

Physik-Praktikum:STI

Einleitung

Thermodynamische Kreisprozesse spielen eine wichtige Rolle in verschiedenen Bereichen des täglichen Lebens: zum Beispiel beruht praktisch die gesamte Energieerzeugung aus fossilen und nuklearen Brennstoffen darauf, aber auch alle Wärmepumpen und Kühlaggregate.

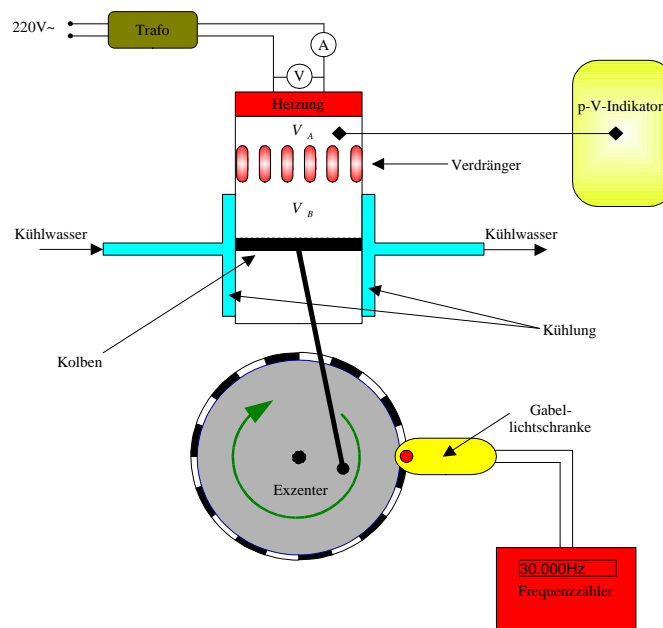
Der ideale Kreisprozess mit dem höchsten Wirkungsgrad ist der Carnot-Prozess, in dem ein ideales Gas die vier Schritte isotherme Expansion - adiabatische Expansion - isotherme Kompression - adiabatische Kompression periodisch durchläuft.

Der Stirlingprozess funktioniert ähnlich; er ist eine technisch realisierbare Näherung des Carnot-Prozesses, bei dem die adiabatischen Schritte durch isochore Schritte ersetzt wurden. Als Arbeitsmedium wird Luft verwendet, die im verwendeten Temperaturbereich (0° - 100° C) und Druckbereich sich annähernd wie ein ideales Gas verhält. Am Stirlingprozess kann man daher gut die Eigenschaften eines reversiblen Kreisprozesses beobachten.

Versuchsaufbau und Durchführung

Betriebs Wärmekraftmaschine

Beim Betrieb als Wärmekraftmaschine dient am oberen Ende des Zylinders eine Heizspirale als Wärmebad, und der durch fließendes Wasser aus der Wasserleitung gekühlte untere Teil fungiert als Kältebad. Die Heizleistung kann man aus der elektrischen Leistung des Heizdrahtes (aus Strom und Spannung, gemessen mit einem Amperemeter und einem Voltmeter) bestimmen, und die mechanische Leistung aus dem Drehmoment an einem Prony'schen Zaum (gemessen durch die Kraft, die das Drehmoment über den Zaum als Hebel ausübt) und die Drehgeschwindigkeit (gemessen mit einer Gabellichtschranke, die die Lichtunterbrechungen durch eine durchsichtige Scheibe mit zehn dunklen Markierungen misst – daher ist die tatsächliche Frequenz 1/10 der vom Frequenzzähler gemessenen Frequenz).



Aufnahme eines p-V-Diagramms bei belastetem und unbelastetem Motor

Die Bewegung des Kolbens ist mit dem Spiegel verbunden, der den Laserstrahl ablenkt; die Drehung des Spiegels in horizontaler Ebene ist somit proportional zum Volumen des Gases im Zylinder.

Die Bewegung des Spiegels in vertikaler Ebene wird durch einen Druckstempel erreicht, der über einen

Schlauch mit dem Zylinder verbunden ist und somit den im Zylinder herrschenden Druck anzeigt.

Kalibrierung des p-V-Diagramms

Zur Vorbereitung muss das p-V-Diagramm kalibriert werden; dazu pumpt man mit einer Luftpumpe Luft in den mechanischen Drucksensor, der den Druck in eine proportionale Spiegelauslenkung für den Laserstrahl umsetzt, und schreibt auf das Diagramm eine Skala mit den vom Manometer der Pumpe gelieferten Druckwerten.

