



# Thermodynamik III

## 3 – Gasarbeitsprozesse Kombinierte Zyklen

HS 2021

Prof. Reza S. Abhari



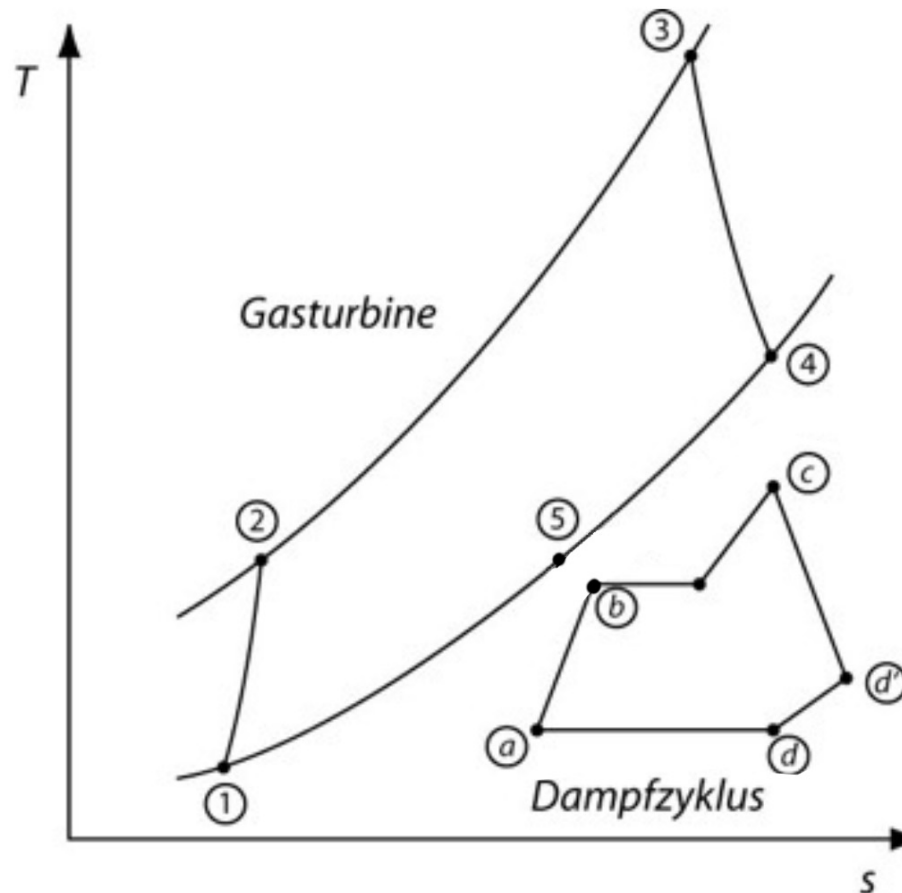
# Overview

| 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<br>Oxyfuel, Carbon Capture and Storage | 21.12          | Wärmepumpe               |



## 4.5 Kombiniertes Gas-Dampf Zyklus

- Wärme des Abgases des Gaszyklus zwischen Punkt 4 und 5 wird in einem Dampferzeuger auf einen Dampfzyklus übertragen

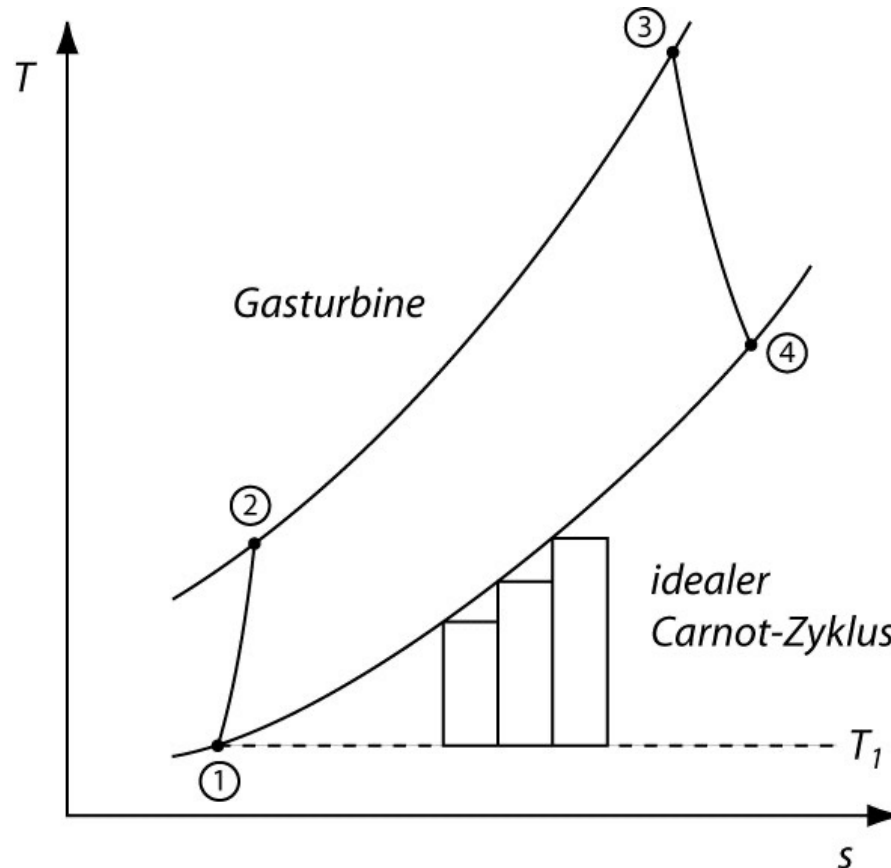




## 4.5.1 Ideale Analyse

- Annahme: die ganze Wärme im Abgas kann durch eine Reihe von Carnot-Zyklen genutzt werden

