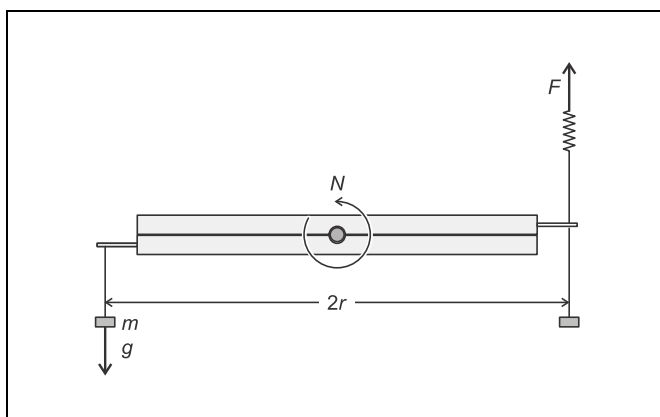


Fig. 1 Pronyscher Zaum zur Erzeugung eines abbremsenden Drehmoments  $N = (F + m \cdot g) \cdot r$

**Geräte**

1 Heißluftmotor . . . . .	388 182
1 Zubehör zum Heißluftmotor . . . . .	388 221
1 U-Kern mit Joch . . . . .	562 11
1 Spannvorrichtung . . . . .	562 12
1 Netzspule mit 500 Windungen . . . . .	562 21
1 Kleinspannungsspule, 50 Windungen . . . . .	562 18
1 Vielfach-Messgerät METRAMax 2 . . . . .	531 100
1 Vielfach-Messgerät METRAMax 3 . . . . .	531 712
1 Satz 12 Laststücke, je 50 g . . . . .	342 61
1 Präzisions-Kraftmesser 1,0 N . . . . .	314 141
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
2 Kleine Stativfüße, V-förmig . . . . .	300 02
1 Stativstange, 25 cm . . . . .	300 41
1 Stativstange, 47 cm . . . . .	300 42
1 Stativstange, 90° abgewinkelt . . . . .	300 51
2 Leybold-Muffen . . . . .	301 011

Experimentierkabel (zum Teil mit 2,5 mm<sup>2</sup> Querschnitt)

*zusätzlich erforderlich:*

offener Wasserbehälter (mindestens 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

**Aufbau**

Der Versuchsaufbau ist in Fig. 2 dargestellt.

**Temperaturmessung im Kühlwasser:**

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

**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.

**Spannungsversorgung:**

- Zylinderkopf-Deckel mit Heizwendel montieren (auf Markierung achten, siehe Gebrauchsanweisung zum Heißluftmotor).
- Schwungradscheibe drehen und Heißluftmotor auf Dichtheit überprüfen; ggf. Schlauchwelle für Drucksensor mit Verschlussstopfen verschließen.
- Zerlegbaren Transformator aufbauen und 12-V-Ausgang zusammen mit einem Volt- und einem Amperemeter (Messbereich 10 A) an die 4-mm-Buchsen des Zylinderkopf-Deckels anschließen.

**Sicherheitshinweise**

Der Heißluftmotor als Wärmekraftmaschine ist nicht selbst anlaufend und bleibt z. B. nach einem Stromausfall stehen. Auch Blockieren der Kolbenstangen und der Kurbelwelle kann einen Stillstand der Maschine verursachen. Bei einem Stillstand wird die dem Zylinderkopf zugeführte Wärme nicht ausreichend abgeführt.

- Gebrauchsanweisung zum Heißluftmotor beachten.
- Zylinderkopf bei stehender Maschine nicht permanent beheizen.
- Heißluftmotor nicht ohne Aufsicht laufen lassen.
- Bei einem Stillstand elektrische Heizung sofort ausschalten.
- Kolbenstangen und Kurbelwelle durch Aufsetzen des Schutzgitters vor unbefugtem Zugriff schützen.

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

- Heißluftmotor nicht ohne Kühlwasser betreiben und einwandfreien Kühlwasserumlauf überprüfen.
- Temperatur des eintretenden Kühlwassers nicht über 30 °C ansteigen lassen.
- Heizwendel nicht im Dauerbetrieb und nur bei schnell laufendem Motor auf hohe Temperaturen (Gelbglut) heizen.

