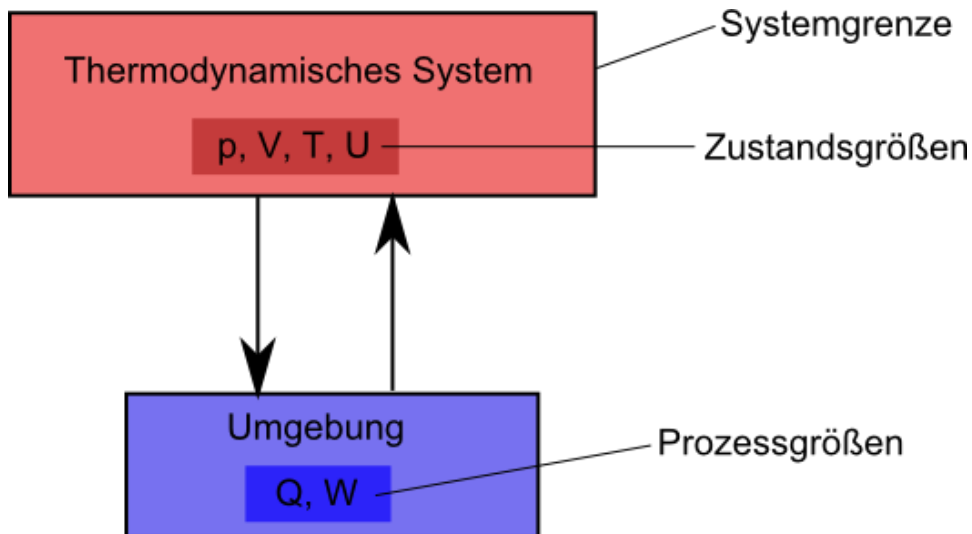


Thermodynamik

Thermodynamische Systeme



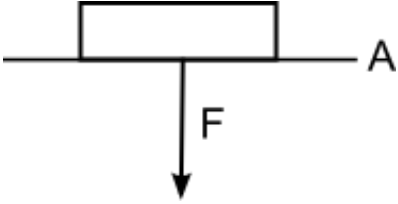
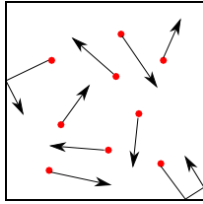
p ... Druck
 V ... Volumen
 T ... Temperatur (in Kelvin)
 U ... innere Energie
 Q ... Wärme
 W ... Arbeit

- Idealisierung; für die Betrachtung spielt die Temperatur eine entscheidende Rolle
- Festlegung der Systemgrenzen ist willkürlich und wird von der Aufgabenstellung bestimmt
- thermodynamisches System befindet sich in einem Zustand; durch Zustandsgrößen (p, V, T, U) bestimmt
- physikalische Größen, die die Wechselwirkung zwischen System und Umgebung beschreiben heißen Prozessgrößen (Q, W)

Betrachtungsweisen:

phänomenologische	kinetisch-statistische
Erfassung und Beschreibung makrophysikalischer (messbarer) Größen	Beschreibung der Eigenschaften der Stoffe und ablaufender Prozesse auf Grundlage der Bewegung von Teilchen

Beispiel: Druck

	
$p = \frac{F}{A}; F \perp A$	• ungeordnete Teilchenbewegung • Teilchen stoßen mit der Gefäßwand zusammen • jedes Teilchen erfährt eine Impulsänderung • Impulsänderung vieler Teilchen ist als Druck messbar

Beispiel: Verdunsten

• $T < T_{\text{Siede}}$ • V nimmt ab • p bleibt konstant • T abnehmend	• schnellste Teilchen verlassen Flüssigkeit • V und T bilden einen Zusammenhang • E_{Kin} fehlt, U sinkt • T sinkt
--	--

