

Stirling- oder Heißluftmotor

Ziele

- Kennenlernen der Arbeitsweise der Stirling-Maschine beim Betrieb als Wärmekraftmaschine, Wärmepumpe und Kältemaschine

1 Grundlagen

Bei vielen Energieumwandlungsprozessen werden Wärmekraftmaschinen eingesetzt, welche Wärmeenergie in mechanische oder elektrische Energie umwandeln. Aus der Vorlesung ist der **Carnotsche Kreisprozess** bekannt. Eine vom **Stirlingschen Kreisprozess** in idealisierter Form beschriebene Maschine ist die **Stirling-Maschine**, die sich außer in in einigen Spezialfällen technisch bisher nicht durchsetzen konnte, weil sie im Ablauf des Prozesses zu träge und in der mechanischen Leistungsfähigkeit zu begrenzt ist. Als Praktikumsgerät ist sie aber ideal.

1.1 Der Kreisprozess von Stirling

Kreisprozesse werden üblicherweise im pV -Diagramm dargestellt. Dabei wird der Druck des Arbeitsgases auf die Ordinate und dessen Volumen auf die Abszisse aufgetragen. Der Stirlingsche Kreisprozess, siehe Abbildung (1), beginnt wie der Carnotsche Prozess, z. B. bei der hohen Temperatur T_2 zunächst mit einer isothermen Expansion ($A \rightarrow B$), der sich eine isochore Abkühlung ($B \rightarrow C$) zur niedrigeren Temperatur T_1 anschließt (bei Carnot adiabatisch). Darauf folgt eine isotherme Kompression ($C \rightarrow D$) zum Ausgangsvolumen mit anschließender isochorer Erwärmung ($D \rightarrow A$) bis zur Anfangstemperatur T_2 .

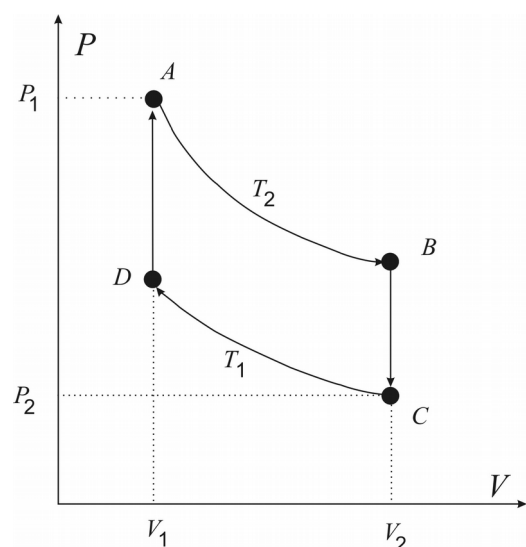


Abbildung 1: pV -Diagramm des Stirlingschen Kreisprozesses. Dies ist der idealisierte Verlauf, der im Experiment nicht zu realisieren ist.

1.2 Energiebilanz beim Stirlingschen Kreisprozess

Die Energiebilanz des Stirlingschen Kreisprozesses soll anhand des in Abbildung (1) dargestellten Zustandsdiagramms (pV -Diagramm) diskutiert werden, wobei das Arbeitsgas Luft als ideales Gas behandelt wird. Vom Gas abgegebene Wärmemengen werden als positiv, aufgenommene als negativ bezeichnet.

a) Isotherme Expansion (A \rightarrow B)

Die Luft dehnt sich auf dem Weg von A nach B vom Volumen V_1 isotherm auf das Volumen V_2 aus und verrichtet dabei die Arbeit (positiver Wert)

$$\Delta A_{AB} = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \nu \cdot R \cdot T_2 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \nu \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (1)$$

Dabei bedeuten ν die Stoffmenge des Gases (in mol) und R die allgemeine Gaskonstante.

