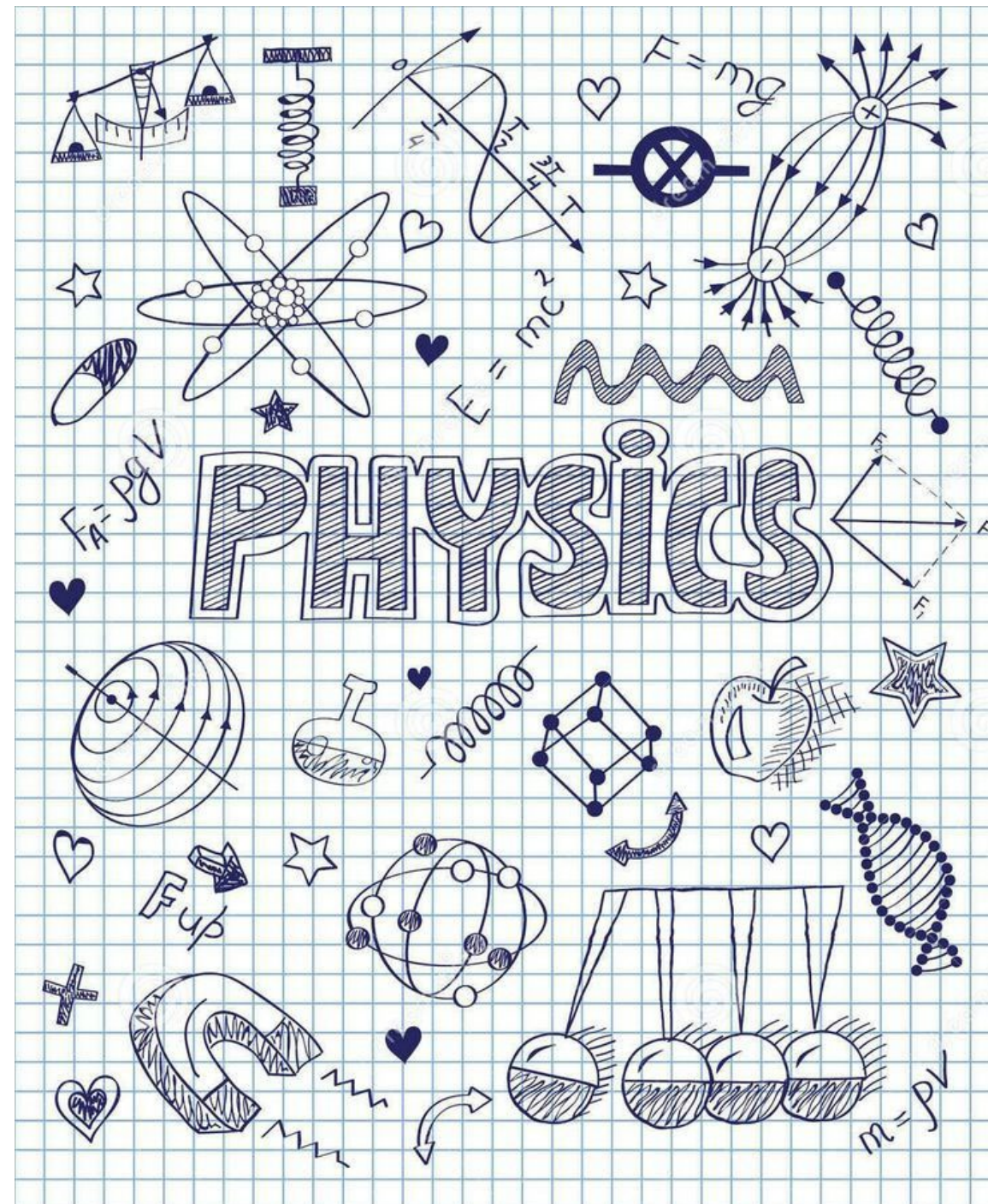


PHYSIK

Thermodynamik

Erster Hauptsatz der Thermodynamik

Prof. Dr.-Ing. Tatsiana Malechka



Thermodynamik

1. Hauptsatz der Thermodynamik

- Änderung der inneren Energie
- Wärmekapazität für Gase
- Volumenarbeit
- Adiabatisches Prozess

2. Hauptsatz der Thermodynamik

1. Hauptsatz der Thermodynamik

Erster Hauptsatz der Thermodynamik: Erhaltung der Energie

Die **Energie** eines **isolierten** Systems bleibt **konstant**.

oder

Ein thermodynamisches System kann Energie in Form von **Arbeit** und/oder **Wärme** mit seiner Umgebung austauschen.