Nachdem der Schlüssel zur Spannungsversorgung des Lasers aufgetaucht und dadurch Workarounds wie Kurzschließen oder Laserpointer überflüssig geworden waren, und auch der Grund für den sehr geringen Stromfluss durch den Heizdraht (Verschmutzung an der Befestigung des Heizdrahts, so dass praktisch kein Kontakt bestand) gefunden war, konnten die Messungen starten (hoher Mac Gyver-Faktor!).

Aufnahme eines p-V-Diagramms

Diagramme: siehe Graphen auf dem Millimeterpapier

Die Ecke rechts unten am Graph 4 (16 V, unbelastet) kam vermutlich durch Schwingungen der Versuchsapparatur zustande, da der Motor extrem schnell (mit ca. 9,6 Hz) lief, was deutlich über der in der Anleitung maximal erlaubten Geschwindigkeit (6 Hz) liegt. Die anderen Graphen sind auch nicht glatt, sondern wellenförmig, d.h. dort muss es auch Schwingungen gegeben haben.

Umrechnung der Diagrammfläche in Arbeit:

x-Achse: 23 Kästchen entspricht 1 bar (1 Kästchen = 1 cm²)

y-Achse: 27 Kästchen entspricht das Gesamtvolumen (150 cm³)

d.h. für die Leistung pro Fläche gilt:

$$\alpha = \frac{1,00 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 \cdot 150 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3}{0,23 \text{ m} \cdot 0,27 \text{ m}} = 241 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Fläche der Graphen:

Graph	Fläche	Arbeit	Frequenz [Hz]	Leistung [W]
Graph 1 (blau)	132 Kästchen	3,19 Joule	6,3	20
Graph 2 (grau)	152 Kästchen	3,67 Joule	4,0	15
Graph 3 (rosa)	182 Kästchen	4,40 Joule	9,6	42
Graph 4 (grün)	205 Kästchen	4,95 Joule	4,0	20

Bestimmung der elektrischen Heizleistung: $P_h = U \cdot I$;

Zur Messung des belasteten Motors wird ein Prony'scher Zaum verwendet, der eine einstellbare Reibungskraft auf die Drehachse ausübt. Die Leistung, die für die Reibung aufgewendet wird, kann man durch das Drehmoment bestimmen, das man über die an einem Hebel (=Zaum) angreifende Kraft messen kann:

$$P_m = 2 \pi f M = 2 \pi f \cdot F l$$

effektiver Wirkungsgrad:

$$\eta_{\text{eff}} = \frac{P_m}{P_h}$$

Nettoleistung: $P_p = f W_{\text{Diagramm}}$;

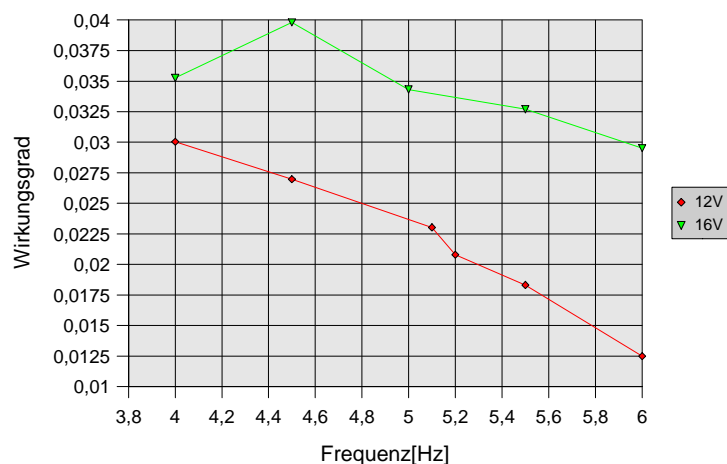
thermischer Wirkungsgrad:

$$\eta_{\text{therm}} = \frac{P_p}{P_h}$$

Länge des Hebels: ca. $l \approx 22,5 \text{ cm}$.

Drehfrequenz [Hz]	Kraft[N]	Drehmoment[Nm]	mechanische Leistung[W]	Heizspannung[V]	Strom[A]	Heizleistung[W]	effektiver Wirkungsgrad	thermischer Wirkungsgrad
6,3	unbelastet	-	-	12,38	13,83	171,2	-	12%
4,0	0,9	0,203	5,10	12,35	13,75	169,8	3,0%	9%
4,5	0,72	0,162	4,58	12,35	13,75	169,8	2,7%	-
5,1	0,54	0,122	3,91	12,35	13,75	169,8	2,3%	-
5,2	0,48	0,108	3,53	12,35	13,75	169,8	2,1%	-
5,5	0,4	0,0900	3,11	12,35	13,75	169,8	1,8%	-
6,0	0,25	0,0563	2,12	12,35	13,75	169,8	1,2%	-
9,6	unbelastet	-	-	16,10	16,93	272,6	-	15%
4,0	1,7	0,38	9,61	16,10	16,93	272,6	3,5%	7%
4,5	1,8	0,41	11,45	15,95	18,04	287,7	4,0%	-
5,0	1,4	0,32	9,9	15,97	18,06	288,4	3,4%	-
5,5	1,2	0,27	9,33	15,97	17,87	285,4	3,3%	-
6,0	1	0,23	8,48	15,97	18,00	287,5	3,0%	-