Wegen $T_2 = \text{const.}$ ist auch die innere Energie des Gases konstant. Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik muss ΔA_{AB} durch eine entsprechende Wärmezufuhr ΔQ_{AB} aufgebracht werden (z. B. Wärmezufuhr durch Heizung), d. h. Wärme wird in mechanische Arbeit umgesetzt, und es gilt

$$\Delta A_{AB} = -\Delta Q_{AB}. \quad (2)$$

b) Isochore Abkühlung (B \rightarrow C)

Bei der isochoren Abkühlung auf dem Weg von B nach C vermindert das Gas seine innere Energie. Die Änderung der inneren Energie beträgt (negativer Wert)

$$\Delta U_{BC} = \nu \cdot c_{V, \text{Mol}} \cdot (T_1 - T_2), \quad (3)$$

mit $c_{V, \text{Mol}}$ als Molwärme bei konstantem Volumen.

Das Gas gibt bei dieser Zustandsänderung eine der Änderung der inneren Energie entsprechende Wärmemenge ΔQ_{BC} ab, also gilt

$$\Delta Q_{BC} = -\Delta U_{BC}. \quad (4)$$

c) Isotherme Kompression (C \rightarrow D)

Das Gas wird auf dem Weg von C nach D isotherm vom Volumen V_2 auf das Volumen V_1 komprimiert. Die am Gas verrichtete Kompressionsarbeit ist analog zu Gleichung (1)

$$\Delta A_{CD} = \nu \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}. \quad (5)$$

Wegen $V_1 < V_2$ ist $\ln \frac{V_1}{V_2} < 0$, was mit obiger Vorzeichenkonvention übereinstimmt. Im

Motorbetrieb wird diese Kompressionsarbeit vom Schwungrad geleistet. Diese Energie wird als Wärmemenge ΔQ_{CD} abgegeben (z. B. an ein Kühlmittel). Analog zu Gleichung (2) gilt

$$-\Delta A_{CD} = \Delta Q_{CD}. \quad (6)$$

d) Isochore Erwärmung (D \rightarrow A)

Bei der isochoren Erwärmung auf dem Weg von D nach A erhöht das Gas seine innere Energie (positiver Wert) gemäß

$$\Delta U_{DA} = \nu \cdot c_{V, \text{Mol}} \cdot (T_2 - T_1). \quad (7)$$

Dem Gas muss bei dieser Zustandsänderung eine der Änderung der inneren Energie entsprechende Wärmemenge zugeführt werden:

$$\Delta Q_{DA} = -\Delta U_{DA} \quad (8)$$

Aus den Gleichungen (3) und (7) folgt, dass die Änderungen der inneren Energie des Gases den gleichen Betrag, aber entgegengesetztes Vorzeichen haben. Wegen der Gleichungen (4) und (8) gilt daher auch

$$\Delta Q_{BC} = -\Delta Q_{DA}. \quad (9)$$

Gelingt es, die bei der isochoren Abkühlung (B \rightarrow C) abgegebene Wärmemenge ΔQ_{BC} zu speichern und sie dann dem System bei der isochoren Erwärmung (D \rightarrow A) wieder vollständig zuzuführen (ΔQ_{DA}), so fallen die bei den isochoren Prozessen umgesetzten Wärmemengen aus der Energiebilanz heraus. Das Gas hat in diesem idealisierten Fall bei dem Kreisprozess folgende Arbeit verrichtet:

$$\Delta A = \Delta A_{AB} + \Delta A_{CD} = \nu \cdot R \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} \cdot (T_2 - T_1) \quad (10)$$

Diese Arbeit entspricht im pV -Diagramm der Fläche ABCD.

Definiert man als Wirkungsgrad $\eta = \frac{\text{geleistete Arbeit } \Delta A}{\text{aufgenommene Wärme } \Delta Q_{AB}}$, so erhält man den Idealwert

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}. \quad (11)$$

Die Wärmemenge ΔQ_{AB} wurde dem Reservoir T_2 entnommen. Sie ist betragsmäßig gleich ΔA_{AB} , siehe Gleichung (2).

Der Wirkungsgrad nach Gleichung (11) stellt eine theoretische Obergrenze dar. Er entspricht dem der Carnot-Maschine. In der Praxis wird dieser Wirkungsgrad bekanntlich von beiden Maschinen leider nicht erreicht.

