

Thermodynamik 1 : Kapitel 5

Kapitel 5: Rechtsläufige Kreisprozesse

5.1 Grundlegende Betrachtungen zu Kreisprozessen

5.2 Joule-Prozess

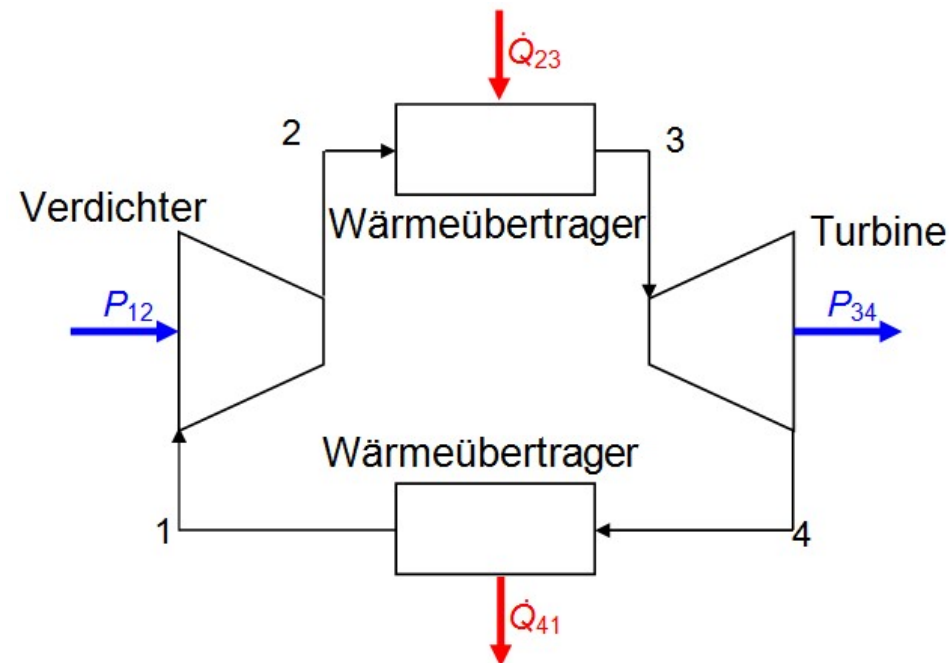
5.3 Clausius-Rankine Prozess

5.4 Stirling Prozess

5.5 Otto-Prozess

5.1 Kreisprozesse

- **Kreisprozesse** sind Prozesse, in denen ein Arbeitsmedium in einem geschlossenen Kreislauf umläuft und dabei periodisch in seinen Anfangszustand zurückkehrt
- **Beispiel: geschlossene Gasturbine**



- In der Praxis werden Verdichter und Turbine auf einer Welle montiert und nur $\Delta P = P_{34} + P_{12}$ (bzw. $|\Delta P| = |P_{34}| - P_{12}$) tritt nach außen in Erscheinung

5.1 Kreisprozesse

- Für die thermodynamische Untersuchung ist es günstiger, alle Teilprozesse unabhängig voneinander zu betrachten
- Die Anwendung des 1. Hauptsatzes ergibt für den dargestellten geschlossenen Gasturbinenprozess

$$\text{Verdichter: } \dot{Q}_{12} + P_{12} = \dot{m} \cdot \left[(h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g \cdot (z_2 - z_1) \right]$$

$$\text{Wärmezufuhr: } \dot{Q}_{23} + P_{23} = \dot{m} \cdot \left[(h_3 - h_2) + \frac{1}{2}(c_3^2 - c_2^2) + g \cdot (z_3 - z_2) \right]$$

$$\text{Turbine: } \dot{Q}_{34} + P_{34} = \dot{m} \cdot \left[(h_4 - h_3) + \frac{1}{2}(c_4^2 - c_3^2) + g \cdot (z_4 - z_3) \right]$$

$$\text{Wärmeabfuhr: } \dot{Q}_{41} + P_{41} = \dot{m} \cdot \left[(h_1 - h_4) + \frac{1}{2}(c_1^2 - c_4^2) + g \cdot (z_1 - z_4) \right]$$

$$\Sigma \dot{Q}_{ij} + \Sigma P_{ij} = 0$$

5.1 Kreisprozesse

- Werden Verdichter und Turbine als adiabat betrachtet und wird in den Wärmeübertragern keine Arbeit zu- oder abgeführt, folgt für die geschlossene Gasturbine

$$|P_{34}| - P_{12} = \dot{Q}_{23} - |\dot{Q}_{41}|$$

- Das gleiche Ergebnis hätte man aus der äußeren Bilanz erhalten
- Für die Nutzleistung ergibt sich allgemein

$$P_{\text{Nutz}} = \sum P_{ij} = -\sum \dot{Q}_{ij}$$

- In Prozessen mit konstantem Massenstrom in allen Teilprozessen lassen sich die entsprechenden Beziehungen auch spezifisch schreiben

$$\frac{\sum \dot{Q}_{ij} + \sum P_{ij}}{\dot{m}} = \sum q_{ij} + \sum w_{t,ij} = 0 \quad \text{und} \quad w_{t,\text{Nutz}} = \sum w_{t,ij} = -\sum q_{ij}$$

- Wirkungsgrade von Wärmekraftmaschinen wurden bereits diskutiert

5.1 Kreisprozesse

- Charakteristisches Merkmal von Wirkungsgraden ist es, dass Nutzen und Aufwand zueinander in Beziehung gesetzt werden
- Für die geschlossene Gasturbine ergibt sich für der ...

... thermischer Wirkungsgrad: $\eta_{th} = \frac{|P_{34}| - P_{12}}{\dot{Q}_{23}}$

bzw. mit $\dot{m} = \text{const.}$ $\eta_{th} = \frac{|w_{t,34}| - w_{t,12}}{q_{23}} = \frac{h_3 - h_4 - (h_2 - h_1)}{h_3 - h_2}$

... exergetische Wirkungsgrad: $\eta_{ex} = \frac{|P_{34}| - P_{12}}{E \dot{Q}_{23}}$

bzw.: $\eta_{ex} = \frac{|P_{34}| - P_{12}}{(1 - T_a / T_m) \cdot \dot{Q}_{23}}$

5.1 Kreisprozesse

- Problematisch ist wieder die Festlegung der thermodynamischen Mitteltemperatur der Wärmezufuhr

⇒ **Für den Prozess** ist es die Mitteltemperatur der Wärmeaufnahme

$$T_m = (h_3 - h_2) / (s_3 - s_2)$$

⇒ **Für die Anlage** ist es die Temperatur, bei der das Wärme zuführende Medium vorliegt (z.B. Verbrennungsgase)

⇒ Alternativ kann für die Anlage die Exergie des Brennstoffs als exergetischer Aufwand betrachtet werden

- Der thermische Wirkungsgrad ist wieder durch den Carnot-Wirkungsgrad begrenzt

$$\eta_{th} \leq \eta_c = 1 - T_a / T_m$$

- Bei einer detaillierten Analyse können die Exergieverluste für jeden Teilprozess einzeln bestimmt werden

5.1 Kreisprozess im p, v - Diagramm

- Die reversible technische Arbeit ist definiert als

$$w_{t,ij,rev.} = \int_i^j v dp$$

- Mit Berücksichtigung der Dissipation φ_{ij} ergibt sich

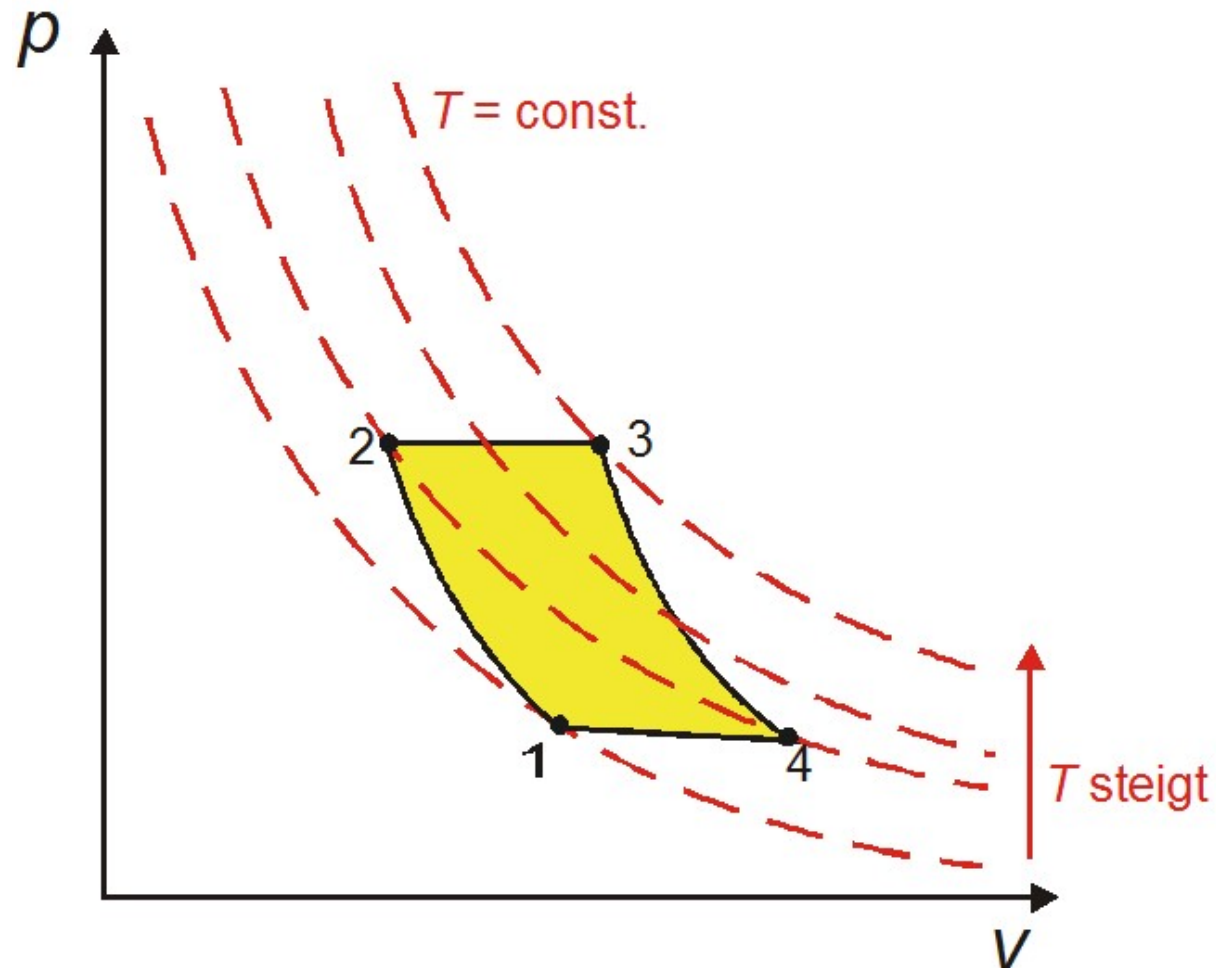
$$w_{t,ij} = \int_i^j v dp + \varphi_{ij} \quad \text{mit} \quad \varphi_{ij} \geq 0$$