- Leistung eines Carnot-Zyklus:  $dW = \dot{m}c_p \left(1 - \frac{T_1}{T}\right) dT$





- Diese Mini-Zyklen stellen die Grenze der Wärme-Rückgewinnung dar
- Totale Leistung des Dampfzyklus (bottoming cycle)

$$W_{bot} = \dot{m} \bar{c}_{p14} \int_{T_1}^{T_4} \left(1 - \frac{T_1}{T}\right) dT$$

$$\begin{aligned} \max. W_{bot} &= \dot{m} c_p T_1 \left[ \frac{T_4}{T_1} - 1 - \ln \left( \frac{T_4}{T_1} \right) \right] \\ &= \dot{m} c_p T_1 \left[ \frac{T_4}{T_3} \frac{T_3}{T_1} - 1 - \ln \left( \frac{T_4}{T_3} \frac{T_3}{T_1} \right) \right] = \dot{m} c_p T_1 \left[ \frac{t}{\lambda} - 1 - \ln \left( \frac{t}{\lambda} \right) \right] \end{aligned}$$

$$\text{wobei } t = \frac{T_3}{T_1} \text{ und } \lambda = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left( \frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{T_3}{T_4}$$



- Leistung der Gasturbine:

$$\begin{aligned} W_{gas} &= \dot{m} c_p T_1 \left[ \left( \frac{T_3}{T_1} \right) \left( 1 - \frac{T_4}{T_3} \right) - \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \right] \\ &= \dot{m} c_p T_1 \left[ t \left( 1 - \frac{1}{\lambda} \right) - (\lambda - 1) \right] \end{aligned}$$

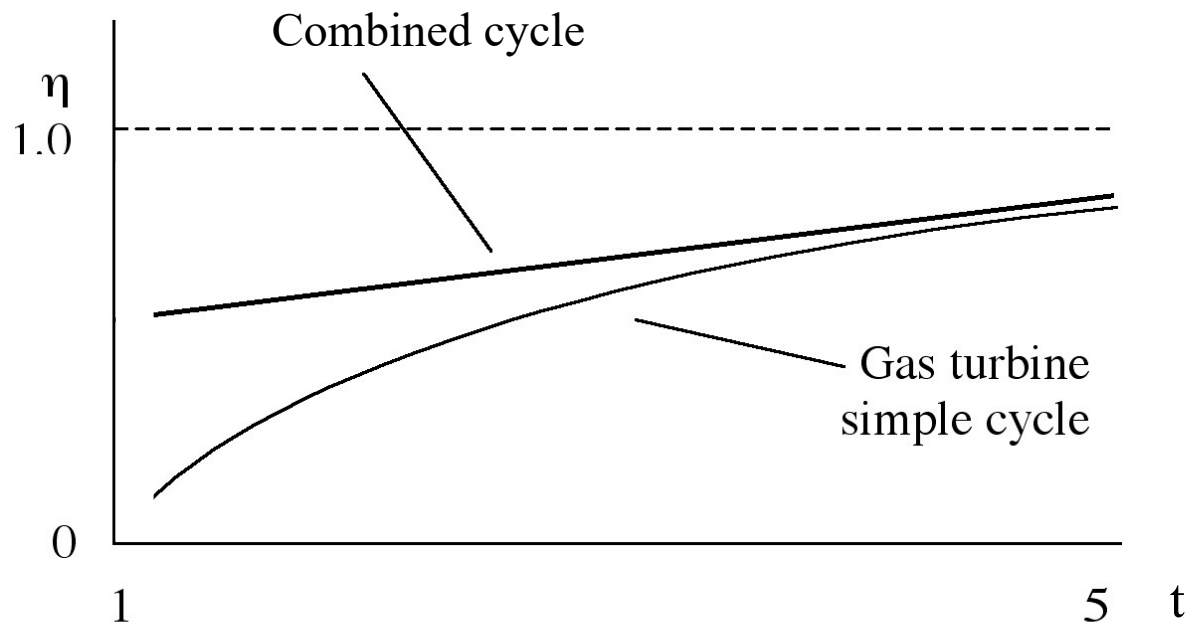
- Totale Leistung,  $W = W_{gas} + W_{bot}$

$$\begin{aligned} \frac{W}{\dot{m} c_p T_1} &= t \left( 1 - \frac{1}{\lambda} \right) - (\lambda - 1) + \frac{t}{\lambda} - 1 - \ln \left( \frac{t}{\lambda} \right) \\ &= t - \lambda - \ln \left( \frac{t}{\lambda} \right) \end{aligned}$$



– Thermischer Wirkungsgrad:

$$\eta_{th} = \frac{W / \dot{m} c_p T_1}{Q / \dot{m} c_p T_1} = \frac{t - \lambda - \ln\left(\frac{t}{\lambda}\right)}{\frac{T_3}{T_1} - \frac{T_2}{T_1}} = 1 - \frac{\ln\left(\frac{t}{\lambda}\right)}{t - \lambda}$$





- Kombiniertes Zyklus ist weniger stark abhängig vom Druckverhältnis als der einfache Gas-Zyklus
- In Wirklichkeit lässt sich nicht die gesamte Wärme zurückgewinnen und der Wirkungsgrad ist kleiner





