ETH
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

LEC
Laboratory for Energy Conversion

Thermodynamik III

3 – Gasarbeitsprozesse
Verbrennungsmotoren

HS 2021

Dr. Ndaona Chokani

Overview

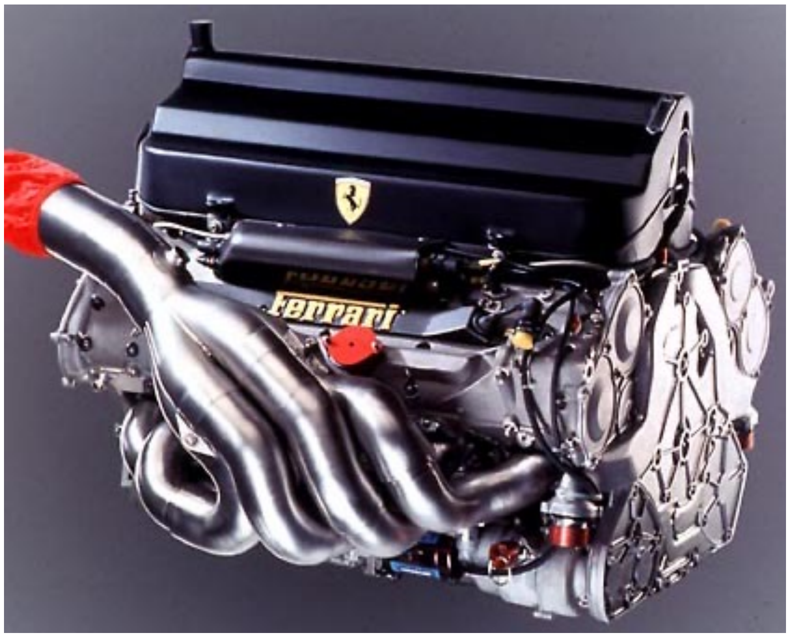
Vorlesung		Übung/Beispiel	
Datum	**Thema**	**Datum**	**Thema**
09.11	Prozess des Energieaustausches	09.11	Geschwindigkeitsdreiecke
16.11	Dampfkraftprozesse	16.11	Rankine Zyklus
23.11	Gasarbeitsprozesse - Verbrennungsmotoren	23.11	Diesel / Otto Zyklus
30.11	Gasarbeitsprozesse - Gasturbinenprozesse	30.11	Brayton Zyklus
07.12	Gasarbeitsprozesse - Kombinierten Zyklen	07.12	Kombinierter Zyklus
14.12	Kältemaschinen und Wärmepumpen	14.12	Kältemaschine/Wärmepumpe
21.12	Kältemaschinen Oxyfuel, Carbon Capture and Storage	21.12	Wärmepumpe

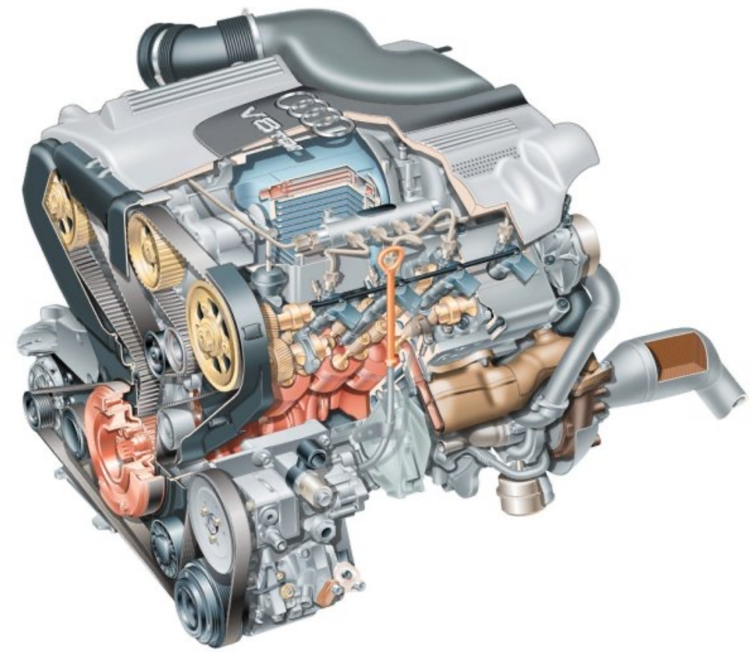
4.1 Verbrennungsmotoren

- Verbrennungsmotoren arbeiten hauptsächlich nach dem Diesel- oder Otto-Prinzip

- Unterschiede:

Otto	**Diesel**
Fremdzündung durch Zündkerze	Selbstzünder
Vorgemischtes Kraftstoff-Luft Gemisch	Kraftstoff wird kurz vor der Verbrennung eingespritzt
Quantitätsregelung, Kraftstoffeinspritzung	Qualitätsregelung über Einspritzmenge





