

# Übung 2 zur Vorlesung Schiffsdieselmotoren

## Wiederholung Kreisprozesse

**UNIVERSITÄT ROSTOCK**  
**Fakultät Maschinenbau und Schiffstechnik**  
**Lehrstuhl für Kolbenmaschinen/Verbrennungsmotoren**

**Prof. Dr.-Ing. Bert Buchholz**

**Dipl.-Ing. Marko Püschel**

- Inhalt:**
- Organisatorisches
  - Fragen zur Vorlesung
  - Kreisprozesse
  - Aufgabe 2 – Kreisprozessrechnung

**Übung: Montags 13:15 bis 14:45 in R I/07**

**Infos und Download:**

<http://www.lkv.uni-rostock.de/>

**Anmeldung:**

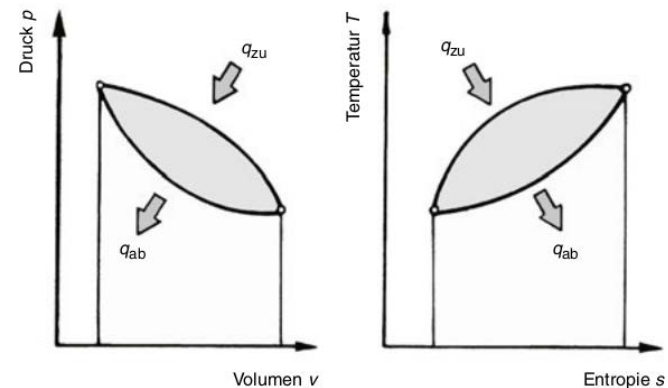
**mit Uni-Zugangsdaten, kein weiteres Passwort erforderlich**

**Kontakt: [marko.pueschel@uni-rostock.de](mailto:marko.pueschel@uni-rostock.de)  
0381-498 9410 oder R I/16**

## Ziel:

- Bildung eines einfachen theoretischen Modells, um mit geringem Rechenaufwand grundsätzliche Aussagen zum Motorprozess sowie zu dessen Einflussgrößen zu bekommen.
- Vergleich mit dem realen Motorprozess und Vergleich mit anderen Vergleichsprozessen

**Kreisprozesse** sind aufeinander folgende Zustandsänderungen eines Arbeitsmittels, bei denen dieses wieder auf den Ausgangszustand zurückgeführt wird. Man bezeichnet sie als geschlossene Kreisprozesse mit Wärmezu- und -abfuhr.



Quelle: R. von Basshuysen, F. Schäfer (Hrsg.),  
Handbuch Verbrennungsmotor, 2015

Zur vereinfachten Berechnung eines Verbrennungsmotors werden idealisierte Vergleichsprozesse herangezogen. Dabei handelt es sich um rechtsläufige Kreisprozesse, bei denen mit folgenden Idealisierungen gearbeitet wird:

- Das Arbeitsmedium ist ein **ideales Gas**, dessen Stoffwerte denen von Luft bei Umgebungsdruck- und Temperatur entsprechen.
- Die chemischen und physikalischen **Eigenschaften** des Arbeitsmediums bleiben **konstant**.
- Es handelt sich um **geschlossene Prozesse**, der Ladungswechsel wird durch eine Wärmeabfuhr, die Verbrennung durch eine Wärmezufuhr ersetzt.
- Die **Masse** der im Kreisprozess befindlichen Stoffe bleibt **konstant**, Verluste durch Leckagen bleiben unberücksichtigt.
- Kompression und Expansion finden **isentrop** statt (**adiabat und reibungsfrei**).

