

1 Fragen zur Vorbereitung

- ? Was bedeuten die Begriffe „Wirkungsgrad“, „Jahres-Arbeits-Zahl“¹, „Wärmereservoir“ und „Kältereservoir“?
- ? Erklären Sie die Funktionsweise der Joule-Thomson-Maschine.
- ? Berechnen Sie den theoretischen Wirkungsgrad des reversiblen Stirling-Kreisprozesses. Orientieren Sie sich an der Berechnung des Wirkungsgrades des Carnot-Prozesses. Was muss man voraussetzen, wenn man den Stirling-Prozess mit Hilfe der allgemeinen Gasgleichung berechnet? Welche Funktion hat der Regenerator im Stirling-Kreisprozess?
- ? Wie sieht das pV Diagramm für die unterschiedlichen Betriebsmodi (Motor, Wärmepumpe, Kältemaschine) aus?
- ? Erklären Sie das Produkt aus Leistungszahl und Wirkungsgrad einer Kraft-Wärme-/Wärme-Kraft-Maschine.

2 Geschichte

Der Stirling Motor wurde 1816 von Robert Stirling entwickelt und stellt die Realisierung einer Wärmekraftmaschine mittels isochoren und isothermen Prozessschritten dar. Im Gegensatz zu vielen anderen Antrieben ist er unabhängig von einem bestimmten Energieträger – nur eine (möglichst große) Temperaturdifferenz ist notwendig. Technische Anforderungen stellten lange ein Hindernis für den Einsatz dar, aktuelle Perspektiven bestehen im Bereich der Energieerzeugung (Kraft-Wärme-Kopplung, Solar). Da der Kreisprozess umkehrbar ist, kann der Stirling Prozess auch dazu genutzt werden eine Temperaturdifferenz zu erzeugen und ist in dieser Form eine Alternative zu cryogenen Flüssigkeiten (Pulsröhrenkühler²).

3 Versuchsaufbau

Der im Praktikum eingesetzte Stirling Motor wird von LD-Didactic (Heißluftmotor, 388 182) gebaut und besteht aus einem gläsernen Zylinder, der sowohl den Arbeits-, als auch den Verdrängerkolben enthält. Die Bewegung beider Kolben wird über die Schwungscheibe gesteuert; die Isothermen und Isochoren werden durch einen Phasenversatz von 90° zwischen der Bewegung der beiden Kolben angenähert. Bewegt sich der Verdrängerkolben, so wird das Arbeitsgas durch den Regenerator geleitet, der die Wärme, die während der einen Isochoren abgegeben wird, aufnimmt und in der anderen Isochoren dem Arbeitsgas wieder zuführt. Der Zylinder wird oben mit einem Deckel verschlossen, der wahlweise eine Heizwendel und/oder ein Thermometer aufnimmt. Am unteren Ende wird der Zylinder von Wasser umspült und so die Temperatur stabilisiert. Damit die

¹<http://www.jahresarbeitszahlen.info>

²<http://de.wikipedia.org/wiki/Pulsr%C3%B6hrenk%C3%BChler>

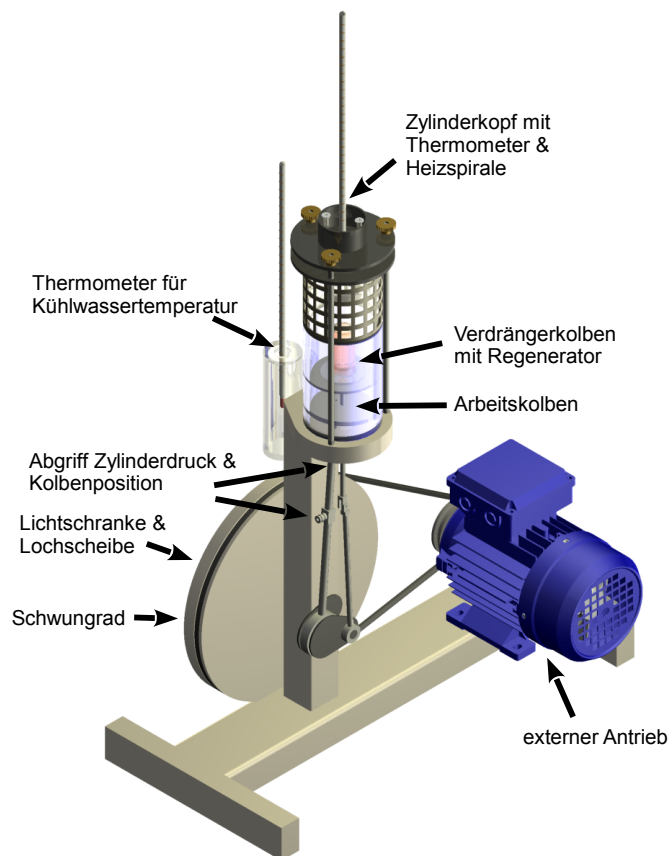


Abbildung ST.1: Aufbau des Leybold Heißluftmotors

verschiedenen Messwerte vergleichbar sind, müssen diese stets auf einen Zyklus bezogen werden.