## 4.5.2 Realer Kombiniertes Zyklus

- Voraussetzung für Wärmerückgewinnung:  
Temperaturdifferenz zwischen Punkt 4  
und 1 muss grösser sein als zwischen a und c

$$\therefore T_5 - T_b = \Delta T_b > 0$$

$$\text{und } T_4 - T_c = \Delta T_s > 0$$

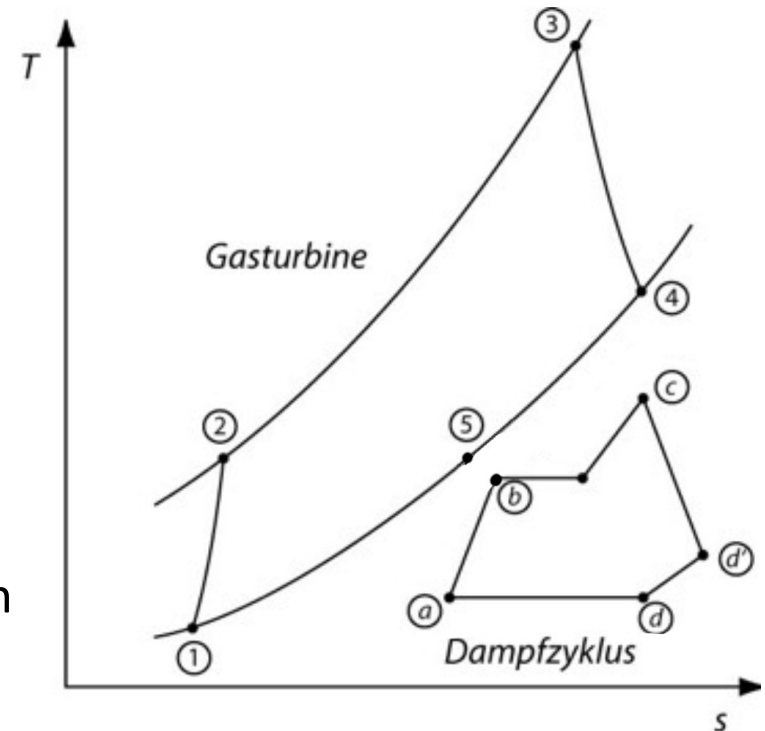
- Für gegebene Temperaturen  $T_3$  und  $T_1$  können verschiedene  $T_5$  und  $T_b$  gewählt werden:

- hohes  $T_5$  und  $T_b$ : guter Dampfkreislauf
- tiefes  $T_5$  und  $T_b$ : guter Gaszyklus

- Wärmebilanz im Boiler/Überhitzer:

$$\dot{m}_{H2O}(h_c - h_b) = \dot{m}_{Gas} c_{pt} (T_4 - T_5)$$

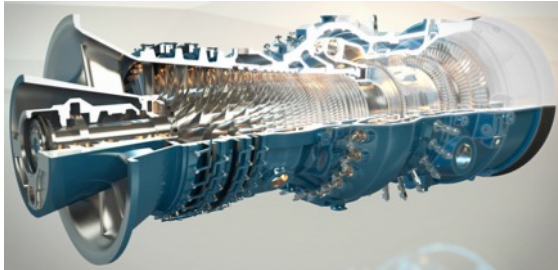
$$\frac{\dot{m}_{H2O}}{\dot{m}_{Gas}} = \frac{c_{pt} (T_4 - T_5)}{h_c - h_b}$$





## GT24/26 Gasturbine

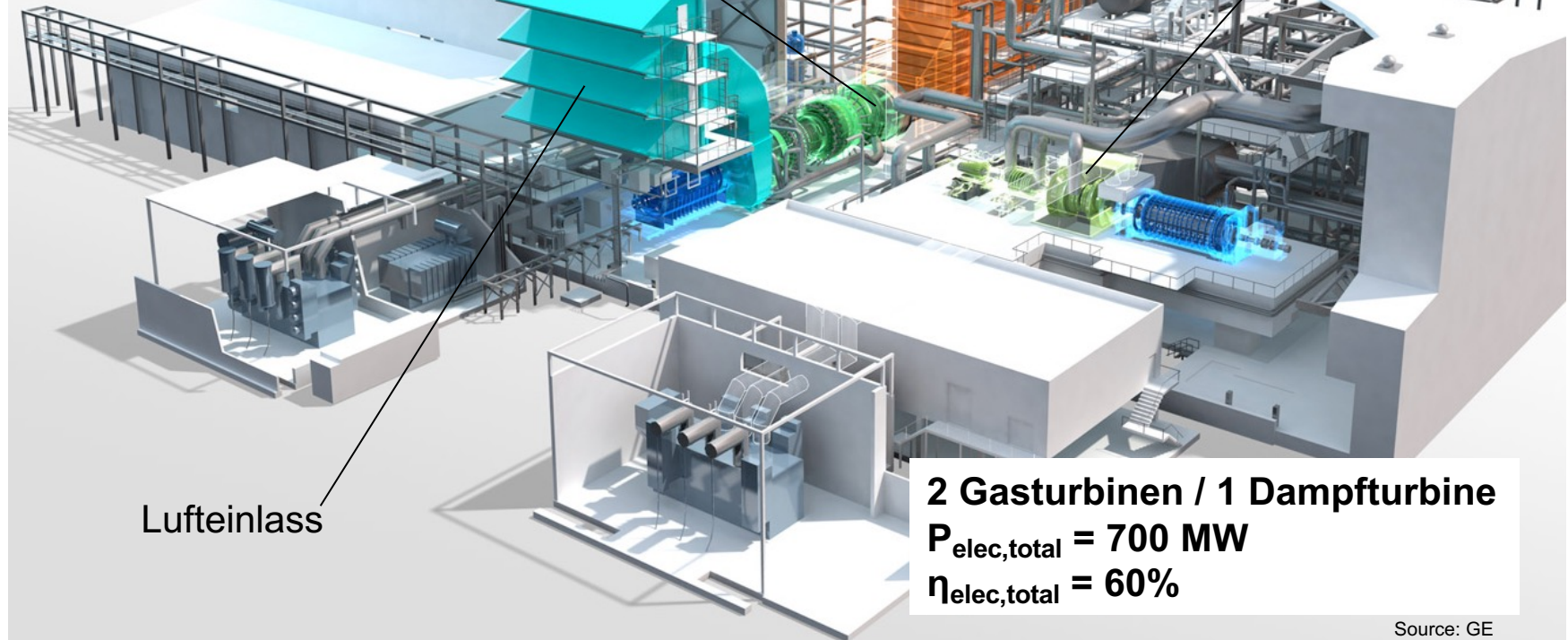
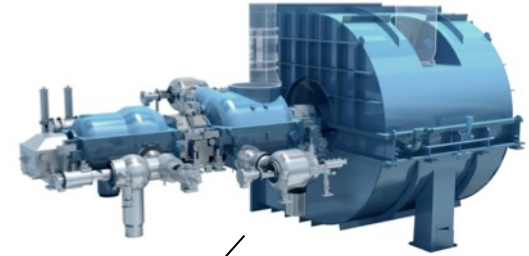
- $P_{\text{elec}} = 230 - 330 \text{ MW}$
- $\eta_{\text{elec}} = 40\%$
- Verdichtungsverhältnis 30:1
- Massenstrom:  $\sim 600 \text{ kg/sec}$



