

## Übung 2

Abgabe: Freitag, 23. April 2004

### Aufgabe 1

Die Stromerzeugung in der Dampfturbine eines kohlebeheizten thermischen Kraftwerks erfolgt mittels eines ähnlichen Kreisprozesses, wie er in der Vorlesung (S. 6f.) behandelt wurde. Dabei ist die höhere Betriebstemperatur  $T_\alpha$  die Temperatur des erzeugten Dampfes und die niedrigere Betriebstemperatur  $T_\beta$  die Temperatur des Kühlmediums.

Ein typisches Kohlekraftwerk (1000 Megawatt) stößt pro Tag ca. 30 000 Tonnen (!) Kohlendioxid aus. Als Kühlmedium wird die Umgebungsluft ( $T_\beta = 10^\circ\text{C}$ ) benutzt. Die Arbeitstemperatur  $T_\alpha$  der Turbine wird durch die metallurgischen Eigenschaften von Stahl beschränkt und beträgt  $550^\circ\text{C}$ . Wenn man neuartige Keramikmaterialien verwenden würde (wie dies heute erprobt wird), könnte man die Arbeitstemperatur auf  $1400^\circ\text{C}$  erhöhen. Um wieviel würde sich dann der  $\text{CO}_2$ -Ausstoß bei gleicher Stromabgabe verringern?

*Annahmen:* Die Dampfturbine hat den gleichen Wirkungsgrad wie der in der Vorlesung behandelte Carnot-Prozess; der  $\text{CO}_2$ -Ausstoß ist proportional zu der vom warmen Reservoir abgegebenen Wärmemenge.

### Aufgabe 2

Der heute in Kraftfahrzeugen gebräuchliche Viertakt-Benzinmotor wurde 1876 von N. A. Otto erfunden. Seine Funktionsweise beruht – stark idealisiert – auf dem Kreisprozeß von Abb. 1.

**2.1** Wie groß ist die gesamte während des Kreisprozesses ausgetauschte Wärmeenergie  $\oint \delta Q$  und Arbeit  $\oint \delta A$ ?

*Annahmen:* Das Arbeitsmedium ist ein ideales Gas; alle Prozesse werden reversibel geführt. Die Wärmekapazität  $C_V$  bei konstantem Volumen kann als temperaturunabhängig betrachtet werden.

- 1→2 adiabatische Kompression auf das Volumen  $V_2$
- 2→3 isochore Erwärmung von der Temperatur  $T_2$  auf die Temperatur  $T_3$
- 3→4 adiabatische Expansion auf das Volumen  $V_4 = V_1$
- 4→1 isochore Abkühlung von der Temperatur  $T_4$  auf die Temperatur  $T_1$

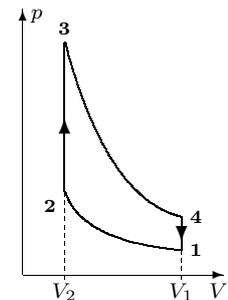


Abbildung 1: Funktionsweise eines Ottomotors

**2.2** Man drücke den thermischen Wirkungsgrad

$$\eta := |\oint \delta A| / Q_{\text{aufgenommen}}$$

mit Hilfe der vier Temperaturen  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  und  $T_4$  aus.

**2.3** Man zeige, daß  $\eta$  nur vom sogenannten Kompressionsverhältnis  $\varepsilon := V_1/V_2$  abhängt. *Hinweis:* Man benutze die in der Vorlesung hergeleitete Adiabaten Gleichung

$$\frac{T_a}{T_b} = \left(\frac{V_b}{V_a}\right)^\kappa \quad \text{mit} \quad \kappa := \frac{nR}{C_V},$$

um  $T_1$  und  $T_4$  mit Hilfe von  $T_2$  und  $T_3$  auszudrücken. Wie groß ist  $\eta$  bei einem Kompressionsverhältnis von  $\varepsilon = 7$  unter der vereinfachenden Annahme, daß  $C_V$  den konstanten Wert  $\frac{5}{2}nR$  hat?