Zustandsänderung für ideale Gase

Isotherme Zustandsänderung:

$$T = \text{konstant}$$

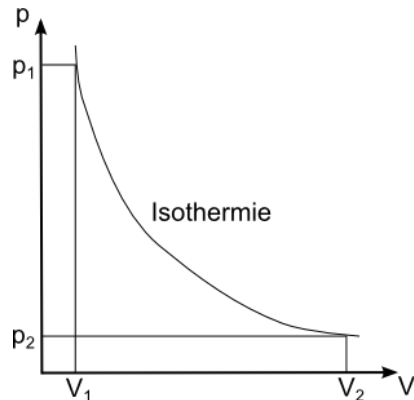
$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

$$p \cdot V = \text{konstant}$$

Boyle-Mariotte'sches Gesetz

Robert Boyle (1627-1690)

Edme Mariotte (1620-1684)



Isochore Zustandsänderung:

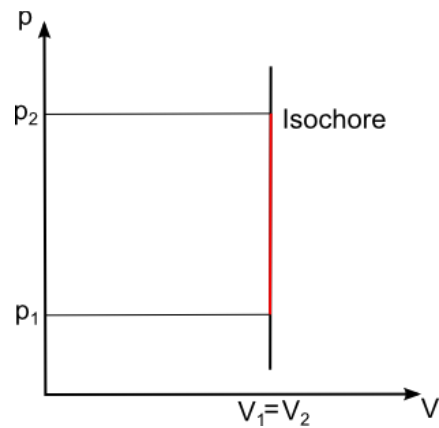
$$V = \text{konstant}$$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

$$\frac{p}{T} = \text{konstant}$$

Gesetz von Amontons

Guillaume Amontons (1663-1705)



Isobare Zustandsänderung:

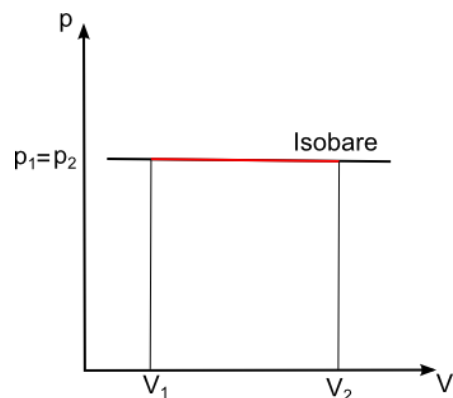
$$p = \text{konstant}$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

$$\frac{V}{T} = \text{konstant}$$

Gesetz von Gay-Lussac

Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850)



Allgemeine Zustandsgleichung für ideale Gase

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{konstant}$$

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$$

Ein Gas, welches diese Gleichung vollständig erfüllt, heißt ideales Gas. (phänomenologische Aussage)

Universelle Gasgleichung:

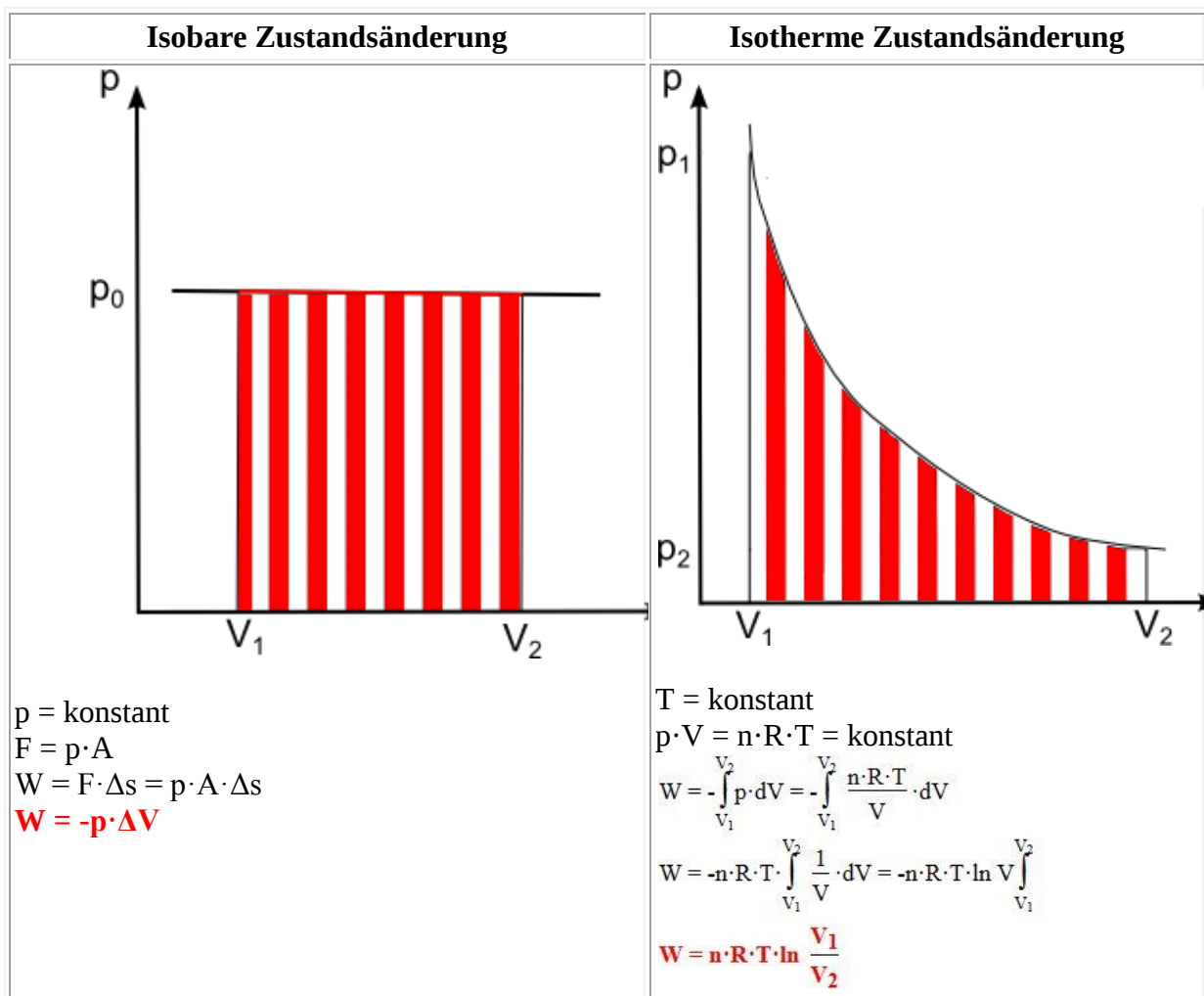
$$\text{universelle Gaskonstante: } R = 8,31451 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{mol}}$$

$$\text{universelle Gasgleichung: } p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$\text{mit } n = \frac{m}{M} \text{ und } R_s = \frac{R}{M} \text{ folgt } p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T$$

Prozessgrößen

Volumenarbeit:



Die Fläche unter der Kurve im $p(V)$ -Diagramm ist ein Maß für die Volumenarbeit.



Vorzeichenregel:

Einem System zugeführte Energie in Form von Arbeit bzw. Wärme ist positiv. Eine vom System abgegebene Energie in Form von Arbeit bzw. Wärme ist negativ.

Volumenarbeit allgemein: $W = - \int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV$

Wärme:

Die Wärme gibt an, wie viel thermische Energie von einem System auf ein anderes übertragen wird.

Formelzeichen: Q

Einheit: J (Joule)

Unter der Bedingung, dass keine Änderung des Aggregatzustandes erfolgt, gilt die zugeführte oder abgegebene Wärme:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

c ... spezifische Wärmekapazität

m ... Masse des Körpers

ΔT ... Temperaturänderung

Beachte: für Gase c_p ... Druck konstant; c_v ... Volumen konstant

weitere Wärmen:

Wärme bei Aggregatzustandsänderung	Wärme einer Heizquelle	Gefäßwärme
$Q = q \cdot m$	$Q = P_{th} \cdot t$	$Q_{Gef} = K \cdot \Delta T$
Q_S ... Schmelzwärme Q_V ... Verdampfungswärme q_S ... spezifische Schmelzwärme q_V ... spezifische Verdampfungswärme	P_{th} ... thermische Leistung t ... Zeit	K ... Kalorimeterkonstante ΔT ... Temperaturdifferenz $(\theta_{Mitte} - \theta_{außen})$