## Idealer Prozess

- Isentrope Verdichtung und Expansion
- Isochore Wärmeabfuhr
- Isobare/isochore Wärmezufuhr
- Ideales Gas

## Realer Prozess

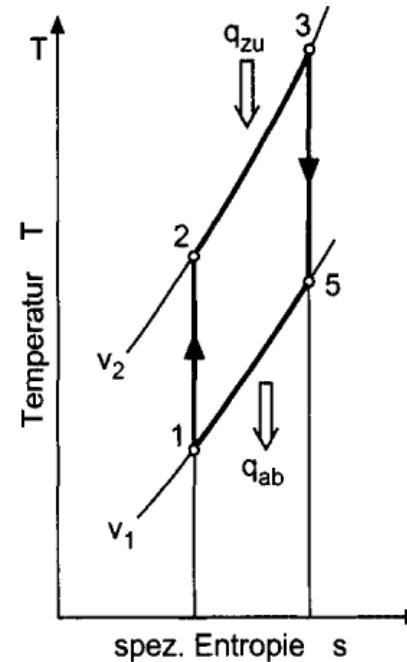
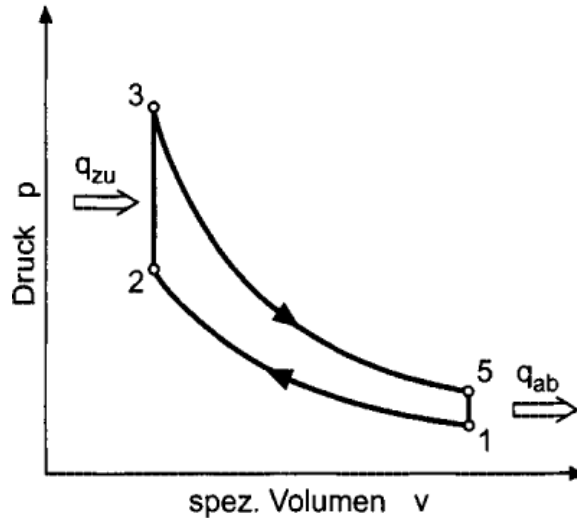
- Gaswechsel                   ⇒ Druckverluste, Gasdynamik im Ansaug- und Auslasskanal
- Zylinderladung           ⇒ Druckverluste, Ventilsteuerzeiten, Wärmeübertragung
- Verbrennung               ⇒ zeitlicher Verlauf, unvollständige Verbrennung
- Wärmeübertragung       ⇒ auf und von den Zylinderwänden
- Gasverluste               ⇒ Undichtigkeiten zwischen Kolben und Zylinder/  
an Ventilen

## Arten der Vergleichsprozesse

- Carnot-Prozess – Idealprozess einer Wärmekraftmaschine mit dem höchsten thermischen Wirkungsgrad, allerdings für eine reale Kolbenmaschine nicht realisierbar, da extrem wenig Arbeit generiert wird
- Gleichraum-Prozess – charakterisiert den Otto-Prozess
- Gleichdruck-Prozess – charakterisiert den Diesel-Prozess
- Seiliger-Prozess – charakterisiert den Diesel-Prozess und hat den Gleichdruck-Prozess weitestgehend verdrängt

## Gleichraum-Prozess

Quelle: R. Pischinger,  
M. Klell, Th. Sams,  
Thermodynamik der  
Verbrennungs-  
kraftmaschine, 2009