Ferrari V10 F1

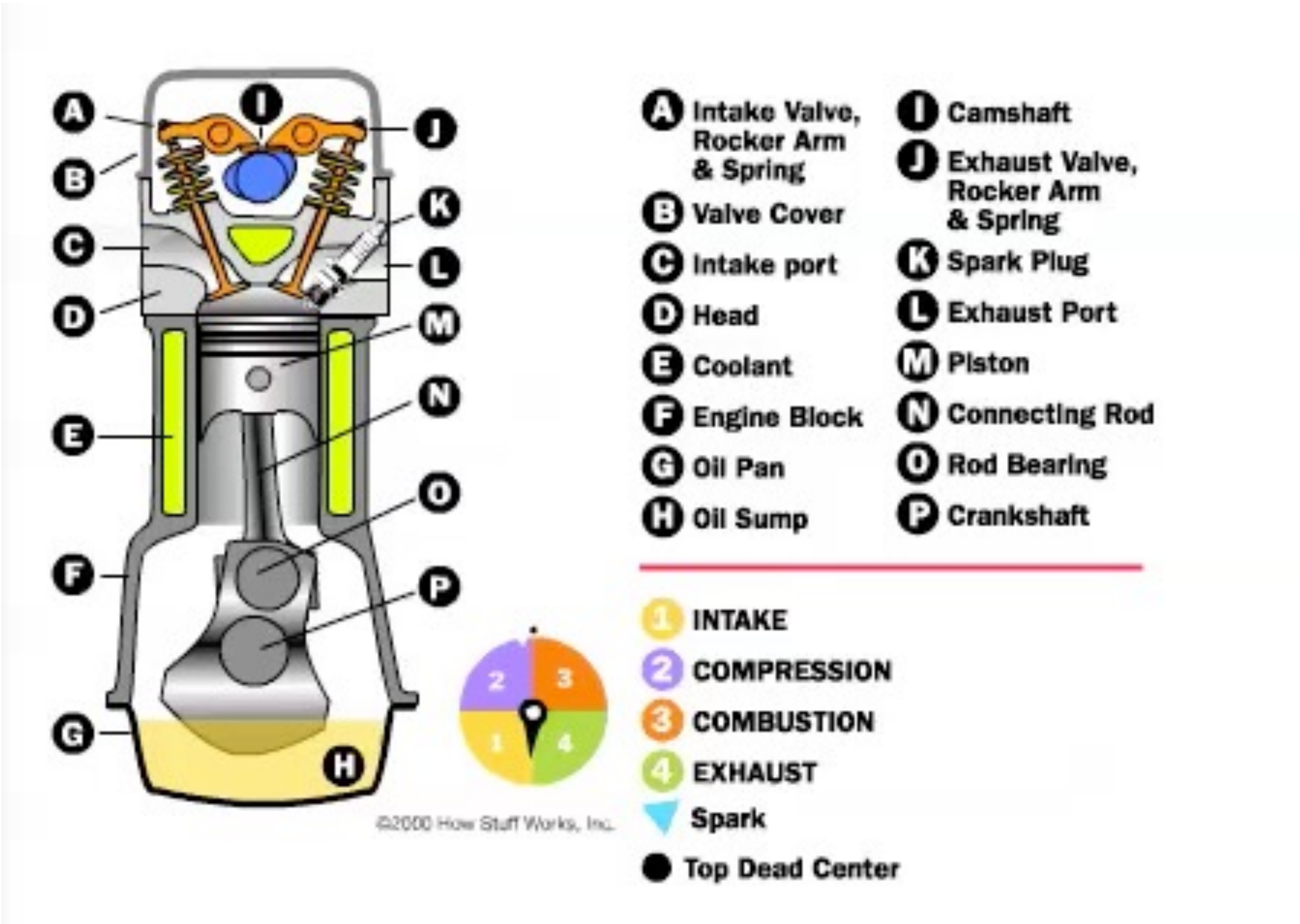
3 l
800 PS
18000 U/min
120 kg
6.7 PS/kg
500 km

Audi V8 TDI

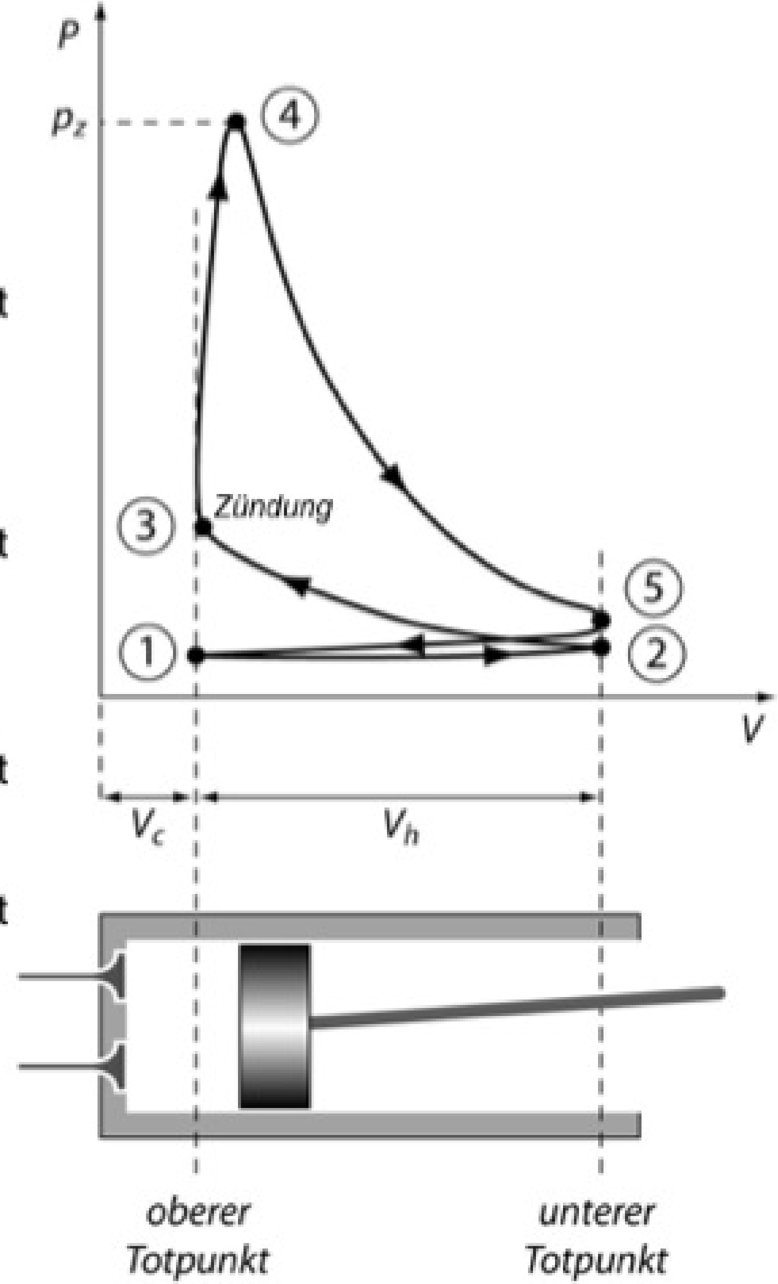
3.3 l
250 PS
4500 U/min
250 kg
1 PS/kg
300000 km