- Für einen Kreisprozess, der aus einer Aneinanderreihung von Teilprozessen (mit konstantem Massenstrom) besteht, ist die technische Arbeit

$$w_t = \sum w_{t,ij} = \sum \left(\int_i^j v dp + \varphi_{ij} \right) = \oint v dp + \sum \varphi_{ij}$$

5.1 Kreisprozess im p, v - Diagramm

- Die technische Arbeit lässt sich als Fläche im p, v -Diagramm darstellen



5.1 Kreisprozess im p, v - Diagramm

- In dem dargestellten Prozess ist das Ringintegral negativ
- Das Ringintegral ist stets negativ, wenn die umschlossene Fläche im Uhrzeigersinn („rechts herum“) umlaufen wird

$$\Rightarrow w_t = \oint v dp + \sum \varphi_{ij} < 0, \text{ Arbeit wird abgegeben}$$

$$\sum q_{ij} = -w_t > 0, \text{ Wärme wird aufgenommen}$$

\Rightarrow Wärme wird bei hoher Temperatur aufgenommen und zum Teil in technische Arbeit umgewandelt; die Abwärme wird bei niedrigerer Temperatur abgegeben

\Rightarrow **Wärmekraftprozess**

- **Beispiele**

\Rightarrow Gasturbine

\Rightarrow Dampfkraftwerk

\Rightarrow Otto-Motor

\Rightarrow Diesel-Motor

5.1 Kreisprozess im p,v - Diagramm

- Wird ein Kreisprozess so geführt, dass die Kompression bei hoher Temperatur stattfindet und die Entspannung bei niedriger Temperatur, so ergibt sich ein **linksläufiger Kreisprozess**
- Für linksläufige Kreisprozesse gilt

$$w_t = \oint v dp + \sum \varphi_{ij} > 0, \text{ Arbeit wird aufgenommen}$$

$$\sum q_{ij} = -w_t < 0, \text{ Wärme wird abgegeben}$$

⇒ Wärme wird bei niedriger Temperatur aufgenommen und unter Aufnahme von technischer Arbeit bei hoher Temperatur abgegeben

- **Beispiele**

⇒ Kühl- und Gefriergeräte

⇒ Kälteaggregate in Klimaanlage

⇒ Wärmepumpen

5.1 Kreisprozess im p,v - Diagramm

Allgemein gilt: Ohne einen Druckunterschied Δp kann ein Kreisprozess keine (reversible) Arbeit abgeben oder aufnehmen, das Ringintegral wird dann stets zu Null

- In ähnlicher Form lassen sich diese Überlegungen auf das T,s -Diagramm übertragen
- Aus $h = h(p,s)$ folgt: $dh = Tds + vdp$
- Das Arbeitsmedium im Kreisprozess kehrt stets zum Ausgangszustand zurück, es muss gelten

$$\oint dh = \oint Tds + \oint vdp = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \oint Tds = -\oint vdp = -(w_t - \sum \phi_{ij})$$

- **Allgemein gilt:** Ohne einen Temperaturunterschied ΔT kann ein Kreisprozess keine (reversible) Arbeit abgeben

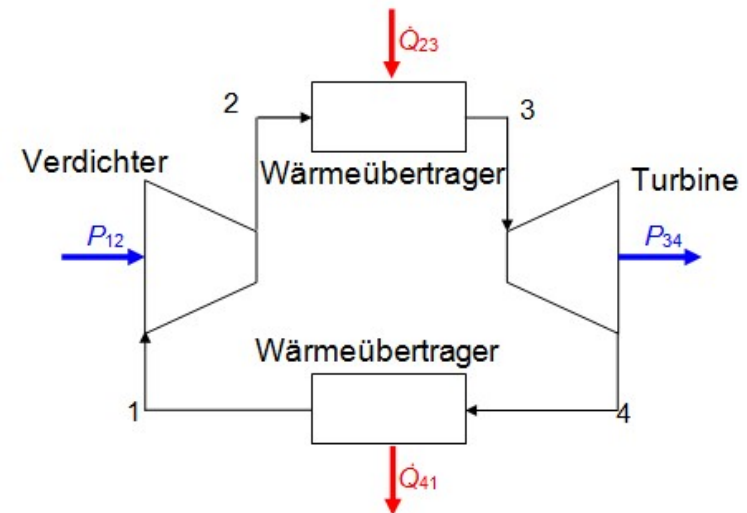
5.2 Joule-Prozess

- Reale Gasturbinen-Prozesse sind sehr kompliziert
 - ⇒ In allen Bauteilen treten nicht vernachlässigbare Druckverluste auf
 - ⇒ Ein Teil der Luft wird auf verschiedenen Druckniveaus aus dem Kompressor ausgeschleust und zur Kühlung von Brennkammer und Turbinenschaufeln verwendet
 - ⇒ Bei den meist verwendeten **offenen Gasturbinenprozessen** ist die Verbrennung integraler Bestandteil des Prozesses
 - ⇒ Für verschiedene Prozessvarianten wird versucht, den Massenstrom in der Turbine durch Befeuchtung der komprimierten Luft zu vergrößern

5.2 Joule-Prozess

- Der abstrahierte Vergleichsprozess für die Gasturbine ist der **Joule-Prozess**

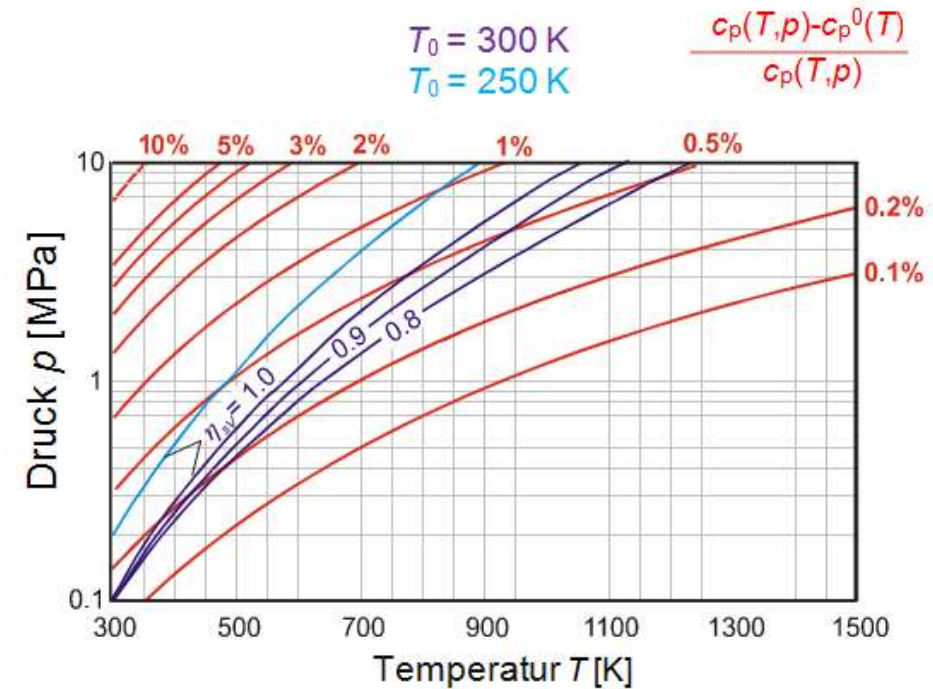
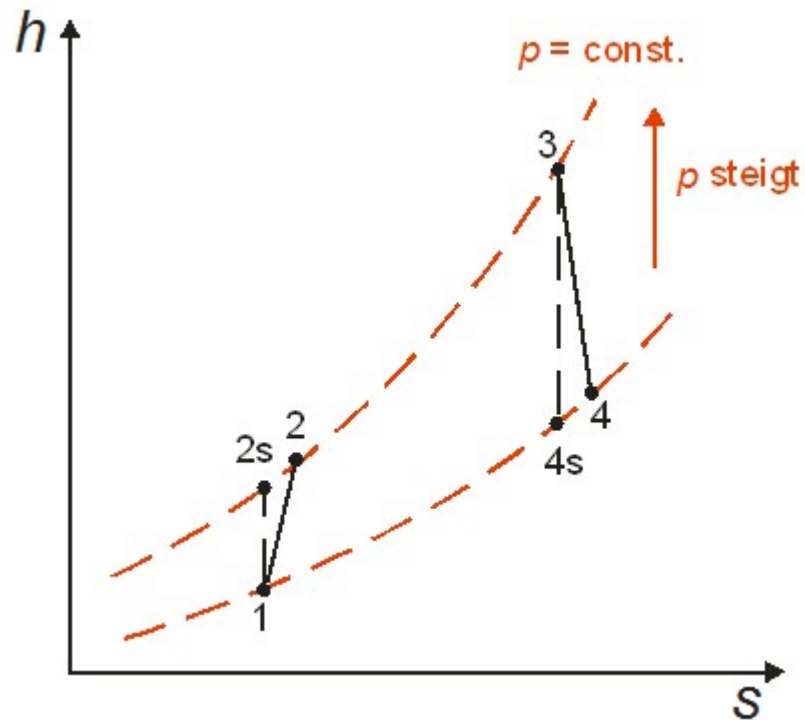
- 1 → 2 Irreversibel adiabate Kompression
- 2 → 3 Isobare Wärmezufuhr
- 3 → 4 Irreversibel adiabate Entspannung
- 4 → 5 Isobare Wärmeabfuhr



