Thermodynamik 2

- Irreversible Prozesse
- Kreisprozesse des idealen Gases in der Anwendung
- Thermodynamisches Verhalten realer Stoffe
- Kreisprozesse mit Dämpfen
- Aufgaben
- Anhang

Peter Junglas 01. 06. 2022

Inhaltsverzeichnis

Übersicht

- Irreversible Prozesse
  - Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik
  - Definition der Entropie
  - Entropie und 2. Hauptsatz
  - Entropie und statistische Physik
  - Zustandsänderungen im TS-Diagramm
  - Der Carnot-Prozess im TS-Diagramm
  - Beispiele irreversibler Prozesse
    - Temperaturausgleich
    - Adiabate Drosselung
    - Füllen eines Behälters
  - Exergie und Anergie
- Kreisprozesse des idealen Gases in der Anwendung
  - Vergleichszahlen für Wärme- und Verbrennungsanlagen
  - Gasturbinen
    - Arbeitsweise
    - Joule-Prozess
    - Ericsson-Prozess
    - Gasturbinen in der Praxis
  - Verbrennungsmotoren
    - Otto-Prozess
    - Diesel-Prozess
- Thermodynamisches Verhalten realer Stoffe
  - Aggregatzustände
  - Zustandsgleichungen realer Gase
  - Eigenschaften von Wasserdampf
- Kreisprozesse mit Dämpfen
  - Clausius-Rankine-Prozess
  - Verbesserungen des Wirkungsgrads
  - Kaltdampfanlagen
- Aufgaben
  - Aufgabe 1
    - Lösung von Aufgabe 1
  - Aufgabe 2
    - Lösung von Aufgabe 2
  - Aufgabe 3
    - Lösung von Aufgabe 3
  - Aufgabe 4
    - Lösung von Aufgabe 4
  - Aufgabe 5
    - Lösung von Aufgabe 5
  - Aufgabe 6
    - Lösung von Aufgabe 6
  - Aufgabe 7
    - Lösung von Aufgabe 7
  - Aufgabe 8
    - Lösung von Aufgabe 8
  - Aufgabe 9
    - Lösung von Aufgabe 9
  - Aufgabe 10
    - Lösung von Aufgabe 10
  - Aufgabe 11
    - Lösung von Aufgabe 11
  - Aufgabe 12
    - Lösung von Aufgabe 12

- Aufgabe 13
  - Lösung von Aufgabe 13
- Aufgabe 14
  - Lösung von Aufgabe 14
- Aufgabe 15
  - Lösung von Aufgabe 15
- Aufgabe 16
  - Lösung von Aufgabe 16
  - Lösung mit Matlab und WATER95
- Aufgabe 17
  - Lösung von Aufgabe 17
- Aufgabe 18
  - Lösung von Aufgabe 18

- Anhang
  - Positivität der Entropie beim Befüllen
  - Tabellen
    - Stoffwerte von Gasen
    - Wärmekapazität von H_2, N_2, O_2, CO
    - Wärmekapazität von H_2O, CO_2, SO_2, Luft
    - Wasserdampftafel, Wasser
    - Wasserdampftafel, Nassdampf
    - Wasserdampftafel, Heißdampf
    - Eigenschaften von Propan
  - Nachweise

Irreversible Prozesse

- Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik
- Definition der Entropie
- Entropie und 2. Hauptsatz
- Entropie und statistische Physik
- Zustandsänderungen im TS-Diagramm
- Der Carnot-Prozess im TS-Diagramm
- Beispiele irreversibler Prozesse
- Exergie und Anergie

Der 2. Hauptsatz der Thermodynamik

- Erfahrungstatsachen:
  - viele Prozesse laufen spontan nur in einer Richtung ab, nie umgekehrt
  - Energie kann in "unnütze" Formen umgewandelt werden und damit "praktisch" verlorengehen
- Beispiele:
  - Temperaturausgleich durch Wärmetransfer
  - Erhöhung der inneren Energie durch Reibung
  - Vermischung zweier Stoffe
- 2. Hauptsatz der Thermodynamik:
  - beschreibt diese Grundbeobachtung
  - Grundpostulat, innerhalb der Thermodynamik nicht ableitbar
  - technisch wichtig, um theoretische Grenzen bei Energieumwandlungen zu verstehen
  - verschiedene äquivalente Formulierungen
  - eine Version des 2. Hauptsatzes:
    - Wärme geht nie von selbst von einem System niedriger Temperatur zu einem höherer Temperatur
- Martin Buchholz alias thermo-bestehen ist mit seiner tollen Einführung Sieger des Science-Slam 2010.

Definition der Entropie

- Entropie differentiell:

  für reversible Prozesse gegeben als Wärmeänderung pro Temperatur

  $dS := dQ/T$ (reversibel)

  bei nicht-reversiblen Prozessen wird Dissipationswärme berücksichtigt

  $dS := (dQ + dW_{diss})/T$

  mit 1. Haupsatz:

  $$\begin{aligned} dU &= dQ + dW_{diss} - p\,dV \\ &= T\,dS - p\,dV \\ \Rightarrow dS &= (dU + p\,dV)/T \end{aligned}$$

- Entropie beim idealen Gas:

  kalorische Zustandsgleichung

  $dU = m\,c_V\,dT$

  thermische Zustandsgleichung

  $p = m\,R_i\,T / V$

  damit

  $dS = m\,c_V\,dT/T + m\,R_i\,dV/V$

  lässt sich integrieren zu

  $$S_2 - S_1 = m \int_1^2 \frac{c_V(T)}{T} dT + m R_i \ln \frac{V_2}{V_1}$$

  hängt nicht vom Weg, sondern nur von Anfangs- und Endzustand ab

  für konstantes c_V

  $S_2 - S_1 = m\,c_V \ln(T_2/T_1) + m\,R_i \ln(V_2/V_1)$

  analog über dH:

  $S_2 - S_1 = m\,c_p \ln(T_2/T_1) - m\,R_i \ln(p_2/p_1)$

- Grundlegende Eigenschaft der Entropie:

  Entropie ist Zustandsgröße, d.h. hängt nicht vom Prozessverlauf ab

  gilt grundsätzlich (nicht nur beim idealen Gas)

  Erfahrungstatsache (Ergebnis von Experimenten)

  mathematisch begründbar, aber schwierig

Entropie und 2. Hauptsatz

- Änderung der Entropie eines Systems:

  durch Wärmetransport

  $dS_q := dQ/T$ (**Entropietransport**)

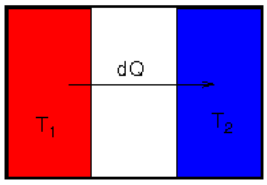
  durch Dissipation

  $dS_i := dW_{diss}/T \geq 0$ (**Entropieerzeugung**)

  reversible Prozesse charakterisiert durch $dS_i = 0$

- Beispiel: Entropieerhöhung beim Wärmetransfer

  Wärmemenge $dQ > 0$ fließe von warmem Körper zu kaltem Körper



  Entropieänderung der Körper

$$dS_1 = \frac{-dQ}{T_1}$$
$$dS_2 = \frac{dQ}{T_2}$$

  Entropieänderung des Gesamtsystems

$$\begin{aligned} dS &= dS_1 + dS_2 \\ &= dQ\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) > 0 \end{aligned}$$

- Formulierung des 2. Hauptsatzes:

  adiabates System ($dQ = 0$) → Entropie nimmt nie ab

  bleibt gleich genau für reversible Prozesse

  bei nicht-adiabatischem System: betrachte alle Wärmequellen als Teil des Systems →

  In einem abgeschlossenen System nimmt die Gesamtentropie niemals ab. Sie bleibt gleich für reversible Prozesse.

- Auswirkung auf irreversible Kreisprozesse:

  Unterscheidung nötig zwischen Volumenänderungsarbeit W_V des Gases und auf den Kolben abgegebene Arbeit W_g

  $W_g = W_V + W_{diss}$

  Kompression
  - $W_V > 0$, $W_{diss} > 0$
  - → $W_g > W_V$
  - zur Kompression des Gases ist mehr Arbeit am Kolben nötig
  - klar: Reibung muss überwunden werden

  Expansion
  - $W_V < 0$, $W_{diss} > 0$
  - → $|W_g| < |W_V|$
  - bei der Expansion des Gases wird weniger Arbeit an den Kolben abgegeben

- klar: ein Teil geht als Reibung verloren

Kreisprozessarbeit = nach außen abgegebene Arbeit, also

$$W_k = \sum_i W_{g,i}$$

- Aufgaben:

  Aufgabe 1

  Aufgabe 2

Entropie und statistische Physik

- Entropie in der statistischen Mechanik (vgl. Physik 2):

  definiert über die Zahl W möglicher Zustände, die den gleichen makroskopischen Zustand beschreiben

  $S_{mikro} := k_B \ln W$

  Maß für die Ordnung eines Systems (hohe Ordnung → S klein)

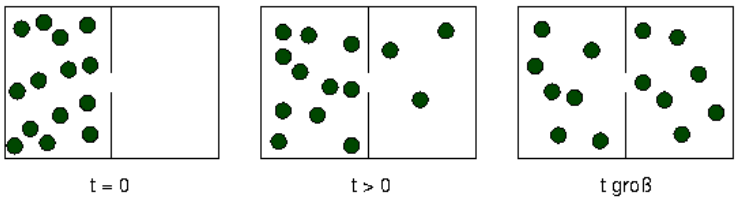
- Erklärung des 2. Hauptsatzes aus der statistischen Mechanik:

  Zahl der Zustände mit höherer Entropie bedeutend größer als mit kleinerer Entropie

  Übergang zu kleinerer Entropie nicht verboten, aber extrem unwahrscheinlich

  Kartenspiel als Beispiel:
  - am Anfang geordnet (niedrige Entropie)
  - Mischen → Unordnung steigt (Entropie wächst)
  - spontanes Sortieren durch Mischen extrem unwahrscheinlich

  ausströmendes Gas



  - Teilchen verteilen sich über ganzes Volumen
  - spontane Sammlung auf einer Seite grundsätzlich möglich
  - sehr unwahrscheinlich
  - bei großen Teilchenzahlen (~ 10^{22}) extrem unwahrscheinlich
  - tritt praktisch nie auf

- Beispiel: adiabate Expansion des idealen Gases

  ideales Gas dehne sich adiabatisch und isotherm in ein Vakuum auf doppeltes Volumen aus

  Entropie klassisch

$$\begin{aligned}\Delta S &= mc_V \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + mR_i \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)\\ &= mR_i \ln 2\\ &= Nk_B \ln 2\end{aligned}$$

  Entropie statistisch
  - Entropie bei n Teilchen im linken Teilvolumen

$$S(n) \approx k_B(N \ln N - n \ln n - (N-n)\ln(N-n))$$

  - am Anfang n = N, also W = 1, somit $S_1 = 0$
  - am Ende n = N/2, daher

$$\begin{aligned}\Delta S &= S_2 - S_1\\ &= S(\frac{N}{2})\\ &= k_B(N \ln N - \frac{N}{2}\ln\frac{N}{2} - \frac{N}{2}\ln\frac{N}{2})\\ &= k_B N(\ln N - \ln\frac{N}{2})\\ &= Nk_B \ln 2\end{aligned}$$

Zustandsänderungen im TS-Diagramm

- Das TS-Diagramm:

  Darstellung von Zuständen und Prozessen als Funktionen von T und S

  Fläche unter dem Graphen

$$\begin{aligned}\int_1^2 T(S)\,dS &= \int_1^2 (dQ + dW_{diss}) \\ &= Q_{12} + W_{diss12}\end{aligned}$$

  zur Erinnerung: Fläche im pV-Diagramm

$$\int_1^2 p(V)\,dV = -W_{V12}$$

  i.f. Zustandsänderungen des idealen Gases, wobei oft noch $c_V(T)$ = const. angenommen wird

  Grundlegende Beziehung zur Berechnung der Kurven

  dS = (dU + p dV) / T
  = (dH - V dp) / T

- Isochore:

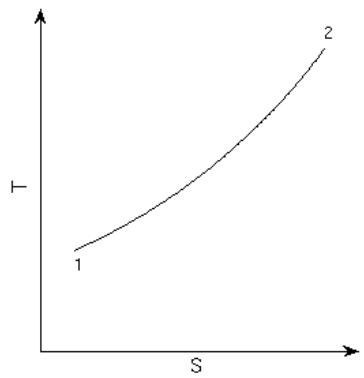
  wegen V = const gilt

  dS = dU/T
  = m c_V dT / T

  mit Annahme $c_V(T)$ = const. folgt

  $S_2 - S_1 = m\, c_V \ln(T_2/T_1)$

  Auflösen nach T → exponentieller Verlauf



  gilt für beliebige Stoffe (bei näherungsweise konstantem c_V)

  innere Energie:

  $U_2 - U_1 = Q_{12} + W_{diss12}$ →

  Fläche unter dem Graphen = Änderung der inneren Energie

- Isobare:

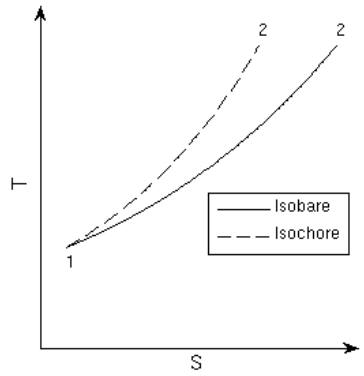
  wegen p = const gilt

  dS = dH/T
  = m c_p dT / T

  mit Annahme $c_p(T)$ = const. folgt

$S_2 - S_1 = m\, c_p \ln(T_2/T_1)$
$= m\, \kappa\, c_V \ln(T_2/T_1)$

Auflösen nach T → exponentieller Verlauf, aber flacher als bei Isochore



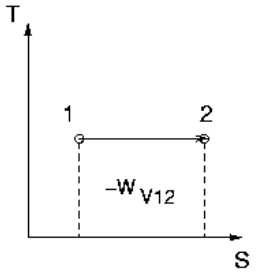
Enthalpie:

$H_2 - H_1 = Q_{12} + W_{diss12}$ →

Fläche unter dem Graphen = Änderung der Enthalpie

- Isotherme:

  Kurve klar



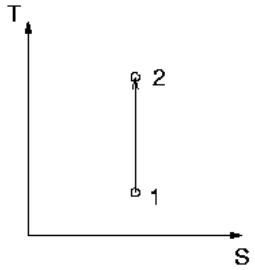
bei T = const. gilt für ideales Gas auch U = const, daher

$Q_{12} + W_{diss12} = - W_{V12}$ →

Fläche unter dem Graphen = Volumenänderungsarbeit

- Isentrope:

  Kurve klar



- Polytrope:
  - war definiert durch $p\, V^n$ = const. Thermische Zustandsgleichung →

$$TV^{n-1} = \text{const}$$
$$\Rightarrow \quad \frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{n-1}}$$

aus Entropie des idealen Gases für c_V = const:

$$S_2 - S_1 = m\, c_V \ln(T_2/T_1) + m\, R_i \ln(V_2/V_1)$$
$$= m\, c_V \ln(T_2/T_1) - m\, R_i \ln(T_2/T_1)/(n-1)$$

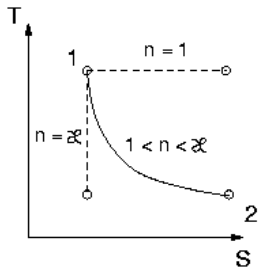
- weiter war

  $$R_i = c_p - c_V = (\kappa - 1)\, c_V$$

  daher

  $$\begin{aligned} S_2 - S_1 &= m c_V \left(1 - \frac{\kappa - 1}{n - 1}\right) \ln \frac{T_2}{T_1} \\ &= m c_V \frac{n - \kappa}{n - 1} \ln \frac{T_2}{T_1} \end{aligned}$$

- häufig interessiert $1 < n < \kappa$ → exponentieller Abfall



- Adiabate Prozesse:

  für reversible Vorgänge isentrop

  bei irreversiblen: $W_{diss} > 0$ erhöht Temperatur und Entropie

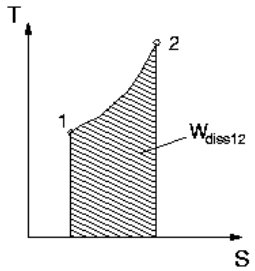
  mit dQ = 0:

  $$T\, dS = dW_{diss}$$

  oft als Polytrope dargestellt, damit folgt wie bei S

  $$W_{diss12} = m c_V \frac{n - \kappa}{n - 1} (T_2 - T_1) > 0$$

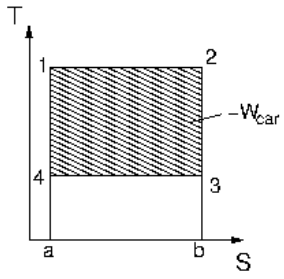
  Wärme wird zugeführt (eben W_{diss}) → Polytrope mit $n < 1$



Der Carnot-Prozess im TS-Diagramm

- Carnot-Prozess:

  2 Isothermen, 2 Isentropen



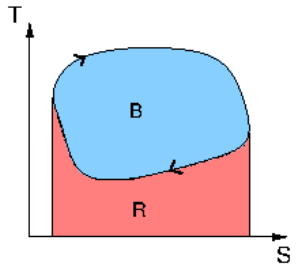
  Energien:
  - zugeführte Wärme Q_{12} = Fläche(12ba)
  - abgeführte Wärme Q_{34} = - Fläche(43ba)
  - Nutzarbeit W_{car} = - Fläche(1234)

  Wirkungsgrad:

  $\eta = (- W_{car})/Q_{12}$
  = Fläche(1234)/Fläche(12ba)

- Vergleich mit anderen Kreisprozessen:

  beliebiger Kreisprozess im T-S-Diagramm



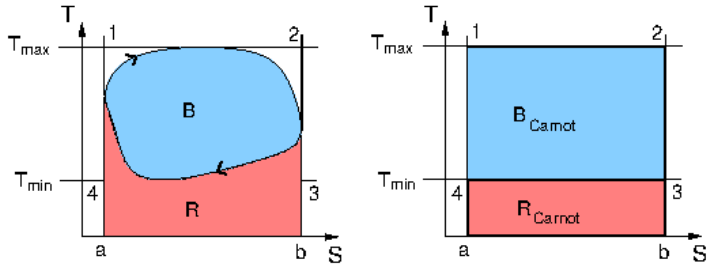
  (positive) Flächen B und R mit

$$\begin{aligned} B &= -W_k \\ R &= -Q_{ab} \\ B + R &= Q_{zu} \end{aligned}$$

  Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{-W_k}{Q_{zu}} = \frac{B}{B+R}$$

  Gesamtwirkungsgrad des Prozesses:



  $B < B_{Carnot}$, $R > R_{Carnot}$ →

$$
\begin{aligned}
\eta &= \frac{B}{B+R} \\
&= \frac{1}{1+R/B} \\
&< \frac{1}{1+R_{Carnot}/B} \\
&< \frac{1}{1+R_{Carnot}/B_{Carnot}} \\
&= \frac{B_{Carnot}}{B_{Carnot}+R_{Carnot}} \\
&= \eta_{Carnot}
\end{aligned}
$$

Für alle Kreisprozesse, die zwischen den Temperaturen T_{max} und T_{min} arbeiten, ist der Wirkungsgrad höchstens gleich dem des Carnot-Prozesses.