4.1.1 Realer Arbeitsprozess eines 4-Takters

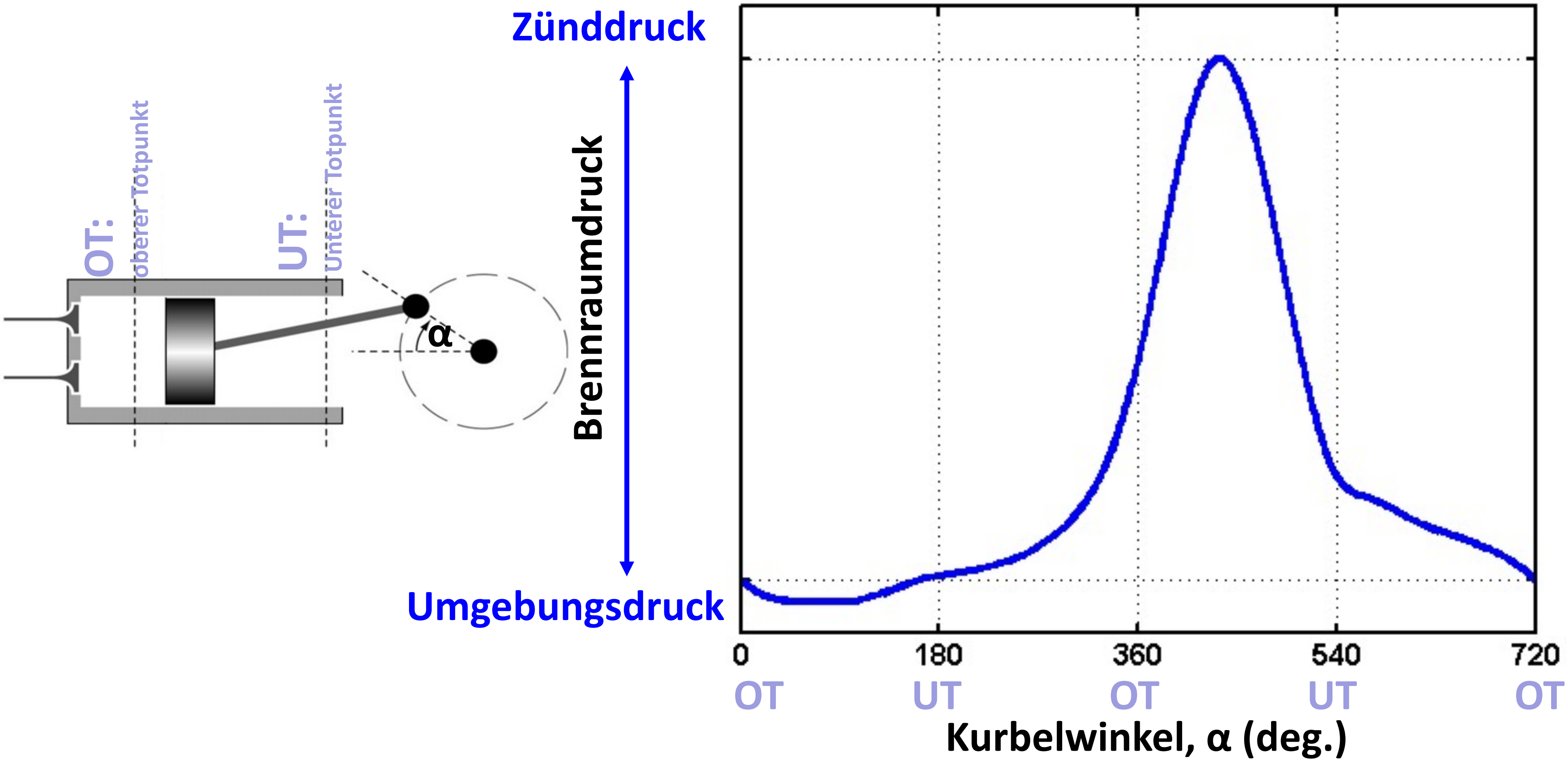
- Volumenänderung abwechselnd zur Arbeitsleistung und Ladungswechsel
- Vollständiges Arbeitsspiel hat 4 Takte
  - Ansaugen von frischem Gemisch
  - Verdichten
  - Expandieren nach Zündung
  - Ausstossen

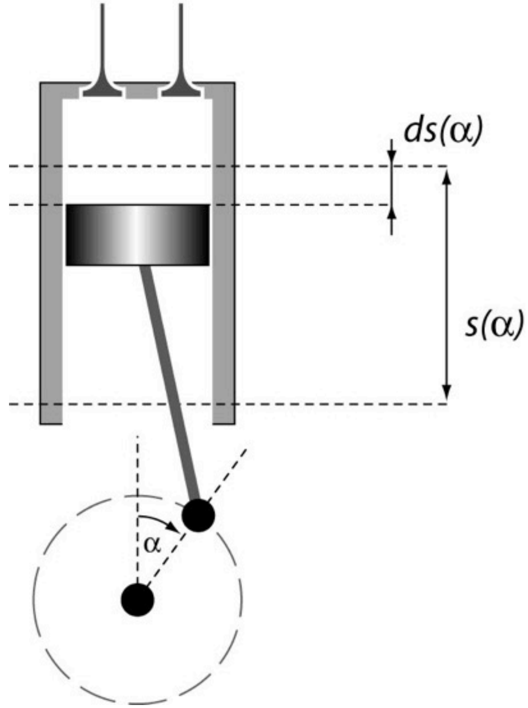

A
B
C
D
E
F
G
H
I
J
K
L
M
N
O
P
2
3
1
4
©2000 How Stuff Works, Inc.
A Intake Valve, Rocker Arm & Spring
B Valve Cover
C Intake port
D Head
E Coolant
F Engine Block
G Oil Pan
H Oil Sump
I Camshaft
J Exhaust Valve, Rocker Arm & Spring
K Spark Plug
L Exhaust Port
M Piston
N Connecting Rod
O Rod Bearing
P Crankshaft
1 INTAKE
2 COMPRESSION
3 COMBUSTION
4 EXHAUST
Spark
Top Dead Center