Abhitzedampferzeuger  
(Heat recovery  
steam generator)

## Dampfturbine

$P_{\text{elec}} = 150 \text{ MW}$





- Verhältnis der Massenströme:

$$\frac{\dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}_{Gas}} = \frac{c_{pt}(T_4 - T_5)}{h_c - h_b} = \frac{c_{pt}(T_c + \Delta T_s - T_b - \Delta T_b)}{h_c - h_b}$$

- Im Gaszyklus gilt für gegebenes  $T_3$ :

$$T_4 = T_c + \Delta T_s \quad \text{oder} \quad \frac{T_4}{T_3} = \frac{T_c + \Delta T_s}{T_3}$$

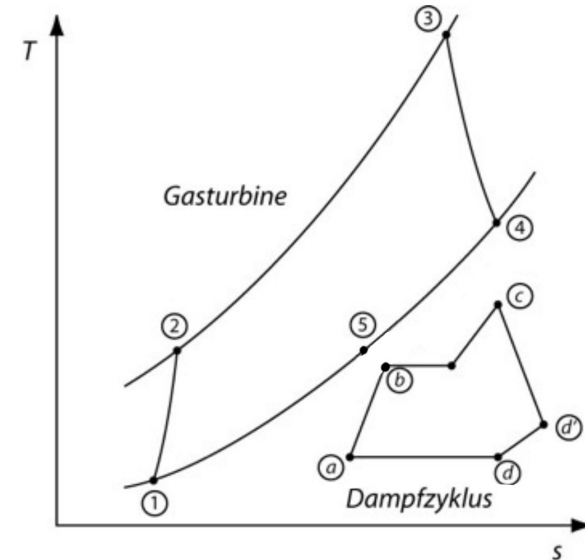
- Druckverhältnis der Turbine

$$\frac{p_3}{p_4} = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{T_4}{T_3} \right) \eta_t \right]^{\frac{\gamma_t}{\gamma_t - 1}}$$

$$\frac{p_2}{p_1} \cdot \frac{p_3}{p_2} \cdot \frac{p_4}{p_3} = \frac{p_2}{p_1} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \frac{p_4}{p_3} = 1$$

- Mit bekanntem Verbrennungs-Druckverlust folgt für  $p_3/p_1$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{1}{1 - \varepsilon} \right) \left[ 1 - \left( 1 - \frac{T_c + \Delta T_s}{T_3} \right) \eta_t \right]^{\frac{\gamma_t}{\gamma_t - 1}} = \Pi_c$$



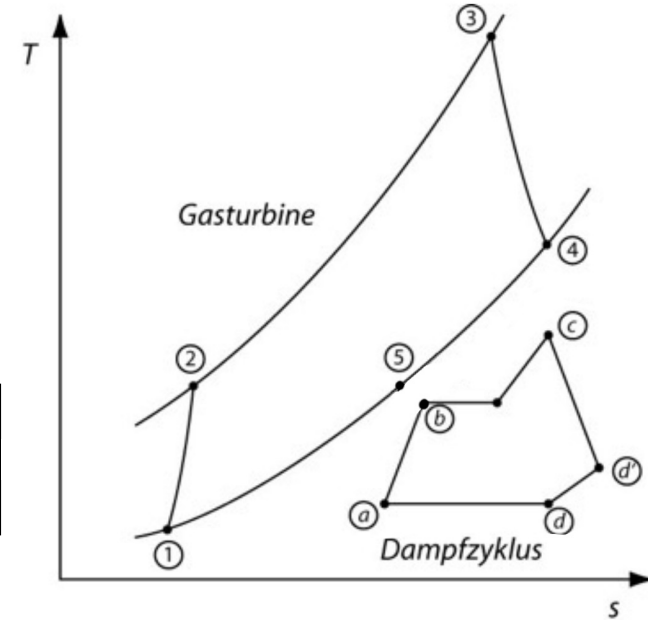


$$\frac{T_2}{T_1} = 1 + \frac{\frac{\gamma_c - 1}{\Pi_c^{\gamma_c}} - 1}{\eta_c}$$