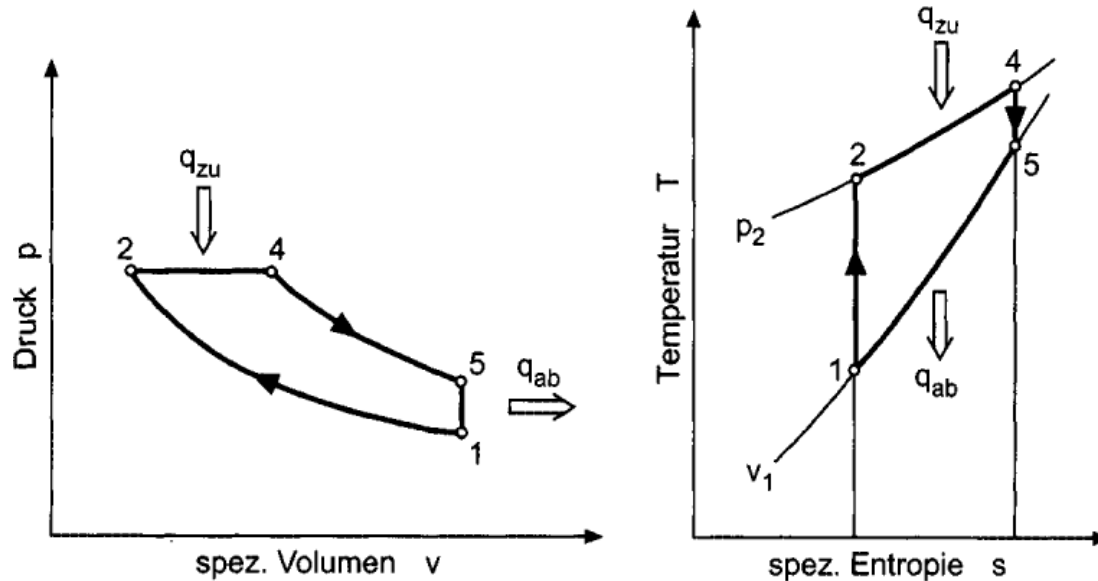


1⇒2 isentrope Kompression  
2⇒3 isochore Wärmezufuhr  
3⇒5 isentrope Expansion  
5⇒1 isochore Wärmeabfuhr

- Höchster thermischer Wirkungsgrad
- Aufgrund isochorer Wärmezufuhr Verbrennung schlagartig, d. h. unendlich schnell, (im oberen Totpunkt)

## Gleichdruck-Prozess

Quelle: R. Pischinger,  
M. Klell, Th. Sams,  
Thermodynamik der  
Verbrennungs-  
kraftmaschine, 2009

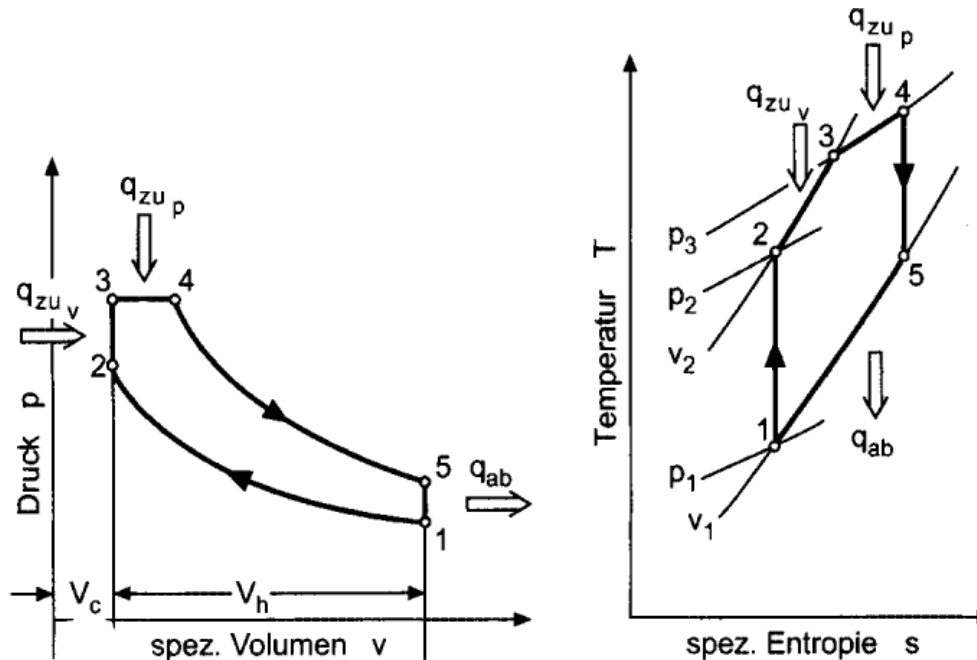


1⇒2 isentrope Kompression  
2⇒4 isobare Wärmezufuhr  
4⇒5 isentrope Expansion  
5⇒1 isochore Wärmeabfuhr

- Verbrennung beginnt im oberen Totpunkt
- Durch Expansion müsste der Druck fallen, wird aber durch intensiver werdende Verbrennung auf konstantem Niveau gehalten
- Kolben bewegt sich während Verbrennung in Richtung unterer Totpunkt ⇒ endliche Verbrennungsgeschwindigkeit