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

ΔU = Änderung der inneren Energie, ΔQ = Wärmeaustausch, ΔW = Arbeit

Wärme wird zugeführt $\rightarrow +$

Wärme wird abgeführt $\rightarrow -$

Arbeit am System $\rightarrow +$

Arbeit vom System $\rightarrow -$

Wärme

Wärmekapazität: Die Wärmekapazität gibt an, wie viel Wärme einem Körper zugeführt werden muss, um eine Temperaturerhöhung ΔT zu erreichen.

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad [C] - ? \quad \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

Spezifische (massebezogene) Wärmekapazität: Die Proportionalitätskonstante heißt spezifische Wärmekapazität. Sie ist eine massebezogene Stoffkonstante.

$$c = \frac{\Delta Q}{m \Delta T} \quad [c] - ? \quad \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Molare (stoffmengenbezogene) Wärmekapazität:

$$C_{mol} = \frac{\Delta Q}{n \Delta T} \quad [C_{mol}] - ? \quad \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$$

Wärmekapazität von idealen Gasen

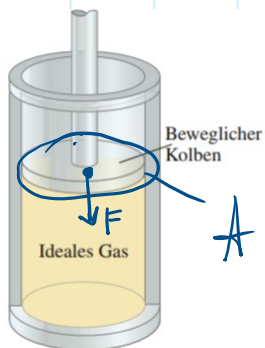
- Gas mit Volumen V und Druck p drückt einen Kolben mit Kraft F .
- Zufuhr von Wärme erhöht die Temperatur. Wegen $pV = nRT$ nimmt auch das

Volumen zu (bei $p=\text{const}$) $p = \frac{F}{A} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}}$

$$W = \vec{F} \cdot \vec{s} = |\vec{F}| \cdot |\vec{s}| \cdot \cos(\angle \vec{F}, \vec{s})$$

$$W = - \int F \cdot ds = - \int p \cdot A \cdot ds$$

$$dW = -p A ds = -p \cdot dV$$

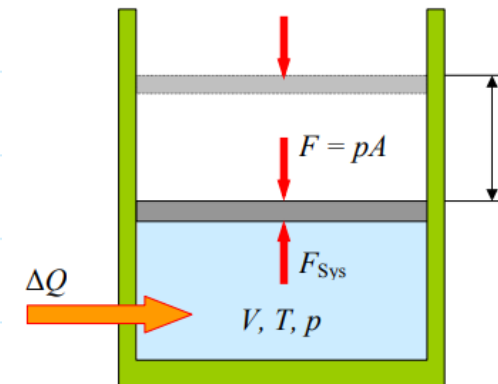


$$W = - \int p dV$$

$$dW = -p dV$$

$$dV > 0$$

Gas expandiert & W vom System verrichtet
 Gas komprimiert & W am System verrichtet



$$T \Rightarrow T + \Delta T$$

$$V \Rightarrow V + \Delta V$$

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

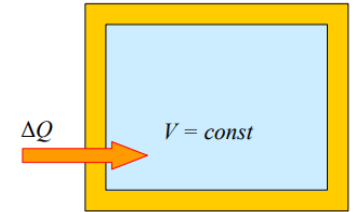
$$\Delta U = \Delta Q$$

Wärmekapazität von idealen Gasen

Konstantes Volumen:

Die zugeführte Wärme dient ganz der Erhöhung der Inneren Energie der Teilchen.

Die innere Energie eines Idealen Gases ist sein gesamter Energieinhalt, d.h. die gesamte Bewegungsenergie der Teilchen.



$$T \Rightarrow T + \Delta T$$

Für n -atomige Moleküle gilt:

	lineare Moleküle	nicht lineare Moleküle
f_{trans}	3	3
f_{rot}	2	3
f_{vib}	$3n - 5$	$3n - 6$
Summe f	$3n$	$3n$

1-atomiges Gas: $U = \frac{3}{2} N k_B T$

n -atomiges Gas: $U = \frac{f}{2} N k_B T$

f → Freiheitsgrad

$$N = n \cdot N_A$$

Für die Änderung der Inneren Energie gilt dann:

$$\Delta U = \Delta Q = \frac{f}{2} N k_B \Delta T$$

$$C_V = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{f}{2} N k_B$$

↑
Volumen ist const

für 1-atom. Moleküle: $C_V = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{3}{2} N k_B$

isochore Wärmekapazität (Wärmekapazität eines idealen Gases bei konstantem Volumen)

$$c_{\text{mol},V} = \frac{3}{2} \frac{N k_B}{n}$$

$$c_{\text{mol},V} = \frac{3}{2} \cdot \frac{n \cdot N_A \cdot k_B}{n} = \frac{3}{2} N_A \cdot k_B = \frac{3}{2} R$$

Wärmekapazität von idealen Gasen

Konstanter Druck:

Die zugeführte Wärme ΔQ muss zusätzlich Ausdehnungsarbeit verrichten.

$$\frac{5}{2} Nk_B - \frac{3}{2} Nk_B = Nk_B$$

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

$$C_p = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{\Delta U - \Delta W}{\Delta T} \neq C_v$$