Wärmeaustausch: $-Q_{abgegeben} = Q_{aufgenommen}$

Hauptsätze der Thermodynamik

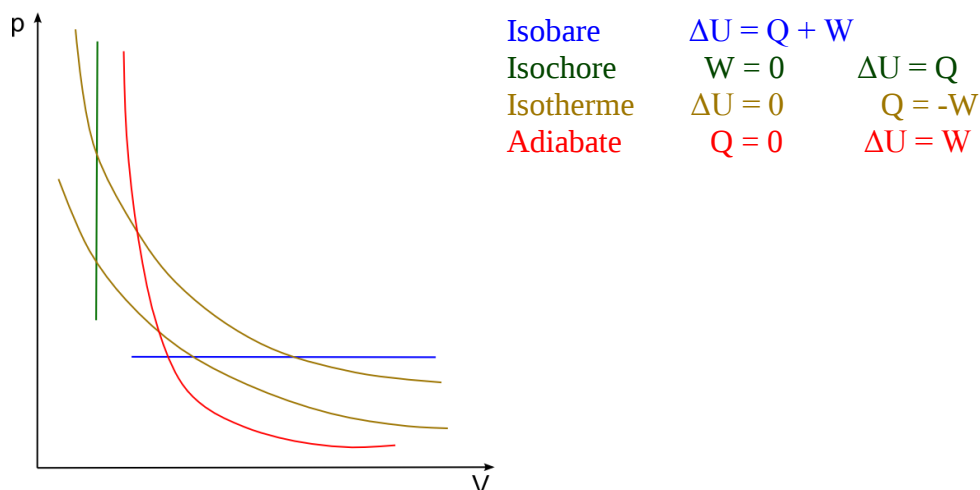
1. Hauptsatz der Thermodynamik:

- Mayer: Energie kann nicht verschwinden oder neu entstehen
- Helmholtz: Energie kann nicht verschwinden oder neu entstehen. Energie kann immer nur von einer Energieform in eine andere umgewandelt werden oder von einem Körper auf einen anderen übertragen werden
- Entdeckertum in Deutschland erst Helmholtz; in England Joule
- erst 1860 offizielle Anerkennung von J. Robert Mayer
- Unmöglichkeit des Perpetuum mobile 1. Art
- Innere Energie U: Summe aller Energien der Teilchen

$$U \sim T$$

$$\Delta U = Q + W$$

- Energieerhaltungssatz
- Energiebilanz der über Systemgrenzen ausgetauschten Energie in Form von Wärme und/oder Arbeit



2. Hauptsatz der Thermodynamik:

- Es gibt keinen Prozess, bei dem Ausschließlich Wärme von einem kalten auf einen heißen Körper übergeht.
- Unmöglichkeit des Perpetuum mobile 2. Art
- Jedes abgeschlossene System strebt der Unordnung entgegen
- Beispiele:
 - Informatik $\Rightarrow$ Datenverlust
 - Biologie $\Rightarrow$ Kompost, Strukturverlust

Die Entropie eines abgeschlossenen Systems nimmt nie ab.