- Arbeit der Gasturbine:

$$W_{Gas} = \dot{m}_{Gas} \left[ c_{p34} T_3 \left( 1 - \frac{T_4}{T_3} \right) - c_{p12} T_1 \left( \frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \right]$$

$$Q_{in} = \dot{m}_{Gas} c_{p23} (T_3 - T_2)$$



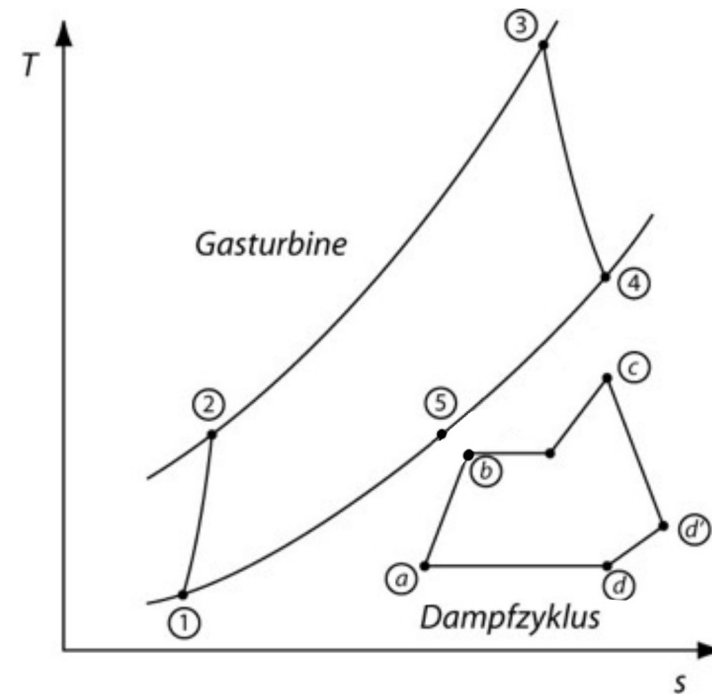
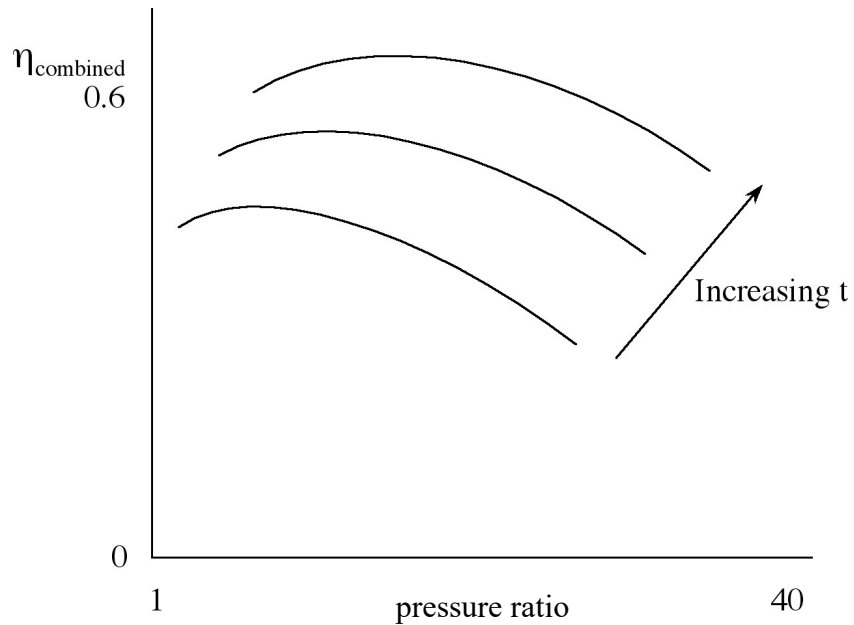
- Der Wirkungsgrad des kombinierten Zyklus wird dann:

$$\eta = \frac{c_{p34}}{c_{p23}} \frac{\left[ 1 - \frac{T_c + \Delta T_s}{T_1 \cdot t} + \left( \frac{T_c + \Delta T_s}{T_1} - \frac{T_b + \Delta T_b}{T_1} \right) \left( \frac{h_c - h_{d'}}{h_c - h_b} \right) - \left( \frac{\frac{\gamma_c - 1}{\Pi_c^{\gamma_c}} - 1}{\eta_c} \right) \frac{c_{p12}}{c_{p34}} \right]}{t - 1 - \frac{\frac{\gamma_c - 1}{\Pi_c^{\gamma_c}} - 1}{\eta_c}}$$



## Effekt des Druck- und Temperaturverhältnisses auf den Gesamtwirkungsgrad

- In der Praxis sind maximal 60% Wirkungsgrad möglich







## 4.5.3 Kombiniertes Zyklus mit Organic Rankine Cycle

- Organic Rankine Cycle: Rankine Zyklus mit anderem Arbeitsmedium als Wasserdampf (z.B. Ammoniak, Ethanol)
- Anwendung: Bei niedrigem Temperaturgefälle zwischen Wärmequelle und Wärmesenke (z.B. Geothermie)
- Betrieb des Zyklus bei niedrigeren Temperaturen als im klassischen Rankine-Zyklus
- Beispielkraftwerk: Geothermiekraftwerk Landau, 3 MW