# Seiliger-Prozess

Quelle: R. Pischinger,  
M. Klell, Th. Sams,  
Thermodynamik der  
Verbrennungs-  
kraftmaschine, 2009



1⇒2 isentrope Kompression  
2⇒3 isochore Wärmezufuhr  
3⇒4 isobare Wärmezufuhr  
4⇒5 isentrope Expansion  
5⇒1 isochore Wärmeabfuhr

- Kombination aus Gleichraum- und Gleichdruckprozess
- Berücksichtigung der aus thermischen und mechanischen Gründen gegebenen Druckbegrenzung sowie der endlichen Verbrennungsgeschwindigkeit
- Wird am häufigsten für überschlägliche Motorberechnungen verwendet

**Technische Arbeit** – Differenz zwischen zugeführter und abgeführter Energie

$$w_t = q_{zu} - q_{ab} = \Delta q$$

## Gleichraum-Prozess

$$\Delta q = c_v (T_3 - T_2) - c_v (T_5 - T_1)$$

## Gleichdruck-Prozess

$$\Delta q = c_p (T_4 - T_2) - c_v (T_5 - T_1)$$

## Seiliger-Prozess

$$\Delta q = c_v (T_3 - T_2) + c_p (T_4 - T_3) - c_v (T_5 - T_1)$$

Isentropenexponent:  $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$

Universelle Gaskonstante:  $R_m = c_p - c_v$

## Thermischer Wirkungsgrad

$$\eta_{\text{th}} = \frac{w_t}{q_{\text{zu}}} = \frac{q_{\text{zu}} - q_{\text{ab}}}{q_{\text{zu}}} = 1 - \frac{q_{\text{ab}}}{q_{\text{zu}}}$$

### Gleichraum-Prozess

$$\eta_{\text{th, Gleichraum}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}$$

### Gleichdruck-Prozess

$$\eta_{\text{th, Gleichdruck}} = 1 - \frac{1}{\kappa \varepsilon^{\kappa-1}} \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\varphi - 1}$$

### Seiliger-Prozess

$$\eta_{\text{th, Seiliger}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \frac{\varphi^{\kappa} \psi - 1}{\psi - 1 + \kappa \psi (\varphi - 1)}$$

Verdichtungsverhältnis:

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_c + V_h}{V_c}$$

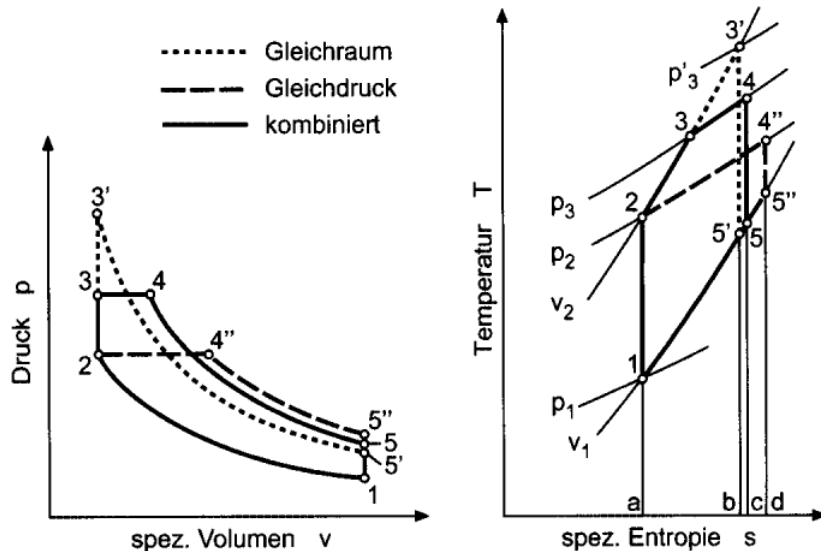
Drucksteigerungsverhältnis:

Einspritz-/Dehnungs-  
verhältnis:

$$\varphi = \frac{V_4}{V_2} \text{ bzw. } \frac{V_4}{V_3}$$

$$\psi = \frac{p_3}{p_2}$$

## Vergleich von Arbeitsprozessen mit gleicher Wärmezufuhr bei gegebenem Verdichtungsverhältnis



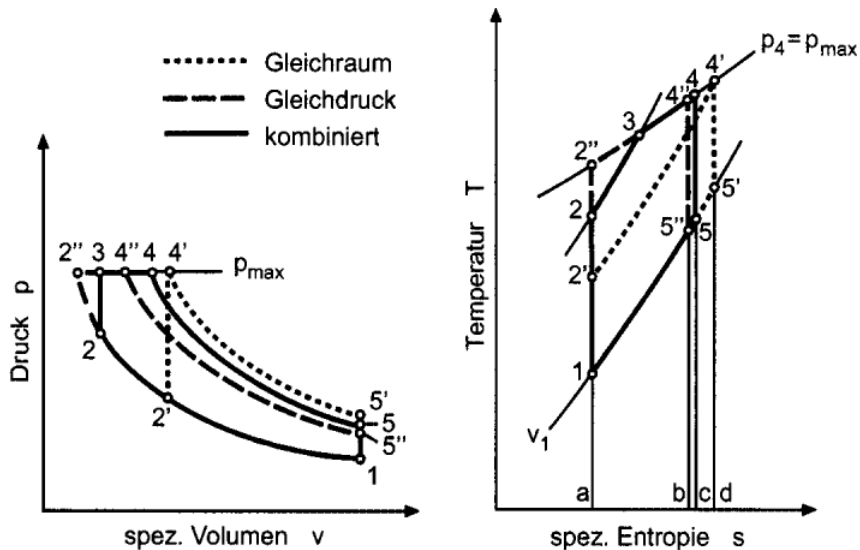
- Flächen im T-s-Diagramm gleich groß
- Abgeführte Wärme des Gleichraum-Prozesses kleiner als die des Seiliger- und des Gleichdruck-Prozesses:

$$\eta_{th,Gleichraum} > \eta_{th,Seiliger} > \eta_{th,Gleichdruck}$$

- Gleichraum-Prozess hat die höchste Temperatur am Verbrennungsende und gleichzeitig die tiefste Temperatur am Expansionsende; dasselbe gilt für die Drücke
- Gleichraum-Prozess hat die höchste thermische Belastung des Brennraums und die niedrigste thermische Belastung des Abgasstrangs

Quelle: R. Pischinger, M. Klell, Th. Sams, Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, 2009

## Vergleich von Arbeitsprozessen mit gleicher Wärmezufuhr bei gegebenem Verdichtungsverhältnis



Quelle: R. Pischinger, M. Klell, Th. Sams, Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine, 2009

- Ist aus Festigkeitsgründen  $p_{max}$  begrenzt, aber Verdichtungsverhältnis  $\epsilon$  nicht  $\Rightarrow$  höchstmögliches  $\epsilon$  anstreben  $\Rightarrow$  bereits durch Verdichtung  $p_{max} \Rightarrow$  Gleichdruck-Verbrennung bei  $p_{max}$
- Limitierung von  $\epsilon$ , z. B. durch Klopfestigkeit  $\Rightarrow$  Gleichraum-Verbrennung vom Verdichtungsdruck bis  $p_{max}$  und anschließend Gleichdruck-Verbrennung

$$\eta_{th, Gleichdruck} > \eta_{th, Seiliger} > \eta_{th, Gleichraum}$$

- Otto-Motor – Begrenzung  $\epsilon \Rightarrow$  Gleichraum-Prozess bester thermischer Wirkungsgrad
- Diesel-Motor – Begrenzung  $p_{max} \Rightarrow$  Gleichdruck-Prozess bester thermischer Wirkungsgrad