1.3 Betriebsarten des Stirlingmotors

a) Heißluftmotor

Der im letzten Abschnitt beschriebene Prozess ist der des Heißluftmotors, da das Gas insgesamt Arbeit verrichtet. Der Vorgang läuft selbstständig ab, wenn ΔA , siehe Gleichung (10), größer ist als die Verluste des Motors durch innere Reibung und mechanische Belastung. Es muss dabei dem Gas ständig Energie in Form von Wärme zugeführt (Heizung) und die Temperatur T_1 möglichst niedrig (Kühlung) gehalten werden, sowie die Temperatur T_2 möglichst hoch.

b) Kältemaschine

Der Drehsinn des Motors bleibt der gleiche wie unter Punkt (a), aber der Motor wird extern angetrieben und die Zufuhr von Wärme am Zylinderkopf ist ausgeschaltet. Dies führt zur allmählichen Abkühlung des Kopfes, da das Gas bei jedem Zyklus bei der Expansion von A nach B Wärme aufnimmt. Die Erniedrigung von T_2 setzt sich über viele Zyklen fort, bis $T_2 < T_1$ wird. Im pV -Diagramm liegen dann die Punkte A und B unterhalb von D und C. Der Durchlaufsin im pV -Diagramm hat sich dann umgedreht, was auch im folgenden Punkt (c) der Fall ist. Im Gegensatz zu (c) ist der Drehsinn des Motors bei (b) jedoch so, dass bei der Temperatur des Wärmereservoirs T_1 (des Kühlwassers) komprimiert wird, bei (c) wird bei dieser Temperatur expandiert.

c) Wärmepumpe

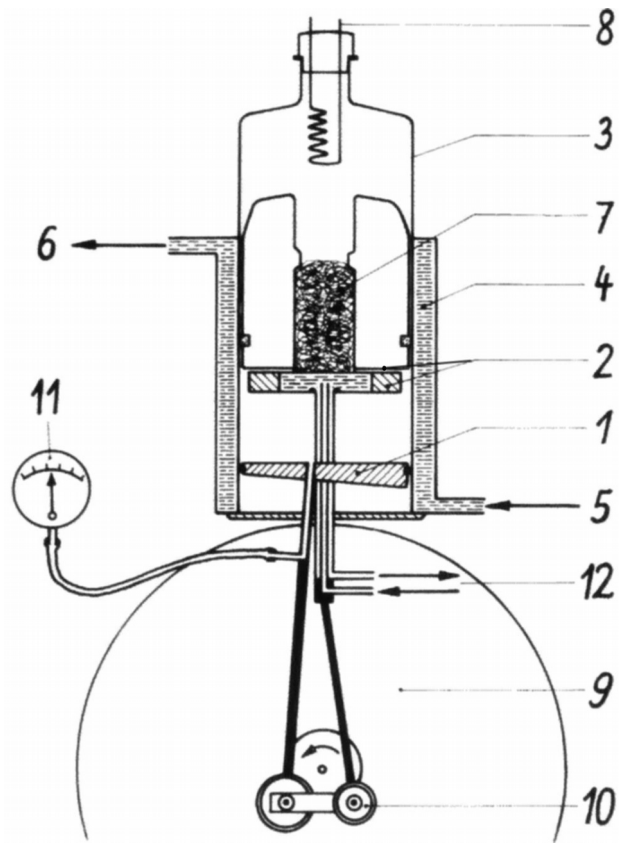
Wird der Motor extern angetrieben und der Drehsinn bei $T_1 < T_2$ geändert, so läuft der Prozess von A über D, C und B nach A. Bei der Expansion D nach C wird bei T_1 Wärme aufgenommen, bei der Kompression von B nach A wird bei T_2 Wärme abgegeben. Die Stirling-Maschine arbeitet nun als Wärmepumpe. Die bei der Kompression B nach A bei T_2 frei werdende Wärme kann z. B. zum Heizen benutzt werden.

Als Wirkungsgrad kann dann $\eta = \frac{\text{abgegebene Wärme } \Delta Q_{BA}}{\text{verrichtete Arbeit } \Delta A_{BA} + \Delta A_{DC}} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$ angegeben werden.