- Wirkungsgrade und Leistungsausbeute des Joule Prozesses wurden bereits diskutiert
- Der thermische Wirkungsgrad des Joule-Prozesses kann im Idealfall gleich dem **Carnot-Wirkungsgrad** werden, wenn
 - ⇒ Kompression und Entspannung reversibel verlaufen
 - ⇒ Das Arbeitsmedium bei der Entspannung bis auf Umgebungstemperatur abgekühlt wird (unendlich große Wärmeübertragungsfläche)

5.2 Joule-Prozess

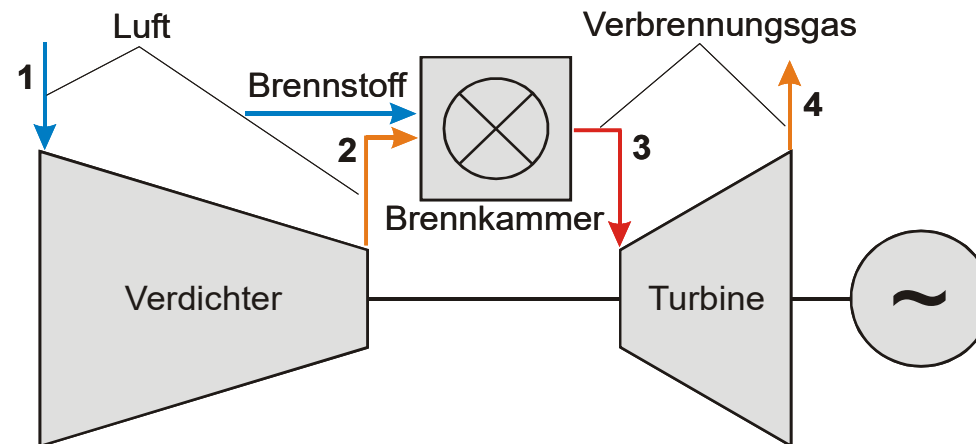
Darstellung des Joule-Prozesses im h,s -Diagramm



- In den meisten Fällen können Stoffdaten bei der Auslegung von Gasturbinen mit den Zustandsgleichungen des idealen Gases berechnet werden

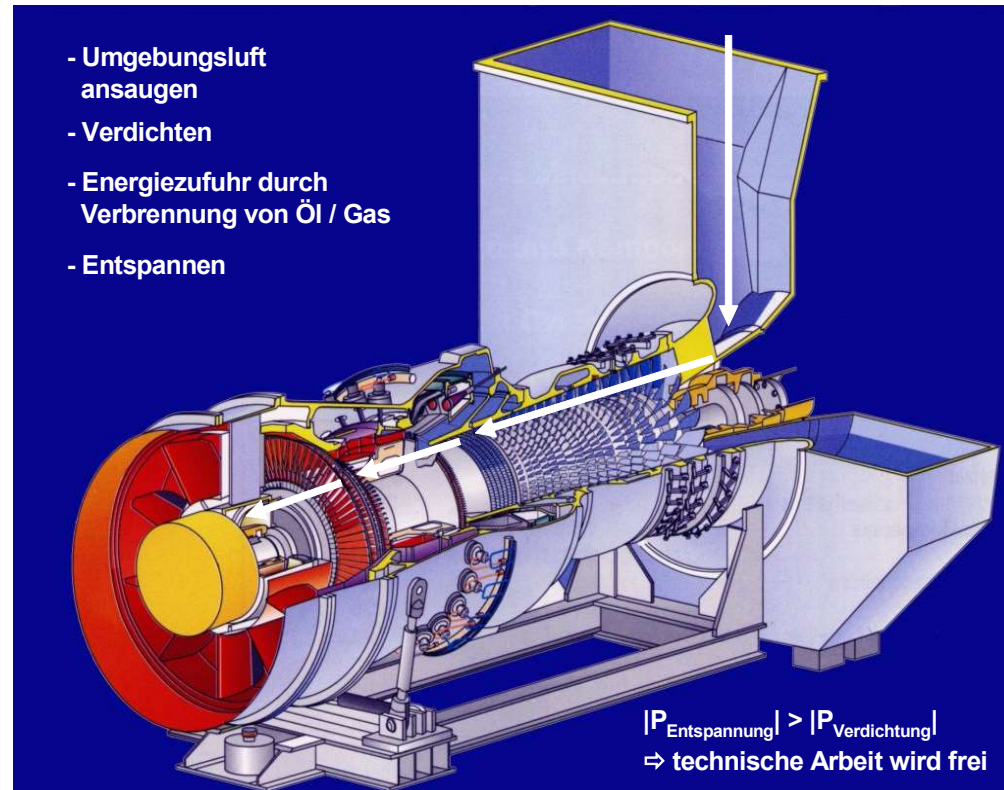
5.2 Offene und geschlossene Gasturbinen

- Geschlossene Gasturbinenprozesse sind bisher nur in wenigen Fällen realisiert worden, bieten aber für die Zukunft interessante Perspektiven
- Die weitaus meisten Gasturbinen verwenden **offene Gasturbinenprozesse**



- ⇒ An Stelle der Abgabe von Abwärme an die Umgebung wird Luft aus der Umgebung angesaugt und an die Umgebung abgegeben
- ⇒ Die Verbrennung ersetzt als integraler Bestandteil des Prozesses die Wärmezufuhr
- ⇒ Der Massenstrom in der Turbine ist nicht gleich dem Massenstrom im Verdichter und hat (etwas) andere thermodynamische Eigenschaften

5.2 Offene und geschlossene Gasturbinen



- Der weitaus meiste Strom wird in Deutschland durch **Dampfkraftwerke** bereitgestellt

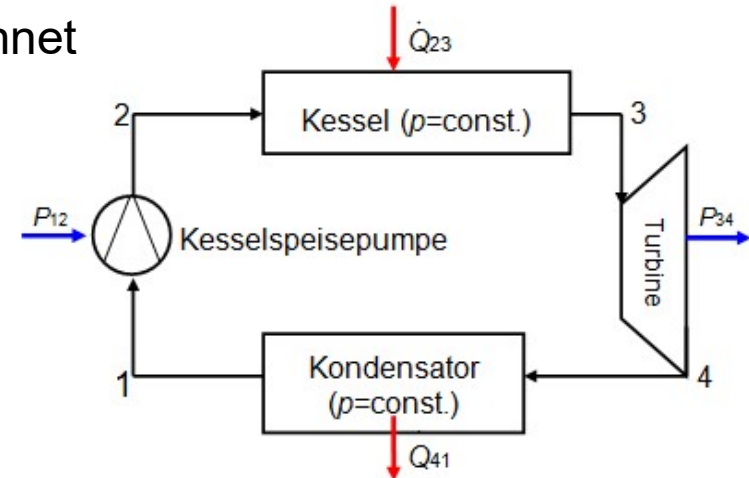
5.3 Dampfkraftwerke

- Im Gegensatz zur Gasturbine wird in Dampfkraftwerken tatsächlich ein geschlossener Kreisprozess realisiert
 - Wärme wird dem Arbeitsmedium (Wasser / Dampf) in einem Wärmeübertrager (Dampferzeuger / Kessel) zugeführt
 - Andere Arbeitsmedien wurden vielfach diskutiert, spielen bisher aber praktisch keine Rolle
 - Die Wärmequelle ist zunächst beliebig; technisch bedeutend sind die klassischen Energieträger: Steinkohle, Braunkohle, Kernbrennstoffe
 - Inzwischen aber auch zunehmend Nutzung von Müll (gekoppelt mit Müllverbrennungsanlagen), Klärschlamm, Biomasse (z.B. Holz-Pellets)
- ⇒ Nutzung sehr verschiedener, billiger Energiequellen
- Dafür hohe Investitionskosten

5.3 Clausius-Rankine Prozess

- Den Grundprozess, den das Arbeitsmedium im Dampfkraftwerk durchläuft, wird als **Clausius-Rankine Prozess** bezeichnet

- 1 → 2 Irreversibel adiabate Kompression
- 2 → 3 Isobare Wärmezufuhr
- 3 → 4 Irreversibel adiabate Entspannung
- 4 → 5 Isobare Wärmeabfuhr