- Heisses Wasser wird mit 70 Liter/s bei 160°C aus der Erde gepumpt, und gibt bis auf 70°C die Wärme an den Organic Rankine Cycle ab
- Wärmeabgabe des Thermalwassers:

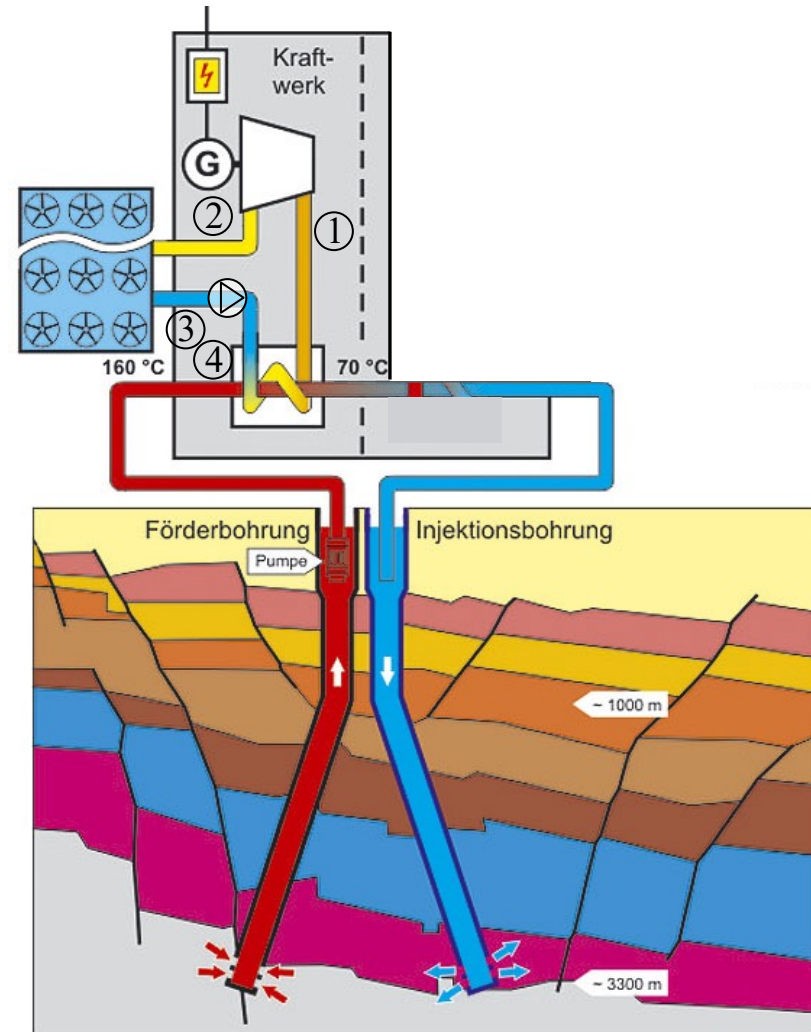
$$\dot{Q} = \dot{V} / v_f \times (h_{\text{Förderung}} - h_{\text{Injektion}})$$

$$h_{\text{Förderung}} = h_f @ 160^\circ\text{C} = 675.55 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$h_{\text{Injektion}} = h @ 70^\circ\text{C} = 293.63 \text{ kJ} / \text{kg}$$

$$\dot{Q} = 24.3 \text{ MW}$$

## Geothermiekraftwerk Landau



Source: BINE Informationsdienst



– Ammoniak-Zyklus zwischen  $140^{\circ}\text{C}$  @ 20 bar und  $14^{\circ}\text{C}$  @ 7 bar

Zustand 1:  $T_1 = 140^{\circ}\text{C}, p_1 = 20\text{bar}$

$$h_1 = 1737.98\text{kJ} / \text{kg}$$

$$s_1 = 5.5012\text{kJ} / \text{kgK}$$

Zustand 2, mit  $\eta_{turb} = 0.95$

$$p_2 = 7\text{bar}$$

$$s_{2s} = s_1 = 5.5012\text{kJ} / \text{kgK}$$

$$h_{2s} = 1559.78\text{kJ} / \text{kg}$$

$$h_2 = h_1 - \eta_{turb}(h_1 - h_{2s}) = 1568.9\text{kJ} / \text{kg}$$





Zustand 3:  $p_3 = 7bar$

$$h_3 = h_f @ 7bar = 244.69 kJ / kg$$

$$v_3 = v_f @ 7bar = 0.00161 m^3 / kg$$

Zustand 4:  $p_4 = 20bar$

$$h_4 = h_3 + v_3(p_4 - p_3) = 246.79 kJ / kg$$

Massenstrom Ammoniak:  $\dot{m} = \dot{Q} / (h_1 - h_4) = 0.0163 kg / s$

Elektrische Leistung:  $\dot{W}_{el} = \dot{m} \times ((h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)) = 2.76 MW$