1 → 2	Ansaugen des brennbaren Gemischs	1. Takt
2 → 3	Kompression des Gemischs	2. Takt
3 → 4	Verbrennung	
4 → 5	Expansion und Arbeitsabgabe	3. Takt
5 → 1	Auspuff	4. Takt



Druckverlauf im Zylinder





s: Kolbenhub

A_k: Kolbenfläche

p: Gasdruck

V_c: Kompressionsvolumen

V_h: Hubvolumen

- Annahme: adiabat
- Arbeit der Gaskraft am Kolben: $dW_k = pA_k ds_\alpha$
- Arbeit pro Arbeitspiel: $W_k = \oint pdV$
- Mitteldruck: bezieht sich auf die Arbeit pro Hubvolumen

$$p_{mi}V_h = \oint pdV = W_{kA}$$

– Innere Leistung pro Motor ergibt (für 4-Takt):

$$P_{iZ} = 1/2 \times i\, n\, p_{mi} V_h$$

– Effektive Leistung an der Welle ergibt sich nach Abzug der Reibungsverluste und der Leistung der Hilfsaggregate:

$$P_e = P_i - P_r$$

– Entsprechend spricht man vom effektiven Mitteldruck p_e und vom Reibmitteldruck p_r

$$P_e = 1/2 \times i\, n\, p_{me} V_h$$

$$P_r = 1/2 \times i\, n\, p_{mr} V_h$$

i : Anzahl der Kolben
n : Drehzahl
P_m: Mitteldruck
P_i : Innere Leistung
P_e : Effektive Leistung
P_r : Reibungsverlust Leistung

4.1.2 Motordynamische Grundlagen

- Im Brennstoff enthaltene Energie soll in mechanische Arbeit umgewandelt werden

- Zwei Teilprozesse
  - Ladungswechsel, Arbeitraum = offenes System
  - Hochdruckprozess, Arbeitsraum = geschlossenes System

- Einfachste Modelle: intern reversible Kreisprozesse
  - Verbrennung = Wärmezufuhr q_B
  - Ladungswechsel = Wärmeabfuhr q_A

- Thermischer Wirkungsgrad:

$$\eta_{th} = \frac{w_{kA}}{q_B} = \frac{q_B - q_A}{q_B} = 1 - \frac{q_A}{q_B}$$

- Prozesse werden als intern reversibel angenommen. Daraus folgt:

$$w_{kA} = \oint p dv = \oint T ds$$

- Am Kolben geleistete Arbeit entspricht der im p-v-Diagramm oder T-s-Diagramm eingeschlossenen Fläche

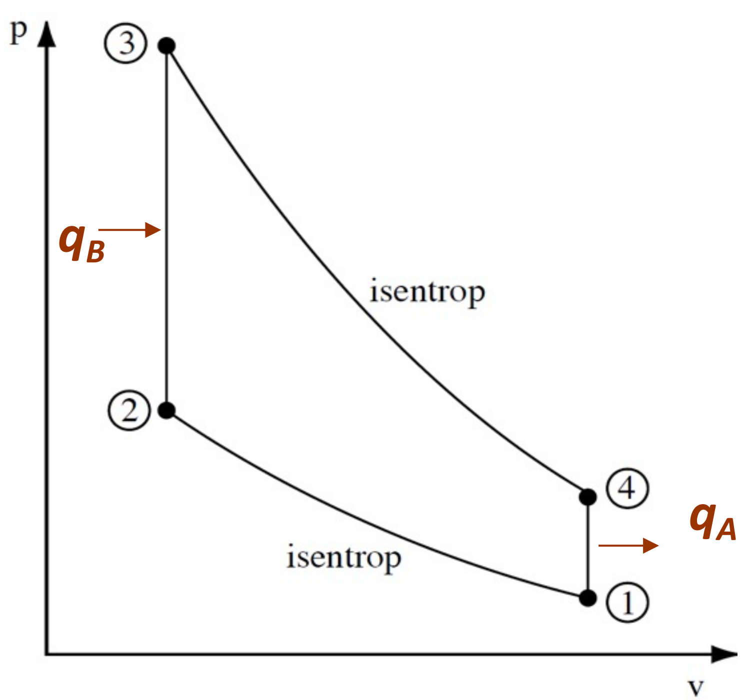
- Idealer Prozess: Carnot Zyklus
  - 1. Isentrope Kompression
  - 2. Isochore Wärmezufuhr
  - 3. Isentrope Expansion
  - 4. Isochore Wärmeabfuhr

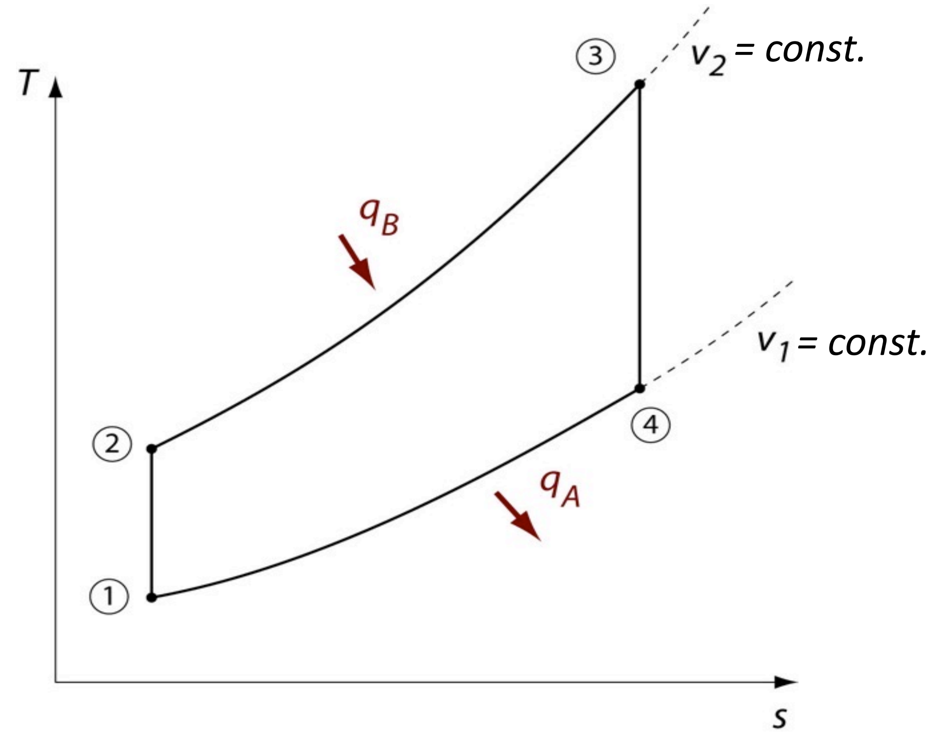
$$\eta_{thC} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$$