- Formal ist der Clausius-Rankine-Prozess identisch mit dem **Joule-Prozess**, jedoch erfolgt die Kompression in der flüssigen Phase und Wärmezufuhr und -abfuhr ist mit einem Phasenwechsel verbunden
- Wird unterstellt, dass Kompression und Entspannung adiabatisch verlaufen, so gilt (auch) für den einfachen Clausius-Rankine Prozess

$$|P_{\text{Nutz}}| = |\sum P_{ij}| = \sum \dot{Q}_{ij} = \dot{Q}_{23} - |\dot{Q}_{41}|$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{|P_{34}| - P_{12}}{\dot{Q}_{23}}$$

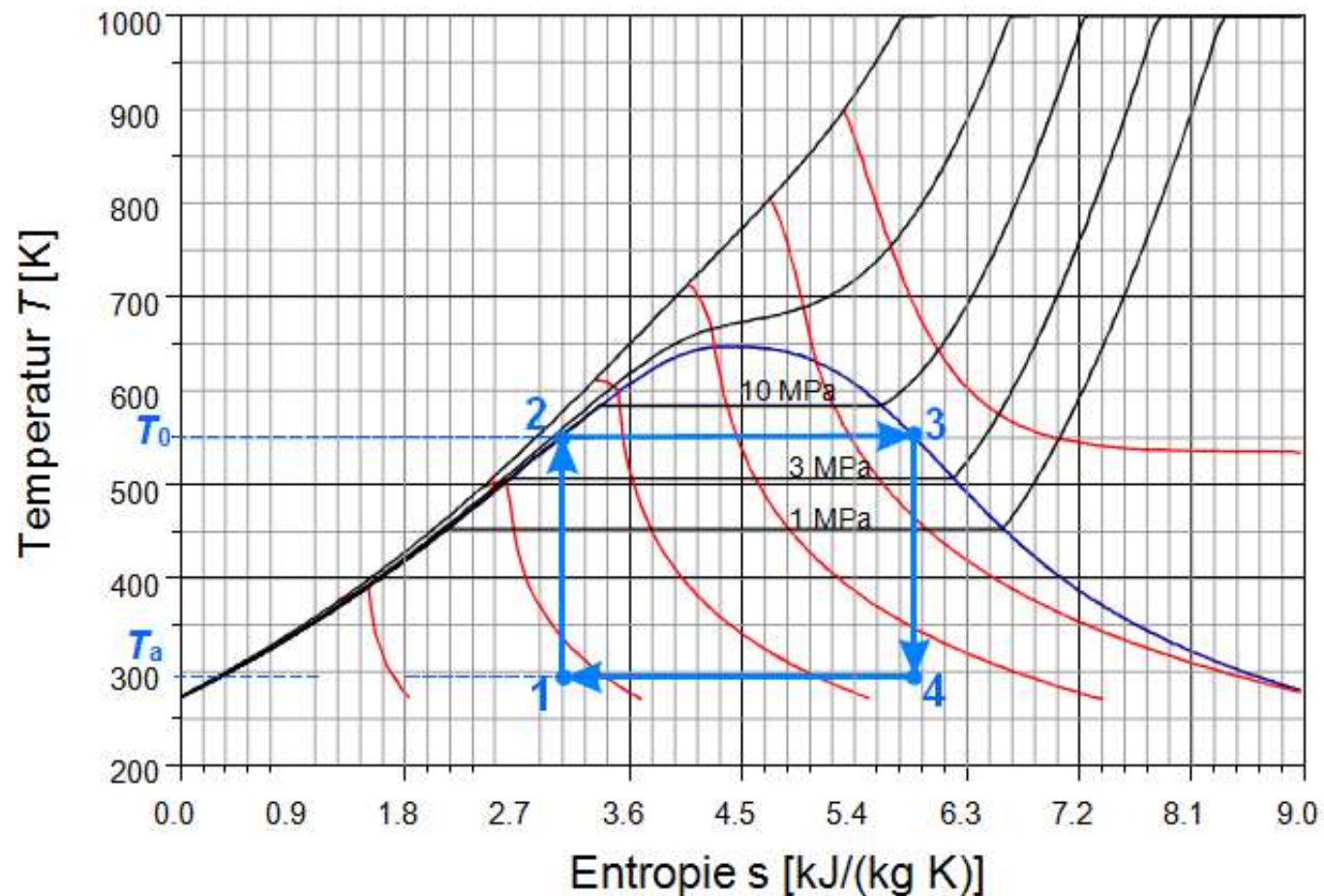
$$\eta_{\text{ex}} = \frac{|P_{34}| - P_{12}}{E_{\dot{Q}_{23}}} = \frac{|P_{34}| - P_{12}}{(1 - T_a/T_m) \cdot \dot{Q}_{23}}$$

5.3 Clausius-Rankine Prozess

- Wegen $w_{t,rev.} = \int v dp$ ist die für die Druckerhöhung von flüssigem Wasser ($v_L \ll v_G$) aufzubringende Antriebsleistung sehr viel kleiner als Antriebsleistung des Verdichters der Gasturbine
- ⇒ P_{12} der Kesselspeisepumpe ist für überschlägige Rechnungen vernachlässigbar
- Beim **reversiblen Clausius-Rankine Prozess** verläuft die
 - Verdichtung isentrop
 - Wärmezufuhr isobar bei Temperatur T_0 der Wärmequelle
 - Entspannung isentrop
 - Wärmeabfuhr isobar und bei Umgebungstemperatur T_a
- Da im Zweiphasengebiet Wärme bei konstanter Temperatur zu- und abgeführt werden kann, erscheint dieser Grenzfall zunächst vernünftig

5.3 Reversibler Clausius-Rankine Prozess

- Darstellung des reversiblen Clausius-Rankine Prozesses im T,s -Diagramm



5.3 Reversibler Clausius-Rankine Prozess

- mit $dh = Tds + vdp$ (2. HS für stationäre Fließprozesse) folgt für die isobar ($dp = 0$) und isotherme Zu- und Abfuhr von Wärme

$$q_{23} = h_3 - h_2 = \int_2^3 Tds = T_0 \cdot (s_3 - s_2)$$

$$q_{41} = h_1 - h_4 = \int_4^1 Tds = T_a \cdot (s_1 - s_4)$$

- Mit $w_{t,Nutz} = \sum w_{t,ij} = -\sum q_{ij} = -(q_{23} + q_{41})$ $s_1 = s_2$ und $s_3 = s_4$ folgt

$$w_{t,Nutz,rev.} = -(q_{23} + q_{41}) = -(T_0 - T_a) \cdot (s_3 - s_2)$$

$$s_3 - s_2 = \frac{q_{23}}{T_0} \Rightarrow w_{t,Nutz,rev.} = -(T_0 - T_a) \cdot \frac{q_{23}}{T_0} = -\left(1 - \frac{T_a}{T_0}\right) \cdot q_{23}$$

5.3 Reversibler Clausius-Rankine Prozess

- Für den thermischen Wirkungsgrad des reversiblen Clausius-Rankine Prozesses ergibt sich

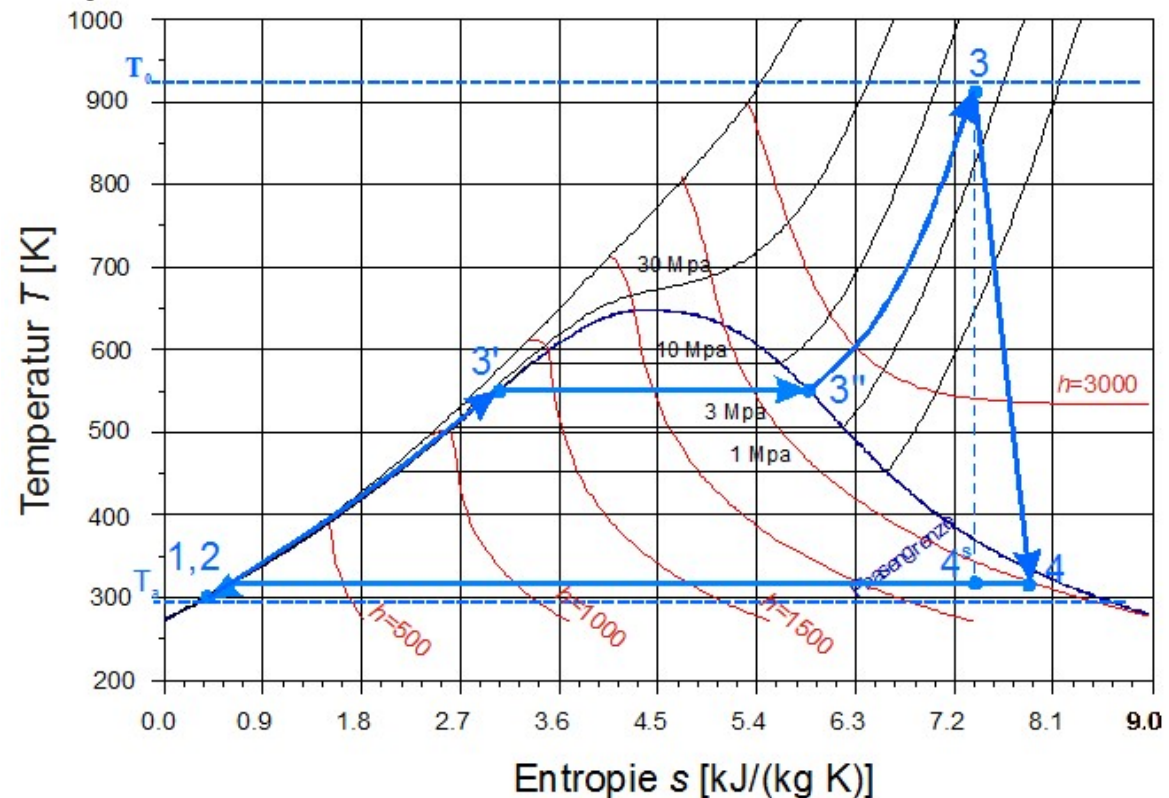
$$\eta_{\text{th,rev.}} = \frac{|P_{\text{Nutz,rev.}}|}{\dot{Q}_{23}} = \frac{\dot{m} \cdot |w_{\text{t,Nutz,rev.}}|}{\dot{m} \cdot q_{23}} = 1 - \frac{T_a}{T_0} = \eta_c$$