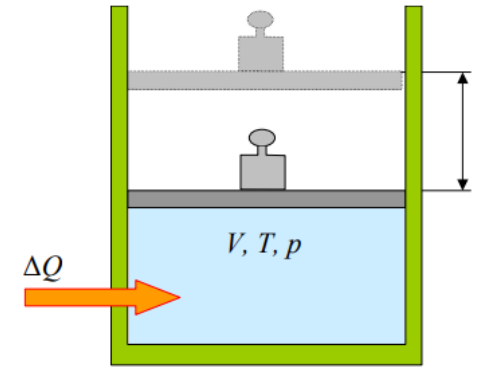
Mayer's Formel, auch Mayer-Beziehung genannt,

beschreibt den Zusammenhang zwischen den

Wärmekapazitäten eines idealen Gases

bei konstantem Druck (C_p) und konstantem

Volumen (C_V): $C_p - C_V = Nk_B$



$$T \Rightarrow T + \Delta T$$

$$V \Rightarrow V + \Delta V$$

Für n -atomige Moleküle gilt:

	lineare Moleküle	nicht lineare Moleküle
f_{trans}	3	3
f_{rot}	2	3
f_{vib}	$3n - 5$	$3n - 6$
Summe f	$3n$	$3n$

$$c_{\text{mol},p} = \frac{5}{2} \frac{N \cdot k_B}{n}$$

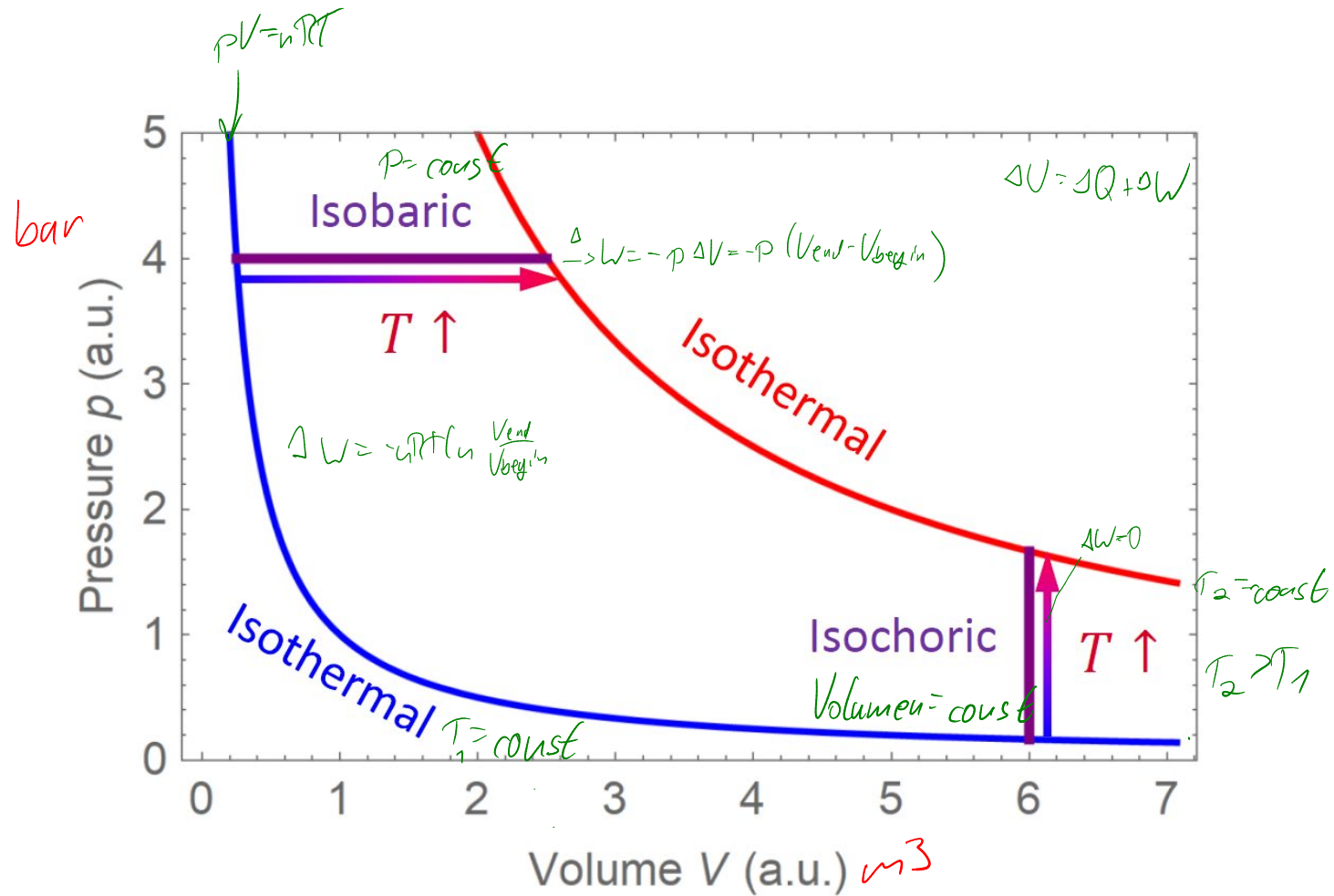
$$= \frac{5}{2} \frac{n \cdot N_A \cdot k_B}{n} = \frac{5}{2} R$$