Dieser Wirkungsgrad ist größer als 1, d. h. man erhält mehr Wärmeenergie als man in Form von mechanischer Energie in die Maschine hineinsteckt. Dies ist ja gerade der Sinn einer Wärmepumpe. Obgleich es sich hier wieder um eine theoretische Obergrenze handelt, so kann man doch an der Formel sehen, wann sich eine Wärmepumpe zum Beispiel zur Gebäudeheizung lohnt: Die Temperatur T_1 des Reservoirs muss möglichst nahe bei der Abgabetemperatur T_2 , die im Haus ja etwa 20°C entspricht, liegen. Dies wird zum Beispiel erreicht, wenn Grundwasser (7°C bis 12°C) als Reservoir zu Verfügung steht. Es stellt andererseits aber ein großes Problem dar, wenn Außenluft als Wärmequelle dienen soll, und dies ungünstigerweise gerade im Winter.

1.4 Technische Realisierung des Stirling-Motors

Die Stirling-Maschine, siehe Abbildung (2), besteht im Wesentlichen aus einem Glaszylinder (3) und zwei Kolben. Innerhalb des Zylinders gibt es zwei Bereiche verschiedener Temperatur. Der untere Teil wird mit Wasser gekühlt (4), (12) und dadurch auf konstanter Temperatur T_1 gehalten. Im oberen Teil kann die Temperatur T_2 variiert werden, z. B. durch Heizen (8). Der Arbeitskolben (1) schließt den Zylinder nach unten hin ab. Wird er bewegt, so bewirkt er Änderungen des Volumens (z. B. A \rightarrow B oder C \rightarrow D). Mithilfe des Verdrängerkolbens kann das Gas von einem Temperaturbereich in den anderen gebracht werden. Dabei ändert sich das Volumen des Gases nicht. Bewegt sich z. B.



der Kolben von unten nach oben, so strömt das Gas mit der Temperatur T_2 durch die Kupferwolle (7) in den Bereich mit der Temperatur T_1 . Dabei ändert sich die innere

Abbildung 2: Schema der Stirling-Maschine der Firma „Leybold“. Arbeitskolben (1), Verdrängerkolben (2), Glaszylinder (3), Wasserkühlung (4) auf Temperatur T_1 , Wasserzulauf (5) und -ablauf (6), Kupferwolle (7), Heizwendel (8), Schwungrad (9), Exzenter (10), Manometer (11), Kühlwasser Verdrängerkolben (12).

Energie des Gases (isochore Zustandsänderung). Die dieser Änderung entsprechende Wärme wird in der Kupferwolle gespeichert. Damit die einzelnen Zustandsänderungen nacheinander erfolgen, sind Arbeits- und Verdrängerkolben über einen Exzenter (10) gekoppelt.

Das Manometer zur Messung des Gasdruckes ist in Form eines Drucksensors realisiert. Über einen Winkelsensor wird die Stellung des Arbeitskolbens, also das Gasvolumen, registriert. Somit ist mit diesen Daten die Aufzeichnung des pV -Diagramms möglich.

Sowohl die Temperatur im Zylinderkopf als auch die Kraft an der Welle zur Messung der mechanischen Leistung werden mit entsprechenden Sensoren gemessen. Näheres dazu findet sich in der Aufgabenstellung.

2 Aufgaben und Hinweise

2.1 Arbeitsweise der Maschine

Machen Sie sich die Arbeitsweise der Stirling-Maschine klar. Drehen Sie dazu das Schwungrad langsam mit der Hand. Spielen Sie dabei die vier Arbeitstakte beim Betrieb als Motor, Wärme- und als Kältemaschine durch.

Beschreiben Sie im Protokoll zuerst kurz die Funktion des Motors, indem Sie in einer Skizze die Stellungen der Kolben bei den einzelnen Punkten (A, B, C, D) des Kreisprozesses angeben. Für jeden Punkt sind die Größen zu nennen, die Extremalwerte erreichen. Beschreiben Sie die Bewegungsabläufe der Kolben während der einzelnen zugehörigen Prozessschritte in wenigen Sätzen. Begründen Sie, warum der Motor überhaupt läuft (pV -Diagramm oder Gleichungen für die Prozesse verwenden). Welche Prozessschritte werden beim Betrieb als Wärmemaschine und als Kältemaschine durchlaufen? Vergleichen Sie diese mit denen beim Motorbetrieb, indem Sie Änderungen und Gleichartiges benennen.