Achtung: Zylinderkopf-Deckel und Anschlussbuchsen werden bei längerem Betrieb mit maximaler Heizleistung sehr heiß.

- Schutzgitter des Zylinders montieren.
- Heißluftmotor vor Entfernen der Anschlusskabel oder vor Austausch des Zylinderkopf-Deckels abkühlen lassen.

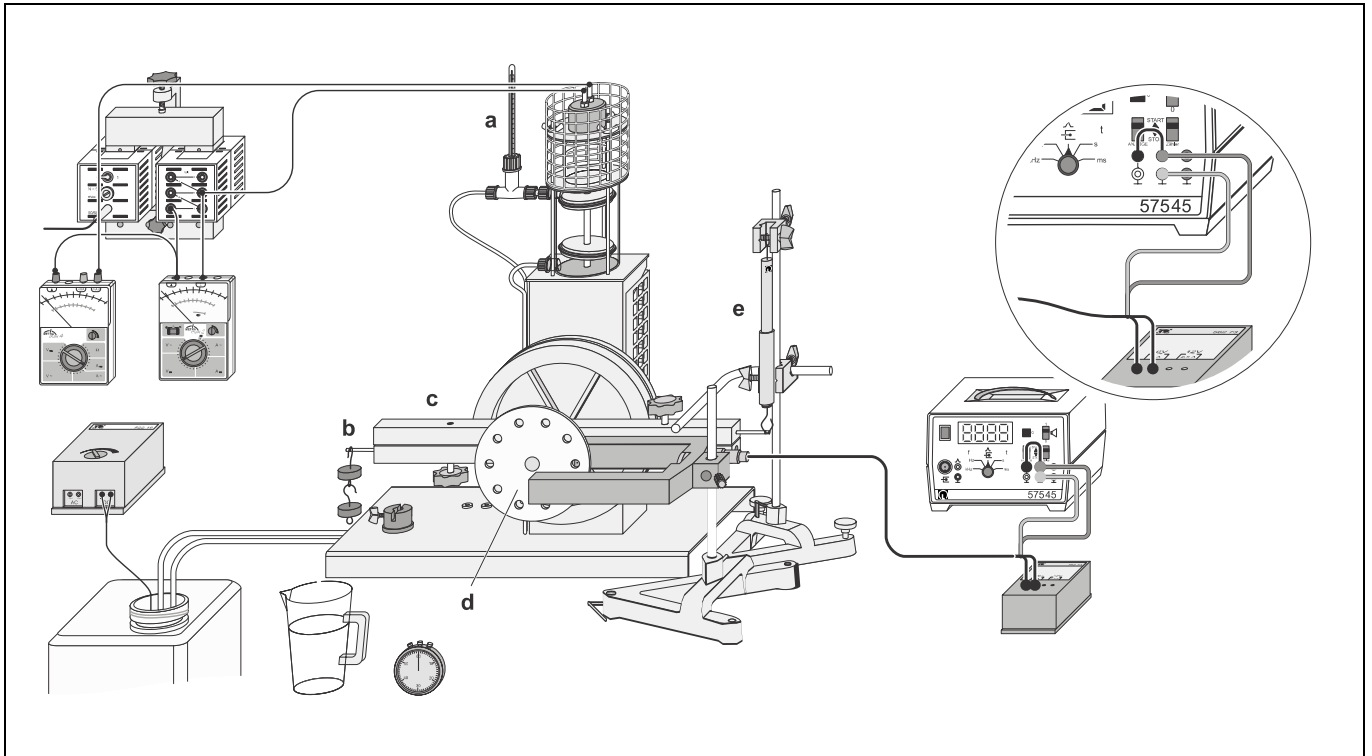


Fig. 2 Versuchsaufbau zur Bestimmung des Wirkungsgrades des Heißluftmotors als Wärmekraftmaschine

#### Frequenzmessung:

- Lochscheibe (**d**) aus dem Zubehör zum Heißluftmotor auf die Kurbelwelle heften.
- Gabellichtschanke auf kleinen Stativfuß montieren und auf ein Loch der stehenden Lochscheibe ausrichten.
- Gabellichtschanke 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.