für 1-atom. Moleküle: $C_p = \frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{5}{2} Nk_B$

isobare Wärmekapazität (Wärmekapazität eines idealen Gases bei konstantem Druck)

Thermodynamische Prozesse

*pV-Diagramm
Klausurrelevant!*



Isobare Zustandsveränderung

Isobare Ausdehnung $1 \rightarrow 2$

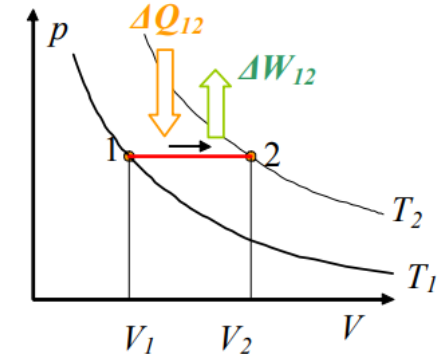
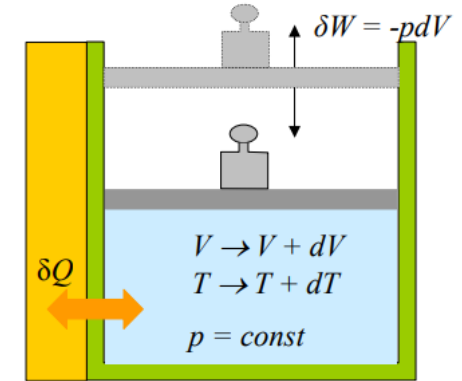
Volumenarbeit $W = - \int_1^2 p dV$



$$\Delta W_{12} = - \int_1^2 p dV = -p \int_1^2 dV$$

$$\Delta Q_{12} = C_p \Delta T = c_{mol,p} \cdot n \cdot \Delta T = c_{mol,p} \cdot n \cdot (T_2 - T_1)$$

$$\Delta U_{12} = \Delta Q_{12} + \Delta W_{12} = c_{mol,p} \cdot n \cdot (T_2 - T_1) - p \int_1^2 dV$$

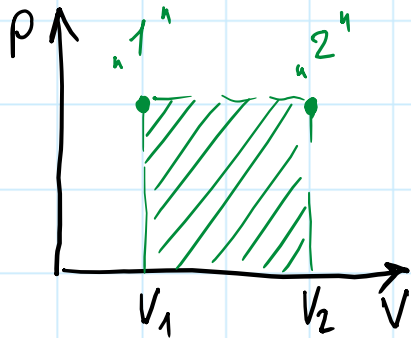


Isobare Zustandsveränderung

Isobare Kompression $2 \rightarrow 1$

Volumenarbeit

$$\Delta W_{21} = - \int_2^1 p \cdot dV = -p \int_2^1 dV = -p (V_1 - V_2) = -p \cdot (-dV) = p \cdot dV$$

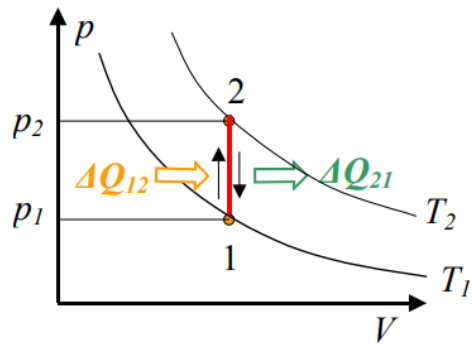


$$\Delta Q_{21} = n \cdot c_{mol,p} \cdot \Delta T = n \cdot c_{mol,p} (T_1 - T_2)$$

$$\Delta U_{21} = n \cdot c_{mol,p} \cdot (T_1 - T_2) + p(V_1 - V_2)$$

Isochore Zustandsänderung

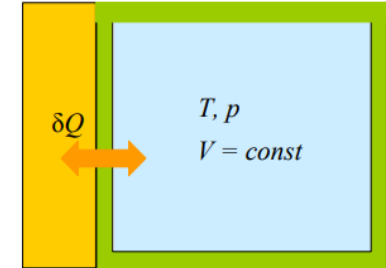
Isochore Druckerhöhung 1→2



$$W = - \int_1^2 p dV = 0$$

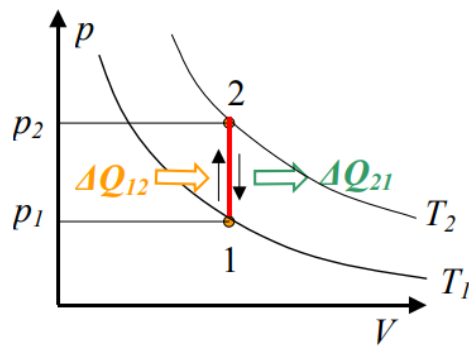
Fläche = 0

$$\Delta Q_{12} = c_{mol, V} \cdot n \cdot \Delta T = c_{mol, V} \cdot n (T_2 - T_1)$$
$$\Delta U_{12} = \Delta Q_{12}$$