⇒ Der thermische Wirkungsgrad des reversiblen Clausius-Rankine Prozesses ist gleich dem **Carnot-Wirkungsgrad**, die aufgenommene Exergie wird vollständig genutzt

- Reale Clausius-Rankine Prozesse verlaufen weder reversibel noch nach diesem Schema, weil
 - Kompression und Entspannung nicht reversibel sind und nicht im Zweiphasengebiet verlaufen können
 - Zu- und Abfuhr von Wärme nicht reversibel sind
 - Wärme nicht bei konstanter Temperatur zur Verfügung steht (Rauchgase kühlen sich bei der Wärmeabgabe ab)

5.3 Realer Clausius-Rankine Prozess

- 1 → 2: Irreversibel adiabate Kompression (wegen kleinem Δh im Diagramm nicht zu sehen!)
- 2 → 3': (Quasi) isobare Erhitzung bis zum Siedepunkt
- 3' → 3'': (Quasi) isobare Verdampfung bei $T = T_s(p_2)$
- 3'' → 3: (Quasi) isobare Überhitzung des Dampfs
- 3 → 4: Irreversibel adiabate Entspannung
- 4 → 1: (Quasi) isobare Wärmeabfuhr (Kondensation und leichte Unterkühlung)

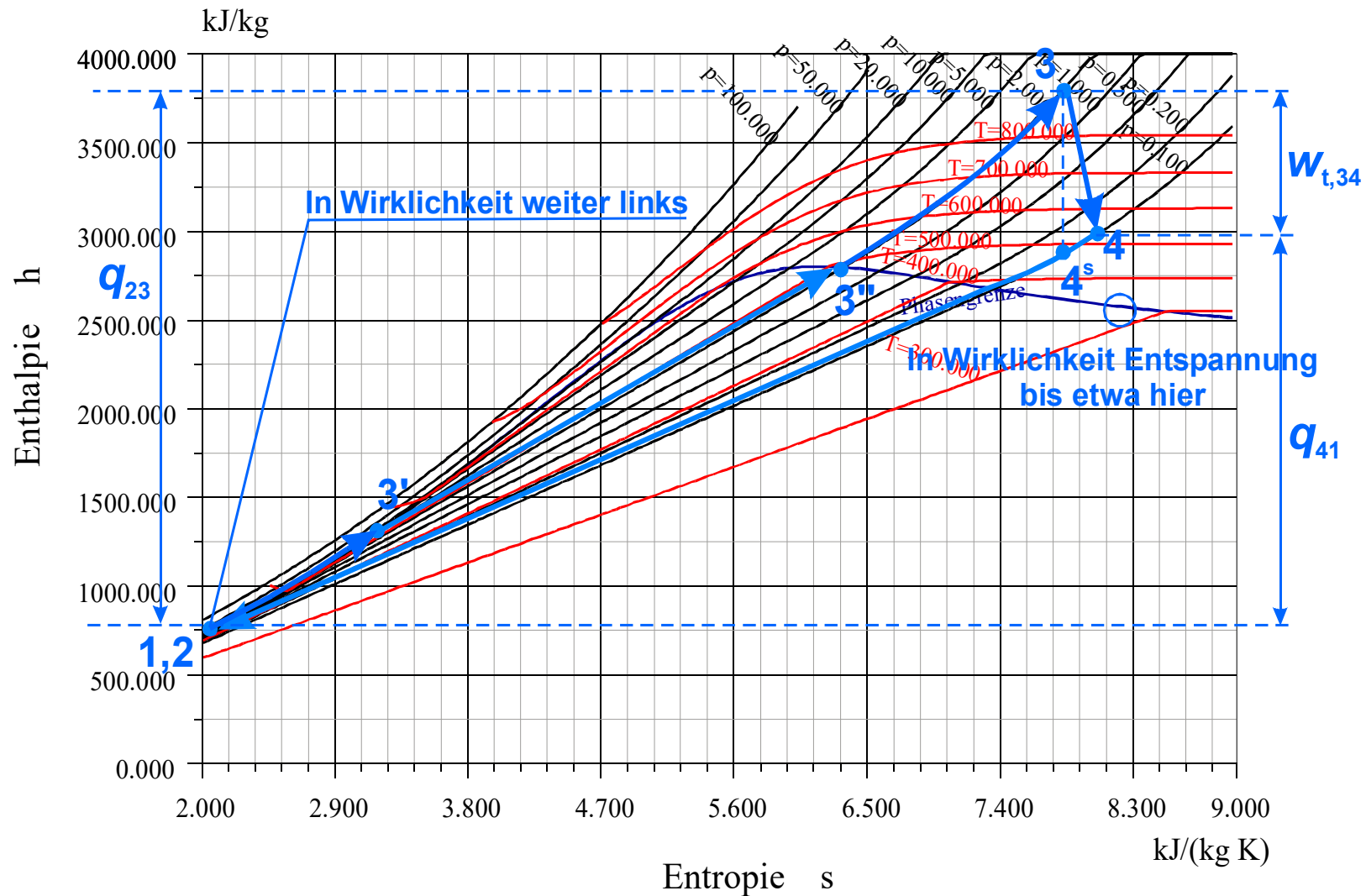


5.3 Realer Clausius-Rankine Prozess

- Für die Berechnung von Leistung und thermischem Wirkungsgrad sind die Enthalpien an den Punkten 1 bis 4 notwendig
- Die Punkte 4^s und 4 liegen typischer Weise im Nassdampfgebiet
 - ⇒ x_{4s} bestimmen aus $s_{4s} = s_3$ und $x_{4s} = (s_{4s} - s') / (s'' - s')$
 - ⇒ h_{4s} bestimmen aus $h_{4s} = h' + x_{4s} \cdot (h'' - h')$
 - ⇒ h_4 bestimmen aus $h_4 = h_3 - h_{s,T} \cdot (h_3 - h_{4s})$
- Das h,s -Diagramm ermöglicht ein direktes Ablesen von Energieumsätzen, drängt den technisch wichtigsten Bereich der Entspannung aber sehr eng zusammen
 - ⇒ Meist Verwendung von Diagrammausschnitten, die eine Darstellung des Gesamtprozesses nicht gestatten
- Schiefwinklige h,s -Diagramme beheben dieses Problem, sollen hier aber nicht weiter behandelt werden

5.3 Realer Clausius-Rankine Prozess

- Darstellung des Clausius-Rankine Prozesses im h,s -Diagramm



5.3 Realer Clausius-Rankine Prozess

- Werden die Irreversibilitäten in Kesselspeisepumpe und Turbine vernachlässigt, so folgt für den Wirkungsgrad des Clausius-Rankine Prozesses