### Durchführung

#### a) Leerlaufbetrieb

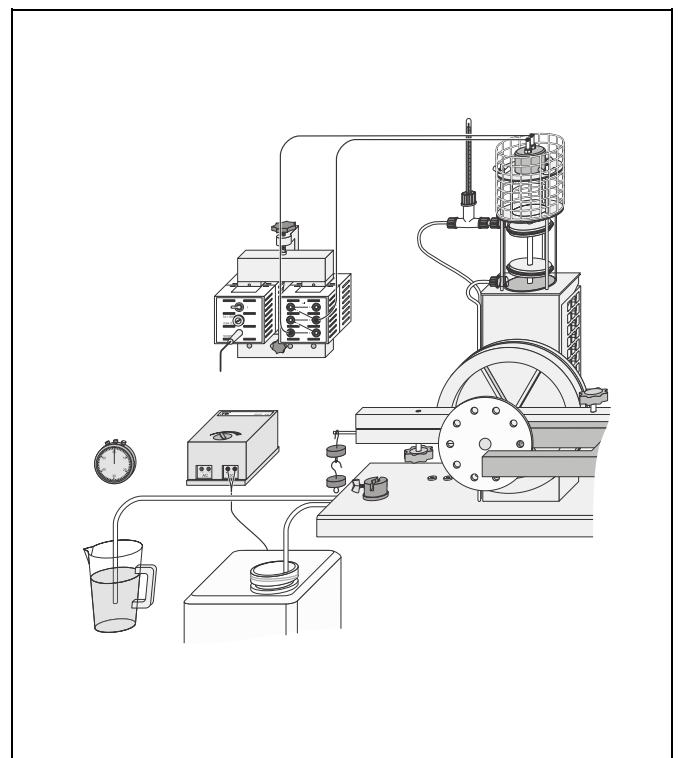
zunächst:

- 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  $\Delta V$  des Kühlwassers pro Zeitintervall  $\Delta t$  bestimmen (siehe Fig. 3).
- Temperatur  $\vartheta$  des Kühlwassers in Abständen von 2 Minuten messen und warten, bis der Verlauf eindeutig extrapolierbar ist.

danach:

- Zerlegbaren Transformator mit Ausgangsspannung  $U = 12\text{ V}$  einschalten.

Fig. 3 Bestimmung des Volumendurchsatzes  $\Delta V$  pro Zeiteinheit  $\Delta t$



Sobald die Heizwendel rot glüht:

- Durch Drehen der Schwungradscheibe im Uhrzeigersinn Heißluftmotor anwerfen.

Wenn der Heißluftmotor trotz mehrmaligen Anwerfens nicht anspringt:

- Zerlegbaren Transformator ausschalten und Aufbau überprüfen.

Sobald der Heißluftmotor selbständig läuft:

- Heizspannung auf  $U = 8\text{ V}$  reduzieren.

- Drehzahl  $f$  des Heißluftmotors messen und notieren.

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

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

anschließend:

- Zerlegbaren Transformator 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.

- Messung mit den Heizspannungen  $U = 10\text{ V}$ ,  $12\text{ V}$  und  $14\text{ V}$  wiederholen.

### b) Betrieb mit Pronyschem Zaum:

zunächst:

- Beide Hälften des Pronyschen Zaums (**c**) auf die Kurbelwelle des Heißluftmotors setzen, Rändelschrauben leicht anziehen und Zaum waagrecht ausrichten.
- Stativstange 47 cm auf kleinen V-förmigen Stativfuß montieren und daran Stativstange,  $90^\circ$  abgewinkelt befestigen.
- Präzisions-Kraftmesser 1,0 N (**e**) mit Leybold-Muffe an Stativstange befestigen, „rechte“ Öse des Pronyschen Zaums einhängen und Nullpunkt des Kraftmessers einstellen.

anschließend:

Hinweis:

Durch die mechanische Belastung darf die Maschine nicht zum Stillstand kommen. Bei Stillstand Maschine sofort wieder von Hand anwerfen oder elektrische Heizung sofort abschalten.