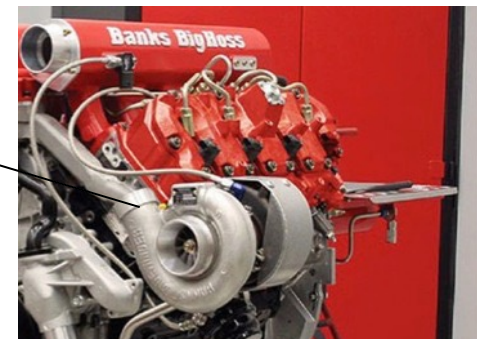
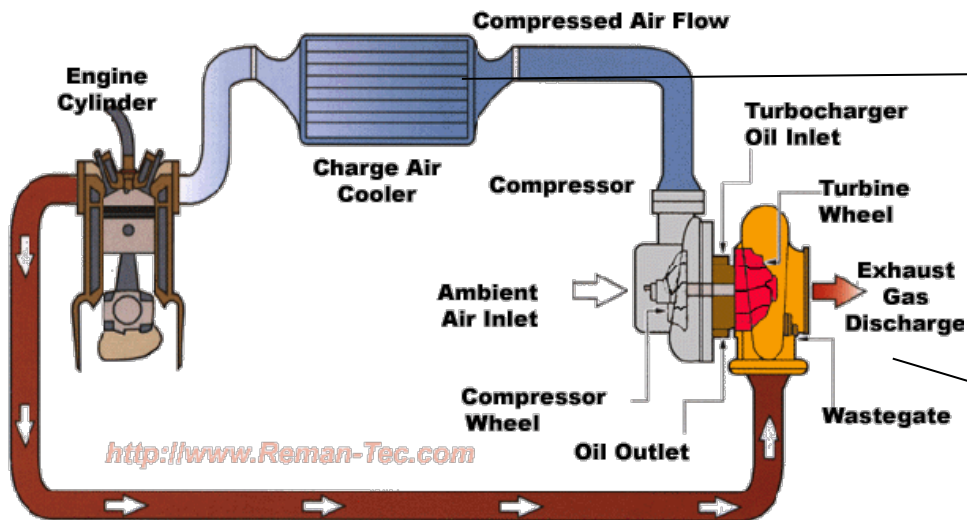
Effizienz:  $\eta_{net} = \dot{W}_{el} / \dot{Q} = 0.11$

Effizienz vergleichsweise niedrig, weil die Wärmezufuhr bei niedriger Temperatur (14-140°C) stattfindet



## 4.5.4 Turbolader / Intercooler

- Leistungssteigerung durch Erhöhung des Massenstroms / der Dichte
  - Druckerhöhung und Kühlung der Frischluft
    - **Turbolader:** Verwendung der kinetischen Energie des Abgases zur Komprimierung von Frischluft
    - **Intercooler:** Kühlt komprimierte Luft