4 Versuchsdurchführung

ROTIERENDE TEILE

Halten Sie ausreichend Abstand zum Keilriemen und der Mechanik – auch mit den Kabeln u.ä.

Beobachten Sie *alle relevanten Größen* jeweils bis das System den *Gleichgewichtszustand erreicht* hat (Temperaturänderung kleiner 1°C in 5 Minuten). Die Drehzahl und der Kühlwasserdurchsatz der Kältemaschine wird einmalig festgelegt. Kontrollieren Sie diese regelmäßig über den gesamten Versuch.

Bei externem Antrieb wird auch bei offenem Zylinderkopf eine Erwärmung des Kühlwassers beobachtet (Warum?). Die hierdurch abgeführte Wärme kann aus der Durchflussmenge und der Wärmekapazität bestimmt werden.

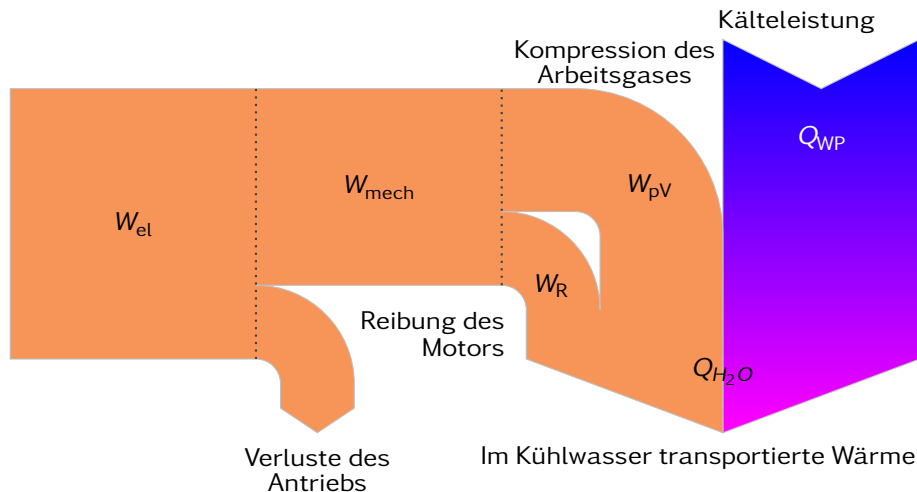


Abbildung ST.2: Energiefluss im Stirling Prozesses beim Betrieb als Kraft-Wärme-Maschine.

AUFGABE ST.1

Ermitteln Sie aus dem Anstieg der Kühlwassertemperatur die durch Reibung erzeugte Wärme pro Zyklus.

4.1 Kraft-Wärme-Maschine

Der Zylinderkopfdeckel wird ausschließlich durch den Betreuer installiert. Dieser enthält ein Thermometer, das die Temperatur im Innern des Zylinders misst. Die ebenfalls enthaltene Heizspirale dient dazu die Kälteleistung des Stirling-Motors zu kompensieren; die erbrachte Leistung kann über Multimeter bestimmt werden. Die vom Elektromotor aufgenommene Leistung wird an einem zwischengeschalteten Messgerät dargestellt.

HINWEIS

Betreiben Sie die Heizwendel nur bei laufendem Stirling Prozess (Elektromotor in Betrieb).

Die vom Elektromotor aufgenommene elektrische Leistung wird nur zum Teil als mechanische Leistung an die Wärme-Kraft-Maschine abgegeben. Reibung in der Mechanik reduziert die zur Verfügung stehende Leistung weiter (vgl. Abbildung ST.2). Im Stirling Prozess selbst wird der Rest ebenfalls in Wärme überführt (Warum?).

AUFGABE ST.II

Bestimmen Sie für 5 Temperaturen des Zylinderkopfs zwischen 10°C und 50°C sämtliche Kenndaten des Versuchs. Berechnen Sie daraus für das Modell der Kältemaschine

- die *äußeren Leistungszahl* aus elektrisch zugeführter Energie und transportierter Wärme,
- die *inneren Leistungszahl* aus thermodynamisch genutzter Energie und transportierter Wärme,
- die *Wirkungsgrad des Antriebs* aus elektrisch zugeführter und mechanisch verfügbarer Energie,

sowie für das Modell der Wärmepumpe

- die *äußeren Leistungszahl* aus elektrisch zugeführter Energie und gesamter abgegebener Wärme,
- die *inneren Leistungszahl* aus thermodynamisch genutzter Energie und abgegebener Wärme ohne Berücksichtigung der durch Reibung entstandenen Wärme.