$$q_{23} = h_3 - h_2 = \int_2^3 T ds = T_{m,23} \cdot (s_3 - s_2)$$

$$q_{41} = h_1 - h_4 = \int_4^1 T ds = T_{m,41} \cdot (s_1 - s_4)$$

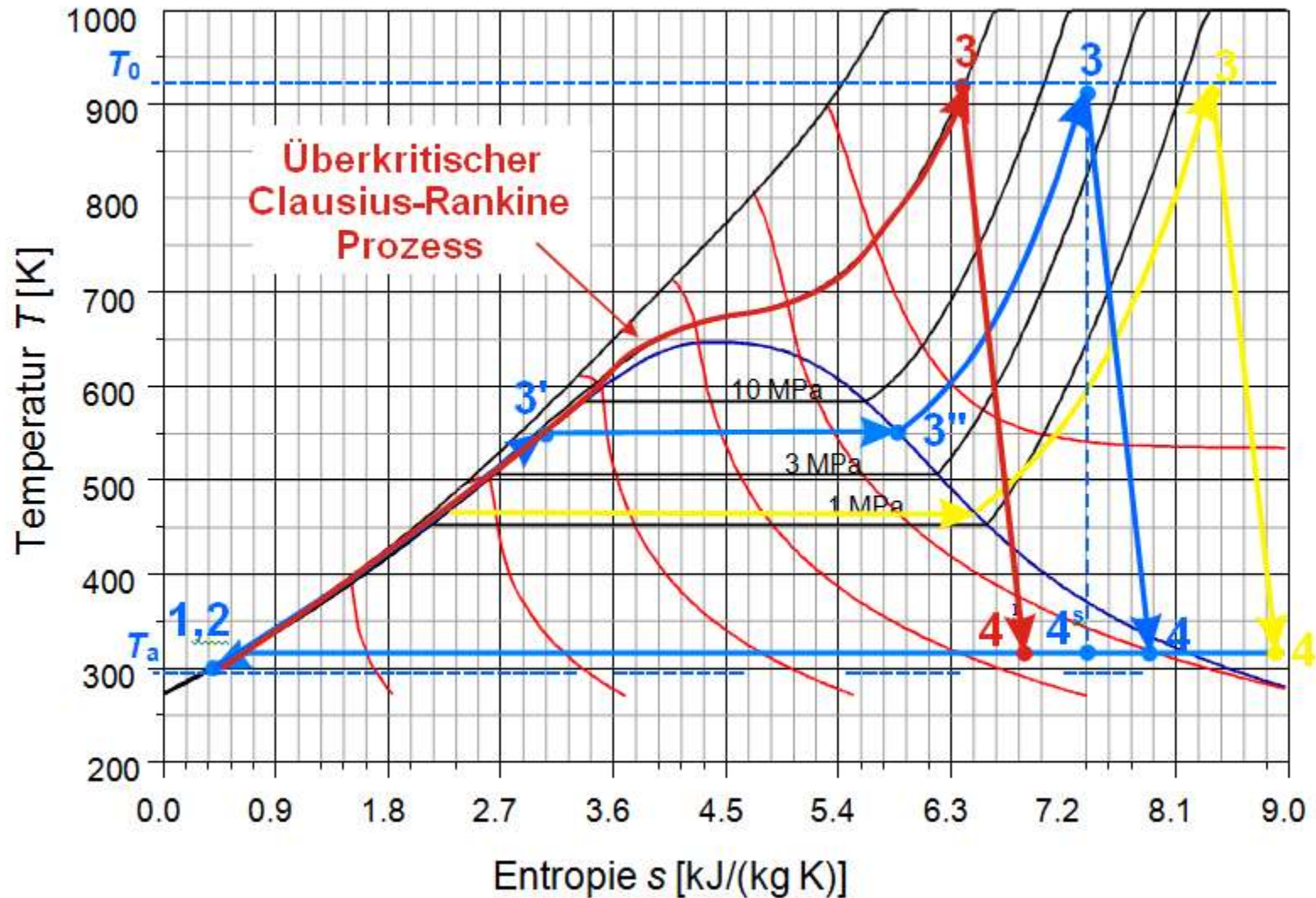
$$w_{t,Nutz} = -(q_{23} + q_{41}) \Rightarrow w_{t,Nutz} = -\left(1 - \frac{T_{m,41}}{T_{m,23}}\right) \cdot q_{23}$$

$$\eta_{th} = \frac{w_{t,Nutz}}{q_{23}} = 1 - \frac{T_{m,41}}{T_{m,23}} \quad (\text{für } h_{s,T} = h_{s,V} = 1)$$

5.3 Realer Clausius-Rankine Prozess

- Der Einfluss der Unterkühlung im Kondensator ist gering; i.d.R. kann $T_{m,41} = T_s$ angenommen werden
- Die Temperatur des Kühlwassers legt fest, bei welcher Temperatur (und damit bei welchem Druck) der Dampf kondensiert werden kann
 - ⇒ Niedrige Kühlwassertemperaturen führen zu höheren Wirkungsgraden
- Die Mitteltemperatur der Wärmezufuhr hat einen entscheidenden Einfluss auf den erreichbaren Wirkungsgrad
- Hohe Endtemperaturen der Überhitzung sind günstig, jedoch durch Materialeigenschaften der Werkstoffe begrenzt (derzeit 620°C bis 650°C)
- Der größte Teil der Wärme wird bei der Verdampfung zugeführt
 - ⇒ möglichst hohe Siedetemperaturen ⇒ hohe Kesseldrücke
- Bei vorgegebener Überhitzungstemperatur steigt mit dem Kesseldruck die Feuchte am Austritt der Entspannungsturbine
 - ⇒ Begrenzung für den Kesseldruck

5.3 Realer Clausius-Rankine Prozess



5.3 Realer Clausius-Rankine Prozess

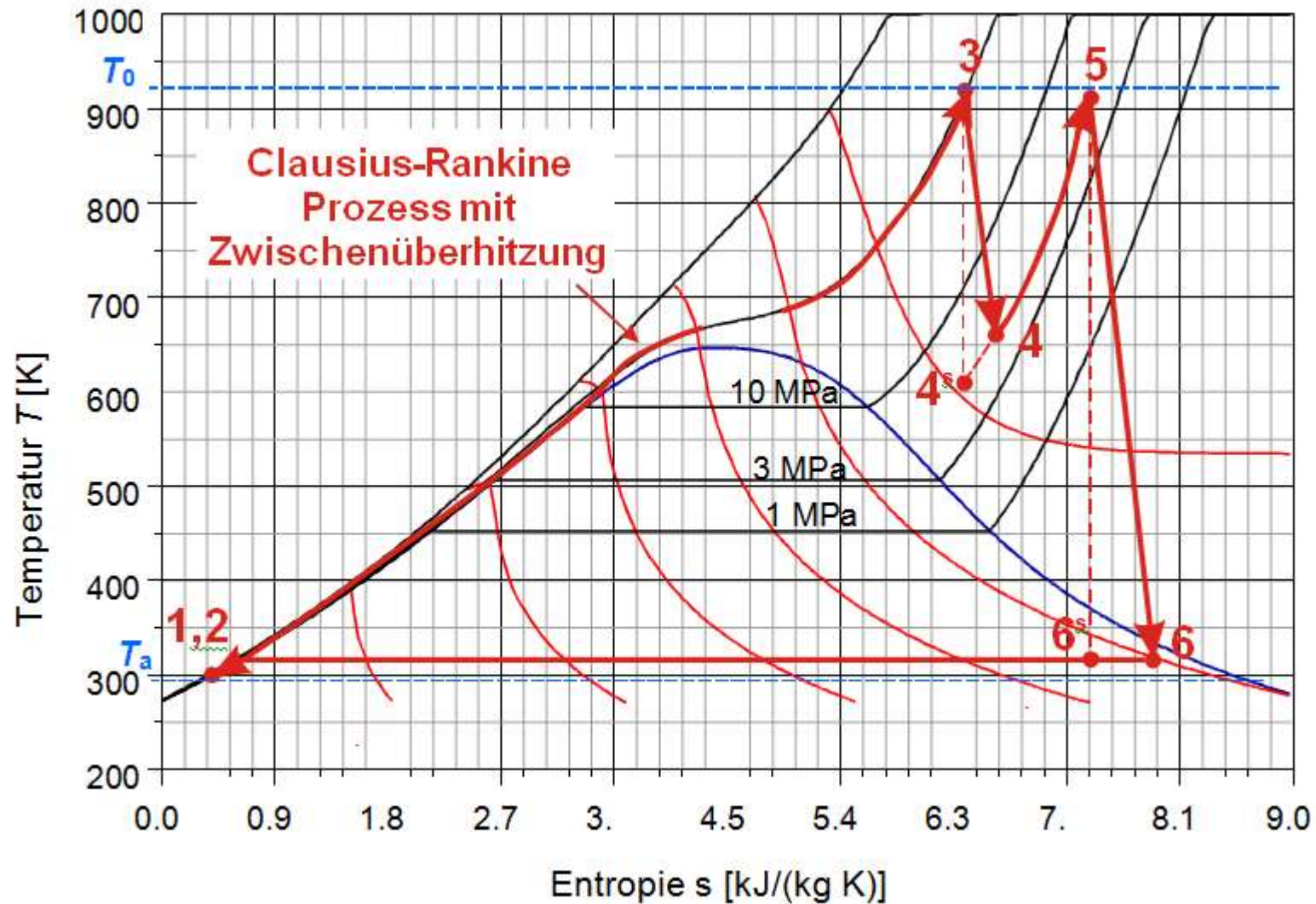
- Einführung einer **Zwischenüberhitzung**, um
 - die Mitteltemperatur der Wärmeübertragung zu erhöhen
 - die Feuchte am Austritt der Turbine zu reduzieren

⇒ Wärmezufuhr erfolgt in zwei Teilen

⇒ Mitteltemperatur der Wärmezufuhr bei Prozessen mit Zwischenüberhitzung

$$T_m = \frac{\dot{Q}_{23} + \dot{Q}_{45}}{\dot{Q}_{23}/T_{m,23} + \dot{Q}_{45}/T_{m,45}} = \frac{(h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)}{(s_3 - s_2) + (s_5 - s_4)}$$