Frequenzabhängigkeit des Wirkungsgrads



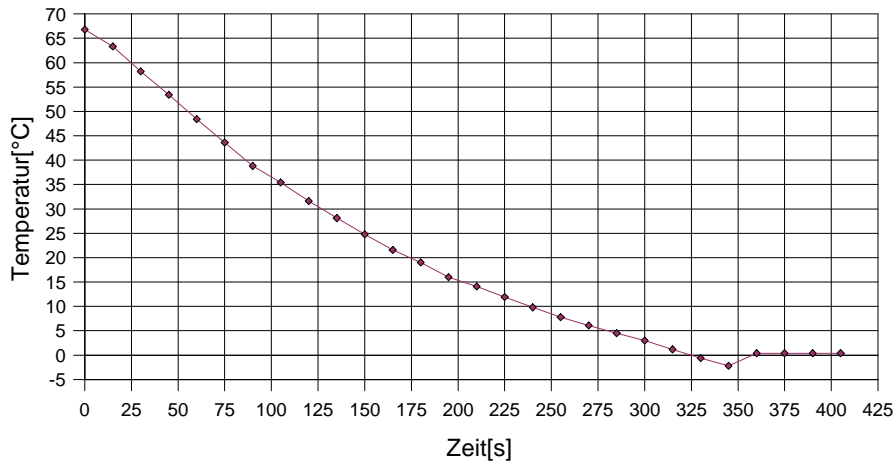
Abgesehen von einem „Ausreißer“ in der 16 V-Kurve ist zu sehen, dass der Wirkungsgrad mit der Frequenz abnimmt. Das liegt daran, dass bei hohen Drehgeschwindigkeiten das Gas (d.h. die Luft im Zylinder) weniger Zeit hat, sich zu erwärmen/abzukühlen, und dadurch die Druckänderung gering ist. Im p-V-Diagramm ergibt sich dadurch eine kleine umlaufene Fläche, die die erzeugte Leistung angibt (das ist in unseren Diagrammen aber praktisch nicht zu erkennen).

Deutlich ist auch zu sehen, dass der Wirkungsgrad mit der Temperaturdifferenz steigt: Das Kühlwasser hat eine konstante Temperatur, aber der Heizdraht hat eine deutlich höhere Temperatur, wenn 16 V statt 12 V anliegen.

Betriebskältemaschine

Zum Betrieb als Kältemaschine wird der Zylinderkopf mit dem Heizdraht entfernt und stattdessen ein Deckel, in dem ein kleines Reagenzglas sitzt, eingebaut. Im Glas befindet sich 1 ml Wasser, und mit einem elektronischen Thermometer kann man die Wassertemperatur messen. Damit die mechanische Leistung konstant ist, wird das Schwungrad über einen Keilriemen von einem Elektromotor angetrieben. Der Antrieb erfolgt im Uhrzeigersinn, aber das p-V-Diagramm wird jetzt im Gegenuhrzeigersinn durchlaufen – es handelt sich also um einen Linksprozess.