- Durch Zusammenschrauben der beiden Hälften des Pronyschen Zaums gewünschte Reibungskraft einstellen.
- Zum Ausgleich der Reibungskraft ein 50-g-Massenstück (**b**) an die linke Seite anhängen.
- Heißluftmotor mit Heizspannung  $U = 14\text{ V}$  betreiben und dabei Temperaturverlauf des Kühlwassers beobachten.

- Kraft  $F$  an Präzisionskraftmesser ablesen.

Abbremsendes Drehmoment:  $N = (F + m \cdot g) \cdot 0,25\text{ m}$

- Temperaturerhöhung des Kühlwassers bestimmen.

- Reibungskraft des Pronyschen Zaums erhöhen und Messung wiederholen.

### Messbeispiel

Volumendurchsatz des Kühlwassers:  $780\text{ cm}^3$  in 5 min

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{780\text{ cm}^3}{300\text{ s}} = 2,6 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$$

#### a) Leerlaufbetrieb:

Tab. 1: Messtabelle zum Leerlaufbetrieb.

$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{A}$	$\frac{f}{s^{-1}}$	$\frac{\Delta\vartheta}{^\circ C}$
8	7,6	1,6	3,3
10	9,4	4,2	5,3
12	>10	6,0	7,7
14	>10	7,4	10,0

#### b) Betrieb mit Pronyschem Zaum:

Tab. 2: Messtabelle zum Betrieb mit Pronyschem Zaum (Heizspannung  $U = 14\text{ V}$ )

$\frac{f}{s^{-1}}$	$\frac{\Delta\vartheta}{^\circ C}$	$\frac{m}{50\text{ g}}^*$	$\frac{F}{N}^*$
6,0	8,6	1	0,13
5,3	8,2	1	0,33
4,2	6,6	2	0,10

\* abbremsendes Drehmoment:  $N = (F + m \cdot g) \cdot 0,25\text{ m}$

**Auswertung und Ergebnis**

In Tab. 3 sind aus den Messgrößen berechnete Daten in Abhängigkeit von der Heizspannung  $U$  und dem abbremsenden Drehmoment  $N$  aufgeführt: Die jeweils erreichte Drehzahl  $f$  des Heißluftmotors, die Kolbenreibrbeitsarbeit  $W_R$  (aus Versuch P2.6.1.1 entnommen), die dem Kühlwasser durch den Kreisprozess pro Umlauf zugeführte Wärme  $Q_2$  (nach (VII)-(IX) berechnet) und die gesamte pro Umlauf verrichtete mechanische Arbeit  $W$  (nach (V) und (VI) berechnet).

Aus den beiden letzten Größen wird gemäß (IV) der Wirkungsgrad  $\eta$  ermittelt (siehe Tab. 4). Fig. 4–6 zeigen die Abhängigkeiten in graphischer Darstellung.

Tab. 3:

$\frac{U}{V}$	$\frac{N}{N \cdot m}$	$\frac{f}{s^{-1}}$	$\frac{W_R}{J}$	$\frac{W}{J}$	$\frac{Q_2}{J}$
8	0	1,6	2,6	2,6	19,8
10	0	4,2	1,0	1,0	12,7
12	0	6,0	1,0	1,0	13,0
14	0	7,4	1,0	1,0	13,7
14	0,16	6,0	1,0	2,0	14,6
14	0,21	5,3	1,0	2,3	15,8
14	0,27	4,2	1,0	2,7	16,1

Tab. 4:

$\frac{U}{V}$	$\frac{N}{N \cdot m}$	$\frac{f}{s^{-1}}$	$\eta$
8	0	1,6	0,12
10	0	4,2	0,07
12	0	6,0	0,08
14	0	7,4	0,07
14	0,16	6,0	0,12
14	0,21	5,3	0,13
14	0,27	4,2	0,14