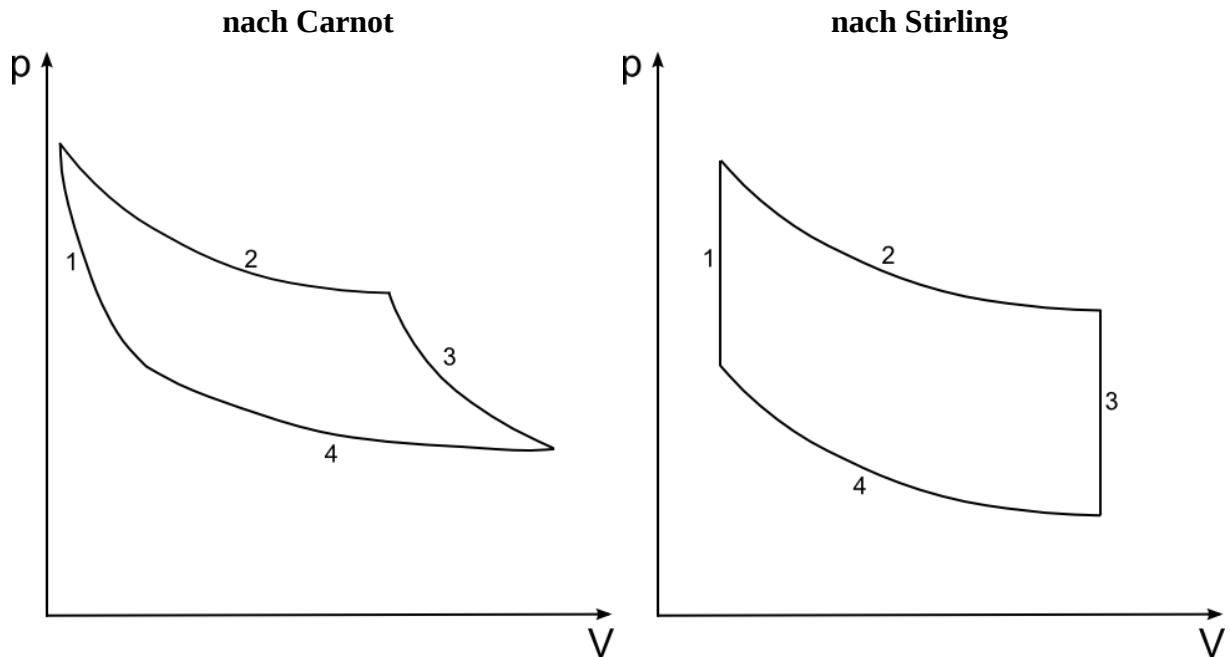
Sie Energie ändert sich immer so, dass der neue Zustand wahrscheinlicher ist.

Entropie... Verhältnis Änderung innerer Energie zur Temperatur

reversibel... umkehrbarer Vorgang, Entropie bleibt konstant

irreversibel... nicht umkehrbarer Vorgang, Entropie nimmt zu

Kreisprozesse



Gemeinsamkeiten:

2: isotherme Expansion $Q = -W$ $\Delta U = 0$

4: isotherme Kompression $-Q = W$ $\Delta U = 0$

Unterschiede:

1: adiabatische Kompression

$$Q = 0 \quad \Delta U = W$$

3: adiabatische Kompression

$$Q = 0 \quad \Delta U = W$$

1: isochore Erwärmung

$$W = 0 \quad \Delta U = 0$$

3: isochore Abkühlung

$$W = 0 \quad \Delta U = 0$$

Stirlingmotor:

1. Erwärmung bei konstantem Volumen $\Rightarrow$ Gas verrichtet keine Arbeit

2. Expansion ohne Temperaturänderung $\Rightarrow$ Energie wird zugeführt

3. Abkühlung bei konstantem Volumen $\Rightarrow$ Energieabgabe, keine verrichtete Arbeit

4. Kompression ohne Temperaturänderung $\Rightarrow$ Energieabgabe, am Gas wird Arbeit verrichtet

Wärmekraftmaschinen

4-Takt-Ottomotor:

Aufbau:

Zylinder, Kolben, Ein- und Auslassventil, Kurbelwelle, Pleuelstange, Zündkerze

Vorgänge:

	1. Takt	2. Takt	3. Takt	4. Takt
Name	Ansaugtakt	Verdichtungstakt	Arbeitstakt	Ausstoßtakt
Vorgang	Ansaugen des Benzin - Luft - Gemisches	Verdichten des Benzin - Luft - Gemisches	Zünden und Verbrennen des Kraftstoff - Luft - Gemisches	Ausschieben des verbrannten Kraftstoffes (Abgase)
Richtung der Kolbenbewegung	Kurbelwelle	Zylinderkopf	Kurbelwelle	Zylinderkopf
Einlassventil	geöffnet	geschlossen	geschlossen	geschlossen
Auslassventil	geschlossen	geschlossen	geschlossen	geöffnet