## Aufgabe 2.1 – Kreisprozessrechnung

Bei einem 1-Zylinder-4-Takt-Prüfstandsmotor (MaK M20) werden Variationen der Wärmezufuhr durchgeführt. Der Motor wird dabei bei konstanter Drehzahl (Generatorbetrieb:  $n = 1.000 \text{ min}^{-1}$ ) gefahren. Berechnen Sie unter der Annahme des Seiliger-Prozesses und unter Vernachlässigung der Kraftstoffmasse bezüglich der Gesamtzylindermasse den Kreisprozess:

gegeben:

$$s = 300 \text{ mm}$$

$$D = 200 \text{ mm}$$

$$\varepsilon = 16$$

$$T_1 = 50 \text{ °C}$$

$$p_1 = 3 \text{ bar}$$

$$H_u = 42,6 \text{ MJ/kg}$$

$$c_{p,\text{Luft}} = 1.005 \text{ J/kgK}$$

$$c_{v,\text{Luft}} = 718 \text{ J/kgK}$$

$$R_{\text{Luft}} = 287,1 \text{ J/kgK}$$

$$\kappa = 1,4$$

Fall 1) ca. 65 % der Nennlast

$$m_K = 1,2 \text{ g}$$

$$Q_{\text{zu,isocho}} = 50 \%$$

$$Q_{\text{zu,isobar}} = 50 \%$$

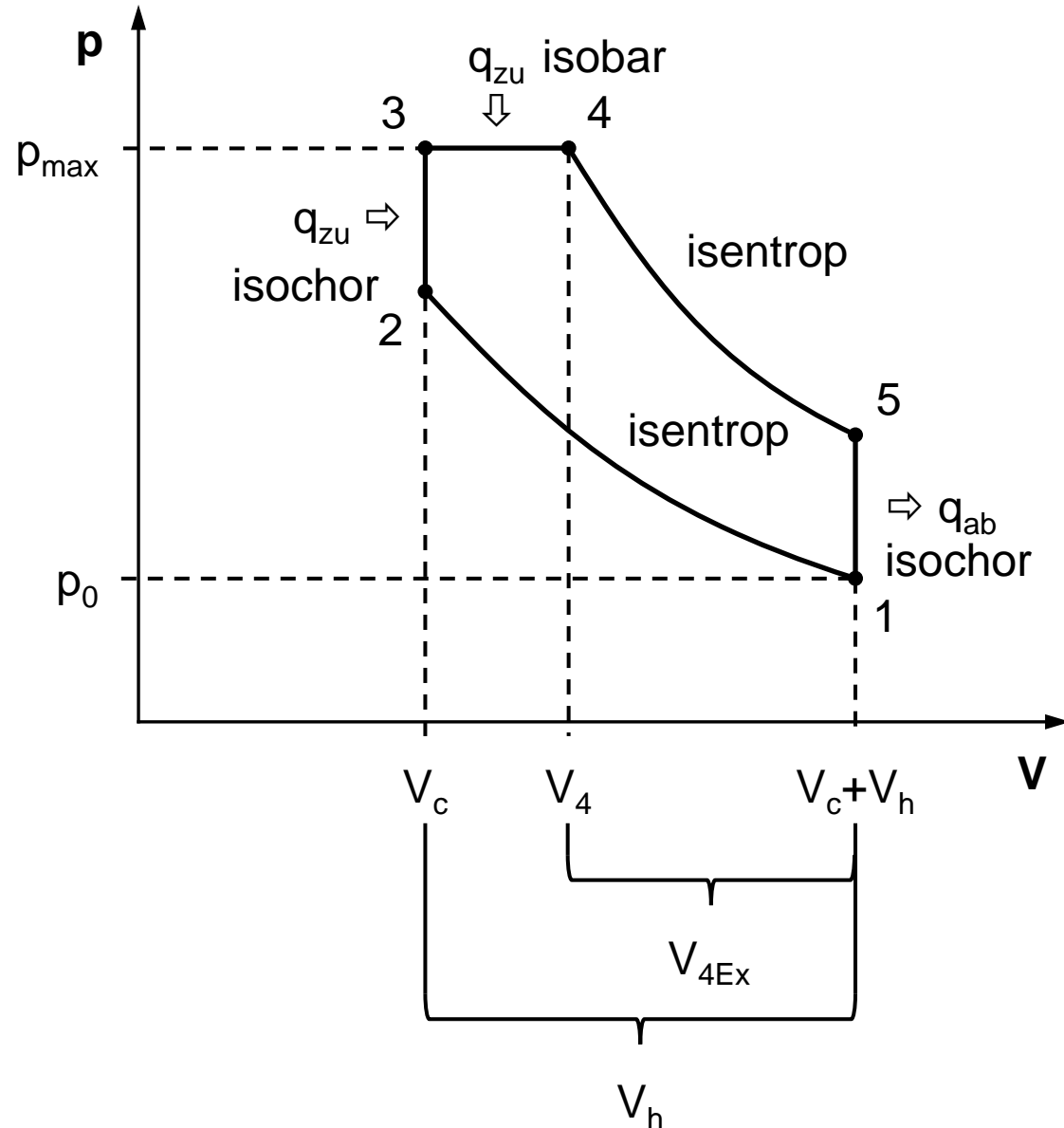
gesucht:

- Skizzieren Sie im p-V- Diagramm die Zustandsänderungen für den Seiliger-Prozess
- Berechnen Sie die Temperatur nach der Verbrennung
- Berechnen Volumen und Kolbenweg am Ende der Verbrennung
- Bedingungen am Ende der Expansion ( $p_5$  und  $T_5$ ) sowie den thermischen Wirkungsgrad  $\eta_{\text{th}}$

## Aufgabe 2.1 – Kreisprozessrechnung

Ergebnisse:

a)



### Ergebnisse:

- b)  $V_h = 0,009425 \text{ m}^3$        $V_c = 0,000628 \text{ m}^3$   
 $T_1 = 323,15 \text{ K}$        $p_1 = 3,00 \text{ bar}$        $V_1 = V_c + V_h$   
 $m_{\text{Zyl}} = 0,032508 \text{ kg}$   
 $T_2 = 979,61 \text{ K}$        $p_2 = 145,51 \text{ bar}$        $V_2 = V_c$   
 $T_3 = 2.074,70 \text{ K}$        $p_3 = 308,17 \text{ bar}$        $V_3 = V_2$   
 $T_4 = 2.857,07 \text{ K}$        $p_4 = p_3$        $V_4 = 0,000865 \text{ m}^3$
- c)  $V_{4\text{Ex}} = V_4 - V_c = 0,000237 \text{ m}^3$        $x_{4\text{Ex}} = 0,007542 \text{ m}$
- d)  $T_5 = 1.071,17 \text{ K}$        $p_5 = 9,94 \text{ bar}$        $V_5 = V_1$   
 $\eta_{\text{th}} = 65,85 \%$