2.2 Die Stirling-Maschine als Kältemaschine und als Wärmepumpe

Montieren Sie den Zylinderkopf mit der dünnen Heizwendel und dem Thermoelement, welches mit dem Temperatursensor verbunden ist. Bitte achten Sie darauf, dass nur eine Gummidichtung verwendet wird¹. Ziehen Sie die drei Zylinderkopfschrauben gleichmäßig an, sodass die weiße Gummidichtung etwas gequetscht wird. Die Heizwendel wird vorerst nicht angeschlossen.

Die Aufzeichnung von $T(t)$ wird mit einem Temperatursensor durchgeführt, der sich über „Bluetooth“ mit einem Endgerät verbinden lässt. Dies kann entweder der am Messplatz vorhandene Laptop oder auch nach Installation der „measureApp“ ein Smartphone sein. Eine Übersicht der wichtigsten Funktionen der App sowie der QR-Code zum Download befinden sich am Messplatz.

Für die Temperaturmessung muss der Sensor zunächst vorbereitet werden. Halten Sie dazu den Schalter des Sensors solange gedrückt, bis er im Eingabemenü der App erscheint und aktivieren Sie ihn durch Anklicken. Als Abtastrate sollte 5 Hz eingestellt sein.

Legen Sie dann den schwarzen Rundschnurring als Antriebsriemen auf das größte Rillenrad des Elektromotors und das Schwungrad der Stirling-Maschine.

Lassen Sie jetzt, also vor der Messung, den Aufbau sowie den Kühlwasserdurchlauf durch den Versuchsbetreuer überprüfen.

¹ Die Gummidichtung kann am Glas des Zylinderendes beim Abbau eines Zylinderkopfes kleben bleiben. Wenn dann der andere mit seiner Dichtung aufgesetzt und fest angezogen wird, kann das Glas springen.

Schalten Sie den Elektromotor mit derjenigen Drehrichtung ein, die dem Kältemaschinenbetrieb entspricht. Helfen Sie ggf. dem Elektromotor am Schwungrad, das Anlaufen zu schaffen. Regulieren Sie auf 280 bis 300 Umdrehungen pro Minute und notieren Sie die Leistung des Elektromotors P_E , wobei Sie die schwankende Anzeige mitteln müssen.

Starten Sie nun die Messung der Temperatur $T(t)$ durch Aktivierung des roten Buttons auf dem Display des Endgerätes. Lassen Sie die Maschine ca. 10 Minuten laufen und beenden dann die Messung durch erneute Aktivierung des roten Buttons. Nach dem Abspeichern der Messung wiederholen Sie das Experiment bei gleicher Drehzahl des Elektromotors als Wärmepumpe (Leistung P_E notieren) und dann bei gleicher Drehzahl erneut als Kältemaschine (Messzeit jeweils ca. 10 Minuten).

Schauen Sie sich die gespeicherten Messkurven an und vergleichen Sie diese miteinander. Entspricht der Kurvenverlauf ihren Erwartungen? Geben Sie die maximale und die minimale Temperatur an, die Sie erreicht haben. Vergleichen Sie den Betrag der Temperaturerhöhung ΔT_{WP} der Wärmepumpe mit dem der Temperaturniedrigung ΔT_{KM} der Kältemaschine. Sie werden $\Delta T_{WP} > \Delta T_{KM}$ vorfinden. Interpretieren Sie diesen Befund (Hilfe: Innere Reibung der Maschine, unterschiedliche Leistung des Motors P_E in Verbindung mit Gleichung (10)).

2.3 Kälteleistung der Stirlingmaschine

Die Heizung erfolgt mit einer Gleichspannung (0 – 30 V). Schließen Sie das entsprechende Netzgerät an die Heizwendel mit denjenigen Kabeln an, welche die dünnen Stecker aufweisen.

Zeigen Sie erneut den Aufbau vor dem Einschalten dem Versuchsbetreuer!

Bestimmen Sie die Kälteleistung (einschließlich Unsicherheit) der Maschine für drei verschiedene Drehzahlen (**maximal 330 U/min!**), indem Sie die Heizleistung ermitteln, die erforderlich ist, um eine konstante Temperatur T_2 im Zylinder zu erreichen. Der Wert von T_2 ist geeignet zu wählen. Zur Beobachtung der Temperatur starten Sie wie oben mithilfe der „measureApp“ eine Messung als Funktion der Zeit.