- Aufgaben:

  Aufgabe 3

  Aufgabe 4

Beispiele irreversibler Prozesse

- Temperaturausgleich
- Adiabate Drosselung
- Füllen eines Behälters

Temperaturausgleich

- Temperaturausgleich bei Mischung:

  Mischungstemperatur (aus Gleichheit der ausgetauschten Wärmemengen) war

  $$T_{Mi} = \frac{m_a \bar{c}_a|_{T_{Mi}}^{T_a} T_a + m_b \bar{c}_b|_{T_b}^{T_{Mi}} T_b}{m_a \bar{c}_a|_{T_{Mi}}^{T_a} + m_b \bar{c}_b|_{T_b}^{T_{Mi}}}$$

  Änderung der Entropie bei isobarem Temperaturausgleich

  $$\Delta S_{Mi,T} = m_a \bar{c}_a|_{T_{Mi}}^{T_a} \ln \frac{T_{Mi}}{T_a} + m_b \bar{c}_b|_{T_b}^{T_{Mi}} \ln \frac{T_{Mi}}{T_b}$$

  ganz allgemein gilt (s.u.):

  $\Delta S_{Mi,T} > 0$

  zusätzliche Entropie bei Mischung unterschiedlicher Stoffe

- Beweis der Zunahme der Entropie:

  zur Vereinfachung werden folgende Hilfsgrößen eingeführt

  $$\begin{aligned} x &:= \frac{m_a c_a}{m_a c_a + m_b c_b} \\ y &:= \frac{m_b c_b}{m_a c_a + m_b c_b} \end{aligned}$$

  mit

  $x + y = 1$

  Mischungstemperatur damit

  $$T_{Mi} = x T_a + y T_b$$

  Entropieänderung also

  $$\begin{aligned} \frac{\Delta S}{m_a c_a + m_b c_b} &= x \ln \frac{T_{Mi}}{T_a} + y \ln \frac{T_{Mi}}{T_b} \\ &= x \ln T_{Mi} + y \ln T_{Mi} - (x \ln T_a + y \ln T_b) \\ &= \ln(x T_a + y T_b) - (x \ln T_a + y \ln T_b) \\ &\geq 0 \end{aligned}$$

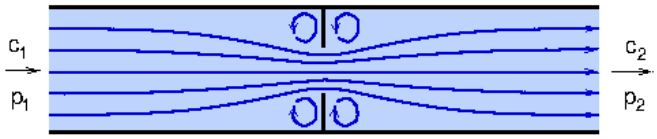
  wegen der Konkavität des Logarithmus.

Adiabate Drosselung

- Drosselung:

  Strömung mit Reibung ohne äußere Arbeitsverrichtung, also $dW_i = 0$

  insbesondere bei Querschnittsveränderungen, Knicken oder Hindernissen



  Ziel: Druckminderung

- Adiabate Drosselung:

  Annahmen: dz = 0, dc = 0

  adiabat, also dQ = 0

  damit

$$dH = dW_t + dW_{diss} + dQ = dW_i + dQ = 0 \qquad (\mathbf{isenthalp})$$

  Vorgang irreversibel mit

$$\begin{aligned} 0 &= dW_i = dW_t + dW_{diss} = V\,dp + dW_{diss} \\ \Rightarrow \qquad dW_{diss} &= -V\,dp \quad > 0 \end{aligned}$$

  also: Druck nimmt ab

  durch Druckverlust verfügbare technische Arbeit wird nicht genutzt, sondern dissipiert

- Speziell beim idealen Gas:

  aus kalorischer Zustandsgleichung folgt

$$dH = mc_p dT = 0 \quad \Rightarrow \quad dT = 0$$

  Entropieänderung

$$S_2 - S_1 = mR_i \ln \frac{p_1}{p_2} \quad > 0$$

  mit thermischer Zustandsgleichung

$$\begin{aligned} W_{diss1,2} &= -\int_1^2 V\,dp = -\int_1^2 \frac{mR_iT}{p}\,dp \\ &= mR_iT \ln \frac{p_1}{p_2} = T(S_2 - S_1) \end{aligned}$$

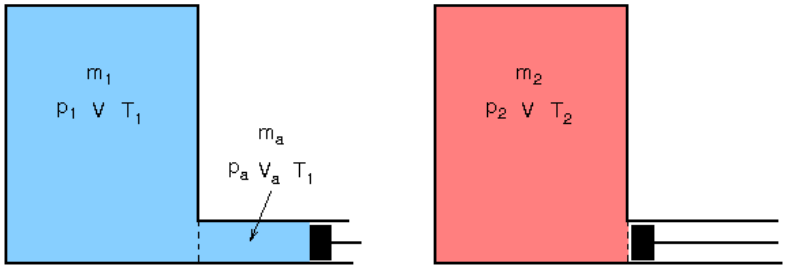
Füllen eines Behälters

- Einfüllen von Gas in Druckbehälter:

  adiabatischer Behälter

  Anfangszustand p_1, V, T_1, m_1

  Gas strömt ein mit konstantem Druck p_a und Temperatur T_1



  Endzustand: p_2, V, T_2, m_2

- Bestimmung der Temperaturerhöhung:

  Einschubarbeit

  $W_{g12} = p_a V_a = m_a R_i T_1 = (m_2 - m_1) R_i T_1$

  Erhöhung der inneren Energie (1. Hauptsatz)

$$\begin{aligned} U_2 - U_1 &= W_{g12} = (m_2 - m_1) R_i T_1 \\ &= m_2 c_V (T_2 - T_1) \end{aligned}$$

  c_V eliminieren mit $(\kappa - 1)\, c_V = R_i$ →

$$\begin{aligned} T_2 - T_1 &= (1 - \frac{m_1}{m_2})(\kappa - 1) T_1 \\ \Rightarrow \quad \frac{T_2}{T_1} &= (1 - \frac{m_1}{m_2})(\kappa - 1) + 1 \end{aligned}$$

  Massen durch Drücke ersetzen mit Gasgleichung

$$\begin{aligned} m_k &= \frac{p_k V}{R_i T_k}, \qquad k = 1, 2 \\ \Rightarrow \quad \frac{m_1}{m_2} &= \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \end{aligned}$$

  in Beziehung für T_2/T_1 einsetzen →

$$\begin{aligned} \frac{T_2}{T_1} &= \left(1 - \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{T_2}{T_1}\right)(\kappa - 1) + 1 \\ \Rightarrow \quad \frac{T_2}{T_1} &= \frac{\kappa}{1 + (\kappa - 1)\, p_1/p_2} \end{aligned}$$

- Bestimmung des Enddrucks:

  Gasgleichungen

$$\begin{aligned} p_1 V &= m_1 R_i T_1 \\ p_2 V &= (m_1 + m_a) R_i T_2 \end{aligned}$$

  Division liefert

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(1 + \frac{m_a}{m_1}\right) \frac{T_2}{T_1}$$

  Einsetzen der Beziehung für T_2/T_1 ergibt nach Auflösen

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \kappa \frac{m_a}{m_1}$$

Damit erhält man für die Endtemperatur

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1 + \kappa \frac{m_a}{m_1}}{1 + \frac{m_a}{m_1}}$$

- Entropieerhöhung:

  Entropieänderungen der beiden Gasanteile m_1 und m_a leicht berechenbar

  auch hier gilt wieder

  $$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_a \geq 0$$

  klar, da irreversibler Prozess

  mathematischer Beweis etwas mühsam, s. Anhang

- Aufgaben:

  Aufgabe 5

Exergie und Anergie

- Beobachtungen:

  Energieformen lassen sich nicht beliebig ineinander umwandeln

  Umwandlung wird beeinflusst durch Umgebung

- Beispiel Kreisprozess:

  Teil der aufgenommenen Wärme wird wieder abgegeben

  Wirkungsgrad η hängt ab von Umgebungstemperatur $T_b < T_{min}$

  $$\eta < \eta_{Carnot} = 1 - T_{min} / T_{max} < 1 - T_b / T_{max}$$

- Anergie B:

  "unnütze" Energie

  lässt sich (bei vorgegebener Umgebung) nicht in andere Energieform umwandeln

  Beispiele:
  - abzugebende Wärme bei Umgebungstemperatur T_b
  - Druck auf Kolben gleich Umgebungsdruck

- Exergie E:

  "nützliche" Energie

  kann (bei vorgegebener Umgebung) vollständig in andere Energieformen umgewandelt werden

  Gesamtenergie $U = E + B$

  Quantifizierung von E und B hängt vom Umgebungszustand T_b, p_b ab

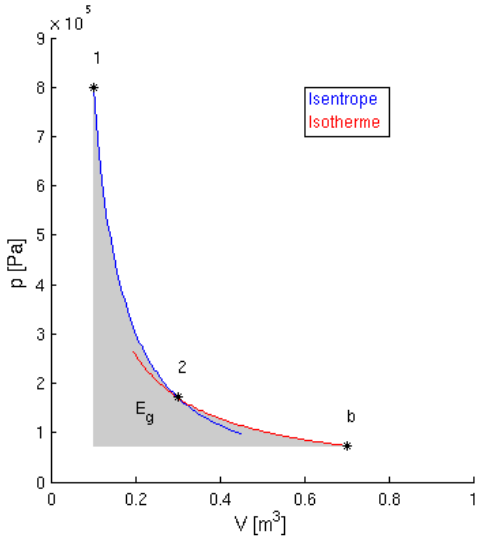
- Formulierung des 2. Hauptsatzes:

  Bei allen natürlichen Prozessen wird Exergie in Anergie umgewandelt.

  Reversibler Prozess ⇔ Exergie bleibt konstant

- Exergie beim geschlossenen System:

  Exergie E_{g1} = Nutzarbeit der Kolbenstange bei Übergang von Anfangszustand 1 bis zum Umgebungszustand



  bei Außendruck p_b gehört nur Kolbenarbeit zur Exergie

  $$E_{g1} = -W_{V1b} - p_b (V_b - V_1)$$

V_b: Volumen des Systems bei p_b, T_b

Wärmeübertragung nur bei $T = T_b$, sonst nicht reversibel

Prozessführung daher

- zunächst alle innere Energie ausnutzen (isentrop, bis $T = T_b$)
- dann reversibel entspannen (isotherm, bis $p = p_b$)

Volumenänderungsarbeit nach 1. Hauptsatz

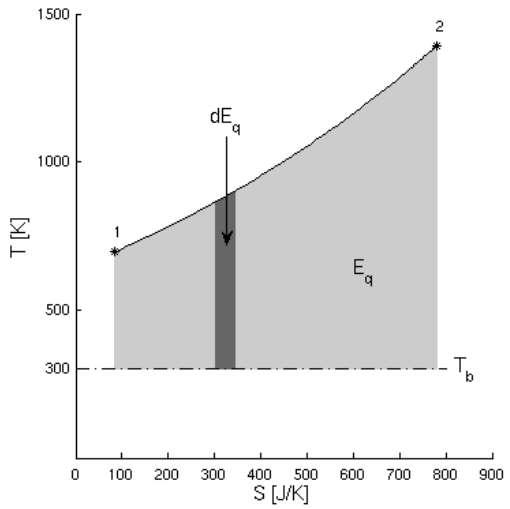
$$\begin{aligned} W_{V1b} &= U_b - U_1 - Q_{1b} \\ &= U_b - U_1 - T_b(S_b - S_1) \end{aligned}$$

damit

$$E_{g1} = U_1 - U_b + T_b (S_b - S_1) - p_b (V_b - V_1)$$

- Exergie der Wärme:

Exergie E_q = Anteil der Wärme, der im betrachteten Prozess maximal in Arbeit W_k umgewandelt werden kann



Prozess 12 in differentielle Teilprozesse zerlegen

jeweils näherungsweise isotherm

maximale Arbeit aus der Wärme durch Carnotprozess zwischen T und T_b

Exergie eines kleinen Teilprozesses

$$dE_q = - dW_k = \eta_C \, dQ = (1 - T_b/T) \, dQ$$

Integriert:

$$\begin{aligned} E_{q12} &= \int_1^2 \left(1 - \frac{T_b}{T}\right) dQ \\ &= Q_{12} - T_b \int_1^2 \frac{dQ}{T} \end{aligned}$$

mit $dQ = T\,dS - dW_{diss}$ ergibt sich

$$E_{q12} = Q_{12} - T_b(S_2 - S_1) + T_b \int_1^2 \frac{dW_{diss}}{T}$$

- Exergetischer Wirkungsgrad ζ:

Verhältnis von genutzter zur aufgewandten Exergie

$$\zeta = E_{Nutz} / E_{Aufwand}$$

etwa für Wärmekraftmaschinen

$\zeta = -W_k / E_{q,zu}$

Vergleich mit η

- η ist beschränkt durch 2. Haupsatz
- theoretische Grenze
- ζ zeigt an, wieviel praktisch erreicht wurde
- $\zeta = 1$, wenn $\eta_{real} = \eta_{th}$

- Aufgaben:

  Aufgabe 6

Kreisprozesse des idealen Gases in der Anwendung

- Vergleichszahlen für Wärme- und Verbrennungsanlagen
- Gasturbinen
- Verbrennungsmotoren

Vergleichszahlen für Wärme- und Verbrennungsanlagen

- Funktionsweise:

  Brennstoffenergie wird chemisch freigesetzt

  erzeugte Wärme wird in Arbeit umgewandelt

  häufig offenes System
  - Luft und Brennstoff zuführen
  - Abgas abführen

  näherungsweise beschrieben als reversibler Kreisprozess des idealen Gases
  - Verbrennung ≙ Wärmezufuhr
  - Ausstoß der Abgase und Zufuhr von Gemisch ≙ Wärmeabfuhr
  - konstantes Arbeitsmittel Luft

  Beispiele: Gasturbine, Verbrennungsmotor

- Wirkungsgrade:

  thermischer Wirkungsgrad η_{th}

  $$\eta_{th} = |W_k|/Q_{zu}$$

  - gut im TS-Diagramm abzulesen
  - optimaler Wert beim Carnot-Prozess

  exergetischer Wirkungsgrad ζ
  - gibt an, wie dicht erreichter Wirkungsgrad an Carnot-Wirkungsgrad

- Arbeitsverhältnis r_W:

  Vergleich der vom Gas an Kolben abgegebenen technischen Arbeit $W_t^- < 0$ mit der vom Gas durch den Kolben aufgenommenen Arbeit $W_t^+ > 0$:

  $$\begin{aligned} r_W &= 1 + W_t^+/W_t^- \\ &= (W_t^- + W_t^+)/W_t^- \\ &= W_k/W_t^- \\ &< 1 \end{aligned}$$

  Reibung →
  - $|W_t^-|$ wird kleiner (Verluste im Kolben verringern Nutzen)
  - W_t^+ wird größer (mehr Energie wird benötigt, um Verluste auszugleichen)

  daher bei irreversiblen Prozessen:

  $$r_W^{irr} < r_W$$

  es steht weniger Nutzarbeit zur Verfügung

  r_W möglichst groß, sonst bleibt bei Reibung zu wenig Nutzarbeit über

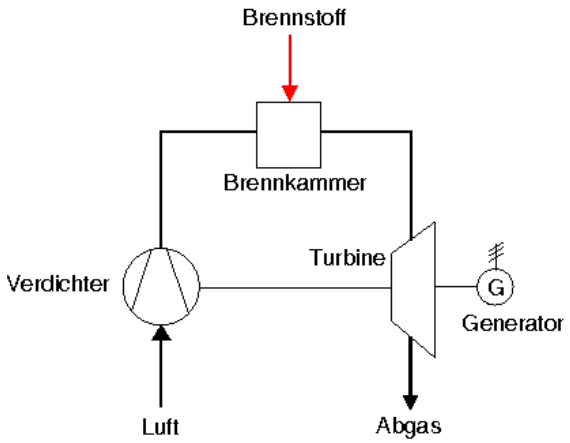
Gasturbinen

- Arbeitsweise
- Joule-Prozess
- Ericsson-Prozess
- Gasturbinen in der Praxis

Arbeitsweise

- Offene Anlage:

  für Kraftwerke und Flugzeugmotoren



  Gas (meistens Luft) wird angesaugt und verdichtet

  in Brennkammer wird Kraftstoff zugeführt

  in Turbine expandiert das heiße Gas und treibt sie an

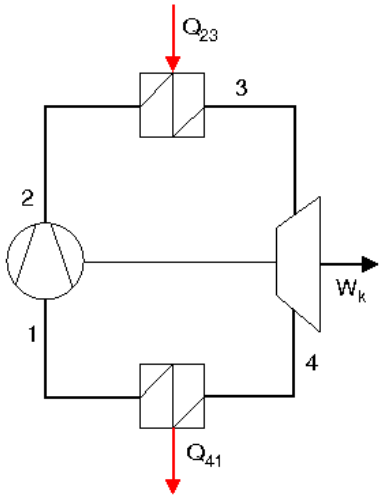
  Turbine treibt Verdichter und Generator an (Nutzenergie)

  heißes Gas tritt als Abgas aus (Schub beim Flugzeug)