- Carnot Zyklus lässt sich praktisch nicht realisieren

4.1.3 Gleichraumprozess

– Teilprozesse:
  - 1 → 2 Isentrope Kompression
  - 2 → 3 Isochore Wärmezufuhr
  - 3 → 4 Isentrope Expansion
  - 4 → 1 Isochore Wärmeabfuhr





Bemerkung: Die Nomenklatur ist hier im Vergleich zu Slide 7 (realer Prozess) verändert, da die Schritte 5 → 1 und 1 → 2 im Schritt 4 →1 zusammengefasst werden. Damit existiert der alte Prozesspunkt 1 nicht mehr und wird neu vor der idealisierten isentropen Kompression (1→2) gesetzt.

- Wärme müsste im OTP (konstantes Volumen) zugeführt und im UTP abgeführt werden:

$$\eta_{th\,GR} = 1 - \frac{q_A}{q_B} = 1 - \frac{c_v\left(T_4 - T_1\right)}{c_v\left(T_3 - T_2\right)}$$

- Isentropenbeziehung:

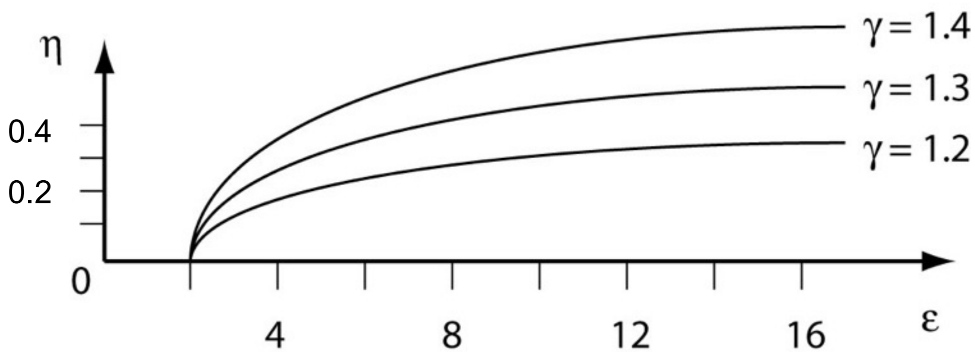
$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_4}{T_3}$$

- Wirkungsgrad:

$$\eta_{th\,GR} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma-1}$$

– Zusammen mit dem Verdichtungsverhältnis ergibt sich:

$$\varepsilon = \frac{v_h + v_c}{v_c} = \frac{v_1}{v_2} \Longrightarrow \eta_{th\,GR} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}$$



– Für einen hohen Wirkungsgrad:
  – hohes Verdichtungsverhältnis
  – Wärmezufuhr in der Nähe von OTP

– Max. Verdichtungsverhältnis für Ottomotoren bestimmt durch Klopfgrenze

- Zu hohes Verdichtungsverhältnis führt zu „Klopfen“
  - Klopfen: Verbrennen des Gemisches auf Grund einer Überhitzung vor der Zündung
    - Hohe Motortemperatur
    - Hoher Motorlärm
    - Reduzierte Leistung
  - Langfristige auftretendes Klopfen führt zu schweren Motorschäden

Von Klopfen beschädigter Kolben

Beispiel: Gleichraumprozess

Die Temperatur zu Beginn des Kompressionshubs eines Standard Otto Zyklus mit einem Volumenverhältnis von 8 ist 300 K, der Druck 1 bar, das Zylindervolumen 500 cm^3 (5×10^{-4} m^3). Die maximale Temperatur während des Zyklus beträgt 2000 K.

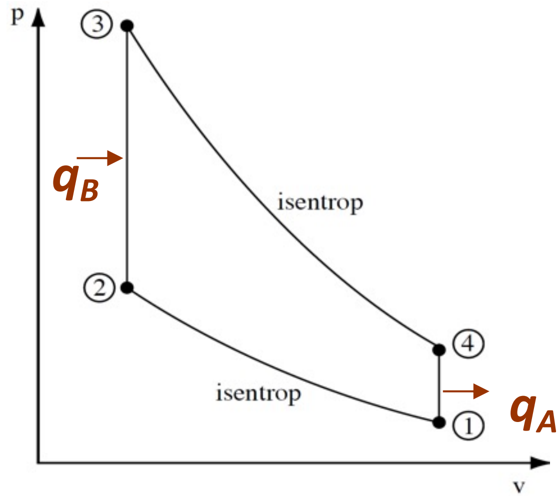
Man bestimme:

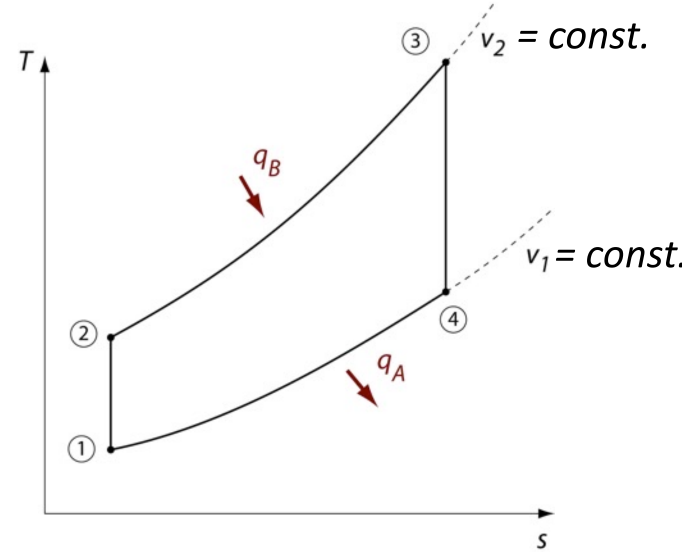
a) Temperatur und Druck am Ende jedes Teilprozesses

b) Thermischer Wirkungsgrad

c) Effektiver Mitteldruck

Annahmen:
- Kompression und Expansion sind adiabat
- Alle Prozesse intern reversibel
- Arbeitsgas ist Luft, ideales Gas
- Kinetische und potentielle Energie vernachlässigbar





Lösung:

a) Bestimmung der Temperaturen und Drücke, sowie der inneren Energie.

– Isentrope Kompression 1-2:

$$T_1 = 300\ K$$

$u_1 = 214.07$ *kJ/kg (Tabelle)*

$v_{r1} = 621.2 * 10^{-3}$ [-] *(Table relative specific volume, only used in isentropic processes, not equal to specific volume)*

$$v_{r2} = \frac{V_2}{V_1} \cdot v_{r1} = \frac{1}{8} \cdot v_{r1} = 77.65$$

$$T_2 = 673\ K\ (Tabelle: mit\ Hilfe\ von\ v_{r2})$$

$$u_2 = 491.22\ kJ/kg\ (Tabelle: mit\ Hilfe\ von\ v_{r2})$$

– Mit der idealen Gasgleichung folgt:

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} \frac{V_1}{V_2} = 1 \cdot \frac{673}{300} \cdot 8 = 17.95\ \ bar$$

– <u>Verbrennung 2-3:</u>

Da der Prozess bei konstantem Volumen abläuft, folgt mit der idealen Gasgleichung:

$$p_3 = p_2 \frac{T_3}{T_2} = 17.95 \cdot \frac{2000}{673} = 53.3\ \ bar$$

– Bei T_3 = 2000 K folgt aus der Tabelle:

$u_3 = 1678.7\ kJ/kg\ (Tabelle)$

$v_{r3} = 2.776 * 10^{-3}$ [-]

- Isentrope Expansion 3-4

$$v_{r4} = v_{r3}\frac{V_4}{V_3} = v_{r3}\frac{V_1}{V_2} = 2.776\cdot 8 = 22.208\,[\text{-}]$$

$$T_4 = 1042.7\ K\ (Tabelle\ mit\ Hilfe\ von\ v_{r4})$$

$$u_4 = 795.7\ kJ/kg\ (Tabelle\ mit\ Hilfe\ von\ v_{r4})$$

- Mit der idealen Gasgleichung und V_4=V_1 folgt

$$p_4 = p_1\frac{T_4}{T_1} = 1\cdot\frac{1042.7}{300} = 3.48\,bar$$

- b) Thermischer Wirkungsgrad:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{41}/m}{Q_{23}/m} = 1 - \frac{u_4 - u_1}{u_3 - u_2}$$

$$= 1 - \frac{795.7 - 214.07}{1678.7 - 491.22} = 0.51\ [\text{-}]$$

- c) Um den Mitteldruck zu bestimmen, benötigt man die Arbeit pro Zyklus:

$$W_{cycle} = m\left[(u_3 - u_4) - (u_2 - u_1)\right]$$

- m ist die Luftmasse in einem Zyklus:

$$m = \frac{p_1 V_1}{R_{air} T_1} = \frac{10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{287.15 \cdot 300} = 5.8 \cdot 10^{-4} \quad kg$$

$$W_{cycle} = 351 \quad J$$

- Effektiver Mitteldruck: $mep = \dfrac{W_{cycle}}{V_1 - V_2}$

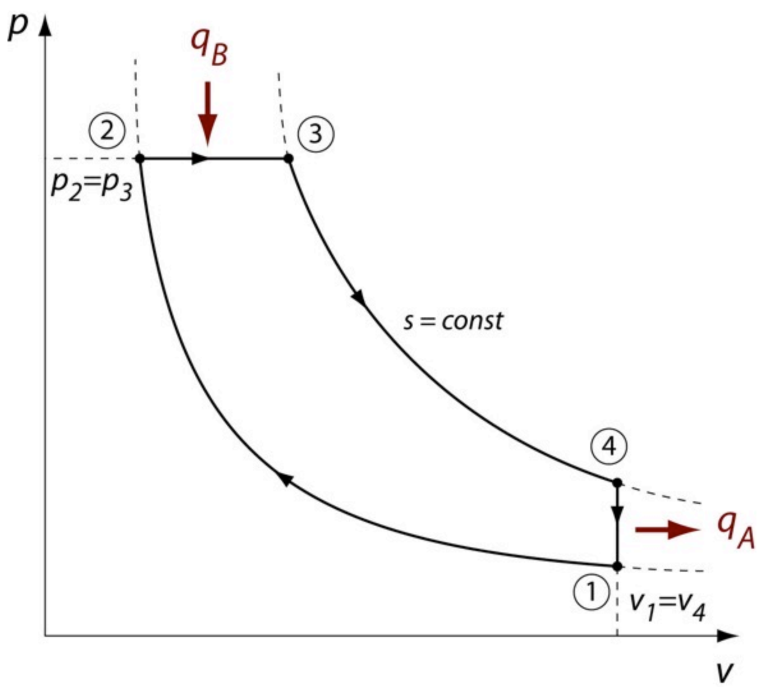
$$mep = \frac{W_{cycle}}{V_1\left[1 - V_2 / V_1\right]} = \frac{351}{5 \cdot 10^{-4}(1 - 1/8)} = 8.02 \quad bar$$