Beim Einstellen des Heizstroms ist zu berücksichtigen, dass das System verzögert reagiert. Es ist auch häufig nicht möglich, völlige Konstanz von T_2 über längere Zeiträume aufrecht zu erhalten.

Begründen Sie im Protokoll Ihre Wahl der Gleichgewichtstemperatur.

2.4 Die Stirling-Maschine als Heißluftmotor

Bauen Sie den Zylinderkopf mit der dicken Heizspirale ein und schließen diese an das große Netzgerät an. Achten Sie wieder auf die Dichtung!

Anstelle eines einfachen Manometers wird der Druck, der im Zylinder herrscht, über einen Schlauch von einem Sensor gemessen. Außerdem ist der Arbeitskolben mit einem Winkelsensor gekoppelt. Bei Änderung des Volumens wird er gedreht. Es ist so möglich, mithilfe der „measureApp“ das pV -Diagramm aufzunehmen.

Schalten Sie dazu den Druck- und den Winkelsensor ein und warten Sie, bis die „Bluetooth“-Verbindung zwischen den Sensoren und dem Endgerät hergestellt ist. Die Sensoren werden nun im Eingabemenü der „measureApp“ angezeigt. Aktivieren Sie beide durch Anklicken, wobei Sie den bisher verwendeten Temperatursensor deaktivieren. Aktivieren Sie für den Winkelsensor als Messkanal ausschließlich den Winkel ϕ . Als Abtastfrequenz wird 5 Hz eingestellt. Ordnen Sie im unteren Teil des Eingabemenüs für die nachfolgende Messung den Koordinatenachsen die richtigen Messgrößen zu, sodass Sie ein pV -Diagramm aufzeichnen können.

Zeigen Sie erneut den Aufbau vor dem Einschalten dem Versuchsbetreuer! Dieser zeigt Ihnen auch die Technik beim Anwerfen des Motors.

Stellen Sie dann eine Heizspannung von ca. 15 V ein, und werfen Sie den Motor über das Schwungrad an, bis er selbstständig läuft. Drehen Sie nun die Spannung zurück. Die Drehzahl darf 340 U/min nicht überschreiten!

Achtung: Heizen bei stillstehendem Motor kann den Motor zerstören.

Starten Sie die Messung und nehmen über einige Umläufe das pV -Diagramm auf. Machen Sie danach eine analoge Messung bei einer anderen Heizspannung. Vergleichen Sie die Diagramme und nehmen Sie insbesondere zu Abweichungen von der Theorie Stellung. Beschreiben Sie weiterhin einschließlich Skizze die Messung des Volumens durch den Winkelsensor. Wie kann die Winkelanzeige des Sensors in Volumenwerte umgerechnet werden?

2.5 Mechanischer Wirkungsgrad des Motors

Eine mechanische Leistung des Motors kann mit Hilfe des sogenannten „Pronyschen Zaumes“ abgenommen und gemessen werden. Es wird hier allerdings eine andere, äquivalente Methode verwendet. Der gemessene Wirkungsgrad wird sehr klein ausfallen, da die nicht unerheblichen, schwer zu erfassenden innere Reibungsverluste des Motors ebenfalls zur mechanischen Leistung des Motors gezählt werden müssen.

In Abbildung (3) ist die klassische Vorrichtung zur Entnahme und Messung der Leistung mit dem „Pronyschen Zaum“ dargestellt.

Die Funktionsweise erklärt sich von selbst. Der Hebelarm des Motors ist der Wellenradius, der des Kraftmessers reicht von der Mitte der Welle zur Federwaage.

Hier wird statt des (zu instabilen) Zaums eine einfache Schnur, die an einem elektronischen Kraftsensor befestigt ist, verwendet und in geeigneter Weise bei laufendem Motor über die Welle gelegt.

Machen Sie den Kraftsensor analog zu den anderen Sensoren messbereit, sämtliche vorher verwendeten Sensoren werden deaktiviert. Bereiten Sie die Messung einer Kraft-Zeit-Kurve vor.