Fall 2) ca. 100 % der Nennlast

$$m_K = 1,8 \text{ g}$$

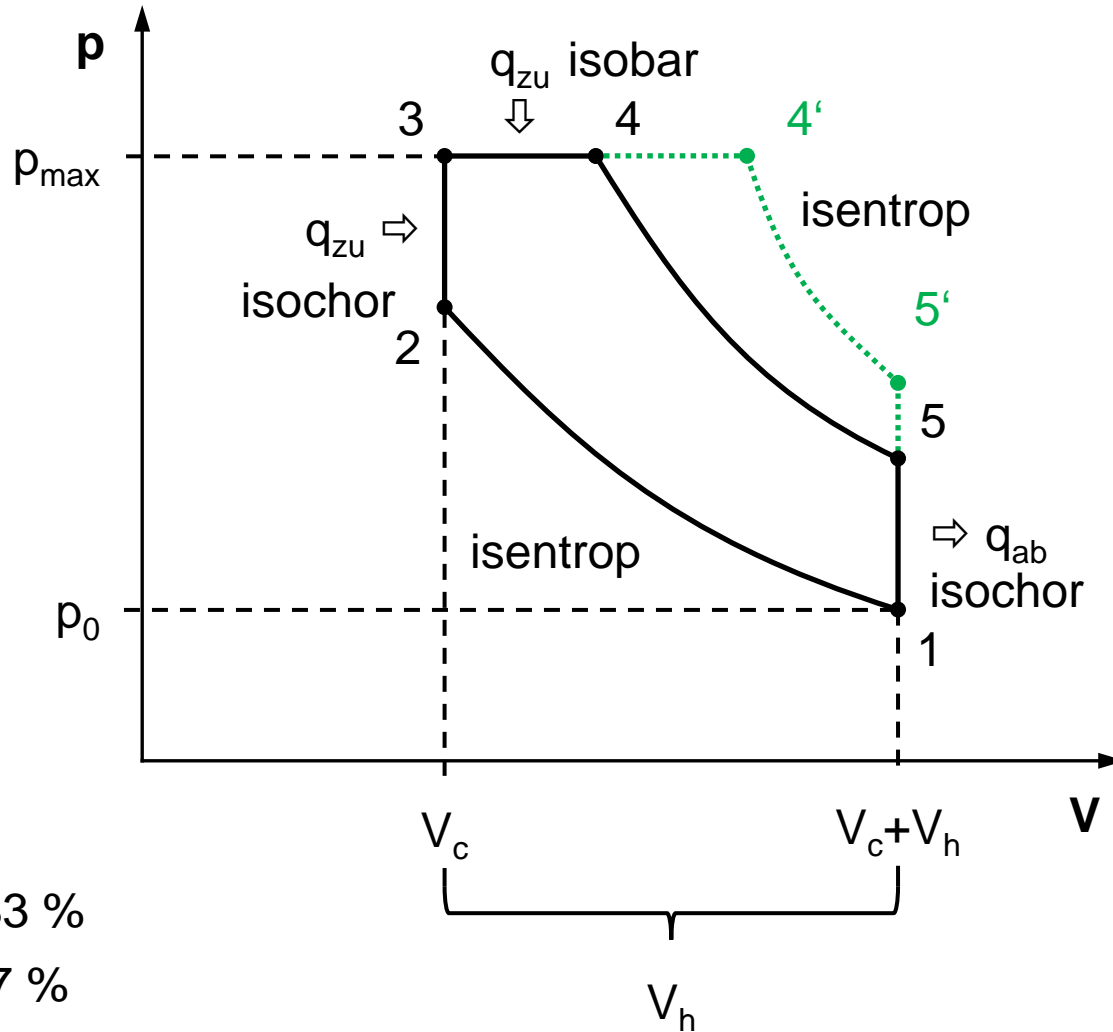
gesucht:

- Überlegen Sie, wie sich die Aufteilung der  $Q_{\text{zu,isochoor}}/Q_{\text{zu,isobar}}$  verändert (PLD-Einspritzung). Skizzieren Sie im p-V- Diagramm den veränderten Innenprozess
- Berechnen Sie die Temperatur nach der Verbrennung
- Berechnen Volumen und Kolbenweg am Ende der Verbrennung
- Bedingungen an Ende der Expansion ( $p_5$  und  $T_5$ ) sowie den thermischen Wirkungsgrad  $\eta_{\text{th}}$

## Aufgabe 2.2 – Kreisprozessrechnung

### Ergebnisse:

a)



$$Q_{zu, isochor} = 33,33 \%$$

$$Q_{zu, isobar} = 66,67 \%$$

### Ergebnisse:

- b)  $V_h = 0,009425 \text{ m}^3$        $V_c = 0,000628 \text{ m}^3$   
 $T_1 = 323,15 \text{ K}$        $p_1 = 3,00 \text{ bar}$        $V_1 = V_c + V_h$   
 $m_{\text{Zyl}} = 0,032508 \text{ kg}$   
 $T_2 = 979,61 \text{ K}$        $p_2 = 145,51 \text{ bar}$        $V_2 = V_c$   
 $T_3 = 2.074,70 \text{ K}$        $p_3 = 308,17 \text{ bar}$        $V_3 = V_2$   
 $T_4 = 3.639,44 \text{ K}$        $p_4 = p_3$        $V_4 = 0,001102 \text{ m}^3$
- c)  $V_{4\text{Ex}} = V_4 - V_c = 0,000474 \text{ m}^3$        $x_{4\text{Ex}} = 0,015084 \text{ m}$
- d)  $T_5 = 1.503,20 \text{ K}$        $p_5 = 13,96 \text{ bar}$        $V_5 = V_1$   
 $\eta_{\text{th}} = 64,08 \%$