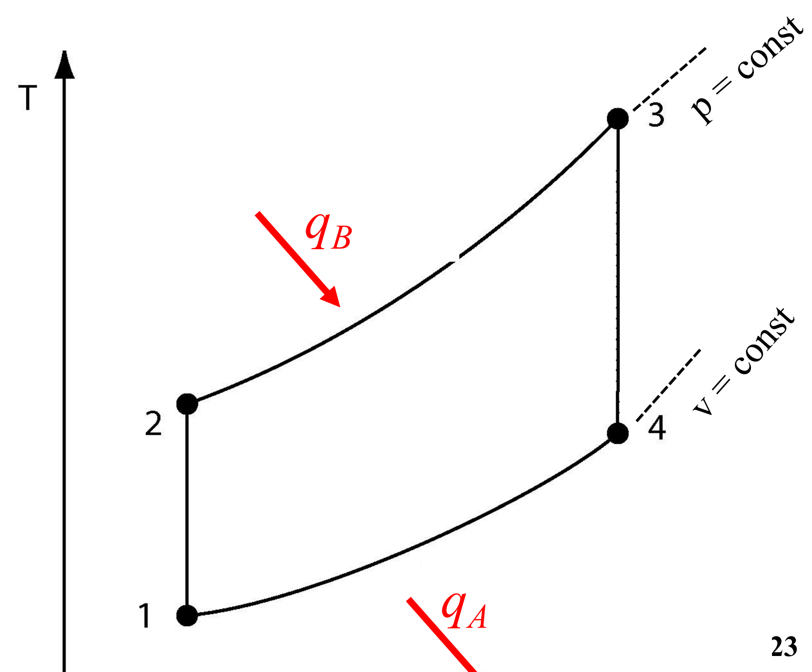
– Falls isentrope Bedingungen mit konstantem γ=1.4 angenommen werden ergibt sich:

	air standard (table)	γ=1.4
T_2	673 K	689 K
T_3	2000 K	2000 K
T_4	1043 K	870.5 K
η	51 %	56.5 %
mep	8.02 bar	7.05 bar

4.1.4 Gleichdruckprozess

- Teilprozesse:
  - 1 → 2 Isentrope Kompression
  - 2 → 3 Isobare Wärmezufuhr
  - 3 → 4 Isentrope Expansion
  - 4 → 1 Isochore Wärmeabfuhr



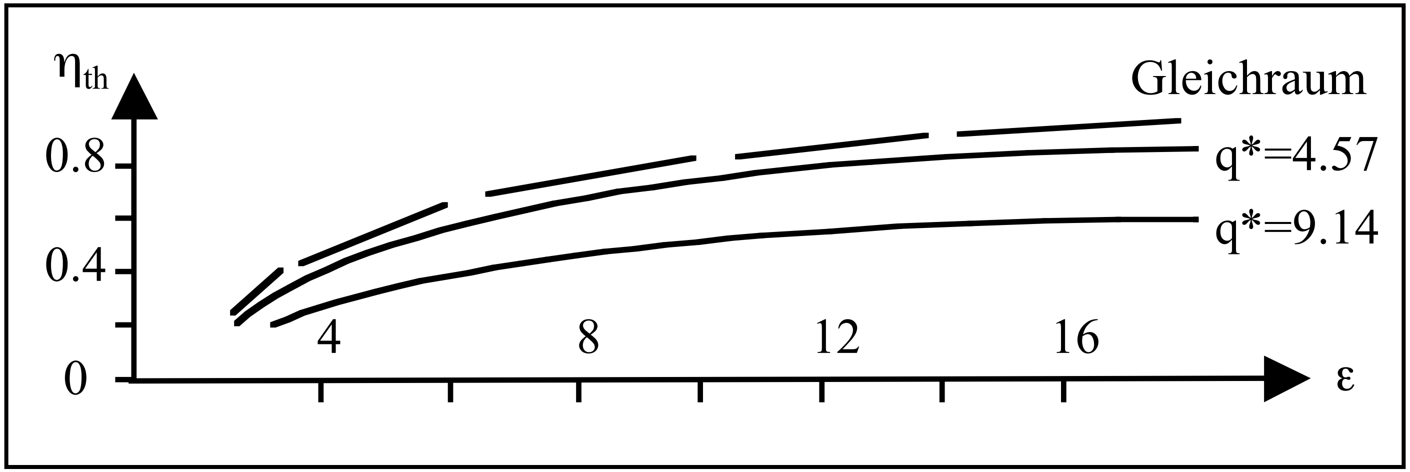


– Theoretischer Wirkungsgrad:

$$\eta_{th\,GD} = 1 - \frac{1}{\gamma q^*}\left[\left(\frac{q^*}{\varepsilon^{\gamma-1}} + 1\right)^{\gamma} - 1\right]$$

– Dimensionslose Grösse q* ist ein Mass für die Grösse der Wärmezufuhr:

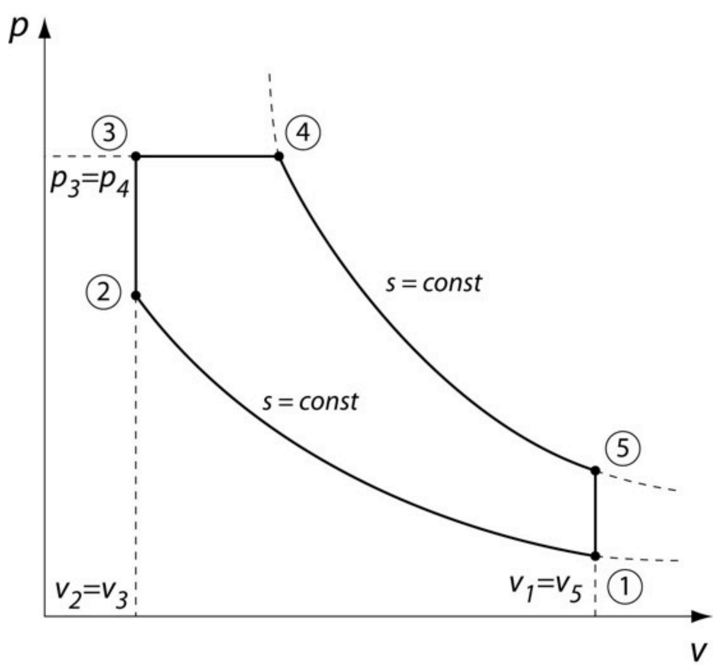
$$q^* = \frac{q_B}{c_p T_1}$$

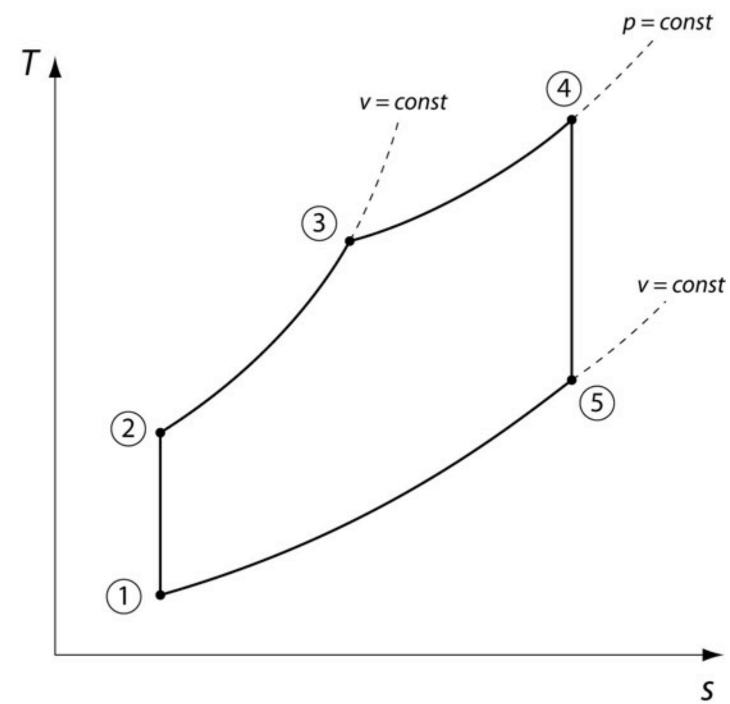


4.1.5 Seiliger-Prozess

– Kombination von Gleichraum- und Gleichdruck- Prozess

– Wärmezufuhr teilweise isochor und isobar





$$\eta_{th\,S} = 1 - \frac{\left[q^{*} - \frac{1}{\gamma^{\varepsilon}}\left(\frac{p_3}{p_1} - \varepsilon^{\gamma}\right) + \frac{p_3}{p_1}\right]^{\gamma}\left(\frac{p_1}{p_3}\right)^{\gamma-1} - 1}{\gamma q^{*}}$$

4.1.6 Offener - geschlossener Prozess

– Warum wird die Innere Energie benutzt, um einen Otto Zyklus zu berechnen?

– Für eine geschlossenes System lautet der 1. Hauptsatz:

$$de = dq - dw,$$

$$\begin{aligned} &wobei \quad q = Wärme \\ &\qquad\quad\; w = Arbeit \\ &\qquad\quad\; e = innere + kinetische + potentielle \quad Energie \end{aligned}$$

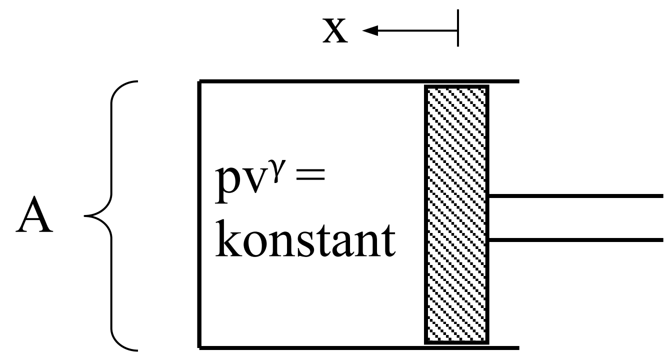
$$\therefore \quad du = dq - dw$$

– Für eine adiabate Zustandsänderung gilt dq=0, d.h.

$$du = -dw$$

- Änderung der Arbeit für einen Kolben (adiabat) ist:

$$\partial w = pA\partial x$$
$$= p\partial(Ax)$$
$$= p\partial v$$



- Integration von 1 nach 2 ergibt:

$$\int_1^2 dw = \int_1^2 pdv$$

- Die Arbeit, um den Kolben von 1 nach 2 zu bewegen, ist gegeben durch:

$$W_{12} = \int_{v1}^{v2} pdv$$

– Für einen reversiblen isentropen Prozess eines perfekten Gases gilt: $pv^{\gamma} = const$

$$\therefore \quad W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{const}{v^{\gamma}} dv = const\left(\frac{V_2^{1-\gamma} - V_1^{1-\gamma}}{1-\gamma}\right)$$

– Nun ist aber $const = p_1 V_1^{\gamma} = p_2 V_2^{\gamma}$

$$W_{12} = \frac{p_2 V_2^{\gamma} V_2^{1-\gamma} - p_1 V_1^{\gamma} V_1^{1-\gamma}}{1-\gamma} = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1-\gamma}$$

– Für ein ideales Gas gilt pV=mRT. Das ergibt:

$$w_{12} = \frac{W_{12}}{m} = \frac{R}{1-\gamma}(T_2 - T_1)$$

$$R = c_p - c_v, \;\; \gamma = c_p / c_v$$

$$\therefore \quad \frac{R}{1-\gamma} = \frac{c_p - c_v}{1 - c_p / c_v} = -c_v$$

- Das ergibt dann:

$$w_{12} = -c_v(T_2 - T_1), \quad -dw = du$$

- Bemerkung: In einem offenen Zyklus kann Energie auch durch die totale Enthalpie des Fluids ins oder aus dem Kontrollvolumen transportiert werden.