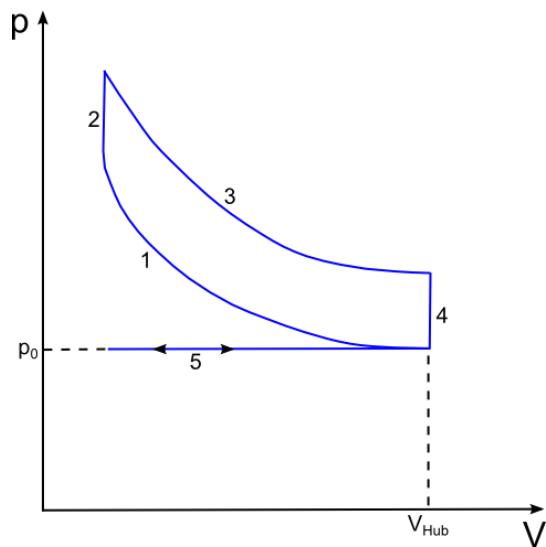
Arbeitsweise:

1. Takt: Ansaugen, Einlassventil geöffnet $\Rightarrow$ offenes System $\Rightarrow$ 1. Hauptsatz nicht anwendbar
2. Ventile geschlossen, sehr schnelle Kompression; 1. Hauptsatz: adiabatische Kompression $Q = 0 \Rightarrow U = W_V$ ($W_V > 0$), Kompressionsarbeit wird zugeführt $\Rightarrow T$ steigt
3. Zünden durch Zündfunken (Fremdzündung); sehr schnelle Temperaturerhöhung, Q wird zugeführt durch Verbrennung $\Rightarrow$ Sprung auf isotherme höhere Temperatur, fast isochore Zustandsänderung $\Rightarrow W_V = 0 \Rightarrow Q = \Delta U > 0 \Rightarrow T$ steigt anschließend, Ausdehnung des verbrannten Kraftstoff - Luft - Gemisches, adiabatische Expansion $Q = 0 \Rightarrow W_V < 0$ (Expansion) $\Rightarrow \Delta U < 0 \Rightarrow T$ sinkt
4. Auslassventil geöffnet, kein abgeschlossenes System $\Rightarrow$ 1. Hauptsatz nicht anwendbar

Vergleich von Otto- und Dieselmotor:

	Ottomotor	Dieselmotor
1. Takt	Das (durch den Vergaser hergestellte) Kraftstoff - Luft - Gemisch wird angesaugt	Es wird reine Luft angesaugt
2. Takt	Das Gemisch wird komprimiert; kurz vor dem oberen Totpunkt erfolgt die Zündung, wodurch Druck und Temperatur stark ansteigen	Die Luft wird so stark komprimiert, dass sich der eingespritzte Dieselmotorkraftstoff durch die hohe Temperatur selbst entzündet
Zündung	Fremdzündung	Selbstzündung
3. Takt	Das hochkomprimierte, erhitzte Gas dehnt sich aus und verrichtet mechanische Arbeit. Der Kolben bewegt sich vom oberen zum unteren Totpunkt.	Das hochkomprimierte, erhitzte Gas dehnt sich aus und verrichtet mechanische Arbeit. Der Kolben bewegt sich vom oberen zum unteren Totpunkt.
4. Takt	Das Gas wird ausgestoßen. Ein Zyklus ist abgelaufen. Die Kurbelwelle hat sich zweimal gedreht.	Das Gas wird ausgestoßen. Ein Zyklus ist abgelaufen. Die Kurbelwelle hat sich zweimal gedreht.

mögliche Idealisierung:



1. Adiabate → Verdichten
2. Isochore → nach Zündung
3. Adiabate → Ausdehnung
4. Isochore → Abkühlung
5. Ansaugen/ Ausschieben

thermodynamischer Wirkungsgrad: $\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}$

$$\text{Wirkungsgrad: } \eta = \frac{E_{\text{nutz}}}{E_{\text{aufgebracht}}} = \frac{\text{eingeschlossene Fläche}}{\Sigma Q + W}$$

$$Q = H \cdot m$$

H... Heizwert