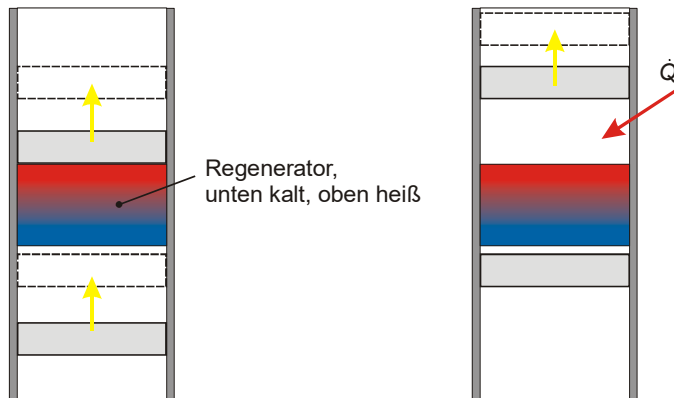
5.3 Realer Clausius-Rankine Prozess



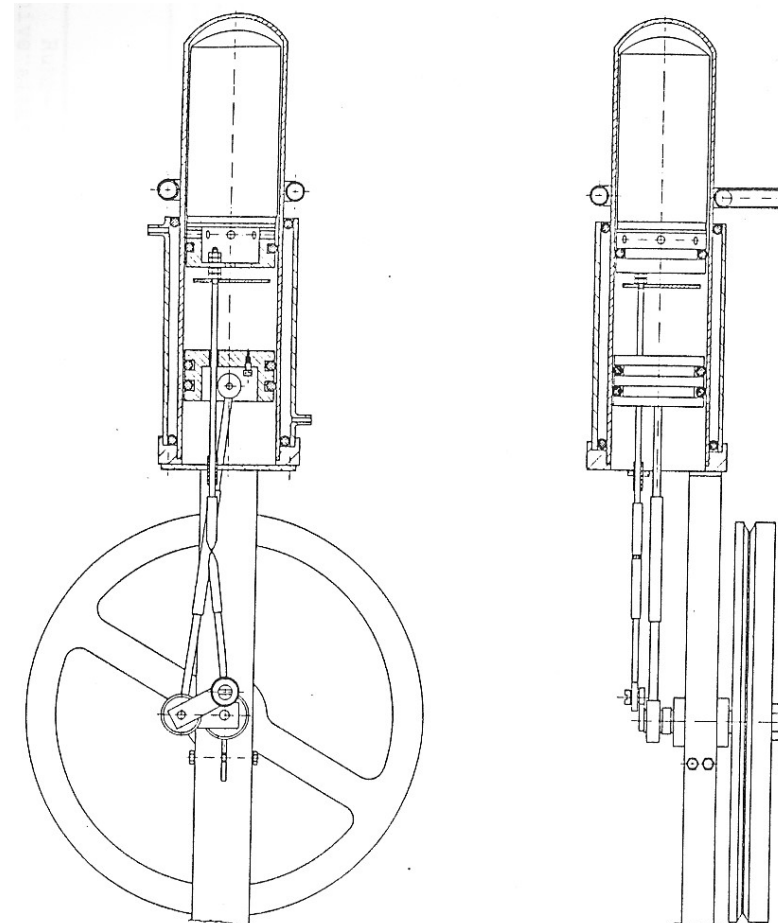
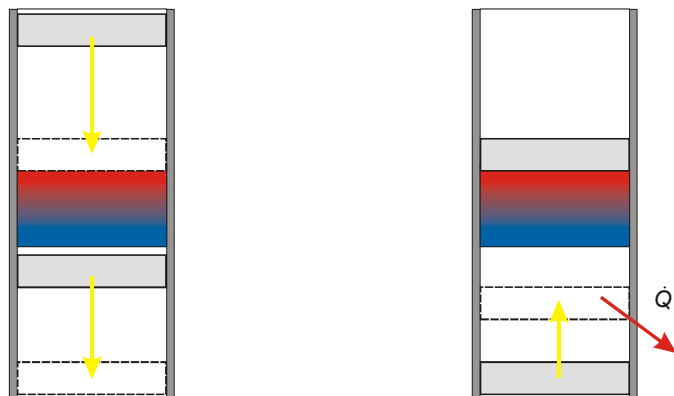
5.3 Stirling-Prozess

- Der Stirling-Prozess ist ein Kreisprozess in der Gasphase, der in Kolbenmaschinen realisiert werden kann

1 → 2: isochore Erwärmung 2 → 3: isotherme Wärmezufuhr

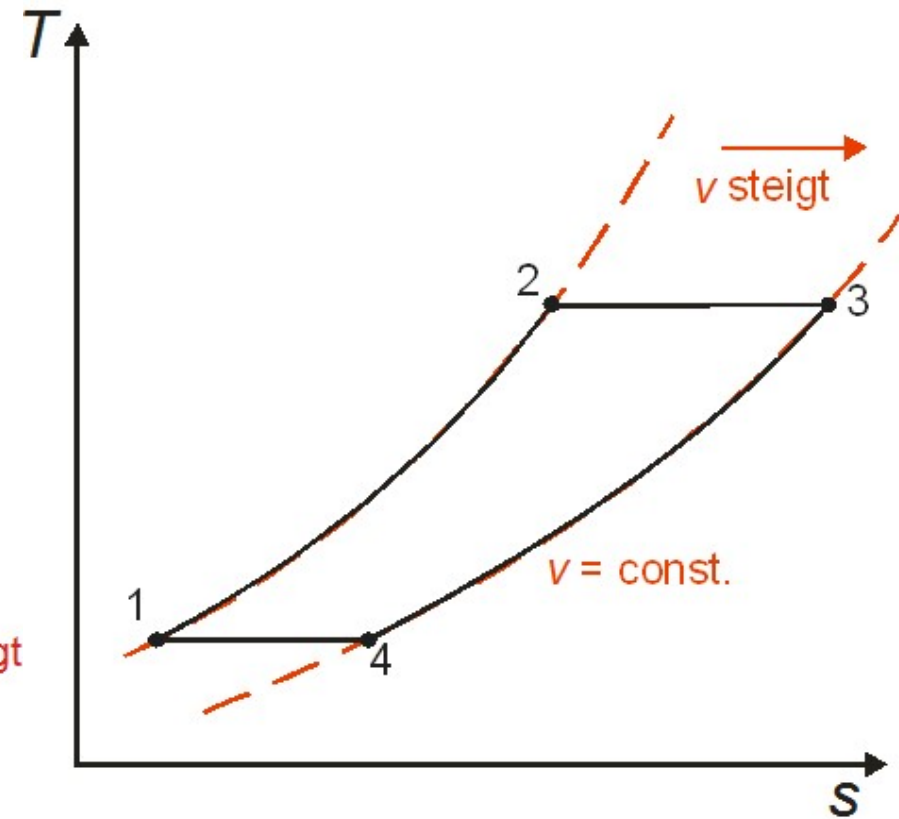
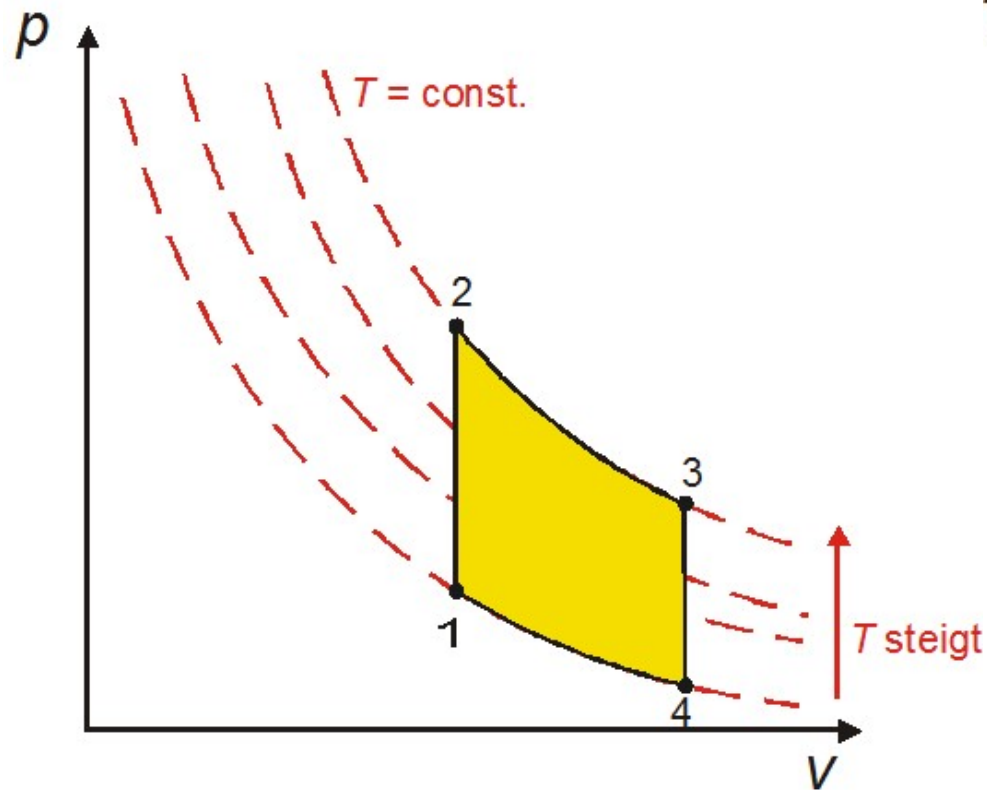


3 → 4: isochore Abkühlung 4 → 1: isotherme Wärmeabfuhr



5.3 Stirling-Prozess

- Der Stirling-Prozess im p, v -Diagramm
- Der Stirling-Prozess im T, s -Diagramm



5.3 Stirling-Prozess

- Für die Berechnung der umgesetzten Wärmeströme und Arbeiten können in guter Näherung die für ideale Gase hergeleiteten Beziehungen verwendet werden

- 1 → 2: Isochore Erwärmung, Erhöhung des Drucks

$$q_{12} = 0, \quad w_{12} = 0$$

- 2 → 3: Isotherme Wärmezufuhr, Expansion

$$q_{23} = RT_2 \cdot \ln\left(\frac{v_3}{v_2}\right), \quad w_{23} = -RT_2 \cdot \ln\left(\frac{v_3}{v_2}\right)$$

- 3 → 4: Isochore Abkühlung, Absenkung des Drucks

$$q_{34} = 0, \quad w_{34} = 0$$

- 4 → 1: Isotherme Wärmeabfuhr, Kompression

$$q_{41} = RT_4 \cdot \ln\left(\frac{v_1}{v_4}\right), \quad w_{41} = -RT_4 \cdot \ln\left(\frac{v_1}{v_4}\right)$$