AUFGABE ST.III

Schätzen Sie durch Extrapolation der Leistungszahl ab welche minimale Temperatur beim Einsatz als Kältemaschine erreicht werden kann.

4.2 Wärme-Kraft-Maschine

Nachdem der Zylinderkopfdeckel getauscht wurde, betreiben Sie den Stirling Motor als eigenständig arbeitende Maschine. Hierzu wird der Zylinderkopf elektrisch beheizt. Aus der umschlossenen Fläche des pV Diagramms kann ebenfalls die am Gas verrichtete Arbeit bestimmt werden. Dazu werden die Druck- und Volumenänderung des Zylinders abgegriffen und in Kippbewegungen eines Spiegels überführt. Ein hierauf gerichteter Laserstrahl zeichnet das pV Diagramm an die Wand. Die Kalibrierung der Achsen erhält man, indem die jeweils andere Achse abgekoppelt wird. Der Hubraum beträgt 150 ml, der Druck kann direkt gemessen werden.

Die elektrisch zugeführte Leistung wird über die Messung von Strom und Spannung bestimmt; Wählen Sie eine Schaltung, die den Gesamtfehler der Messung minimiert. Die abgeführte Wärme bestimmen Sie aus der Temperaturänderung des Kühlwassers.

HEIZUNG

Der Zylinderkopf und die Zuleitungen werden im Betrieb heiß!



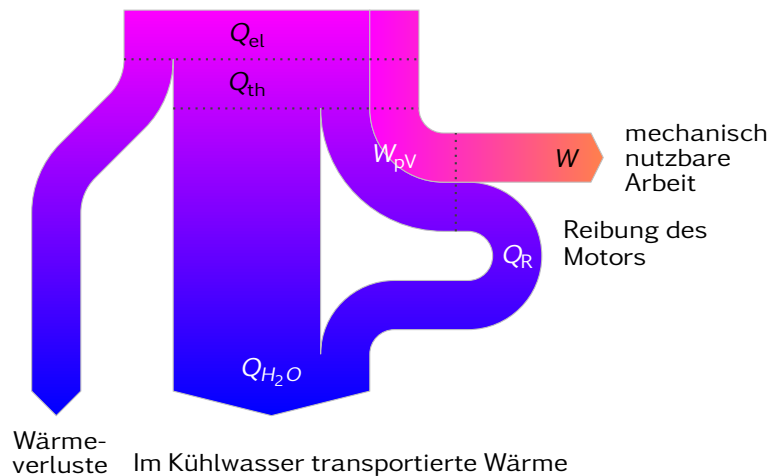


Abbildung ST.3: Energiefluss im Stirling Prozesses beim Betrieb als Wärme-Kraft-Maschine.

LASER

Laserstrahlung Klasse 2
Nicht in den Strahl blicken!



HINWEIS

Bleibt der Stirlingmotor bei eingeschalteter Zylinderkopfheizung stehen, so muss die Heizung unverzüglich abgeschaltet werden.

AUFGABE ST.IV

Ermitteln Sie hieraus

- den *elektrischen Wirkungsgrad* aus der zugeführten elektrischen Energie und der nutzbaren Arbeit,
- den *thermodynamischen Wirkungsgrad* aus der thermodynamisch genutzten Energie und der nutzbaren Arbeit,
- sowie den *Wirkungsgrad des idealen Stirlingmotors* aus der thermodynamisch genutzten Energie und der erzeugten mechanischen Arbeit.

AUFGABE ST.V

Abbildung ST.4 zeigt exemplarisch die Infrarotstrahlung eines Stirlingmotors während des Betriebs. Hieraus lassen sich die Temperaturen der einzelnen Komponenten bestimmen. Berechnen Sie damit den Carnot Wirkungsgrad. Ist das Ergebnis konsistent mit Ihren eigenen Messungen?

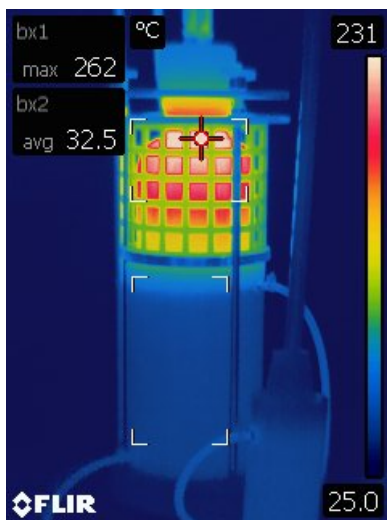


Abbildung ST.4: Aufnahme einer Wärmebildkamera im $10\mu\text{m}$ Fenster. Für das Kältereservoir ist die mittlere Temperatur angegeben. Das Schutzgitter verhindert die freie Sicht auf das Wärmereservoir, weshalb hier das Maximum angegeben ist.

? Warum ist die Heizwendel nicht zu erkennen?