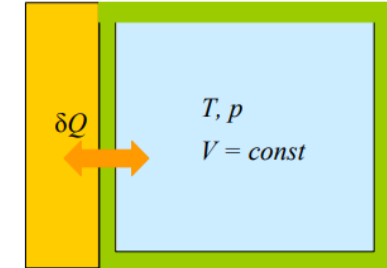
Isochore Zustandsänderung

Isochore Druckerniedrigung 2→1



$$W=0$$

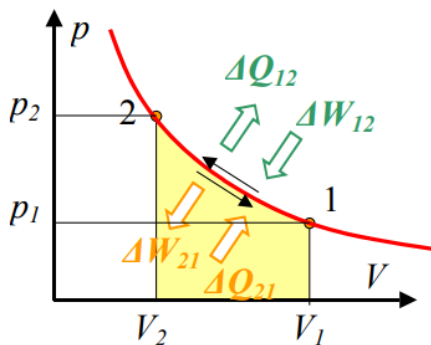
$$\Delta Q_{21} = c_{mol, v} \cdot n \cdot (T_1 - T_2)$$
$$\Delta U_{21} = \Delta Q_{21}$$



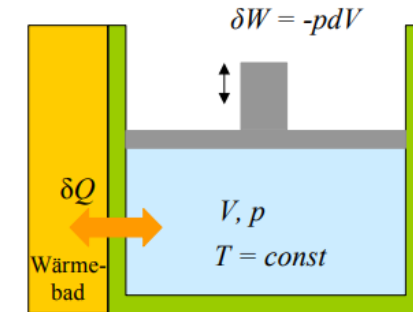
Isotherme Zustandsänderung

Isotherme Kompression 1→2

$$\begin{aligned}
 W &= -\int_1^2 p dV = -\int_1^2 \frac{nRT}{V} dV = -nRT \int_1^2 \frac{1}{V} dV = -nRT \cdot (\ln(V)|_1^2) \\
 &= -nRT \cdot (\ln V_2 - \ln V_1) \\
 W &= -nRT \cdot \ln \frac{V_2}{V_1} \quad \left(W = nRT \cdot \ln \frac{V_1}{V_2} \right)
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 \Delta Q_{12} &= 0 \\
 \Delta U_{12} &= \Delta U_{21}
 \end{aligned}$$

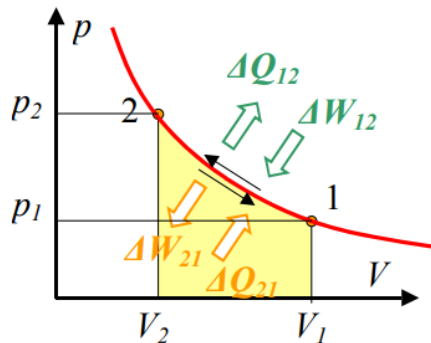


Isotherme Zustandsänderung

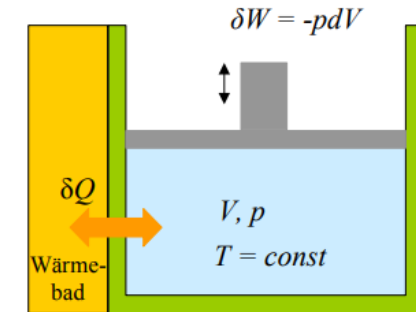
$$Q = \text{const}$$
$$\Delta Q = 0$$

Isotherme Expansion 2 → 1

$$\begin{aligned}\Delta W_{21} &= - \int_2^1 p dV = - \int_2^1 \frac{nRT}{V} dV = - nRT \int_2^1 \frac{dV}{V} = - nRT \cdot \ln(V) \Big|_2^1 \\ &= - nRT \cdot (\ln V_1 - \ln V_2) = - nRT \cdot \ln \frac{V_1}{V_2}\end{aligned}$$



$$\Delta Q_{21} = 0$$
$$\Delta U_{21} = \Delta U_{12}$$



Adiabatische Zustandsänderung

Adiabatisch bedeutet: keine Wärmezufuhr oder Abgabe $\Delta Q = 0$.