5.3 Stirling-Prozess

- Mit $T_4 = T_1$, $v_1 = v_2$, $T_2 = T_3$, $v_3 = v_4$ und $v_i / v_j = V_i / V_j$ folgt

$$w_{\text{Nutz}} = -R(T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) \cdot \ln\left(\frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}}\right)$$

$$q_{\text{zu}} = RT_{\text{max}} \cdot \ln\left(\frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}}\right)$$

- Der **Wirkungsgrad des reversiblen Stirling-Prozesses** ergibt sich zu

$$\eta_{th} = \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}} = 1 - \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}}$$

⇒ Erfolgen Zu- und Abfuhr der Wärme reversibel, so ist der Wirkungsgrad des reversiblen Stirling-Prozesses gleich dem Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses

5.3 Stirling-Prozess

- Mit der Drehzahl f [s^{-1}] und der im System eingeschlossenen Masse m ergibt sich die abgegebene Leistung zu

$$P_{\text{Nutz}} = m \cdot f \cdot w_{\text{Nutz}} = -m \cdot f \cdot R \cdot (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) \cdot \ln\left(\frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}}\right)$$

mit $m = \frac{\rho_i V_i}{RT_i} \Rightarrow P_{\text{Nutz}} = -f \cdot \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}}{T_{\text{max}}} \rho_{\text{max}} \cdot V_{\text{min}} \cdot \ln\left(\frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}}\right)$

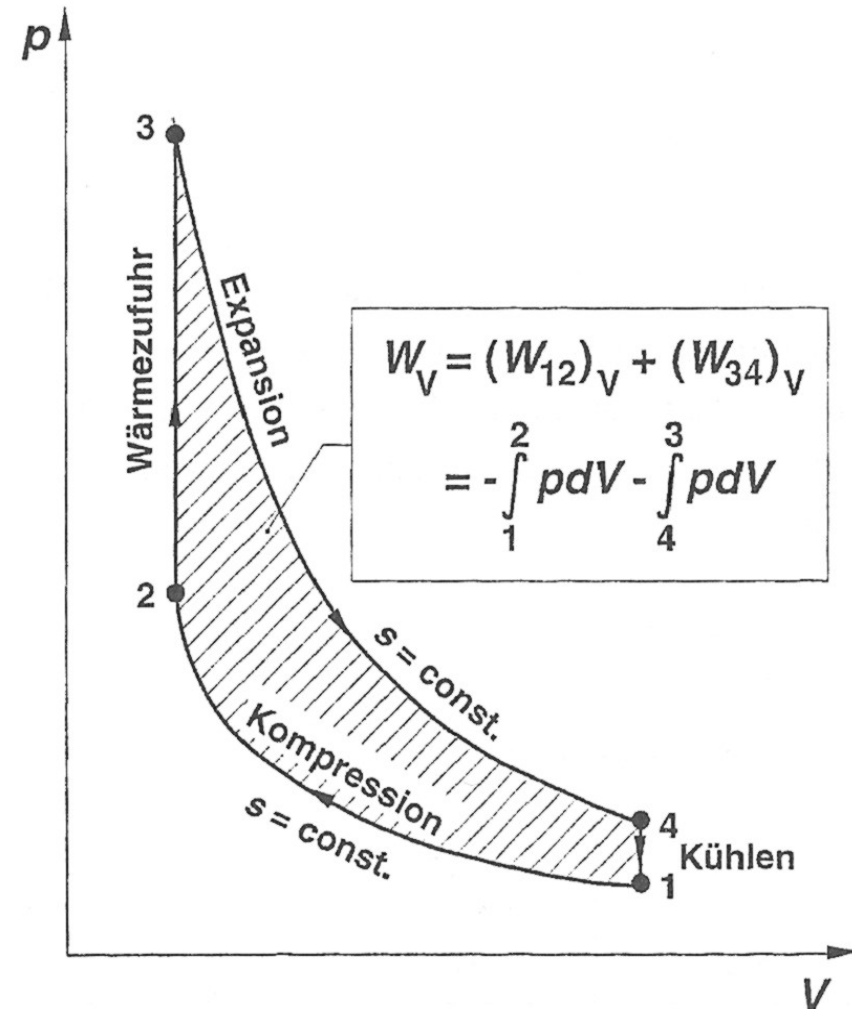
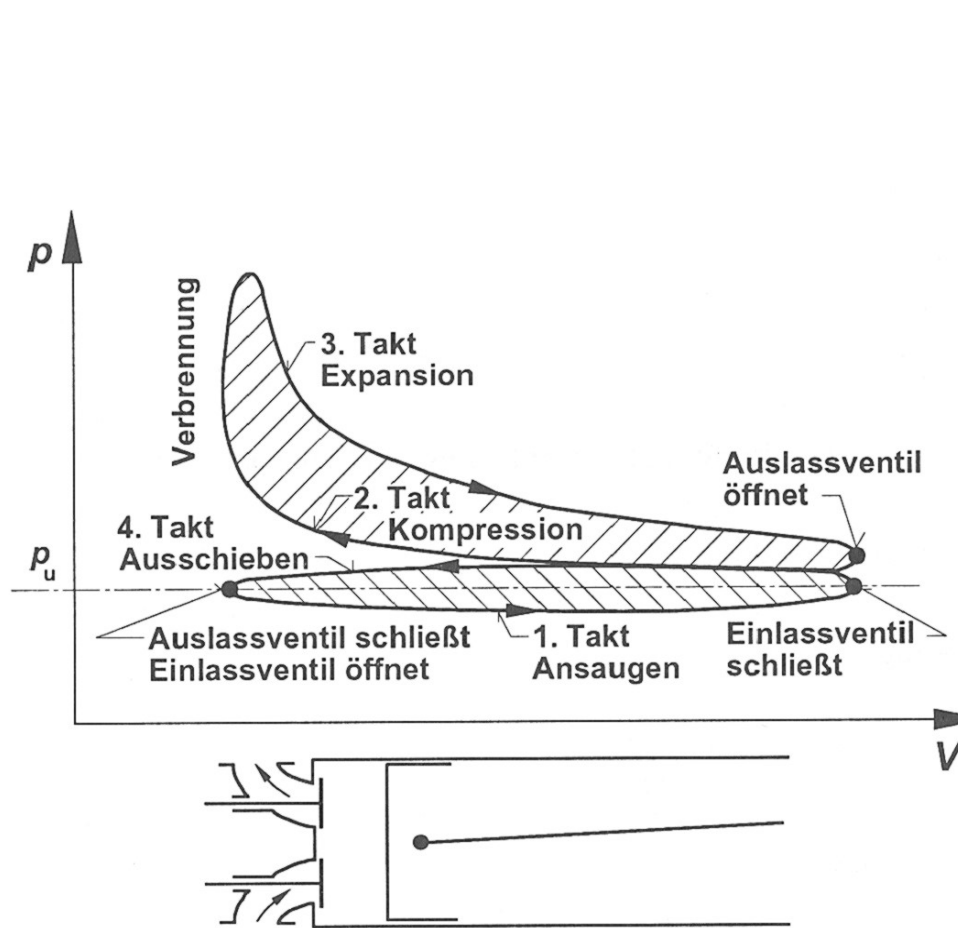
⇒ Die Leistungsabgabe lässt sich bei konstanten Temperaturen und Volumen über den Fülldruck regeln

- Kein Kurbeltrieb eines realen Motors kann den idealen Verlauf des Stirling-Prozesses realisieren; reale Motoren können den Prozess nur mehr oder weniger gut nachbilden

5.3 Verbrennungsmotoren

- Die am weitesten verbreiteten Kraftmaschinen mit Prozessverlauf in der Gasphase sind die **Verbrennungsmotoren**
- Verbrennungsmotoren lassen sich mit den Grundlagen der Thermodynamik kaum beschreiben; die realen Prozesse können nur mit instationären Betrachtungsweisen abgebildet werden
- In jedem Fall muss der Verbrennungsvorgang modelliert werden
- Trotzdem wird häufig mit Vergleichsprozessen argumentiert, die den Verbrennungskraftprozess wie einen geschlossenen Kreisprozess betrachten
- Das einfachste Modell für den Verbrennungskraftprozess mit Fremdzündung ist der **Otto-Prozess**
- Nach dem Otto-Prozess ergeben sich deutlich höhere Wirkungsgrade als für reale Verbrennungsmotoren
- Einige grundlegende Überlegungen lassen sich anhand der Vergleichsprozesse jedoch anstellen

5.3 Otto-Prozess



5.3 Kapitel 5: Verständnisfragen

- Was ist eine Wärmekraftmaschine? Was ist der Nutzen und der Aufwand einer solchen Maschine?
- Warum ist das Ringintegral bei Wärmekraftprozessen stets negativ?
- Unter welcher Voraussetzung gilt, dass Wärme nicht vollständig in Arbeit umgewandelt werden kann?
- Mit welchem Vergleichsprozess werden Gasturbinenanlagen berechnet und welche Zustandsänderungen sind dabei relevant?
- Welche Unterschiede gibt es zwischen einem Gasturbinenprozess und einem Dampfturbinenprozess? Zeichnen Sie beide Prozesse in ein p,v -Diagramm ein.
- Wozu dient eine Zwischenüberhitzung in einem realen Clausius-Rankine-Prozess?
- Warum kann bei einem Entspannungsprozess einer Dampfturbine nicht beliebig weit ins Nassdampfgebiet entspannt werden?
- Wie kann der Wirkungsgrad eines Clausius-Rankine-Prozesses gesteigert werden? Wodurch ergeben sich Beschränkungen der Optimierungsmöglichkeiten?
- Worin liegt der Unterschied zwischen dem Stirling-Prozess und dem Otto-Prozess? Welche Maschinen arbeiten nach diesen Prozessen?