Legen Sie nun die Schnur mit einer einfachen Schleife über die Welle, sodass das Ende der Schnur durch die Schleife führt (sogenannter „Halber Schlag“, siehe Abbildung (4)). Die Schleife soll die Tendenz haben, sich selbst zuzuziehen und dadurch Reibung erzeugen. Die Stärke der Reibung, d. h. wie stark Sie den Motor abbremsen, regulieren Sie, indem Sie am Schnurende leicht (!) ziehen. In der Regel können Sie dann das Schnurende loslassen und eine zeitlich relativ stabile Kraft messen. Sie können auch mit zwei oder mehr Schleifen über der Welle arbeiten, probieren Sie es aus!

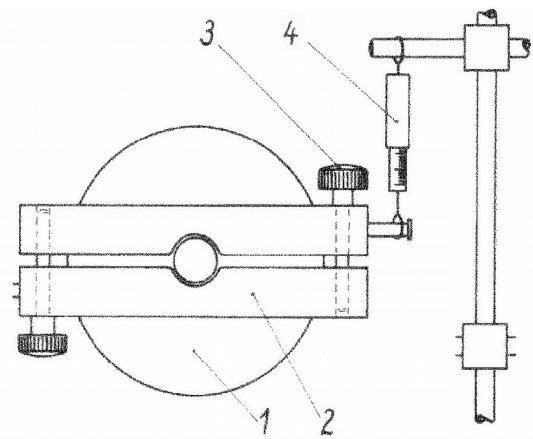


Abbildung 3: Schwungrad (1), „Pronyscher Zaum“ (2) mit Kraftmesser (4). Die Klemmschrauben (3) pressen die Hälften des Zaums an die sich drehende Motorwelle in der Mitte des Schwungrades.

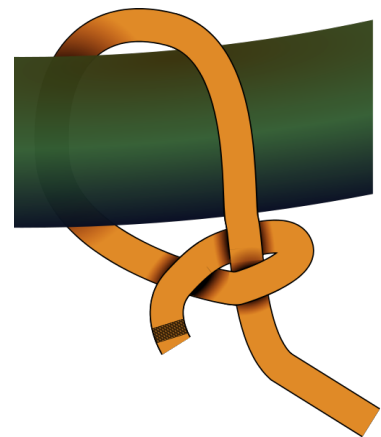


Abbildung 4: „Halber Schlag“ (aus Wikipedia).

Vorsicht: Halten Sie die Fingerspitzen beim Auflegen der Schleife vom Schwungrad fern. Die Speichen des Schwungrades können zu Verletzungen führen!

Durch Ziehen am Schnurende kann die Reibung vorsichtig erhöht werden, bis der Sensor gerade eine ablesbare Kraft F anzeigt. Die Kurve dient lediglich dazu, einen Mittelwert der Kraft abzuschätzen. Für das vom Kraftmesser ausgeübte Drehmoment gilt

$$M = r F , \tag{12}$$

wobei r der Wellenradius ist.

Mit gleichem Drehmoment wird die Achswelle an der Reibungsfläche gebremst und man kann sich leicht überlegen, dass für die durch diese Reibung dem Motor entnommene Leistung gilt:

$$P_{\text{Br}} = 2 \pi \cdot \nu \cdot M . \quad (13)$$

Dabei ist ν die Drehfrequenz des Motors.

Führen Sie nun eine Messung der Bremsleistung P_{Br} bei geringem Drehmoment für eine elektrische Heizleistung von ca. $P_{\text{El}} = 150 \text{ W}$ durch. Der Heizstrom der Glühwendel darf dabei aber den am Gerät angegebenen Grenzwert nicht übersteigen!

Rechnen Sie den ungefähren Wert von P_{Br} sofort aus.

Erhöhen Sie jetzt die Reibung so stark, dass der Motor gerade noch läuft.

Stillstand ist jedoch unbedingt vermeiden, da sonst die Heizwendel durchbrennt!

Die Drehzahl ist jetzt niedriger, aber P_{Br} sollte dennoch gewachsen sein, und dies bei gleichem P_{El} .

Als Wirkungsgrad kann man nun naheliegender Weise $\eta = \frac{P_{\text{Br}}}{P_{\text{El}}}$ definieren. Im Protokoll geben Sie die Werte für η für beide Belastungen an und versuchen zu erklären, warum das Ergebnis bei höherer mechanischer Belastung größer ist.

(Hinweis: Was passiert bei verschwindend kleiner mechanischer Belastung mit der hineingesteckten elektrischen Energie?)