Kältemaschine



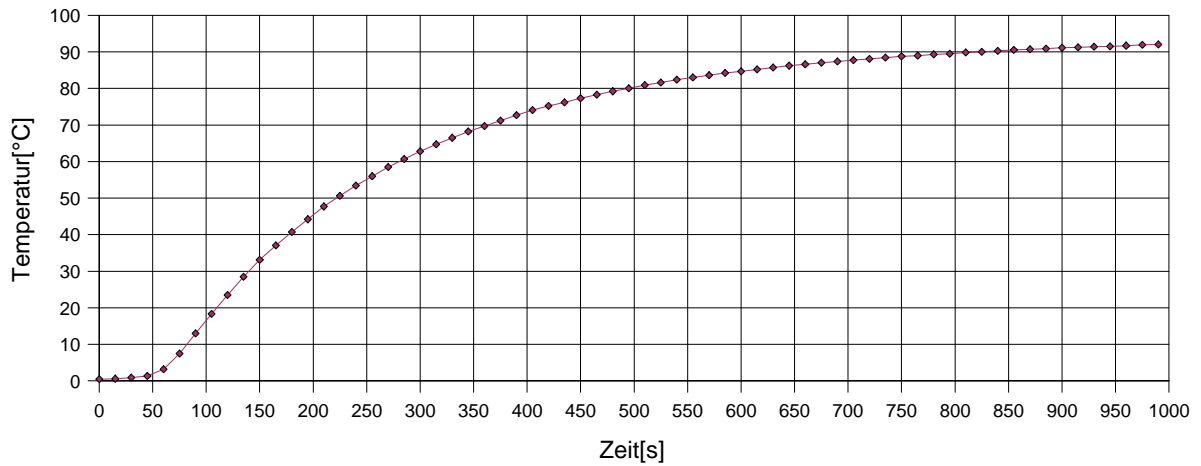
Hier sieht man deutlich die beim Gefrieren freiwerdende Wärme. Zuerst sinkt die Temperatur bis auf $-2,2\text{ °C}$; dann beginnt das Wasser zu gefrieren, und die Temperatur steigt auf $0,4\text{ °C}$ an (wäre das Messintervall kleiner als 15 Sekunden, könnte man sehen, dass dieser Anstieg ziemlich sprunghaft erfolgt), und bleibt dort konstant, obwohl die Kältemaschine weiter kühlt. Die Temperatur würde erst weitersinken, wenn das komplette Wasser gefroren wäre, solange haben wir aber nicht gemessen.

Bei der restlichen Kurve würde man erwarten, dass sie im Bereich der Temperatur des Kühlwassers (schätzungsweise 10 °C) am steilsten ist, weil dann die Temperaturdifferenz zum warmen Reservoir (dort, wo die Wärme hin gepumpt wird: hat Raumtemperatur) dann am geringsten ist und somit der Wirkungsgrad am höchsten sein sollte. Das ist offensichtlich nicht der Fall; scheinbar ist hier die Abstrahlung/Konvektion der Wärme in die Umgebung der dominierende Effekt, der umso größer ist, je größer die Temperaturdifferenz ist, und der Kältemaschine zuarbeitet, solange das Wasser wärmer ist als Raumtemperatur, und dagegen arbeitet, wenn es kälter ist.

Betriebswärmpumpe

Der Betrieb als Wärmepumpe ist eigentlich identisch mit dem Betrieb als Kältemaschine. In beiden Fällen wird Wärme vom kälteren Reservoir zum wärmeren Reservoir unter Aufwendung mechanischer Arbeit gepumpt. Lediglich die Drehrichtung des Exzentrers/Schwungrades bestimmt, wo das wärmere und wo das kältere Reservoir ist. Dreht sich das Schwungrad in die gleiche Richtung wie beim Betrieb als Wärmekraftmaschine (Uhrzeigersinn), geht der Wärmefluss in die gleiche Richtung, d.h. das obere Ende des Zylinders (wo bei der Wärmekraftmaschine der Heizdraht ist) wird abgekühlt, das untere Ende (wassergekühlt) wird erwärmt, man hat eine Kältemaschine. Bei umgekehrter Drehrichtung (Gegenuhrzeigersinn) wird Wärme aus dem unteren Teil des Zylinders nach oben zum Reagenzglas gepumpt, das Wasser wird erwärmt, wir haben eine Wärmepumpe. Weil hier auch wieder mit mechanischer Arbeit Wärmeenergie erzeugt (d.h. in die gewünschte Richtung gepumpt) wird, handelt es sich auch um einen Linksprozess.

Wärmepumpe



Wie man sieht, erhöht sich in der ersten Minute die Temperatur nur wenig, weil die angelieferte Wärme weitgehend zum Schmelzen des Eises benötigt wird. Danach steigt die Temperatur zuerst zügig und dann immer langsamer. Der Grund dafür ist erstens der Wärmetransport in die Umgebung: Je größer die Temperaturdifferenz des warmen Reservoirs zur Umgebung wird, desto mehr Wärme fließt (durch Strahlung, Konvektion oder Verdampfen des Wassers) in die kalte Umgebung, die Differenz zwischen angelieferter und wegfließender Wärme wird immer geringer. Zweitens sinkt bei Wärmepumpen auch der Wirkungsgrad, je größer die Temperaturdifferenz wird (anschaulich: vgl. Gaspumpen: je höher der aufgebaute Druck, desto mehr Gasteilchen strömen durch die Pumpe zurück).