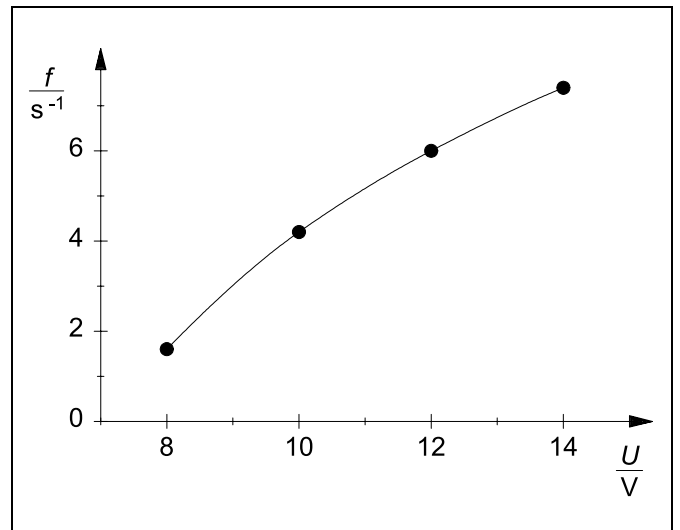


Fig. 4 Drehzahl  $f$  des ungebremsten Heißluftmotors in Abhängigkeit von der Heizspannung  $U$ .

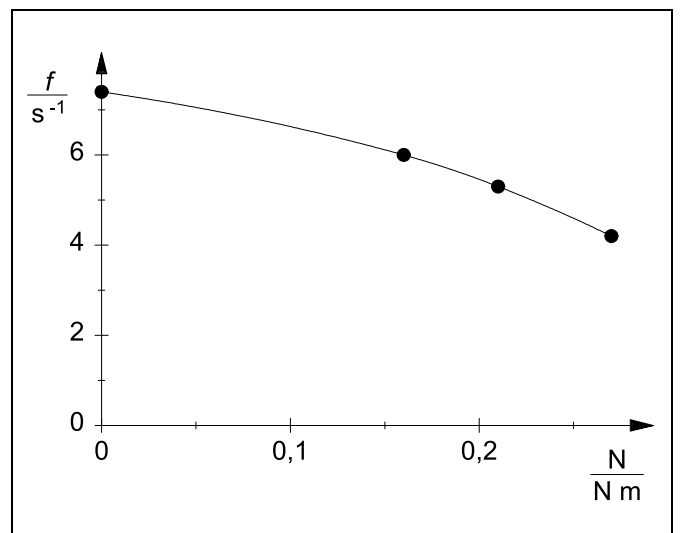


Fig. 5 Drehzahl  $f$  des Heißluftmotors in Abhängigkeit vom abbremsenden Drehmoment  $N$  (bei der Heizspannung  $U = 14\text{ V}$ ).

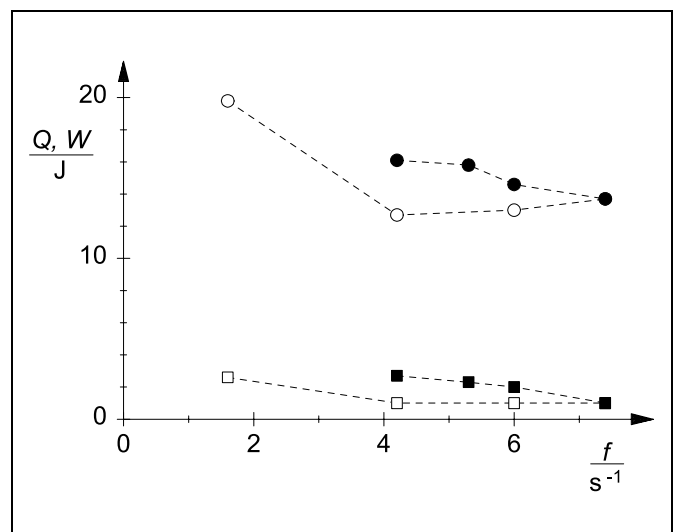


Fig. 6 Abhängigkeit der Größen  $Q_2$  und  $W$  von der Drehzahl  $f$   
 ● : Wärme  $Q_2$  im abgebremsten Betrieb  
 ○ : Wärme  $Q_2$  im Leerlaufbetrieb  
 ■ : mechanische Arbeit  $W$  im abgebremsten Betrieb  
 □ : mechanische Arbeit  $W$  im Leerlaufbetrieb