- Modellierung als geschlossener Prozess:

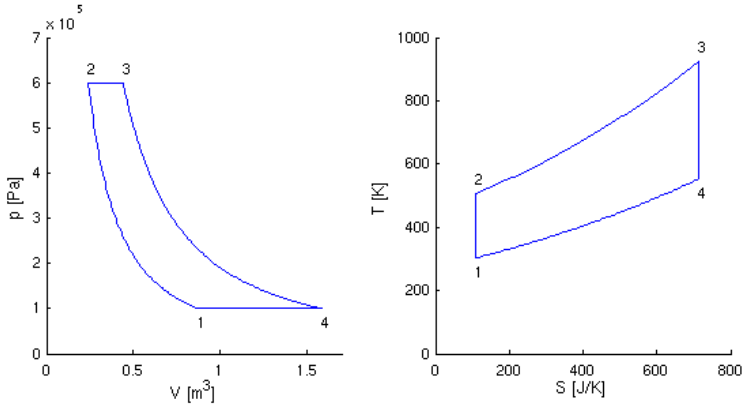
  Verbrennung des Brennstoffs als äußere Wärmezufuhr

  Austausch von Abgas durch Luft als Wärmeabfuhr



Joule-Prozess

- Kreisprozess als Annäherung:



1 → 2 Luft wird isentrop verdichtet

2 → 3 Wärme wird bei der Verbrennung isobar zugeführt

3 → 4 Gas dehnt sich isentrop in der Turbine aus

4 → 1 Wärme wird isobar abgegeben (bzw. Gas ausgetauscht)

- Berechnung des thermischen Wirkungsgrades:

Arbeit aus der Wärmezufuhr bei konstantem Druck

$$\begin{aligned} |W_k| &= Q_{23} + Q_{41} \\ &= mc_p|_{T_2}^{T_3}(T_3 - T_2) + mc_p|_{T_1}^{T_4}(T_1 - T_4) \end{aligned}$$

Wirkungsgrad

$$\begin{aligned} \eta_{th} &= |W_k|/Q_{23} \\ &= 1 + Q_{41}/Q_{23} \\ &= 1 + \frac{m\overline{c_p}|_{T_1}^{T_4}(T_1 - T_4)}{m\overline{c_p}|_{T_2}^{T_3}(T_3 - T_2)} \end{aligned}$$

für näherungsweise konstante Wärmekapazität c_p

$\eta_{th} = 1 - (T_4 - T_1)/(T_3 - T_2)$

Isentropengleichungen

$$\begin{aligned} \frac{T_1}{T_2} &= \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \\ &= \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \\ &= \frac{T_4}{T_3} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \qquad T_4 = \frac{T_1}{T_2} T_3$$

in Beziehung für η_{th} einsetzen

$$\eta_{th} = 1 - \frac{\frac{T_1}{T_2} T_3 - T_1}{T_3 - T_2}$$

Erweitern mit T_2 →

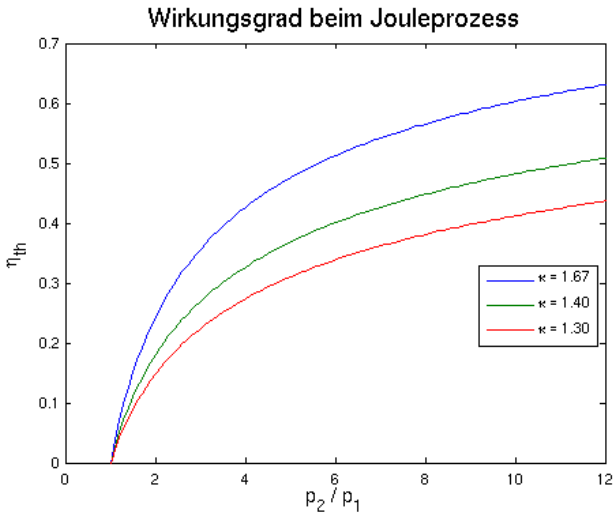
$$\begin{aligned}\eta_{th} &= 1 - \frac{T_1(T_3 - T_2)}{T_2(T_3 - T_2)} \\ &= 1 - T_1/T_2 \\ &= 1 - (p_1/p_2)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\end{aligned}$$

- Analyse des Ergebnisses:

  Wirkungsgrad hängt (bei gegebenem Gas) nur vom Druckverhältnis ab

  Stärke der Wärmezufuhr beeinflusst Wirkungsgrad nicht

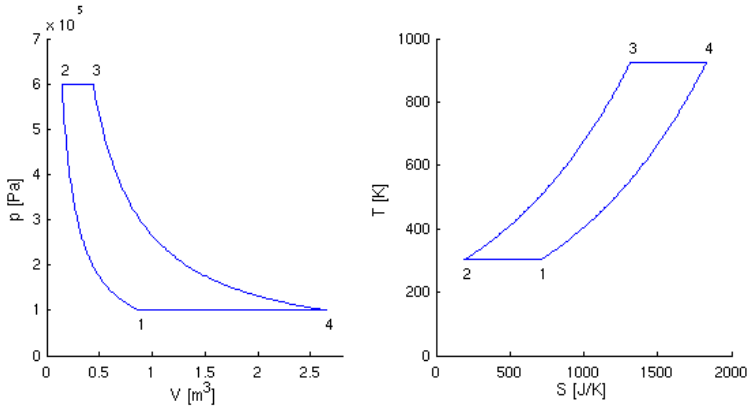
  Abhängigkeit vom Gas durch κ



Ericsson-Prozess

- Kreisprozess:

  verwendet Isothermen statt Isentropen



  bei Verbrennung zugeführte Wärmemenge Q_{23} und bei Gasaustausch abgegebene Wärmemenge Q_{41} sind gleich groß:

  $Q_{23} = m\, c_p\, (T_3 - T_2)$ (für Isobare)
  $= m\, c_p\, (T_4 - T_1)$ (wegen Isothermen)
  $= Q_{14} = - Q_{41}$

  Abwärme Q_{41} wird für Erwärmung 2 → 3 genutzt

  - Verringerung der Verlustwärme
  - Verringerung der zuzuführenden Wärme
  - deutliche Verbesserung des Wirkungsgrades

  zugeführte Wärme Q_{34} in der Turbine

  abgeführte Wärme Q_{12} im Verdichter

- Beachte 2. Hauptsatz:

  Wärme geht nur von höherer Temperatur zu niedriger

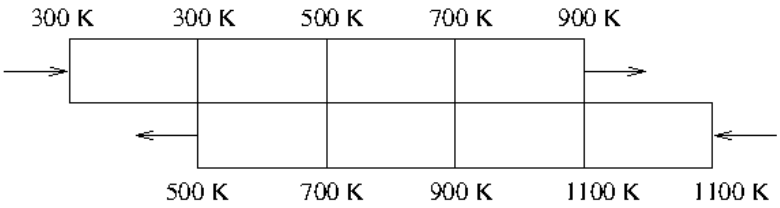
  Carnot-Prozess

  - Wärmeabfuhr nur bei niedrigster Temperatur
  - → Abwärme kann im Prozess nicht zugeführt werden

  Ericsson-Prozess

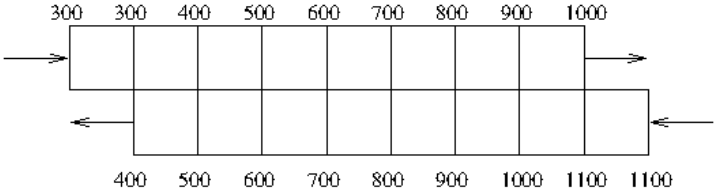
  - Temperaturen von 2 → 3 wie bei 1 → 4
  - Massen und Wärmekapazitäten gleich

  Aufteilung in 4 Bereiche



  - in jedem Teilbereich positive Temperaturdifferenz
  - Q_{zu}-Anteil von Q_{23} verringert sich auf 25%

  Aufteilung in 8 Bereiche



- Q_{zu}-Anteil von Q_{23} verringert sich auf 12.5%

idealer Wärmetauscher → komplette Wärmeübertragung → Q_{zu}-Anteil von $Q_{23} = 0$

- Berechnung des thermischen Wirkungsgrads:

Wärmemenge bei Isotherme 3 → 4

$$Q_{34} = m\, R_i\, T_3 \ln(p_3/p_4)$$
$$= m\, R_i\, T_3 \ln(p_2/p_1)$$

Wärmemenge bei Isotherme 1 → 2

$$Q_{12} = m\, R_i\, T_1 \ln(p_1/p_2)$$
$$= -\, m\, R_i\, T_1 \ln(p_2/p_1)$$

Arbeit des Kreisprozesses

$$|W_k| = Q_{34} + Q_{12}$$
$$= m\, R_i\, (T_3 - T_1) \ln(p_2/p_1)$$

Wirkungsgrad

$$\eta_{th} = |W_k|/Q_{34}$$
$$= 1 - T_1/T_3$$

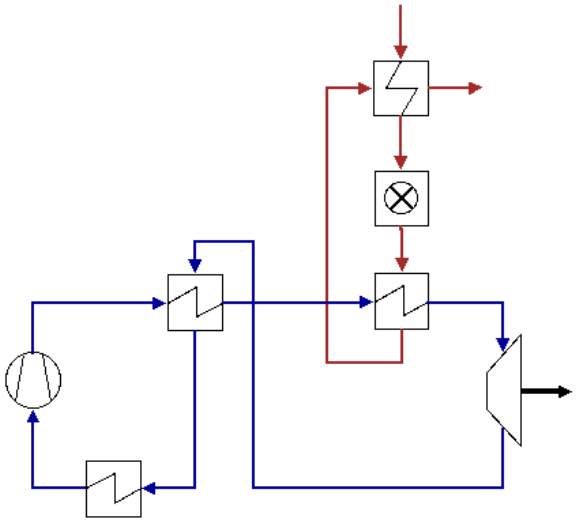
η maximal (wie beim Carnot-Prozess)

Gasturbinen in der Praxis

- Geschlossene Anlage:

  Arbeitsmittel läuft um

  Wärme kommt aus zusätzlichem Brennstoffkreislauf (äußere Wärmezufuhr)



  Vorteil: keine Vermischung von Brennstoff und Arbeitsmittel →
  - billiger Brennstoff möglich
  - Betrieb mit beliebigem Gas (etwa mit größerem κ)
  - Druckanpassung

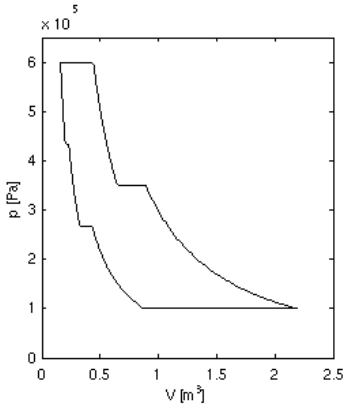
  Nachteil:
  - deutlich aufwändiger zu bauen

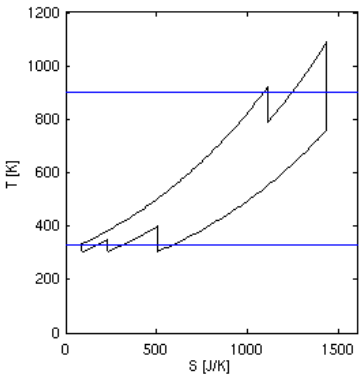
- Isex-Gasturbine:

  Realisierung des günstigen Ericsson-Prozesses

  Problem:
  - Wärmeaustausch in Turbine und Verdichter nicht isotherm (zu schnell)

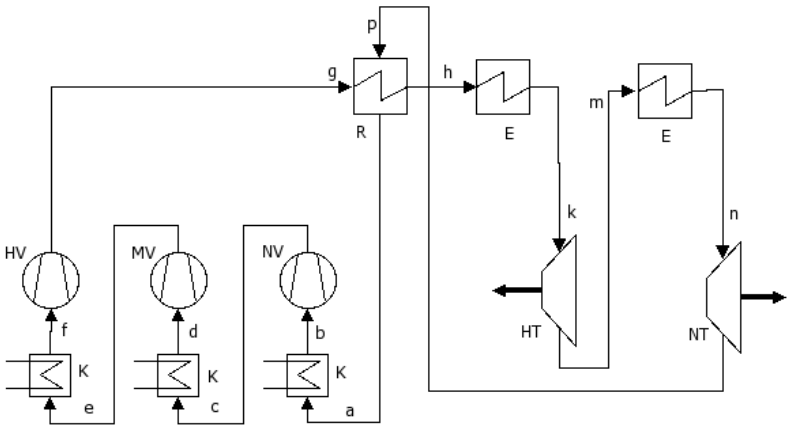
  Lösung:
  - mehrere Zwischenkühler bzw. -erhitzer
  - statt Isotherme mehrere kleine Stücke isobar und isentrop





  -

  praktische Ausführung



zusätzlicher Wärmetauscher (**Rekuperator**)

- heißes Turbinengas (p → a) erwärmt kühles Verdichtergas (g → h)

- Aufgaben:

  Aufgabe 7

  Aufgabe 8

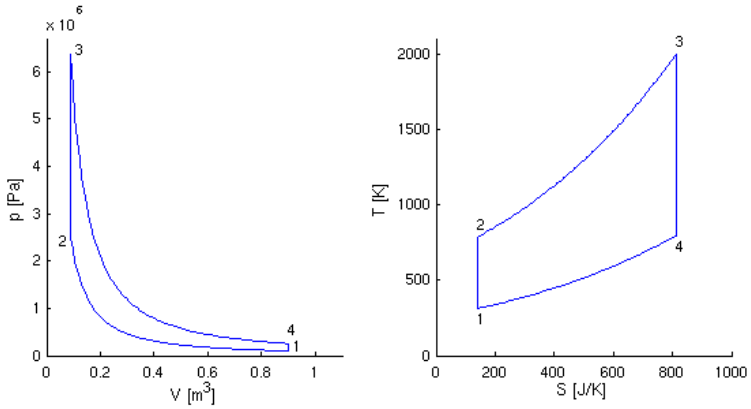
Verbrennungsmotoren

- Otto-Prozess
- Diesel-Prozess

Otto-Prozess

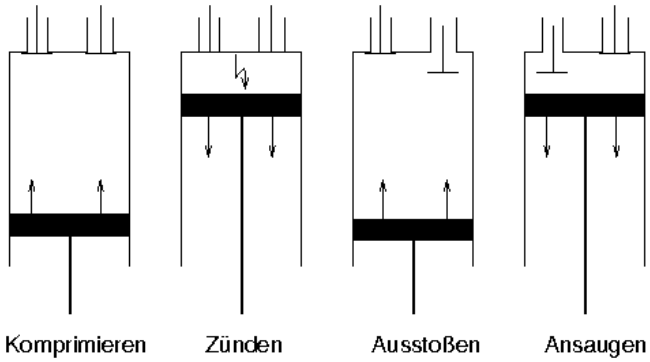
- Kreisprozess:

  Grundidee: Wärmezufuhr und -abfuhr bei konstantem Volumen (**Gleichraumprozess**)



  Zustandsänderungen im einzelnen

  1 → 2 isentrope Verdichtung der Luft (eigentlich des Gemischs)
  2 → 3 Zündung → sehr schnelle Drucksteigerung
  Wärmezufuhr näherungsweise bei konstantem Volumen
  3 → 4 isentrope Ausdehnung der Luft
  4 → 1 Druckminderung bei konstantem Volumen
  Ausstoßen der Abgase, Ansaugen des neuen Gemischs



  Verdichtungsverhältnis

  $\varepsilon := V_1 / V_2$

- Berechnung des thermischen Wirkungsgrads:

  Wärmemenge bei Isochore 2 → 3

  $Q_{23} = m\, c_V\, (T_3 - T_2)$

  Wärmemenge bei Isochore 4 → 1

  $Q_{41} = m\, c_V\, (T_1 - T_4)$

  Wirkungsgrad

$$\begin{aligned} \eta_{th} &= |W_k|/Q_{23} \\ &= 1 + Q_{41}/Q_{23} \\ &= 1 + \frac{\overline{c_V}|_{T_1}^{T_4}(T_1 - T_4)}{\overline{c_V}|_{T_2}^{T_3}(T_3 - T_2)} \end{aligned}$$

  für konstantes c_V:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

Isentrope 1 → 2

$$\begin{aligned} \frac{T_2}{T_1} &= \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1} \\ &= \epsilon^{\kappa-1} \end{aligned}$$

Isentrope 3 → 4

$$\begin{aligned} \frac{T_4}{T_3} &= \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{\kappa-1} \\ &= \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\kappa-1} \\ &= \frac{T_1}{T_2} \end{aligned}$$