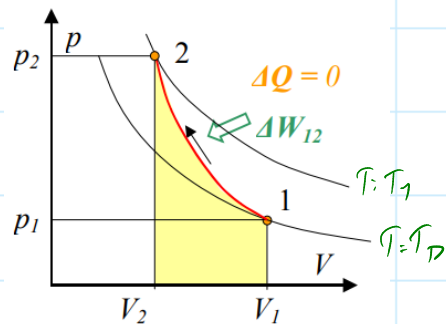
Adiabatische Zustandsänderungen liegen z.B. vor, bei

a) schnellen Änderungen, wenn die Zeit für einen Wärmeaustausch mit der Umgebung zu kurz ist

b) guter Isolation

p, V, T

Adiabatische Kompression: $1 \rightarrow 2$



$$W = -\int p dV$$

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W \Rightarrow \Delta U = \Delta W \rightarrow \Delta U - \Delta W = 0$$

$$\Delta U \Rightarrow ?$$

$$\Delta U = c_v \cdot \Delta T$$

$$c_v \cdot dT + p dV = 0$$

$$c_v \cdot dT + \frac{nRT}{V} dV = 0$$

$$c_v \cdot \frac{dT}{T} + \frac{nR}{V} dV = 0$$

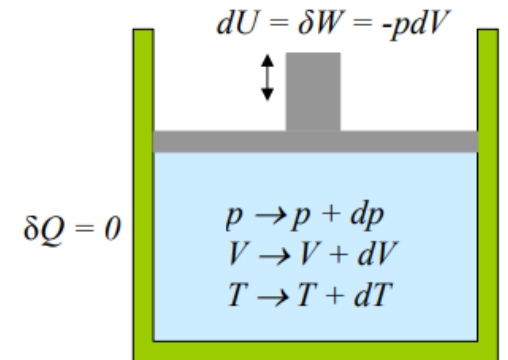
$$c_v \cdot \frac{dT}{T} + nR \frac{dV}{V} = 0$$

$$\frac{dT}{T} + \frac{nR}{c_v} \cdot \frac{dV}{V} = 0$$

$$dU - dW = 0$$

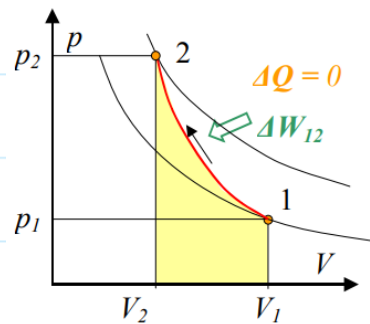
$$dW = -\int p dV$$

$$dW = -p dV$$



Adiabatische Zustandsänderung

Adiabatische Kompression: 1 → 2



$$\frac{dT}{T} + nR \frac{1}{c_V} \frac{dV}{V} = 0$$

$$c_P - c_V = N k_B$$

$$c_{mol,P} - c_{mol,V} = \frac{5}{2}R - \frac{3}{2}R = R$$

$$\frac{nR}{c_V} = \frac{\ln(c_{mol,P} - c_{mol,V})}{c_{mol,V} + n} = \frac{c_{mol,P} - c_{mol,V}}{c_{mol,V}} = \frac{c_{mol,P}}{c_{mol,V}} - 1$$

$$\int \frac{dT}{T} + \int (\gamma - 1) \frac{dV}{V} = \int 0$$

$$\ln(T) + (\gamma - 1) \ln(V) = \text{const}$$

$$\ln(T) + (\gamma - 1) \ln(V) = \text{const}$$

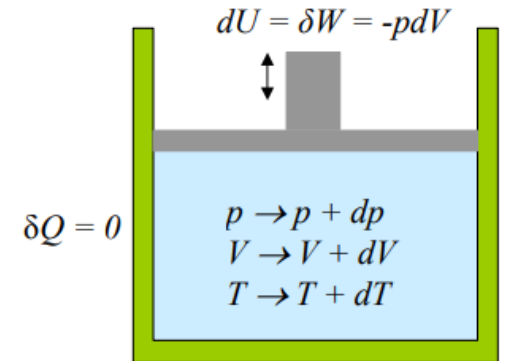
$$\ln(T \cdot V^{\gamma-1}) = \text{const}$$

$$T \cdot V^{\gamma-1} = \text{const}$$

$$\gamma_{einzatom} = \frac{c_{mol,P}}{c_{mol,V}} = \frac{\frac{5}{2} N k_B}{\frac{3}{2} N k_B} = \frac{5}{3} \approx 1,67$$

$$\gamma_{zweiatom} = \frac{5}{2} N k_B$$

$$c_P = N \cdot k_B + c_V$$



$$pV^\gamma = \text{const}$$

$$p^{1-\gamma} T^\gamma = \text{const}$$

Kreisprozesse, Wärmekraftmaschinen

Bei einem Kreisprozess durchläuft ein System eine Folge von Zustandsänderungen, so dass der Endzustand wieder mit dem Ausgangszustand übereinstimmt. Arbeitsleistung im rechtsläufigen Kreisprozess