**2.4** Man skizziere qualitativ die  $\varepsilon$ -Abhängigkeit von  $\eta$ . Wieso kann man in der Praxis die Kompression nicht beliebig hoch treiben?

### Aufgabe 3

Ebenso, wie man einen Kreisprozeß verwenden kann, um über eine Temperaturdifferenz zwischen zwei Wärmebädern Wärme in Arbeit zu verwandeln, kann man – indem man den Zyklus umgekehrt durchlaufen läßt – mit Hilfe äußerer Arbeit

## Aufgabe 4

Wärme aus einem Reservoir niedriger Temperatur  $T_\beta$  in ein Reservoir höherer Temperatur  $T_\alpha$  transportieren.

Als Beispiel einer solchen Wärmepumpe wollen wir den im Skript (S. 6f.) beschriebenen Carnot-Prozeß (mit einem idealen Gas als Arbeitsmedium) verwenden. Die wesentliche Größe ist dabei das Leistungsverhältnis

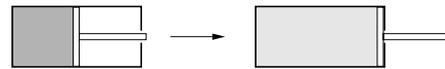
$$\varepsilon := \frac{|Q_{21}|}{|\oint \delta A|} = \frac{|Q_{21}|}{|Q_{21}| - |Q_{43}|} > 1,$$

das angibt, wieviel mal mehr Wärme  $|Q_{21}|$  an das wärmere Reservoir abgegeben wird, als äußere Arbeit  $|A| = |\oint \delta A|$  eingesetzt werden muß. Wie man aus den Definitionen sieht, ist  $\varepsilon = 1/\eta$ , wobei  $\eta$  der thermische Wirkungsgrad ist, wenn derselbe Prozeß als Wärmekraftmaschine läuft.

- 3.1** Man drücke das Leistungsverhältnis  $\varepsilon$  mit Hilfe der Temperaturen  $T_\alpha$  und  $T_\beta$  aus.
- 3.2** Man skizziere qualitativ die Abhängigkeit des Leistungsverhältnisses  $\varepsilon$  von der hohen Temperatur  $T_\alpha$  bei festgehaltener tiefer Temperatur  $T_\beta$ . Für welches  $T_\alpha$  ist die Energiebilanz am günstigsten?
- 3.3** Wieviel elektrische Leistung (= elektrische Energie pro Zeiteinheit) muß eine Wärmepumpe bei thermodynamisch idealen Bedingungen aufnehmen, um eine Heizleistung von 8000 W zu erbringen ( $1 \text{ W} = 1 \text{ J s}^{-1}$ ), wenn sie Wärme aus dem Grundwasser ( $9^\circ\text{C}$ ) entzieht? Die gewünschte Raumtemperatur betrage  $20^\circ\text{C}$ .

In einem Wärmebad der Temperatur  $T = 300 \text{ K}$  befindet sich ein Gefäß vom Volumen  $2\ell$ , das durch eine Wand in zwei gleiche Hälften geteilt ist. Am Anfang enthält die eine Hälfte ein ideales Gas im Gleichgewicht bei einem Druck von  $p_1 = 10 \text{ atm}$ . Die zweite Hälfte ist leer. Am Ende ist das Gas gleichmäßig auf beide Hälften verteilt. Der Prozeß kann reversibel oder irreversibel geführt werden.

- *Reversible Führung:* Durch langsames Verschieben der Trennwand (so daß das System zu jedem Zeitpunkt im Gleichgewicht ist) wird Volumenarbeit an die Umgebung abgegeben und Wärme aus der Umgebung aufgenommen.



- *Irreversible Führung:* Durch ein Loch in der Wand strömt das Gas bis zum Druckausgleich von der ersten in die zweite Gefäßhälfte aus. Es wird keine Volumenarbeit an die Umgebung abgegeben.



Wie groß ist die Entropieänderung des Gases und des Wärmebads für die beiden Prozesse?  
*Annahme:* Der Wärmeaustausch auf beiden Seiten des Wärmebads erfolgt reversibel.