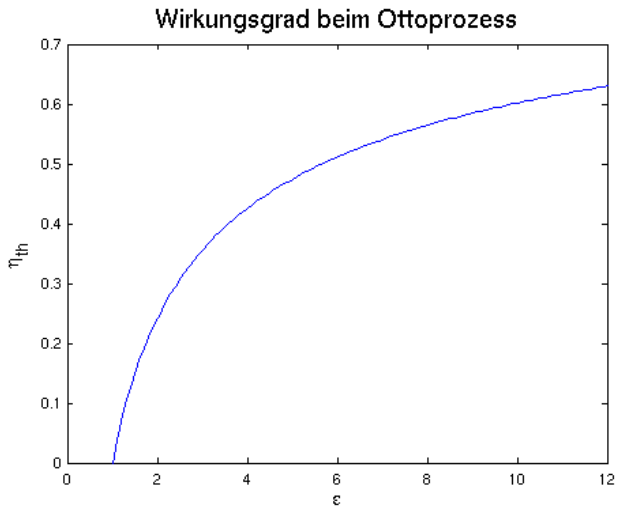
$$\Rightarrow \qquad T_4 = T_3 \frac{T_1}{T_2}$$

in Beziehung für η_{th} einsetzen →

$$\begin{aligned} \eta_{th} &= 1 - T_1/T_2 \\ &= 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} \end{aligned}$$

- Bemerkungen:

  Wirkungsgrad hängt (bei gegebenem Arbeitsmittel) nur vom Verdichtungsverhältnis ab



größtmögliches ε beschränkt durch Gefahr der Selbstentzündung des Gemischs (Klopfen)

gute Treibstoffe, elektronische Klopfregelung → ε = 10 ... 14

Verbrennung geschieht in der Praxis zwar schnell, aber dennoch nicht ganz isochor

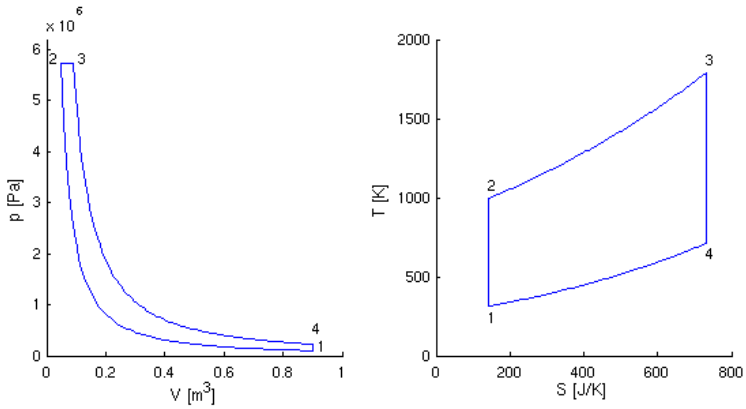
Diesel-Prozess

- Kreisprozess:

  Verbrennung des eingespritzten Kraftstoffs durch Selbstentzündung

  Wärmezufuhr geschieht langsamer als beim Otto-Prozess

  näherungsweise isobar (**Gleichdruckprozess**)



  zusätzliche Kenngröße Einspritzverhältnis

  $\varphi := V_3 / V_2$

- Berechnung des thermischen Wirkungsgrads:

  Wärmemengen

  $Q_{41} = m\, c_V\, (T_1 - T_4)$
  $Q_{23} = m\, c_p\, (T_3 - T_2)$
  $\quad = m\, \kappa\, c_V\, (T_3 - T_2)$

  Wirkungsgrad für konstantes c_V

$$\begin{aligned} \eta_{th} &= 1 + Q_{41}/Q_{23} \\ &= 1 - \frac{T_4 - T_1}{\kappa(T_3 - T_2)} \end{aligned}$$

  Isobare 2 → 3

  $T_3 / T_2 = V_3 / V_2 = \varphi$

  $\rightarrow \quad T_3 = \varphi\, T_2$

  Isentropen 3 → 4 und 1 → 2

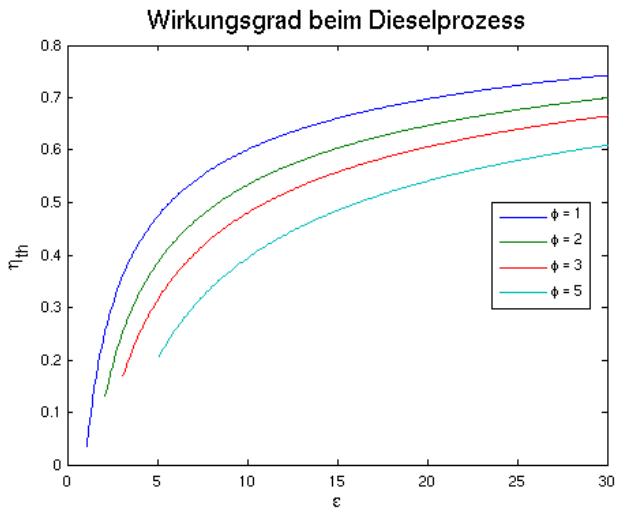
$$\begin{aligned} \frac{T_4}{T_3} &= \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{\kappa-1} \\ &= \left(\frac{V_3}{V_2} \cdot \frac{V_2}{V_4}\right)^{\kappa-1} \\ &= \varphi^{\kappa-1} \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\kappa-1} \\ &= \varphi^{\kappa-1} \frac{T_1}{T_2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \qquad T_4 &= T_3 \cdot \varphi^{\kappa-1} \frac{T_1}{T_2} \\ &= \varphi T_2 \cdot \varphi^{\kappa-1} \frac{T_1}{T_2} \\ &= \varphi^{\kappa} T_1 \end{aligned}$$

Einsetzen von T_3 und T_4 in η_{th}

$$\begin{aligned}\eta_{th} &= 1 - \frac{\varphi^\kappa T_1 - T_1}{\kappa(\varphi T_2 - T_2)} \\ &= 1 - \frac{T_1}{T_2}\frac{\varphi^\kappa - 1}{\kappa(\varphi - 1)} \\ &= 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}}\frac{\varphi^\kappa - 1}{\kappa(\varphi - 1)}\end{aligned}$$

Wirkungsgrad steigt mit zunehmendem ε und abnehmendem φ



typische Werte ε = 19 ... 23

- Aufgaben:

  Aufgabe 9

  Aufgabe 10

Thermodynamisches Verhalten realer Stoffe

- Aggregatzustände
- Zustandsgleichungen realer Gase
- Eigenschaften von Wasserdampf

Aggregatzustände

- Beobachtung:

  qualitativ verschiedene Stoffeigenschaften bei bestimmten Bereichen von Druck und Temperatur

  Beispiel Wasser bei Normaldruck: Wechsel bei 0 °C und 100 °C

  Aggregatzustände fest, flüssig, gasförmig

  verschiedene Aggregatzustände können koexistieren (mehrere Phasen)

  Beispiele:
  - Eis und Wasser bei Normaldruck und 0 °C
  - Wasser und Wasserdampf bei Normaldruck und 100 °C

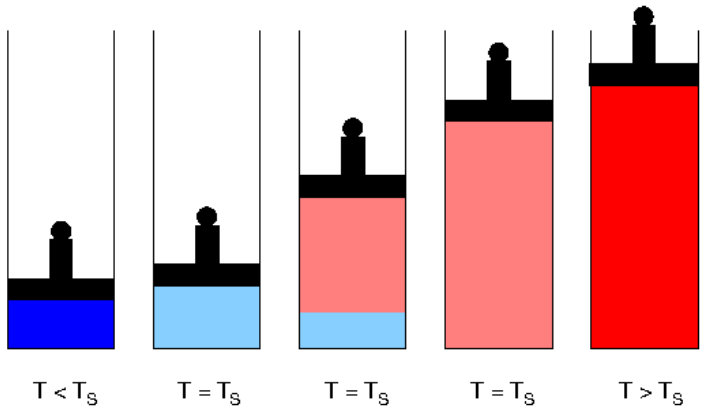
  Stoffeigenschaften oft für verschiedene Phasen sehr unterschiedlich, z.B. bei Wasser

T [°C]	Phase	c_p [kJ/(kg K)]
0	fest	1.93
0	flüssig	4.22
100	flüssig	4.19
100	gasförmig	2.03

- Verdampfen:

  Übergang von der flüssigen in die gasförmige Phase

  bei konstantem Druck:



  Siedetemperatur hängt vom Druck ab

  Zustand bei Siedetemperatur und gegebenem Druck
  - verschiedenes Volumen möglich → nicht eindeutig bestimmt
  - zwei Phasen (Wasser und Dampf)
  - weitere Zustandsgröße x (Dampfgehalt) zur Beschreibung

    $x = m_{Gas} / (m_{Gas} + m_{Flüssigkeit})$

- Technische Bezeichnungen bei Wasser:

  Nassdampf
  - t = 100 °C, x < 1
  - Gemisch aus Wasser und Wasserdampf

  Sattdampf oder **trockengesättigter Dampf**
  - t = 100 °C, x = 1
  - gerade kein Wasser mehr im Dampf

  Heißdampf oder **überhitzter Dampf**
  - t > 100 °C, x = 1

- reiner Wasserdampf

- **Spezifische Verdampfungsenthalpie** oder **Verdampfungswärme** r:

  erforderliche Energie, um 1 kg bei konstantem Druck zu verdampfen

  hängt vom Druck und vom Stoff ab

  ist 0 oberhalb einer bestimmten Temperatur

  für Wasser bei Normdruck r = 2256.5 kJ/kg

- Schmelzen:

  Übergang von der festen in die flüssige Phase

  Schmelztemperatur hängt nur schwach vom Druck ab

  bei Schmelztemperatur Koexistenz von flüssiger und fester Phase

  spezifische Schmelzenthalpie oder **Schmelzwärme** σ

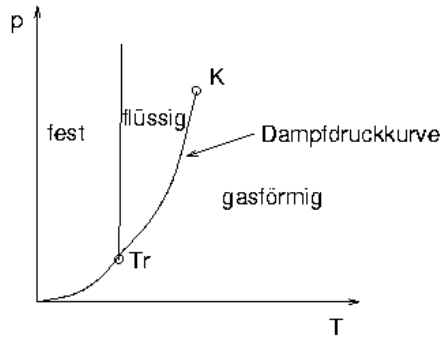
  für Wasser bei Normdruck σ = 333.5 kJ/kg

- Sublimieren:

  direkter Übergang von der festen in die gasförmige Phase bei sehr niedrigem Druck

- Darstellung im p-T-Diagramm:

  typisches Verhalten



  Dampfdruckkurve p(T): Druckabhängigkeit des Siedepunkts

  Tripelpunkt

  Koexistenz aller drei Phasen

  bei Wasser p_{Tr} = 6.117 mbar, T_{Tr} = 0.01 °C

  Kritischer Punkt

  Druck p_k und Temperatur T_k, ab der r = 0

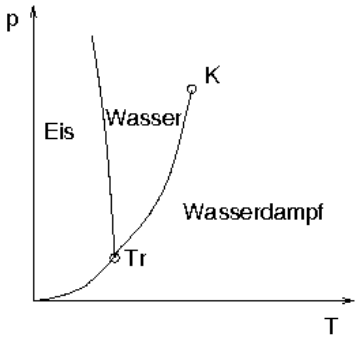
  darüber stetiger Übergang von Flüssigkeit zu Gas

  bei Wasser p_k = 220.64 bar, T_k = 373.95 °C

- Anomalie des Wassers:

  spezifisches Volumen von Eis größer als von Wasser bei 0 °C

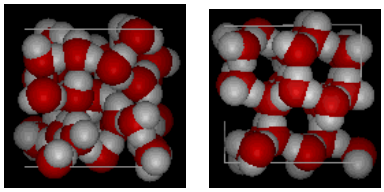
  Schmelztemperatur sinkt mit steigendem Druck



hartnäckiger Mythos: ermöglicht Schlittschuhlaufen

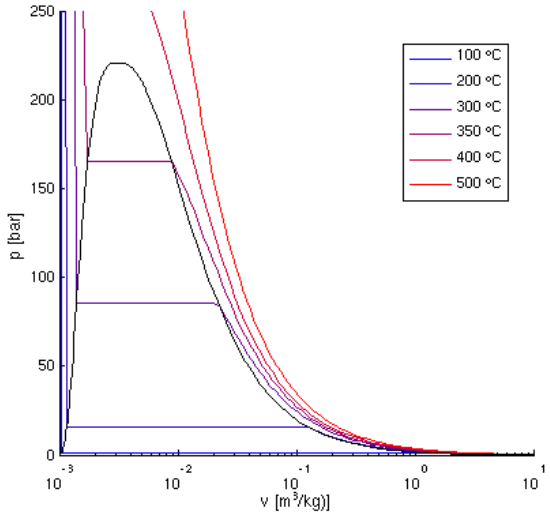
Ursache:

- Eis formt Kristalle mit großen Zwischenräumen → niedrige Dichte
- Wasser nahe 0 °C beginnt schon, sich zu Eisstrukturen zu ordnen → Dichte sinkt



- Darstellung im p-V-Diagramm:

  exemplarisch für Wasserdampf

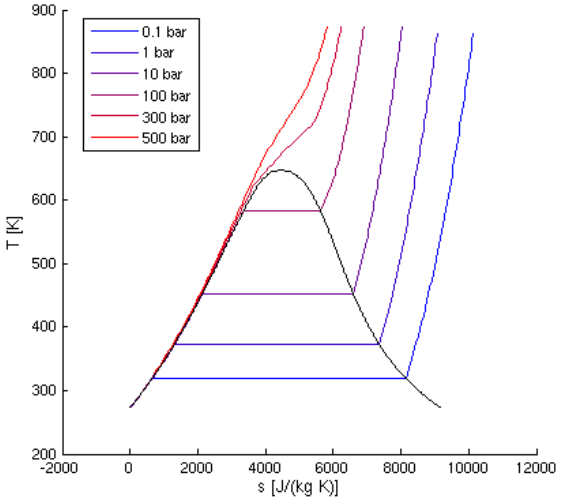


Isothermen

- T groß → ungefähr Hyperbeln
- im Nassdampfgebiet (Verdampfung): waagerechte Abschnitte, also isobar

- Darstellung im T-S-Diagramm:

  exemplarisch für Wasserdampf



Isobaren

- T groß → Verlauf wie beim idealen Gas
- im Nassdampfgebiet: waagerechte Abschnitte, also isotherm

- Aufgaben:

  Aufgabe 11

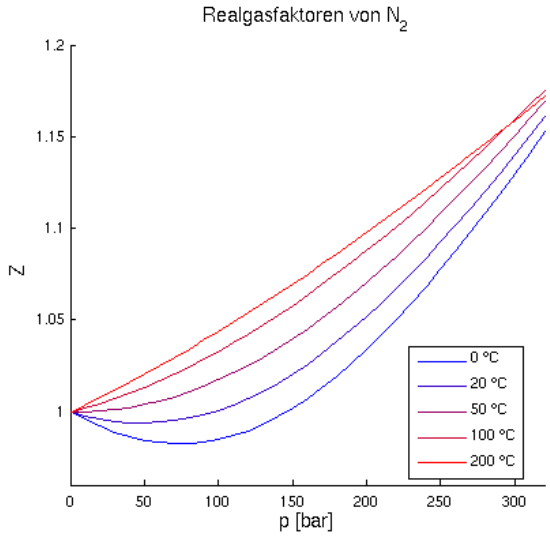
Zustandsgleichungen realer Gase

- Abweichung vom idealen Gas:

  Realgasfaktor

  $Z := p\,v / (R_i\,T)$

  als Funktion von p und T für Stickstoff



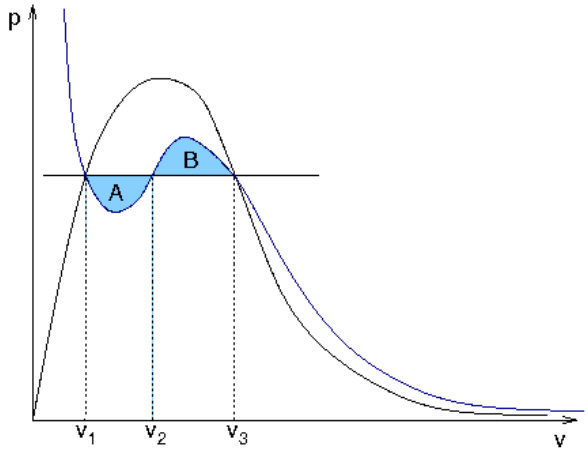
- Van-der-Waals-Gleichung:

  erweitert ideale Gasgleichung um zwei Korrekturterme
  - Anziehungskräfte zwischen Molekülen → Druckkorrektur
  - Eigenvolumen der Moleküle → Volumenkorrektur

  Damit

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = R_i T$$

  im p-V-Diagramm



  geschrieben als Gleichung für v

$$v^3 - \left(\frac{R_i T}{p} + b\right) v^2 + \frac{a}{p} v - \frac{ab}{p} = 0$$

  für kleine Werte von p
  - drei Lösungen (v_1,v_2, v_3 im Bild)
  - Kurve unphysikalisch
  - Flüssigkeit nicht berücksichtigt

- Ersetzen durch gerade Linie, so dass Flächen A und B gleich groß

für große Werte von p

- eine Lösung
- Grenzfall am kritischen Punkt
- kritische Temperatur: Wendepunkt mit waagerechter Tangente
- damit:

$a = 3\ p_k\ v_k^2$

$b = v_k/3$

$R_i = 8\ p_k\ v_k\ /\ (3\ T_k)$

- Virialgleichung:

empirischer Ansatz

$p = R_iT/v + B(T)/v^2 + C(T)/v^3 + D(T)/v^4 + ...$

B, C, D: **Virialkoeffizienten**

viele andere Gleichungen zur näherungsweisen Beschreibung realer Gase

in der Praxis: Messwerte als Tabellen oder Computerprogramme

- Aufgaben:

Aufgabe 12

Eigenschaften von Wasserdampf

- Zustandsgleichungen:

  ideale Gasgleichung nur bei sehr niedrigen Drücken hinreichend genau

  einfache Erweiterungen wie van-der-Waals-Gleichung in der Regel nicht wesentlich besser

  akzeptables Modell für Wasser: ideale Flüssigkeit (s.u.)

  für hohe Genauigkeitsanforderungen sehr aufwändige Gleichungen mit vielen Parametern

  von der IAPWS ("International Association for the Properties of Water and Steam") standardisiert
  - IAPWS-95 (gegenwärtig bestes Modell)
  - IAPWS-IF97 (Industriestandard, leicht vereinfacht, schneller zu berechnen)

- Dampftafeln:

  Werte als Funktion von p und T direkt ablesen
  - für Heissdampf: Tabelle 6
  - für Wasser: Tabelle 4
  - für Nassdampf: Tabelle 5

  auf der Dampfdruckkurve (Nassdampf)
  - p(T) ablesen (bzw. invers T(p))
  - Werte hängen vom Dampfgehalt x ab
  - Tabelle enthält Werte für x = 0 (v', h', s') und für x = 1 (v'', h'', s'')
  - Zwischenwerte einfach mit

    $v_x = v' + x\,(v'' - v')$ (analog für h_x, s_x)

  Werte bezogen auf Tripelpunkt
  - $p_{tr} = 0.0061$ bar
  - $t_{tr} = 0.01$ °C
  - $v'_{tr} = 1.00 \cdot 10^{-3}$ m^3/kg

  Festlegungen
  - innere Energie $u'_{tr} = 0$
  - Entropie $s'_{tr} = 0$

- Wasser als ideale Flüssigkeit:

  Näherungen
  - v = const.
  - c_p = const

  innere Energie hängt wegen v = const. nur von T ab, also

$$\begin{aligned} du &= c_V dT \\ dh &= du + vdp + pdv = du + vdp \\ &= c_V dT + vdp \end{aligned}$$

  andererseits gilt

$$dh = c_p dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T dp$$

  aus der Unabhängigkeit von dT und dp folgen

$$c_p = c_v \qquad \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = v$$

  kalorische Zustandsgleichung also

$$h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1) + v(p_2 - p_1)$$

spezifische Entropie

$$\begin{aligned} ds &= \frac{dq}{T} = \frac{dh}{T} - \frac{vdp}{T} \\ &= c_p \frac{dT}{T} \\ \Rightarrow \qquad s_2 - s_1 &= c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) \end{aligned}$$

- Aufgaben:

  Aufgabe 13

  Aufgabe 14

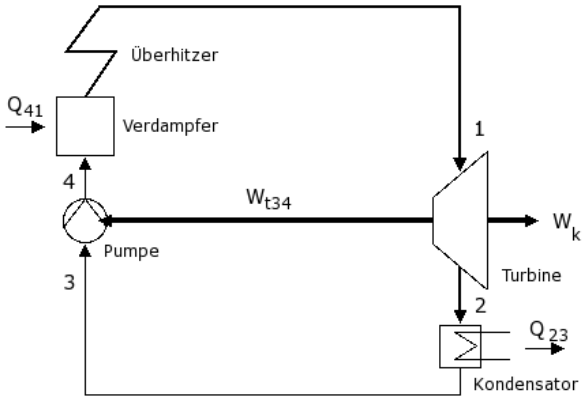
  Aufgabe 15

Kreisprozesse mit Dämpfen

- Clausius-Rankine-Prozess
- Verbesserungen des Wirkungsgrads
- Kaltdampfanlagen

Clausius-Rankine-Prozess

- Prinzip der Dampfkraftanlage:



Dampferzeuger (Dampfkessel)
- Wasser wird bei hohem Druck erhitzt, verdampft, der Dampf überhitzt

Dampfturbine
- heißer Dampf wird unter Arbeitsabgabe entspannt
- früher auch Kolbenmaschine (klassische Dampfmaschine, Lokomotive)

Kondensator
- Dampf wird abgekühlt → Wasser

Pumpe
- Wasser wird unter hohem Druck in Verdampfer geleitet

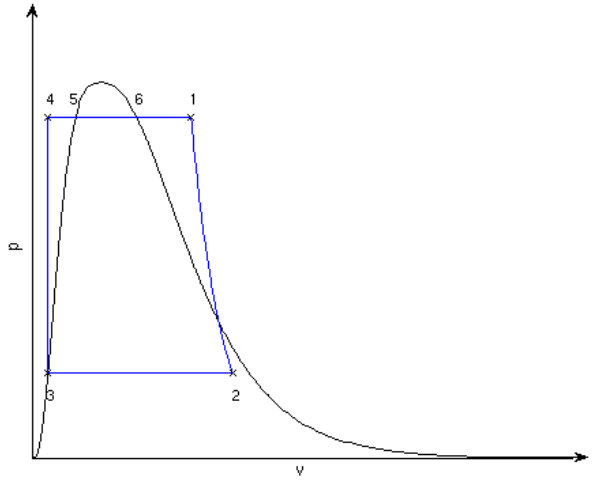
- Einsatz in Großkraftwerken als Dampfturbinen:

außer Dienst gestellter Niederdruck-Turbinenläufer aus dem Kernkraftwerk Unterweser.

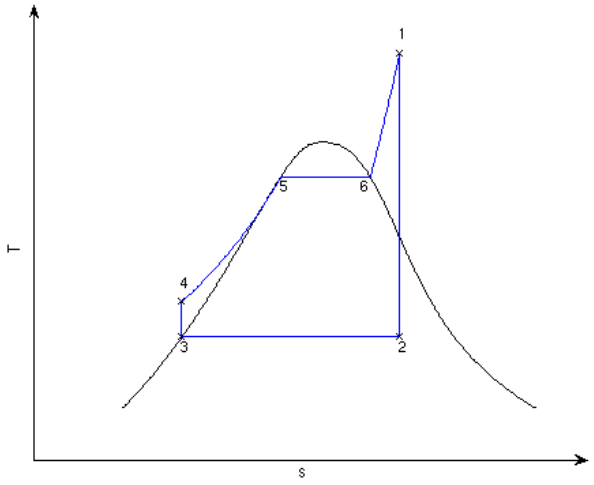
- Vergleichsprozess von Clausius-Rankine als Modell:

besteht aus 2 Isobaren und 2 Isentropen

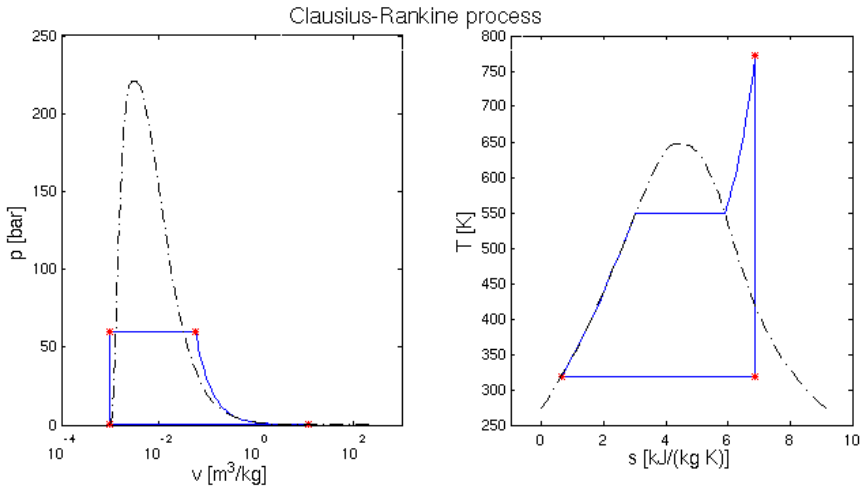
im p-V-Diagramm (schematisch)



im T-s-Diagramm (schematisch)



realistische Diagramme



Schritte

- 4 → 5 isobare Erhitzung des Wassers (Kessel)
- 5 → 6 isobare Verdampfung (Kessel)
- 6 → 1 isobare Überhitzung (Kessel)
- 1 → 2 isentrope Entspannung (Turbine)
- 2 → 3 isobarer Wärmeentzug (Kondensator)
- 3 → 4 isentrope Druckerhöhung (Pumpe)

- Thermischer Wirkungsgrad:

Kreisprozessarbeit W_k

- $W_k = Q_{41} + Q_{23}$

bei isobarem Prozess über Enthalpie

$Q_{23} = H_3 - H_2$

$Q_{41} = H_1 - H_4$

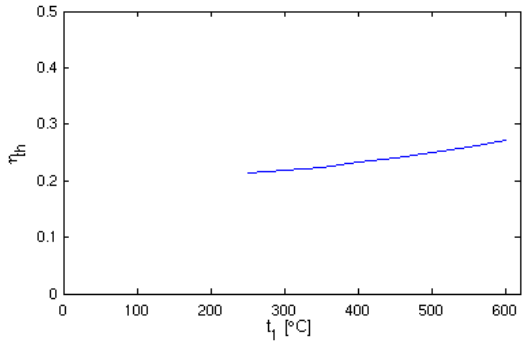
zugeführte Wärme Q_{41}

Wirkungsgrad daher

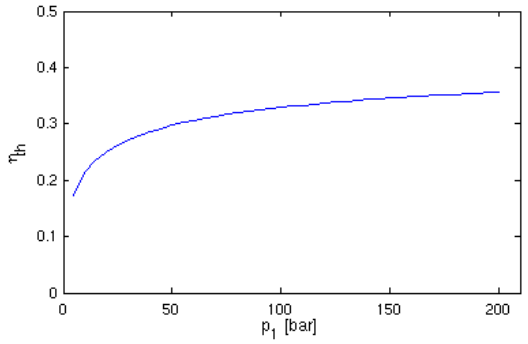
$$\eta_{th} = \frac{-W_k}{Q_{zu}} = 1 + \frac{H_3 - H_2}{H_1 - H_4}$$

Werte für H_i aus Enthalpie-Tabellen

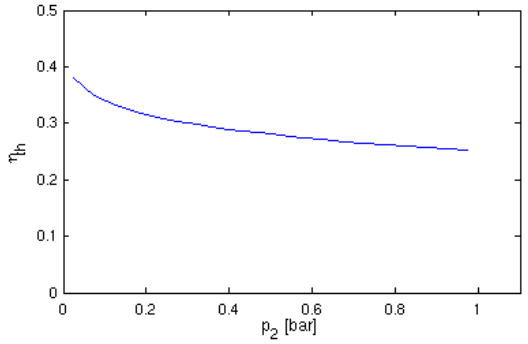
Abhängigkeit von Dampf-Temperatur t_1 (p_1 = 20 bar, p_2 = 1 bar)



Abhängigkeit von Dampfdruck p_1 (t_1 = 500 °C, p_2 = 1 bar)



Abhängigkeit von Gegendruck p_2 (p_1 = 20 bar, t_1 = 500 °C)



- Arbeitsverhältnis r_W:

  gegeben durch die abgegebene technische Arbeit

$$
\begin{aligned}
r_W &= \frac{W_k}{W_{t12}} \\
&= \frac{W_{t12} + W_{t34}}{W_{t12}} \\
&= 1 - \frac{W_{t34}}{|W_{t12}|} \\
&= 1 - \frac{H_4 - H_3}{H_1 - H_2}
\end{aligned}
$$

W_{t34} sehr klein → r_W fast 1

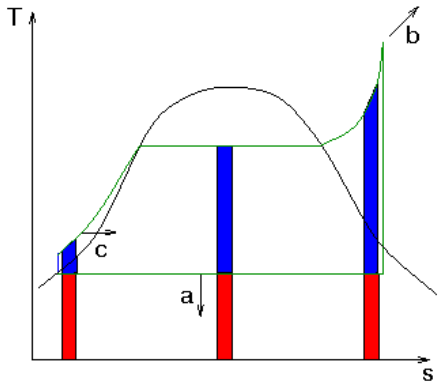
- Aufgaben:

  Aufgabe 16

Verbesserungen des Wirkungsgrads

- Grundlegende Ideen:

  "schlechte" Teilflächen minimieren



  Werte der Zustandsgrößen verbessern
  - Kondensationstemperatur verringern (a)
  - Dampftemperatur erhöhen (b)

  Abwärme nutzen
  - wirklicher Verlust Q_{ab} (bei gleichem W_k) wird kleiner
  - benötigte Wärme Q_{zu} wird kleiner
  - → Wirkungsgrad steigt

  Beispiele
  - Speisewasservorwärmung (interne Nutzung) (c)
  - Kraft-Wärme-Kopplung (externe Nutzung)

- Erniedrigung des Gegendrucks:

  niedrige Kondensationstemperatur → niedriger Dampfdruck im Kondensator

  meist durch Kühlwasser-Temperatur beschränkt

- Erhöhung der Dampftemperatur:

  starke Beanspruchung der Materialien

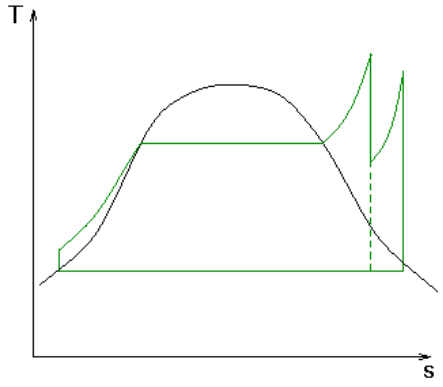
  Nassdampfgebiet →
  - Trennung von Wasser und Dampf nötig
  - z.B. dickwandige Kessel
  - Wirkungsgrad steigt
  - Wirtschaftlichkeit sinkt

  Ausweg: "Verdampfen" über dem kritischen Punkt

- Zwischenüberhitzung:

  Problem
  - zu hoher Wassergehalt bei Entspannung in Turbine

  Lösung
  - zunächst geringere Entspannung
  - Dampf danach wieder aufwärmen
  - weitere Entspannung in 2. Turbine

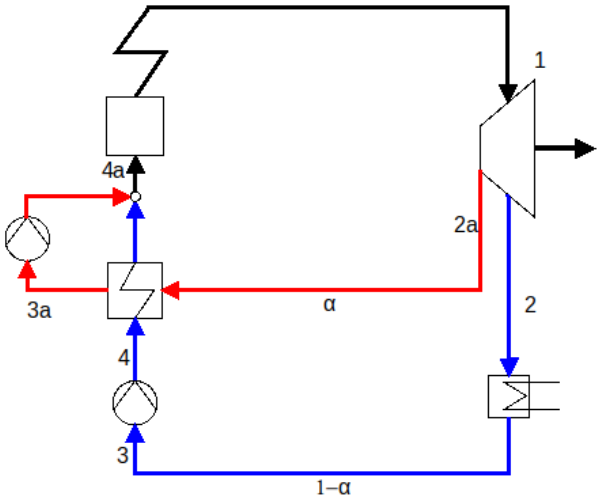


verbessert auch den Wirkungsgrad (bei geeigneten Zwischentemperaturen)

- Speisewasservorwärmung:

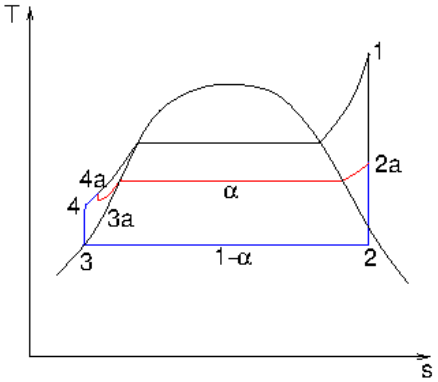
  sehr schlechter Wirkungsgradbereich bei Erwärmung des Wassers

  Verbesserung
  - Massenanteil α vom Dampf abzweigen
  - zum Vorwärmen des Wassers verwenden



ideale Wärmeübertragung
  - heißer Dampf gibt isobar die gesamte Wärme ab
  - wird nach adiabater Druckanpassung dem Wasser wieder hinzugefügt
  - in der Praxis Wärmeübertragung nur gegen endlichen Temperaturunterschied

im T-s-Diagramm mit farbigen Linien für die einzelnen Dampfanteile



Energiebilanz im 1. Vorwärmer

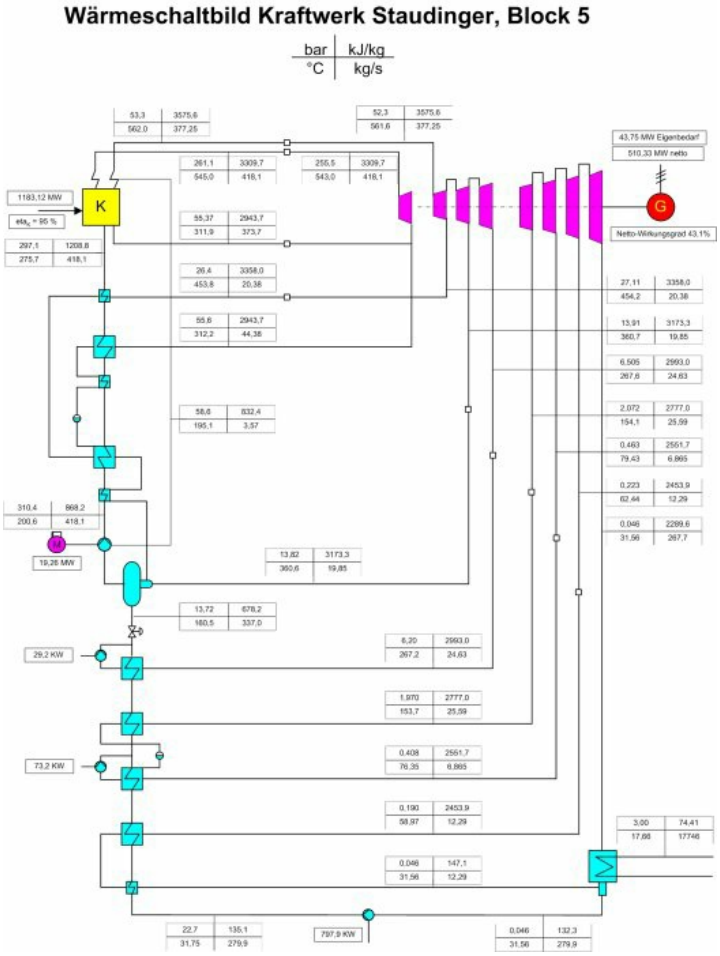
$$\alpha(h_{2a} - h_{3a}) = (1-\alpha)(h_{4a} - h_4)$$
$$\Rightarrow \qquad \alpha = \frac{h_{4a} - h_4}{h_{2a} - h_{3a} + h_{4a} - h_4}$$

in großen Anlagen bis zu zehn Vorwärmstufen

- Reale Dampfkraftanlagen:

  Gesamtwirkungsgrad enthält viele Verluste, z.B.
  - Verbrennungsverluste
  - Rohrleitungsverluste
  - Turbinenverluste
  - mechanische und elektrische Verluste bei der Energieumwandlung
  - Eigenbedarf für Pumpen etc.

  vereinfachtes Schaltbild eines 500 MW-Blocks eines Dampfkraftwerks



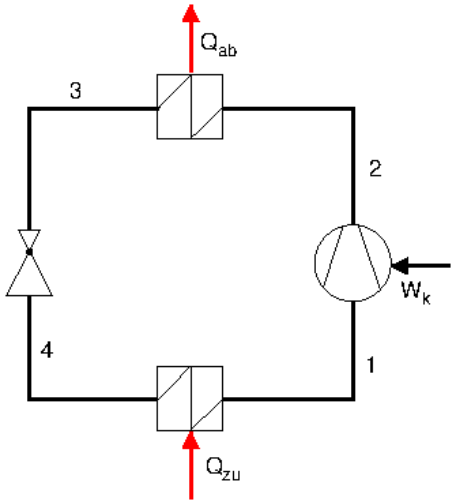
- Aufgaben:

  Aufgabe 17

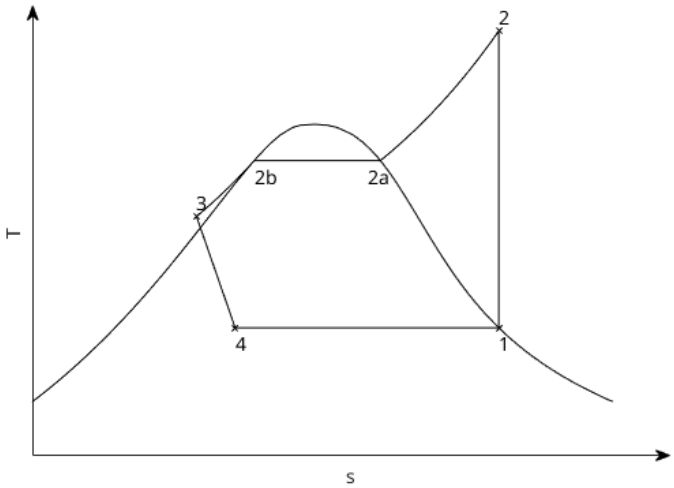
Kaltdampfanlagen

- Grundprozess der Kaltdampfanlage:

  i. W. linkslaufender Clausius-Rankine-Prozess



Prozessverlauf (im Bild qualitativ!)



1 → 2 reversible adiabate Verdichtung des Dampfs

2 → 3 reversible isobare Kühlung (mit Kondensation und weiterer Kühlung)

3 → 4 adiabate Drosselung, isenthalp (incl. teilweise Verdampfung)

4 → 1 reversible isobare Verdampfung

zusätzliche Kühlung von 2b → 3

- konkret durch Wärmetauscher mit Umgebung
- verbessert Leistungszahl
- entfällt oft

Drossel statt Turbine

- nutzbare technische Arbeit zu klein
- vereinfacht Gerät
- Turbine mit Nassdampf problematisch

Kreisprozessarbeit also einfach

$$W_k = W_{t12}$$

Kältemittel

- FCKWs (inzwischen verboten wegen Ozonschichtabbau)
- FKWs (sehr starke Treibhausgase), z. B. R134a (1,1,1,2-Tetrafluorethan)
- Ammoniak, Kohlendioxid (speziell in Großanlagen)
- Propan (speziell für Kleinanlagen)

ähnliches Prinzip: Eis-Speicher-Wärmepumpe

- verwendet Wasser-Glykol-Gemisch
- nutzt latente Wärme der Kristallisation (flüssig → fest) statt der Kondensation

- Anwendung Wärmepumpe:

Leistungszahl (**COP** = Coefficient Of Performance)

$$COP = \frac{-Q_{ab}}{W_k}$$

- bei Grundprozess (ohne Verluste)

$$COP_{max} = \varepsilon_W = \frac{-Q_{23}}{W_{t12}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$$

praktisch beschränkt durch Gütegrad einer Wärmepumpe

$$\eta_{WP} = \frac{COP}{COP_{max}}$$

- in der Praxis $\eta_{WP} \approx 50\%$

Herstellerangaben gemäß EU-Verordnung meist viel zu hoch

- speziell für Luft-Wärmepumpen bezogen auf T_1 = 7 °C, T_3 = 20 °C
- realistischer mit niedrigerem T_1 und Vorlauftemperatur $T_v = T_{2b}$ = 35 °C
- jahreszeitliche Schwankungen (vor allem von T_1) berücksichtigt in Jahresarbeitszahl JAZ (Seasonal Performance Factor SPF)

- Konkrete Berechnung eines Wärmepumpen-Prozesses:

Kältemittel Propan (C_3H_8)

- Zustandsgleichungen in Tabelle 7

idealer Prozess ohne Kühlung (also Drosselung von 2b direkt nach 4)

gegebene Werte

- T_1 = 10 °C (Erdwärmepumpe)
- p_2 = 14 bar

Strategie

- P1 ggb. durch T_1 und Sättigungskurve mit $x_1 = 1$
- P2 bestimmt durch p_2 und $s_2 = s_1$
- P2b ggb. durch $p_{2b} = p_2$ und Sättigungskurve mit $x_{2b} = 0$
- P4 bestimmt durch $T_4 = T_1$, $h_4 = h_{2b}$

Berechnung von Punkt 1 (Dampfdruckkurve x = 1)

- Ablesen liefert p_1 = 6.3661 bar, h_1 = 585.43 kJ/kg, s_1 = 2.3617 kJ/(kg K)

Berechnung von Punkt 2 (gasförmig)

- grundsätzlich: s-Tabelle mit p_2 und s_2 → T_2 durch Interpolieren
- Problem: Wert liegt zwischen Dampfdruckkurve und 1. Wert in der Tabelle
- Lösung: Tabelle bei p_2 durch Dampfdrucktabelle ergänzen

T	s	
40.868	2.3390	(aus Dampfdrucktabelle interpoliert)
T_2	2.3617	
50	2.4028	

- Interpolieren für s_2 liefert T_2 = 44.122 °C
- damit analog für Enthalpie: h_2 = 622.08 kJ/kg

Berechnung von Punkt 2b (Dampfdruckkurve x = 0)

- Interpolation liefert T_{2b} = 40.868 °C (klar, s.o.), h_3 = 309.72 kJ/kg

Berechnung von Punkt 4 (Dampfdruckkurve) klar, aber hier nicht nötig

mit den Enthalpien erhält man

COP = 8.523

- Aufgaben:

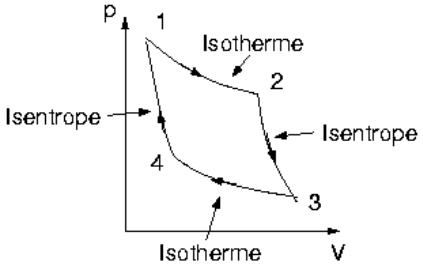
  Aufgabe 18

Aufgaben

- Aufgabe 1
- Aufgabe 2
- Aufgabe 3
- Aufgabe 4
- Aufgabe 5
- Aufgabe 6
- Aufgabe 7
- Aufgabe 8
- Aufgabe 9
- Aufgabe 10
- Aufgabe 11
- Aufgabe 12
- Aufgabe 13
- Aufgabe 14
- Aufgabe 15
- Aufgabe 16
- Aufgabe 17
- Aufgabe 18

Aufgabe 1

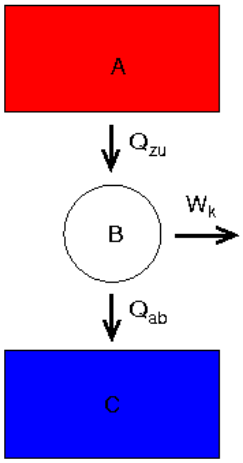
- Gegeben sei ein reversibler Carnot-Prozess mit 10 kg Luft. Die Zustandsbezeichnungen seien wie im Bild



- Der Anfangszustand sei gegeben durch p_1 = 20 bar, T_1 = 1000 K, die isotherme Expansion gehe zu p_2 = 10 bar, die folgende isentrope Expansion auf p_3 = 2 bar.

  a. Bestimmen Sie die Temperaturen, zu- und abgeführte Wärmen, die Nutzarbeit, den Wirkungsgrad und die Entropieänderungen am Gas.

  b. Berechnen Sie die Entropieänderungen an den Wärmereservoiren A und C, die bei den isothermen Prozessen benötigt werden. Wie groß ist die Summe aller Entropieänderungen am Gesamtsystem?



- Benötigte Werte:

  $\kappa = 1.40$

  $R_i = 0.287$ kJ/(kg K)

- Lösung

Aufgabe 2

- Betrachten Sie den Carnot-Prozess aus Aufgabe 1, aber mit zusätzlicher Reibung: Die Drücke und Temperaturen seien gleich, aber bei den Isothermen werden 10% der Volumenänderungsarbeit als zusätzliche Reibungswärme W_{diss} frei.

  a. Wie groß sind jetzt aufgenommene und abgegebene Wärmemengen, Nutzarbeit und Wirkungsgrad?

  b. Wie groß sind die Entropieänderungen am Gas, an den Wärmebädern und für das Gesamtsystem?

- Lösung

Aufgabe 3

- 10 m^3 Luft von 1 bar und 60 °C werden isochor auf 300 °C erwärmt. Wie ändert sich die Entropie?
- Nehmen Sie $\kappa = 1.40$ als konstant an.
- Lösung

Aufgabe 4

- In einem Wärmeübertrager mit einer Wärmeleistung von 1000 kW werden 1.9 kg/s Helium, das mit 10 °C einströmt, isobar und reversibel bei einem Druck von 15 bar erwärmt. Wie ändert sich der Entropiestrom?
- Lösung

Aufgabe 5

- Ein adiabater Behälter mit 10 l Volumen enthalte Luft von 0.2 bar und 20 °C. Er wird befüllt mit Außenluft (auch 20 °C, 1 bar), bis der Innendruck 0.8 bar beträgt.
  a. Welche Temperatur hat das Gas nach dem Befüllen?
  b. Wie stark hat die Entropie durch das Befüllen zugenommen?
- Verwenden Sie konstantes $\kappa = 1.40$.
- Lösung

Aufgabe 6

- 1000 kg Methan sollen in einem Vorkühler zur Verflüssigung von -20 °C auf -80 °C bei konstantem Druck gekühlt werden. Wie ändert sich dabei die Exergie des Methans, wenn die Bezugstemperatur 20 °C beträgt?
- Betrachten Sie Methan näherungsweise als ideales Gas mit einer spezifischen Wärmekapazität von

  c_p = 2.1562 kJ/(kg K)
- Lösung

Aufgabe 7

- Eine Gasturbine arbeite mit Luft nach dem Joule-Prozess zwischen den Drücken 1 bar und 6 bar. Die Anfangstemperatur betrage t_1 = 30 °C, die höchste Temperatur t_3 = 650 °C. Rechnen Sie mit einem konstanten Wert κ = 1.40.

  a. Bestimmen Sie p und T für alle Eckpunkte.

  b. Berechnen Sie den thermischen Wirkungsgrad der Anlage.

  c. Bestimmen Sie das Arbeitsverhältnis r_W.

- Lösung

Aufgabe 8

- Wiederholen Sie Aufgabe 7, berücksichtigen Sie aber diesmal die Temperaturabhängigkeit von κ.
- Hinweise:

  Nehmen Sie zunächst die Zwischentemperaturen aus Aufgabe 7 an und berechnen Sie die zugehörigen Werte der mittleren spezifischen Wärmekapazitäten und daraus ein mittleres κ längs der Isentropen.

  Mit diesen Werten können Sie nun neue Werte für die Temperaturen längs der Isentropen bestimmen. Bei zu großer Abweichung von den Ausgangswerten müssten Sie nun iterieren. Darauf soll aber hier verzichtet werden.

  Für die neuen Temperaturwerte bestimmen Sie die spezifischen Wärmekapazitäten längs der Isobaren und daraus den thermischen Wirkungsgrad.

  Werte für die isobare spezifische Wärmekapazität von Luft entnehmen Sie der Tabelle

- Lösung

Aufgabe 9

- In einem Ottomotor darf bei der Verdichtung das Gas von 30 °C maximal auf 490 °C erwärmt werden. Wie groß sind dann das Verdichtungsverhältnis und der Wirkungsgrad?
- Gehen Sie von Luft mit $\kappa = 1.40$ aus.
- Lösung

Aufgabe 10

- Ein Dieselmotor mit einem Verdichtungsverhältnis $\varepsilon = 18$ starte bei $T_1 = 343$ K, $p_1 = 1$ bar und erreiche als höchste Temperatur $T_3 = 1973$ K.
- Bestimmen Sie (mit $\kappa = 1.40$) Druck und Temperatur aller 4 Endpunkte des Kreisdiagramms, das Einspritzverhältnis und den Wirkungsgrad.
- Vergleichen Sie mit den Werten des Otto-Motors aus Aufgabe 20 von Thermodynamik 1.
- Lösung

Aufgabe 11

- In einen gut wärmeisolierten Einspritzkondensator werden 1500 kg Wasserdampf von 100 °C durch Einspritzen von 14300 kg kaltem Wasser isobar (bei Normdruck) kondensiert. Das Gemisch verlässt den Kondensator mit 75 °C. Welche Temperatur hat das eingespritzte Wasser?
- Wiederholen Sie die Aufgabe für Wasserdampf von 120 °C und sonst gleichen Werten.
- Hinweis:

  Nehmen Sie die spezifische Wärmekapazität von Wasser und Wasserdampf näherungsweise temperaturunabhängig an mit

  c_W = 4.186 kJ/(kg K)

  c_D = 1.86 kJ/(kg K)
- Lösung

Aufgabe 12

- Nehmen Sie an, dass Wasserdampf näherungsweise der van-der-Waals-Gleichung genügt.

  a. Bestimmen Sie die Parameter a, b der van-der-Waals-Gleichung aus den kritischen Werten

     $p_k = 220.64$ bar

     $v_k = 3.106 \cdot 10^{-3}$ m^3/kg

  b. Berechnen Sie die Temperaturen für die folgenden Werte von p und v, einmal mit der idealen Gasgleichung, einmal mit der van-der-Waals-Gleichung, und vergleichen Sie die Ergebnisse mit den gemessenen Werten.

p [bar]	v [m^3/kg]	$t_{Messung}$[°C]
1	1.696	100
1	2.172	200
1	2.639	300
4	0.5343	200
10	0.2060	200

- Verwenden Sie die Molmasse des Wassers

  $M_{H_2O} = 18.0153$ g/mol

- Lösung

Aufgabe 13

- 80 m^3 Nassdampf mit x = 0.6 stehen unter einem Druck von 50 bar. Bestimmen Sie
  a. das spezifische Volumen des Nassdampfs
  b. die Masse des Nassdampfs und des darin enthaltenen Wassers
  c. die spezifische Enthalpie des Nassdampfs.
- Lösung

Aufgabe 14

- 25000 kg/h Dampf werden in einem Zwischenerhitzer zwischen Hochdruck- und Niederdruckteil einer Turbine bei einem konstanten Druck von 4 bar reversibel von 150 °C auf 450 °C erwärmt. Welche Wärmeleistung ist dem Dampf zuzuführen?

- Lösung

Aufgabe 15

- 100 kg Heißdampf von 450 °C und 10 bar werden adiabatisch und reversibel auf 1.5 bar entspannt.
  a. Auf welchen Wert sinkt die Temperatur?
  b. Wieviel technische Arbeit wird dabei vom Dampf abgegeben?
- Lösung

Aufgabe 16

- Der Dampf verlasse den Kessel einer Dampfkraftanlage mit 60 bar und 500 °C. Der Druck im Kondensator betrage 0.1 bar. Wie groß sind thermischer Wirkungsgrad und Arbeitsverhältnis?
- Lösung

Aufgabe 17

- Ein Dampfkraftwerk arbeite mit Dampf von 100 bar und 600 °C bei einem Gegendruck von 0.1 bar. Bei 10 bar wird der Turbine soviel Dampf zur Vorwärmung entnommen, dass das Speisewasser auf 150 °C erwärmt wird.

  a. Bestimmen Sie die spezifische Enthalpie an den Punkten 1, 2, 3, 4 und daraus den thermischen Wirkungsgrad und das Arbeitsverhältnis der Anlage ohne Vorwärmung.

  b. Ermitteln Sie die spezifische Enthalpie des abgezweigten Dampfes an den Stellen 2a, 3a, 4a und seinen Massenanteil α.

  c. Wie groß sind die spez. technischen Arbeiten, die zugeführte spez. Wärme sowie der thermische Wirkungsgrad und das Arbeitsverhältnis der Anlage insgesamt?