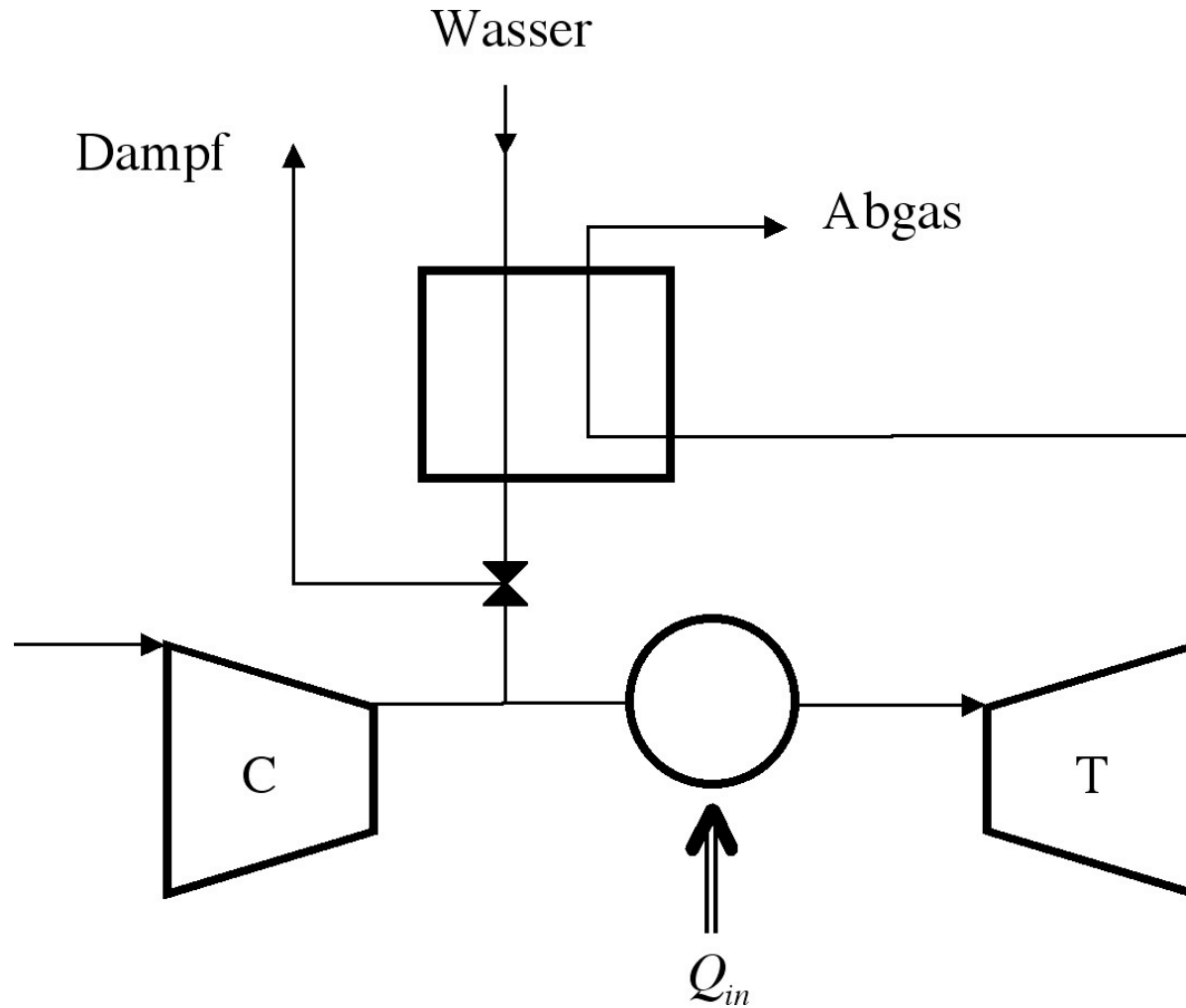


## 4.5.5 Cheng Zyklus

- Mit der Wärme des Abgases wird Dampf erzeugt, der in die Brennkammer geleitet wird
- Wirkungsgrad wird stark verbessert
- Spitzentemperatur in der Brennkammer und deshalb Emissionen werden reduziert
- Nachteil: Komponenten sind schwieriger zu designen, kompliziertes Kontrollsystem
- Vorteil: Man kann mittels der Speisewasserzufuhr die Produktion von Elektrizität oder Wärme anpassen

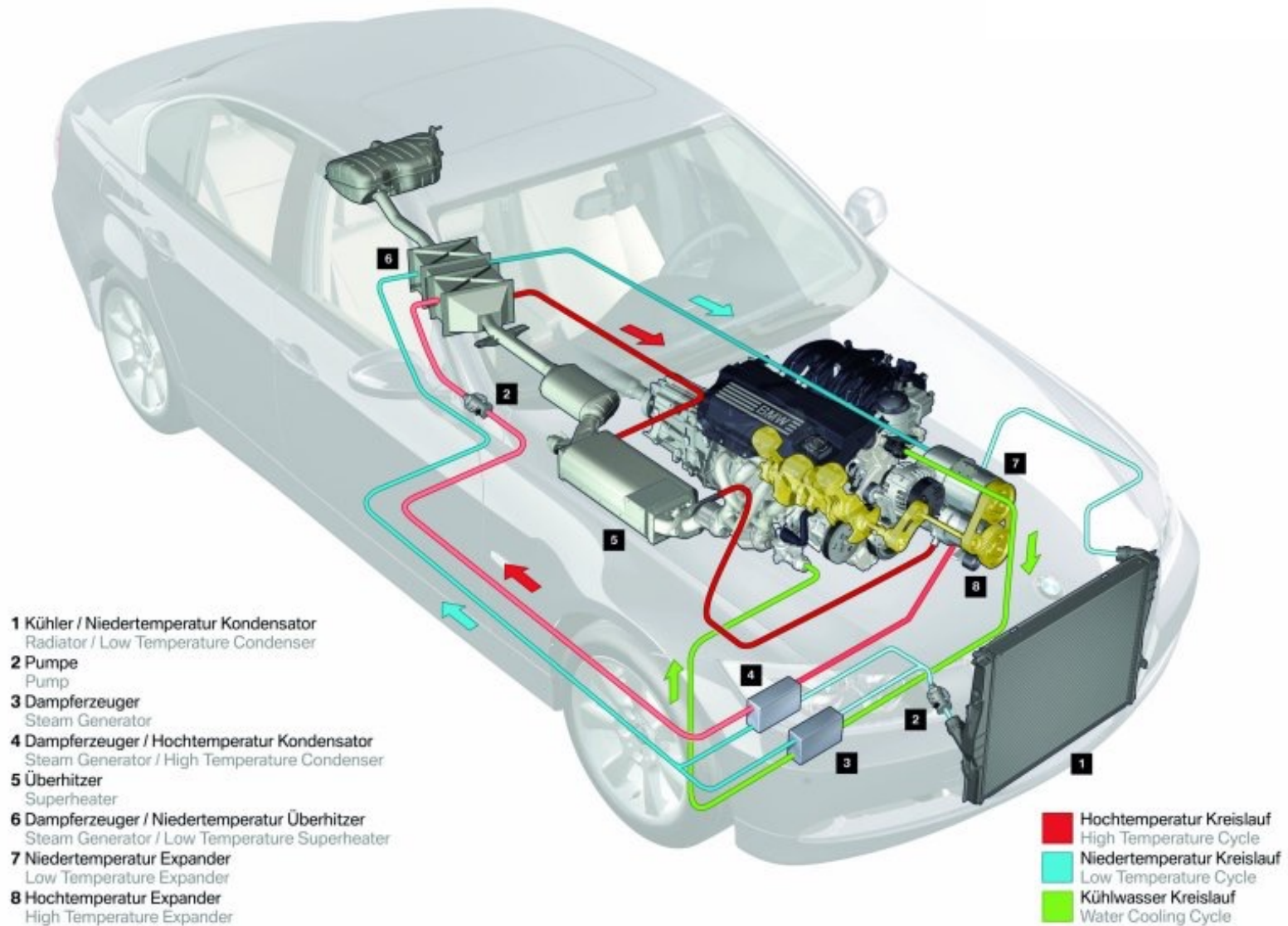


## Schaubild des Cheng Zyklus





# BMW Turbosteamer





# BMW Turbosteamer

- Abwärme wird in Antriebsleistung umgewandelt
- Prinzip Dampfmaschine
  - Geschlossener Dampfkreislauf
  - Expansionsmaschine (Kolbenmaschine)
  - Arbeit wird direkt an die Kurbelwelle abgegeben
- 1.8 l BMW Vierzylinder: + 10 kW, + 20 Nm
- Verbrauch: - 15%
- Über 80% der Abwärme kann genutzt werden