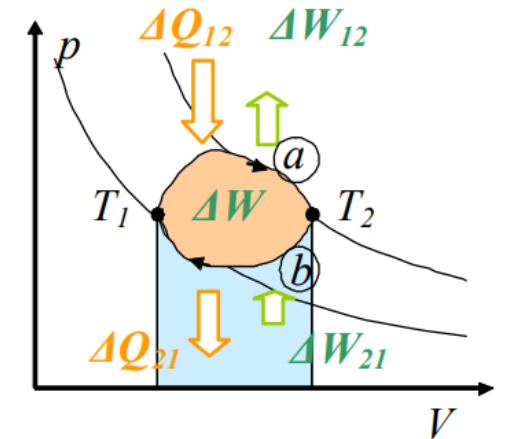
Weg 1 → 2 Expansion

Durch Zufuhr von Wärme ΔQ_{12} wird vom Gas Arbeit verrichtet. Dabei wird auch die Innere Energie erhöht.

Weg 2 → 1 Kompression

Durch Kompression wird Arbeit zugeführt. Dabei muss gleichzeitig Wärme ΔQ_{21} abgeführt werden, da die Innere Energie dabei abnimmt.

Arbeitsbilanz: $\Delta W = \Delta W_{12} + \Delta W_{21} =$



Kreisprozesse, Wärmekraftmaschinen

Arbeitsbilanz:

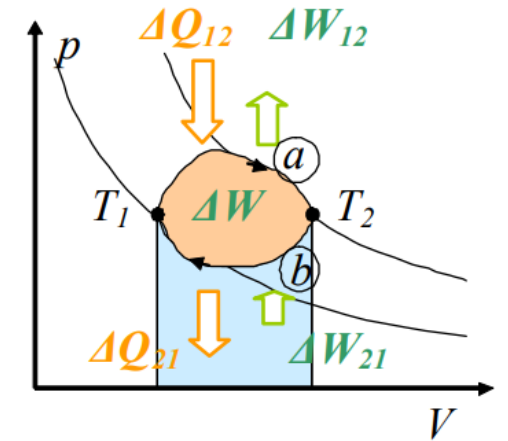
$$\Delta U$$

Wärmebilanz:

$$\Delta Q = \Delta Q_{12} + \Delta Q_{21}$$

Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine:

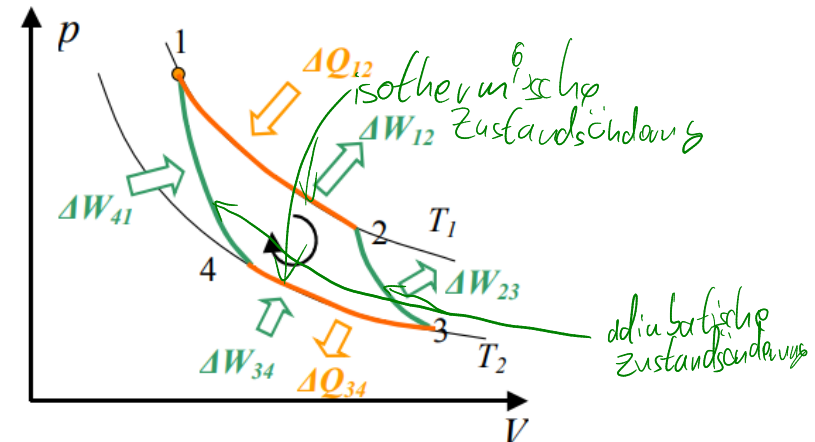
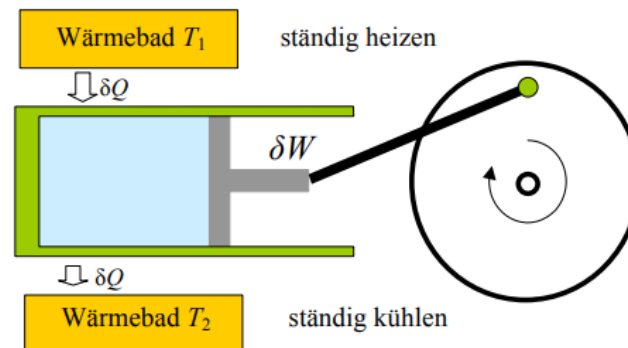
$$\eta = \frac{|\Delta W|}{\Delta Q_{zu}}$$



Der Carnotsche Kreisprozess

S. Carnot hat sich 1824 eine periodisch arbeitende Maschine ausgedacht, die Wärme in Arbeit umwandelt und dabei einen maximalen Wirkungsgrad besitzt. Die Wärme wird von einem Reservoir bei höherer Temperatur $T_1 = \text{const}$ aufgenommen und an ein Reservoir bei tieferer Temperatur $T_2 = \text{const}$ abgegeben.