- Lösung

Aufgabe 18

- Der durchgerechnete Beispielprozess einer Wärmepumpe wird um eine Kühlung bis zur Temperatur T_3 = 19 °C ergänzt.
  a. Wie groß ist die Leistungszahl nun?
  b. Wieviel (Massen-)Prozent des Kühlmittels sind nach der Drosselung schon verdampft?
  c. Wieviel Kühlmittel (kg/s) benötigt man, um eine Heizleistung von 30 kW zu erreichen? Gehen Sie von einem Gütegrad von 50% aus.
- Lösung

Anhang

- Positivität der Entropie beim Befüllen
- Tabellen
- Nachweise

Positivität der Entropie beim Befüllen

- Die gesamte Entropieänderung ergibt sich aus den Entropieänderungen der beiden Gasanteile m_1 und m_a zu

$$\Delta S = m_1 c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - m_1 R_i \ln\frac{p_2}{p_1} + m_a c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - m_a R_i \ln\frac{p_2}{p_a}$$

- Mit

$$c_p = R_i \frac{\kappa}{\kappa - 1}$$

und den Abkürzungen

$$x := \frac{m_1}{m_1 + m_a}, \qquad y := \frac{m_a}{m_1 + m_a}$$

$$\Rightarrow \qquad x + y = 1, \qquad \frac{y}{x} = \frac{m_a}{m_1}$$

hat man

$$\begin{aligned}
\frac{\Delta S}{R_i(m_1+m_a)} &= x\frac{\kappa}{\kappa-1}\ln\frac{T_2}{T_1} - x\ln\frac{p_2}{p_1} + y\frac{\kappa}{\kappa-1}\ln\frac{T_2}{T_1} - y\ln\frac{p_2}{p_a} \\
&= \frac{\kappa}{\kappa-1}\ln\frac{T_2}{T_1} - x\ln\frac{p_2}{p_1} + y\ln\frac{p_a}{p_2} \\
&\geq \frac{\kappa}{\kappa-1}\ln\frac{T_2}{T_1} - x\ln\frac{p_2}{p_1} \\
&= \frac{\kappa}{\kappa-1}\ln\left(\frac{1+\kappa\frac{y}{x}}{1+\frac{y}{x}}\right) - x\ln\left(1+\kappa\frac{y}{x}\right) \\
&= \left(\frac{\kappa}{\kappa-1} - x\right)\ln\left(1+\kappa\frac{y}{x}\right) - \frac{\kappa}{\kappa-1}\ln\left(1+\frac{y}{x}\right) \\
&= \left(\frac{\kappa}{\kappa-1} - x\right)\ln\left(1+\kappa\frac{y}{x}\right) + \frac{\kappa}{\kappa-1}\ln x \\
&= \left(\frac{\kappa}{\kappa-1} - x\right)\ln(x+\kappa y) + x\ln x
\end{aligned}$$

- Zur Abschätzung des Logarithmus geht man aus von

$$f(x) := x\ln x + 1 - x \geq 0$$

Das gilt, da

$$f'(x) = \ln x$$

f ist also monoton fallend für x < 1, monoton steigend für x > 1. Sein Minimum ist daher f(1) = 0.

Daher hat man

$$\ln x \geq 1 - \frac{1}{x}$$

- Mit dieser Abschätzung für beide auftretenden Logarithmen erhält man

$$
\begin{aligned}
\frac{\Delta S}{R_i(m_1+m_a)} &\geq \left(\frac{\kappa}{\kappa-1}-x\right)\left(1-\frac{1}{x+\kappa y}\right)+x-1 \\
&= \frac{1}{x+\kappa y}\left[\left(\frac{\kappa}{\kappa-1}-x\right)(-y+\kappa y)-y(x+\kappa y)\right] \\
&= \frac{y}{x+\kappa y}\left[\kappa-x(\kappa-1)-x-\kappa y\right] \\
&= \frac{y}{x+\kappa y}(\kappa-\kappa x-\kappa y) \\
&= 0
\end{aligned}
$$

Tabellen

- Stoffwerte von Gasen
- Wärmekapazität von H_2, N_2, O_2, CO
- Wärmekapazität von H_2O, CO_2, SO_2, Luft
- Wasserdampftafel, Wasser
- Wasserdampftafel, Nassdampf
- Wasserdampftafel, Heißdampf
- Eigenschaften von Propan

Tabelle 1

Stoffwerte von Gasen

Auszug von [1], Tabelle T2.1

Gas	Chemisches Symbol	Molares Normvolumen Vmn bei 0 Â°C, 1.01325 bar	Molare Masse M	Spezielle Gaskonstante R_i	Dichte im Normzustand ρ_n bei 0 Â°C, 1.01325 bar	Molare und spezifische WÃ¤rmekapazitÃ¤t bei 0 Â°C und idealem Gaszustand				$\kappa=c_p/c_v$ bei 0 Â°C und idealem Gaszustand
						C_p	c_p	C_v	c_v	
		m3/kmol	kg/kmol	J/kg K	kg/m3	kJ/kmol K	kJ/kg K	kJ/kmol K	kJ/kg K	
Helium	He	22.426	4.0026	2077.3	0.17848	20.7859	5.1931	12.4714	3.1158	1.667
Argon	Ar	22.392	39.948	208.1	1.784	20.7858	0.5203	12.4713	0.3122	1.667
Wasserstoff	H_2	22.428	2.0159	4124.5	0.08988	28.6228	14.2003	20.3083	10.0758	1.409
Stickstoff	N_2	22.403	28.0134	296.8	1.2504	29.0967	1.0389	20.7823	0.7421	1.4
Sauerstoff	O_2	22.392	31.9988	259.8	1.429	29.2722	0.915	20.9578	0.6552	1.397
Luft (trocken)	-	22.4	28.966	287.0	1.293	29.0743	1.0043	20.7598	0.7171	1.401
Kohlenmonoxid	CO	22.4	28.0104	296.8	1.2505	29.1242	1.0403	20.8097	0.7435	1.399
Kohlendioxid	$C0_2$	22.261	44.0098	188.9	1.977	35.9336	0.8169	27.6191	0.628	1.301
Schwefeldioxid	$S0_2$	21.856	64.0588	129.8	2.931	38.9666	0.6092	30.6521	0.4794	1.271
Ammoniak	NH_3	22.065	17.0305	488.2	0.7718	35.0018	2.0557	26.6873	1.5675	1.312
Methan	CH_4	22.36	16.043	518.3	0.7175	34.5667	2.1562	26.2522	1.6379	1.316
Ethin (Acetylen)	C_2H_2	22.226	26.038	319.3	1.1715	39.3536	1.5127	31.0391	1.1934	1.268
Ethen (Ethylen)	C_2H_4	22.245	28.053	296.4	1.2611	45.1842	1.6119	36.8697	1.3155	1.225
Ethan	C_2H_6	22.191	30.07	276.5	1.355	51.9556	1.7291	43.6411	1.4526	1.19

Tabelle 2

Mittlere isobare molare und isobare spezifische Wärmekapazität, bezogen auf 0 °C

Auszug von [1], Tabelle T2.2a

	H2		N2		O2		CO	
Temperatur	C_p	c_p	C_p	c_p	C_p	c_p	C_p	c_p
°C	kJ/kmol K	kJ/kg K	kJ/kmol K	kJ/ kg K	kJ/kmol K	kJ/ kg K	kJ/kmol K	kJ/kg K
0	28.62	14.2	29.1	1.039	29.27	0.915	29.12	1.04
100	28.94	14.36	29.12	1.039	29.53	0.9227	29.16	1.041
200	29.07	14.42	29.2	1.042	29.92	0.9351	29.29	1.046
300	29.14	14.45	29.35	1.048	30.39	0.9496	29.5	1.053
400	29.19	14.48	29.56	1.055	30.87	0.9646	29.77	1.063
600	29.32	14.54	30.11	1.075	31.75	0.9922	30.41	1.086
800	29.52	14.64	30.69	1.096	32.49	1.0154	31.05	1.109
1000	29.79	14.78	31.25	1.116	33.11	1.0347	31.65	1.13
1200	30.12	14.94	31.77	1.134	33.62	1.0508	32.17	1.149
1400	30.47	15.12	32.22	1.15	34.07	1.0648	32.63	1.165
1600	30.84	15.3	32.62	1.164	34.47	1.0772	33.03	1.179
1800	31.21	15.48	32.97	1.177	34.83	1.0885	33.38	1.192
2000	31.58	15.66	33.28	1.188	35.17	1.099	33.69	1.203
2200	31.93	15.84	33.55	1.198	35.48	1.1089	33.96	1.212
2500	32.44	16.09	33.91	1.21	35.93	1.1229	34.31	1.225
3000	33.22	16.48	34.4	1.228	36.62	1.1443	34.79	1.242

Tabelle 3

Mittlere isobare molare und isobare spezifische Wärmekapazität, bezogen auf 0 °C und Gaszustand

Auszug von [1], Tabelle T2.2b

	H2O		CO2		SO2		Luft	
Temperatur	C_p	c_p	C_p	c_p	C_p	c_p	C_p	c_p
°C	kJ/kmol K	kJ/kg K	kJ/kmol K	kJ/ kg K	kJ/kmol K	kJ/ kg K	kJ/kmol K	kJ/kg K
0	33.47	1.858	35.93	0.8169	38.97	0.6092	29.07	1.004
100	33.71	1.871	38.17	0.8673	40.71	0.6355	29.15	1.007
200	34.08	1.892	40.13	0.9118	42.43	0.6624	29.3	1.012
300	34.54	1.917	41.83	0.9505	43.99	0.6868	29.52	1.019
400	35.05	1.945	43.33	0.9846	45.35	0.7079	29.79	1.029
600	36.15	2.007	45.85	1.0417	47.55	0.7423	30.41	1.05
800	37.34	2.073	47.86	1.0875	49.2	0.768	31.03	1.071
1000	38.56	2.14	49.5	1.1248	50.47	0.7879	31.6	1.091
1200	39.76	2.207	50.85	1.1555	51.49	0.8038	32.11	1.109
1400	40.91	2.271	51.98	1.1811	52.31	0.8167	32.57	1.124
1600	42	2.332	52.93	1.2027	53	0.8273	32.97	1.138
1800	43.03	2.388	53.74	1.2211	53.59	0.8365	33.32	1.15
2000	43.97	2.441	54.44	1.237	54.09	0.8444	33.64	1.161
2200	44.86	2.49	55.06	1.251	54.54	0.8514	33.93	1.171
2500	46.07	2.557	55.85	1.269	55.13	0.8606	34.31	1.185
3000	47.82	2.654	56.91	1.2932	55.95	0.8734	34.84	1.203

Tabelle 4

Wasserdampftafel, Wasser

Daten entsprechen dem IAPWS95-Standard, sie wurden mit Hilfe der WATER95-Bibliothek berechnet.

p	t	v	h	s	t	v	h	s
bar	°C	m^3/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)	°C	m^3/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)
0.2	0	0.0010002	-0.022	-0.0002	40	0.0010079	167.544	0.5724
	20	0.0010018	83.931	0.2965	60	0.0010171	251.180	0.8313
0.4	0	0.0010002	-0.001	-0.0002	40	0.0010079	167.562	0.5724
	20	0.0010018	83.950	0.2965	60	0.0010171	251.197	0.8313
0.6	0	0.0010002	0.019	-0.0002	60	0.0010171	251.214	0.8313
	20	0.0010018	83.968	0.2965	80	0.0010290	335.022	1.0756
	40	0.0010079	167.580	0.5724				
0.8	0	0.0010002	0.039	-0.0001	60	0.0010171	251.231	0.8313
	20	0.0010018	83.987	0.2965	80	0.0010290	335.038	1.0756
	40	0.0010079	167.597	0.5724				
1	0	0.0010002	0.060	-0.0001	60	0.0010171	251.248	0.8313
	20	0.0010018	84.006	0.2965	80	0.0010290	335.054	1.0755
	40	0.0010078	167.615	0.5724				
2	0	0.0010001	0.162	-0.0001	80	0.0010290	335.134	1.0755
	20	0.0010018	84.100	0.2964	100	0.0010434	419.240	1.3071
	40	0.0010078	167.704	0.5723	120	0.0010603	503.813	1.5279
	60	0.0010170	251.332	0.8312				
4	0	0.0010000	0.365	-0.0001	80	0.0010289	335.293	1.0753
	20	0.0010017	84.288	0.2964	100	0.0010433	419.390	1.3070
	40	0.0010077	167.881	0.5722	120	0.0010602	503.953	1.5277
	60	0.0010170	251.500	0.8311	140	0.0010797	589.187	1.7392
6	0	0.0009999	0.569	-0.0001	80	0.0010288	335.452	1.0752
	20	0.0010016	84.476	0.2964	100	0.0010432	419.541	1.3068
	40	0.0010076	168.058	0.5722	120	0.0010601	504.094	1.5275
	60	0.0010169	251.667	0.8310	140	0.0010796	589.316	1.7390
8	0	0.0009998	0.772	-0.0001	100	0.0010431	419.691	1.3067
	20	0.0010015	84.665	0.2963	120	0.0010600	504.234	1.5274
	40	0.0010075	168.235	0.5721	140	0.0010795	589.446	1.7388
	60	0.0010168	251.835	0.8309	160	0.0011019	675.579	1.9423
	80	0.0010287	335.611	1.0751				
10	0	0.0009997	0.976	-0.0001	100	0.0010430	419.841	1.3065
	20	0.0010014	84.853	0.2963	120	0.0010599	504.375	1.5272
	40	0.0010074	168.412	0.5720	140	0.0010794	589.575	1.7386
	60	0.0010167	252.003	0.8308	160	0.0011017	675.696	1.9421
	80	0.0010286	335.771	1.0750				
20	0	0.0009992	1.992	-0.0000	100	0.0010425	420.593	1.3057
	20	0.0010009	85.793	0.2961	120	0.0010593	505.079	1.5263
	40	0.0010070	169.298	0.5716	140	0.0010787	590.224	1.7375
	60	0.0010162	252.843	0.8302	160	0.0011010	676.280	1.9409
	80	0.0010281	336.567	1.0743	200	0.0011561	852.451	2.3298
40	0	0.0009982	4.021	0.0001	120	0.0010582	506.488	1.5245

	20	0.0010000	87.670	0.2956	140	0.0010775	591.525	1.7354
	40	0.0010061	171.068	0.5708	160	0.0010996	677.453	1.9385
	60	0.0010153	254.521	0.8292	200	0.0011541	853.265	2.3267
	80	0.0010272	338.159	1.0730	240	0.0012284	1037.611	2.7005
	100	0.0010415	422.097	1.3042				
60	0	0.0009972	6.043	0.0002	120	0.0010571	507.899	1.5227
	20	0.0009991	89.543	0.2952	140	0.0010762	592.830	1.7334
	40	0.0010052	172.835	0.5701	160	0.0010981	678.633	1.9362
	60	0.0010144	256.199	0.8281	200	0.0011521	854.095	2.3235
	80	0.0010263	339.751	1.0717	240	0.0012253	1037.817	2.6961
	100	0.0010405	423.602	1.3026				
80	0	0.0009962	8.059	0.0003	120	0.0010560	509.312	1.5209
	20	0.0009982	91.414	0.2948	140	0.0010750	594.139	1.7313
	40	0.0010044	174.601	0.5693	160	0.0010967	679.818	1.9339
	60	0.0010136	257.875	0.8271	200	0.0011501	854.938	2.3205
	80	0.0010253	341.343	1.0704	240	0.0012222	1038.059	2.6919
	100	0.0010395	425.109	1.3011	280	0.0013282	1236.020	3.0631
100	0	0.0009952	10.069	0.0003	120	0.0010549	510.728	1.5191
	20	0.0009973	93.281	0.2943	140	0.0010738	595.452	1.7293
	40	0.0010035	176.365	0.5685	160	0.0010954	681.009	1.9315
	60	0.0010127	259.551	0.8260	200	0.0011482	855.796	2.3174
	80	0.0010244	342.936	1.0691	240	0.0012192	1038.335	2.6876
	100	0.0010385	426.616	1.2996	280	0.0013226	1235.031	3.0565
200	0	0.0009904	20.033	0.0005	140	0.0010679	602.067	1.7194
	20	0.0009929	102.566	0.2921	160	0.0010886	687.048	1.9203
	40	0.0009992	185.156	0.5646	200	0.0011390	860.268	2.3027
	60	0.0010084	267.918	0.8208	240	0.0012053	1040.174	2.6676
	80	0.0010199	350.899	1.0627	280	0.0012978	1231.504	3.0265
	100	0.0010337	434.168	1.2920	320	0.0014450	1445.485	3.3996
	120	0.0010496	517.839	1.5105	360	0.0018248	1740.096	3.8787

Tabelle 5

Wasserdampftafel, Nassdampf

Daten entsprechen dem IAPWS95-Standard, sie wurden mit Hilfe der WATER95-Bibliothek berechnet.

