6. Der Carnot'sche Kreisprozess – Wiederholung

In **mathematischer Schreibweise** wurde der **1. Hauptsatz der Thermodynamik** formuliert:

$$dU = dQ + dW$$

Die **Änderung d*U* der inneren Energie *U*** eines Systems ist **gleich** der **übertragenen Wärme d*Q* plus der mechanischen Arbeit d*W***.

Es gibt keine Zustandsänderung, deren einziges Ergebnis die Übertragung von Wärme von einem Körper niederer auf einen Körper höherer Temperatur ist. Das ist die Aussage des
2. Hauptsatzes der Thermodynamik.
Einfacher ausgedrückt: Wärme kann nicht von selbst von einem Körper niedriger Temperatur auf einen Körper höherer Temperatur übergehen.
Diese Aussage scheint zunächst überflüssig zu sein, denn sie entspricht der alltäglichen Erfahrung, wie die über die Anziehungskraft der Erde. Dennoch ist sie äquivalent zu allen weiteren, weniger „selbstverständlichen" Aussagen, denn alle Widersprüche zu den anderen Aussagen lassen sich auf einen Widerspruch zu dieser zurückführen.

Carnot - Prozess

Daraus kann man umgekehrt schließen, dass keine Wärmekraftmaschine (mit unterschiedlichen Temperaturen im Prozess) 100 % Wirkungsgrad haben kann.
Was ist aber nun der theoretisch beste Wirkungsgrad einer solchen Maschine, die mit zwei Wärmereservoirs der Temperaturen T_H and T_C arbeitet. Diese Frage wurde nun von dem Franzosen Sadi Carnot beantwortet, der die hypothetische und idealisierte Maschine mit dem höchst möglichen Wirkungsgrad entwickelte, die mit dem 2. Hauptsatz konsistent ist. Diesen Prozess nennt man den Carnot'schen Kreisprozess.
Wir haben gesehen, die Umwandlung mechanischer Arbeit in Wärme ist irreversibel. Der Zweck einer Wärmekraftmaschine ist die partielle Umkehr des Prozesses, der Erzeugung von Arbeit aus Wärme mit dem größten möglichen Wirkungsgrad.
Um den höchst möglichen Wirkungsgrad zu erzielen, müssen wir alle irreversiblen Prozesse vermeiden.
Der Wärmestrom über eine Temperaturdifferenz ist immer irreversibel und deshalb darf ein Wärmefluss nur bei finiten Temperaturdifferenzen (ΔT nahe 0) erfolgen.
Wenn die Maschine Wärme aus dem heißen Reservoir T_H übernimmt, muss sie selbst die gleiche Temperatur T_H haben. Wenn nicht, würde es zu einem irreversiblen Wärmestrom kommen.

Entsprechend, wenn Wärme zum kalten Reservoir T_c zurückgeführt wird, muss die Maschine selbst auf T_c sein. Somit muss jeder Prozess, bei dem ein Wärmetransport stattfindet, ein isothermer Prozess sein, entweder bei T_H oder T_c.
Weiterhin darf kein Wärmetransport in der Maschine stattfinden, wenn sich die Temperatur ändert, kurz gesagt, im idealisierten Prozess muss jede Veränderung isotherm oder adiabatisch ablaufen. So ist bei diesem Teil des Prozesses kein thermisches Gleichgewicht sondern ein mechanisches Gleichgewicht muss erhalten bleiben, damit jeder Prozess reversibel bleibt.

Der Carnot'sche Kreisprozess besteht aus zwei isothermen und zwei adiabatischen Prozessen. Der Prozess nutzt ein ideales Gas als Arbeitsmittel und wir schauen uns das im ***pV*-**Diagramm an.