$$\eta = \frac{T_{12} - T_{34}}{T_{12}}$$



Carnot-Kreisprozess

Weg 3 → 4: Isotherme Kompression:

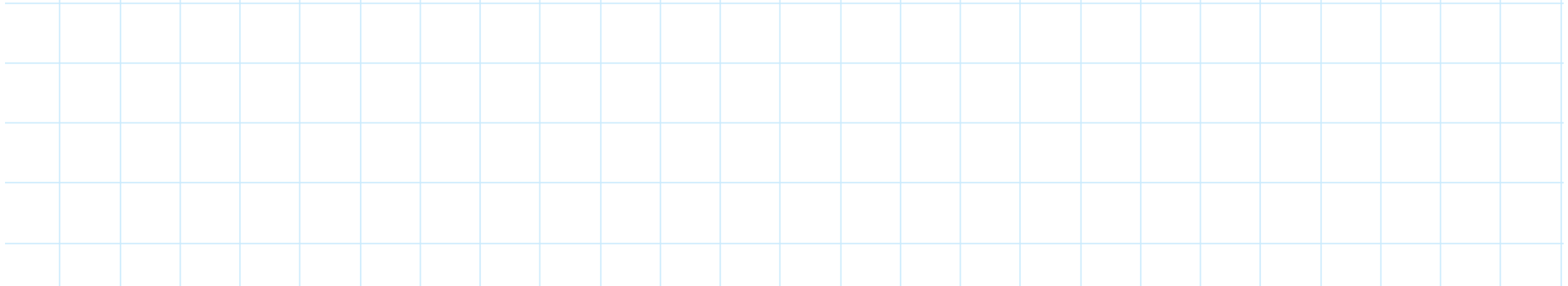
Weg 4 → 1: Adiabatische Kompression:

Carnot-Kreisprozess

Weg 1 → 2: Isotherme Expansion:



Weg 2 → 3: Adiabatische Expansion



Weitere technische Kreisprozesse

	Bezeichnung	p, V-Diagramm	Einzelprozesse	thermischer Wirkungsgrad
Kolbenmaschinen	Verbrennungsmotoren	Seiliger-Prozeß	2 Isentropen, 2 Isochoren, 1 Isobare	$\eta_{th} = 1 - \frac{T_5 - T_1}{T_3 - T_2 + \kappa(T_4 - T_3)}$
		Otto-Prozeß	2 Isentropen, 2 Isochoren	$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{V_1}{V_2} - 1\right)^{\kappa - 1}}$
		Diesel-Prozeß	2 Isentropen, 1 Isochore, 1 Isobare	$\eta_{th} = \frac{\left(\frac{V_3}{V_2}\right)^{\kappa} - 1}{\kappa \left(\frac{V_3}{V_2} - 1\right) \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa - 1}}$
	Heißluftmotor	Stirling-Prozeß	2 Isothermen, 2 Isochoren	$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_3} = \eta_{th,c}$
Strömungsmaschinen	offene Gasturbine	Joule-Prozeß	2 Isentropen, 2 Isobaren	$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = \frac{\kappa - 1}{\kappa} \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}}$
	geschlossene Gasturbine	Ericsson-Prozeß	2 Isothermen, 2 Isobaren	$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_3} = \eta_{th,c}$
	Dampfkraftanlagen	Clausius-Rankine-Prozeß	2 Isentropen, 2 Isobaren	$\eta_{th} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_1} \approx 1 - \frac{h_4}{h_3}$

Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik

Formulierung 1: Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die Wärme aus einer Wärmequelle entnimmt und vollständig in mechanische Arbeit umwandelt.

Formulierung 2: Ein höherer Wirkungsgrad als der des Carnotschen Kreisprozesses ist nicht möglich.

Formulierung 3: Wärme geht nicht von selbst von einem kalten auf einen warmen Körper über

Zusammenfassung

2. Hauptsatz der Thermodynamik

Formulierung 1: Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die Wärme aus einer Wärmequelle entnimmt und vollständig in mechanische Arbeit umwandelt.

Formulierung 2: Ein höherer Wirkungsgrad als der des Carnotschen Kreisprozesses ist nicht möglich.

Formulierung 3: Wärme geht nicht von selbst von einem kalten auf einen warmen Körper über

Eine **Carnot-Wärmekraftmaschine** ist eine Maschine, die im **Carnot-Kreisprozess**, also reversibel, zwischen zwei Reservoiren arbeitet.

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Wirkungsgrad der Carnot-Kreisprozesses:

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_H|} \quad \eta = \frac{|W|}{|Q_H|} = \frac{|Q_H - Q_L|}{|Q_H|} = 1 - \frac{|Q_L|}{|Q_H|}$$

Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine:

$H = zu$

$L = ab$