Wir hatten dann die folgenden Schritte gesehen:

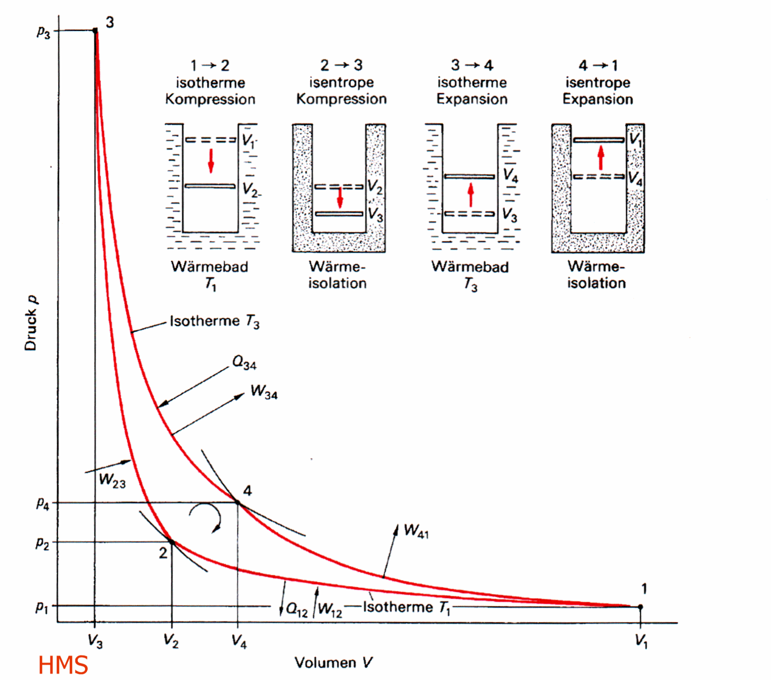

Abb. 3.24 Carnot'scher Kraftmaschinenprozess. *Q* Wärme, *W* Arbeit, rot umgrenzte Fläche: Nutzarbeit

a) $1 \Rightarrow 2$
Das Gas wird zusammengepresst und nimmt dabei die Arbeit W_{12} auf, die als Wärmefluss isotherm an das Reservoir abgegeben wird.
Mathematisch beschrieben:
Isotherme Kompression von V_1 auf V_2 (Zustand 1 nach Zustand 2).
Die bei der tiefen Temperatur T_1. **zugeführte Arbeit**

$$W_{12} = n \cdot R_m \cdot T_1 \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}$$ ist

betragsmäßig gleich der **abgegebenen Wärme (-W_{12})**

$$Q_{12} = -n \cdot R_m \cdot T_1 \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}$$

b) $2 \Rightarrow 3$
Das Gas wird ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung komprimiert, wobei Energie als mechanische Arbeit zugeführt wird.
Mathematisch:
Isentrope Kompression
von V_2 auf V_3, **die Temperatur steigt von T_1 auf T_3**.
Zugeführte Arbeit

$$W_{23} = n \cdot C_{vm} \cdot (T_3 - T_1)$$

c) $3 \Rightarrow 4$
Das Gas expandiert isotherm bei der Temperatur T_3 und nimmt dabei die Wärme Q_{34} auf. Mathematisch beschrieben:
Isotherme Expansion von V_3 auf V_4 (Zustand 3 nach Zustand 4) bei der hohen Temperatur T_3.
Die zugeführte Wärme

$$Q_{34} = n \cdot R_m \cdot T_3 \cdot \ln \frac{V_4}{V_3}$$

ist betragsmäßig gleich der sofort wieder abgegebenen Arbeit

$$W_{34} = -n \cdot R_m \cdot T_3 \cdot \ln \frac{V_4}{V_3}$$

d) $4 \Rightarrow 1$
Das Gas expandiert adiabatisch bis die Temperatur auf T_1 gefallen ist. Mathematisch beschrieben:
Isentrope Expansion von V_4 auf V_1;
die Temperatur fällt von T_3 auf T_1;
abgegebene Arbeit

$$W_{41} = -n \cdot C_{vm} \cdot (T_3 - T_1)$$

Die weiteren Berechnungen sehen wir im Skript und haben das schon früher behandelt.