t	p	v'	v''	h'	h''	s'	s''
°C	bar	m^3/kg	m^3/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)	kJ/(kg K)
0.01	0.0061	0.0010002	205.9912	0.00	2500.92	0.0000	9.1555
1.00	0.0066	0.0010001	192.4388	4.18	2502.73	0.0153	9.1291
2.00	0.0071	0.0010001	179.7578	8.39	2504.56	0.0306	9.1027
3.00	0.0076	0.0010001	168.0084	12.60	2506.40	0.0459	9.0765
4.00	0.0081	0.0010001	157.1158	16.81	2508.23	0.0611	9.0505
5.00	0.0087	0.0010001	147.0113	21.02	2510.06	0.0763	9.0248
6.00	0.0094	0.0010001	137.6327	25.22	2511.89	0.0913	8.9993
7.00	0.0100	0.0010001	128.9226	29.43	2513.72	0.1064	8.9741
8.00	0.0107	0.0010002	120.8289	33.63	2515.55	0.1213	8.9491
9.00	0.0115	0.0010003	113.3038	37.82	2517.38	0.1362	8.9243
10.00	0.0123	0.0010003	106.3032	42.02	2519.21	0.1511	8.8998
11.00	0.0131	0.0010004	99.7872	46.22	2521.04	0.1659	8.8754
12.00	0.0140	0.0010005	93.7189	50.41	2522.86	0.1806	8.8513
13.00	0.0150	0.0010007	88.0644	54.60	2524.69	0.1953	8.8274
14.00	0.0160	0.0010008	82.7928	58.79	2526.51	0.2099	8.8037
15.00	0.0171	0.0010009	77.8755	62.98	2528.33	0.2245	8.7803
16.00	0.0182	0.0010011	73.2863	67.17	2530.16	0.2390	8.7570
17.00	0.0194	0.0010013	69.0011	71.36	2531.98	0.2534	8.7339
18.00	0.0206	0.0010014	64.9978	75.54	2533.80	0.2678	8.7111
19.00	0.0220	0.0010016	61.2560	79.73	2535.62	0.2822	8.6884
20.00	0.0234	0.0010018	57.7567	83.91	2537.43	0.2965	8.6660
21.00	0.0249	0.0010021	54.4827	88.10	2539.25	0.3107	8.6437
22.00	0.0265	0.0010023	51.4180	92.28	2541.07	0.3249	8.6217
23.00	0.0281	0.0010025	48.5477	96.46	2542.88	0.3391	8.5998
24.00	0.0299	0.0010028	45.8584	100.65	2544.69	0.3532	8.5781
25.00	0.0317	0.0010030	43.3373	104.83	2546.51	0.3672	8.5566
26.00	0.0336	0.0010033	40.9729	109.01	2548.32	0.3812	8.5353
27.00	0.0357	0.0010035	38.7544	113.19	2550.13	0.3952	8.5142
28.00	0.0378	0.0010038	36.6718	117.37	2551.93	0.4091	8.4933
29.00	0.0401	0.0010041	34.7160	121.55	2553.74	0.4229	8.4725
30.00	0.0425	0.0010044	32.8783	125.73	2555.55	0.4368	8.4520
31.00	0.0450	0.0010047	31.1509	129.91	2557.35	0.4505	8.4316
32.00	0.0476	0.0010050	29.5265	134.09	2559.15	0.4642	8.4113
33.00	0.0504	0.0010054	27.9982	138.27	2560.95	0.4779	8.3913
34.00	0.0533	0.0010057	26.5597	142.45	2562.75	0.4915	8.3714
35.00	0.0563	0.0010060	25.2053	146.63	2564.55	0.5051	8.3517
36.00	0.0595	0.0010064	23.9293	150.81	2566.34	0.5187	8.3321
37.00	0.0628	0.0010068	22.7269	154.99	2568.14	0.5322	8.3127
38.00	0.0663	0.0010071	21.5933	159.17	2569.93	0.5456	8.2935
39.00	0.0700	0.0010075	20.5240	163.35	2571.72	0.5590	8.2745
40.00	0.0738	0.0010079	19.5151	167.53	2573.51	0.5724	8.2555

41.00	0.0779	0.0010083	18.5628	171.71	2575.30	0.5857	8.2368
42.00	0.0821	0.0010087	17.6635	175.89	2577.08	0.5990	8.2182
43.00	0.0865	0.0010091	16.8140	180.07	2578.87	0.6123	8.1998
44.00	0.0911	0.0010095	16.0111	184.25	2580.65	0.6255	8.1815
45.00	0.0959	0.0010099	15.2521	188.43	2582.43	0.6386	8.1633
46.00	0.1010	0.0010104	14.5342	192.62	2584.20	0.6517	8.1453
47.00	0.1063	0.0010108	13.8550	196.80	2585.98	0.6648	8.1275
48.00	0.1118	0.0010112	13.2121	200.98	2587.75	0.6779	8.1098
49.00	0.1175	0.0010117	12.6034	205.16	2589.52	0.6908	8.0922
50.00	0.1235	0.0010121	12.0269	209.34	2591.29	0.7038	8.0748
51.00	0.1298	0.0010126	11.4806	213.52	2593.05	0.7167	8.0576
52.00	0.1363	0.0010131	10.9628	217.71	2594.82	0.7296	8.0404
53.00	0.1431	0.0010136	10.4719	221.89	2596.58	0.7425	8.0234
54.00	0.1502	0.0010141	10.0062	226.07	2598.34	0.7553	8.0066
55.00	0.1576	0.0010146	9.5643	230.26	2600.09	0.7680	7.9898
56.00	0.1653	0.0010151	9.1448	234.44	2601.85	0.7808	7.9732
57.00	0.1734	0.0010156	8.7466	238.62	2603.60	0.7934	7.9568
58.00	0.1817	0.0010161	8.3683	242.81	2605.35	0.8061	7.9404
59.00	0.1904	0.0010166	8.0089	246.99	2607.09	0.8187	7.9242
60.00	0.1995	0.0010171	7.6672	251.18	2608.83	0.8313	7.9081
61.00	0.2089	0.0010177	7.3424	255.37	2610.57	0.8438	7.8922
62.00	0.2187	0.0010182	7.0335	259.55	2612.31	0.8563	7.8764
63.00	0.2288	0.0010188	6.7396	263.74	2614.05	0.8688	7.8607
64.00	0.2394	0.0010193	6.4598	267.93	2615.78	0.8813	7.8451
65.00	0.2504	0.0010199	6.1935	272.12	2617.50	0.8937	7.8296
66.00	0.2618	0.0010204	5.9399	276.30	2619.23	0.9060	7.8142
67.00	0.2737	0.0010210	5.6984	280.49	2620.95	0.9183	7.7990
68.00	0.2860	0.0010216	5.4682	284.68	2622.67	0.9306	7.7839
69.00	0.2988	0.0010222	5.2488	288.87	2624.38	0.9429	7.7689
70.00	0.3120	0.0010228	5.0395	293.07	2626.10	0.9551	7.7540
71.00	0.3258	0.0010234	4.8400	297.26	2627.80	0.9673	7.7392
72.00	0.3400	0.0010240	4.6496	301.45	2629.51	0.9795	7.7246
73.00	0.3548	0.0010246	4.4680	305.64	2631.21	0.9916	7.7100
74.00	0.3701	0.0010252	4.2945	309.84	2632.91	1.0037	7.6955
75.00	0.3860	0.0010258	4.1289	314.03	2634.60	1.0158	7.6812
76.00	0.4024	0.0010265	3.9708	318.22	2636.29	1.0278	7.6670
77.00	0.4194	0.0010271	3.8197	322.42	2637.98	1.0398	7.6528
78.00	0.4370	0.0010277	3.6752	326.62	2639.66	1.0517	7.6388
79.00	0.4553	0.0010284	3.5372	330.81	2641.34	1.0637	7.6249
80.00	0.4741	0.0010291	3.4052	335.01	2643.02	1.0756	7.6111
81.00	0.4937	0.0010297	3.2789	339.21	2644.69	1.0874	7.5973
82.00	0.5139	0.0010304	3.1581	343.41	2646.35	1.0993	7.5837
83.00	0.5348	0.0010311	3.0425	347.61	2648.02	1.1111	7.5702
84.00	0.5564	0.0010317	2.9318	351.81	2649.67	1.1229	7.5567
85.00	0.5787	0.0010324	2.8258	356.01	2651.33	1.1346	7.5434
86.00	0.6017	0.0010331	2.7244	360.22	2652.98	1.1463	7.5302
87.00	0.6256	0.0010338	2.6271	364.42	2654.62	1.1580	7.5170
88.00	0.6502	0.0010345	2.5340	368.63	2656.26	1.1696	7.5040

89.00	0.6756	0.0010352	2.4447	372.83	2657.90	1.1813	7.4910
90.00	0.7018	0.0010360	2.3591	377.04	2659.53	1.1929	7.4781
91.00	0.7289	0.0010367	2.2770	381.25	2661.16	1.2044	7.4653
92.00	0.7568	0.0010374	2.1982	385.46	2662.78	1.2160	7.4526
93.00	0.7857	0.0010381	2.1227	389.67	2664.40	1.2275	7.4400
94.00	0.8154	0.0010389	2.0502	393.88	2666.01	1.2389	7.4275
95.00	0.8461	0.0010396	1.9806	398.09	2667.61	1.2504	7.4151
96.00	0.8777	0.0010404	1.9137	402.30	2669.22	1.2618	7.4027
97.00	0.9103	0.0010411	1.8496	406.52	2670.81	1.2732	7.3904
98.00	0.9439	0.0010419	1.7879	410.73	2672.40	1.2846	7.3783
99.00	0.9785	0.0010427	1.7287	414.95	2673.99	1.2959	7.3661
100.00	1.0142	0.0010435	1.6718	419.17	2675.57	1.3072	7.3541
102.00	1.0887	0.0010450	1.5644	427.61	2678.71	1.3297	7.3303
104.00	1.1678	0.0010466	1.4652	436.05	2681.84	1.3522	7.3068
106.00	1.2515	0.0010483	1.3733	444.50	2684.94	1.3745	7.2836
108.00	1.3401	0.0010499	1.2882	452.95	2688.01	1.3967	7.2607
110.00	1.4338	0.0010516	1.2093	461.42	2691.06	1.4188	7.2381
112.00	1.5328	0.0010533	1.1361	469.88	2694.09	1.4408	7.2157
114.00	1.6374	0.0010550	1.0680	478.35	2697.09	1.4628	7.1937
116.00	1.7477	0.0010568	1.0048	486.83	2700.06	1.4846	7.1719
118.00	1.8641	0.0010585	0.9460	495.32	2703.01	1.5063	7.1504
120.00	1.9867	0.0010603	0.8912	503.81	2705.93	1.5279	7.1291
125.00	2.3224	0.0010649	0.7700	525.07	2713.10	1.5816	7.0770
130.00	2.7028	0.0010697	0.6680	546.38	2720.08	1.6346	7.0264
135.00	3.1323	0.0010746	0.5817	567.74	2726.87	1.6872	6.9772
140.00	3.6154	0.0010798	0.5085	589.16	2733.44	1.7392	6.9293
145.00	4.1568	0.0010850	0.4460	610.64	2739.80	1.7907	6.8826
150.00	4.7616	0.0010905	0.3925	632.18	2745.93	1.8418	6.8371
160.00	6.1823	0.0011020	0.3068	675.47	2757.44	1.9426	6.7491
170.00	7.9219	0.0011143	0.2426	719.08	2767.90	2.0417	6.6650
180.00	10.0281	0.0011274	0.1938	763.05	2777.21	2.1392	6.5840
190.00	12.5524	0.0011415	0.1564	807.43	2785.28	2.2355	6.5059
200.00	15.5493	0.0011565	0.1272	852.27	2792.01	2.3305	6.4302
210.00	19.0767	0.0011727	0.1043	897.63	2797.27	2.4245	6.3563
220.00	23.1959	0.0011902	0.0861	943.58	2800.95	2.5177	6.2840
230.00	27.9709	0.0012090	0.0715	990.19	2802.90	2.6101	6.2128
240.00	33.4693	0.0012295	0.0597	1037.55	2802.96	2.7020	6.1423
250.00	39.7617	0.0012517	0.0501	1085.77	2800.93	2.7935	6.0721
260.00	46.9226	0.0012761	0.0422	1134.96	2796.60	2.8849	6.0016
270.00	55.0299	0.0013030	0.0356	1185.27	2789.69	2.9765	5.9304
280.00	64.1658	0.0013328	0.0302	1236.88	2779.87	3.0685	5.8579
290.00	74.4178	0.0013663	0.0256	1290.03	2766.70	3.1612	5.7834
300.00	85.8790	0.0014042	0.0217	1345.01	2749.64	3.2552	5.7059
310.00	98.6505	0.0014479	0.0183	1402.22	2727.95	3.3510	5.6244
320.00	112.8429	0.0014990	0.0155	1462.22	2700.59	3.4494	5.5372
330.00	128.5805	0.0015606	0.0130	1525.87	2666.03	3.5518	5.4422
340.00	146.0068	0.0016376	0.0108	1594.53	2621.85	3.6601	5.3356
350.00	165.2942	0.0017400	0.0088	1670.89	2563.64	3.7784	5.2110

360.00	186.6601	0.0018954	0.0069	1761.66	2481.49	3.9167	5.0536
370.00	210.4356	0.0022152	0.0050	1890.69	2334.52	4.1112	4.8012
373.00	218.1417	0.0025083	0.0040	1969.67	2229.81	4.2308	4.6334
373.94	220.6240	0.0029944	0.0032	2064.84	2105.02	4.3770	4.4391

Tabelle 6

Wasserdampftafel, Heißdampf

Daten entsprechen dem IAPWS95-Standard, sie wurden mit Hilfe der WATER95-Bibliothek berechnet.

p	t	v	h	s	t	v	h	s
bar	°C	m^3/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)	°C	m^3/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)
0.1	50	14.8669727	2591.967	8.1741	350	28.7545067	3177.550	9.4513
	100	17.1963874	2687.456	8.4489	400	31.0630759	3279.949	9.6094
	150	19.5131671	2783.039	8.6892	450	33.3714079	3383.982	9.7584
	200	21.8255848	2879.599	8.9049	500	35.6795757	3489.691	9.8998
	250	24.1360789	2977.448	9.1015	550	37.9876258	3597.112	10.0344
	300	26.4455795	3076.736	9.2827	600	40.2955890	3706.275	10.1631
0.2	100	8.5854966	2686.219	8.1263	400	15.5295316	3279.795	9.2893
	150	9.7485667	2782.339	8.3680	450	16.6840687	3383.855	9.4384
	200	10.9072106	2879.143	8.5843	500	17.8384415	3489.584	9.5798
	250	12.0639161	2977.124	8.7811	550	18.9926966	3597.022	9.7144
	300	13.2196240	3076.492	8.9625	600	20.1468646	3706.197	9.8431
	350	14.3747571	3177.359	9.1312				
0.4	100	4.2798712	2683.703	7.8010	400	7.7627586	3279.487	8.9691
	150	4.8662177	2780.926	8.0456	450	8.3403987	3383.601	9.1182
	200	5.4480070	2878.227	8.2629	500	8.9178742	3489.372	9.2596
	250	6.0278282	2976.474	8.4603	550	9.4952318	3596.841	9.3943
	300	6.6066432	3076.004	8.6419	600	10.0725024	3706.042	9.5231
	350	7.1848808	3176.976	8.8108				
0.6	100	2.8444974	2681.128	7.6084	400	5.1738336	3279.179	8.7816
	150	3.2387245	2779.500	7.8558	450	5.5591749	3383.348	8.9308
	200	3.6282578	2877.306	8.0743	500	5.9443515	3489.160	9.0723
	250	4.0157930	2975.822	8.2722	550	6.3294100	3596.661	9.2070
	300	4.4023137	3075.514	8.4542	600	6.7143815	3705.887	9.3358
	350	4.7882540	3176.594	8.6232				
0.8	100	2.1266778	2678.487	7.4699	400	3.8793705	3278.870	8.6485
	150	2.4249448	2778.058	7.7204	450	4.1685627	3383.094	8.7978
	200	2.7183721	2876.381	7.9400	500	4.4575900	3488.947	8.9393
	250	3.0097710	2975.169	8.1385	550	4.7464991	3596.480	9.0741
	300	3.3001469	3075.024	8.3208	600	5.0353210	3705.732	9.2029
	350	3.5899396	3176.210	8.4900				
1.0	100	1.6958653	2675.766	7.3610	400	3.1026923	3278.562	8.5452
	150	1.9366503	2776.603	7.6148	450	3.3341952	3382.840	8.6946
	200	2.1724318	2875.451	7.8356	500	3.5655329	3488.734	8.8361
	250	2.4061542	2974.514	8.0346	550	3.7967524	3596.300	8.9709
	300	2.6388452	3074.533	8.2172	600	4.0278847	3705.577	9.0998
	350	2.8709502	3175.827	8.3866				
1.2	150	1.6110981	2775.132	7.5279	400	2.5849064	3278.253	8.4607
	200	1.8084641	2874.516	7.7499	450	2.7779499	3382.586	8.6102
	250	2.0037401	2973.857	7.9495	500	2.9708281	3488.522	8.7518
	300	2.1979761	3074.041	8.1324	550	3.1635879	3596.119	8.8866
	350	2.3916233	3175.443	8.3020	600	3.3562604	3705.422	9.0155

1.5	150	1.2855117	2772.898	7.4208	400	2.0671200	3277.789	8.3572
	200	1.4444851	2873.105	7.6447	450	2.2217044	3382.205	8.5068
	250	1.6013215	2972.868	7.8451	500	2.3761231	3488.203	8.6485
	300	1.7571050	3073.303	8.0284	550	2.5304232	3595.848	8.7834
	350	1.9122953	3174.867	8.1983	600	2.6846361	3705.190	8.9124
2.0	150	0.9598554	2769.098	7.2810	400	1.5493325	3277.016	8.2236
	200	1.0804833	2870.730	7.5081	450	1.6654582	3381.569	8.3734
	250	1.1988940	2971.212	7.7100	500	1.7814177	3487.670	8.5152
	300	1.3162298	3072.067	7.8941	550	1.8972584	3595.397	8.6502
	350	1.4329653	3173.904	8.0644	600	2.0130116	3704.802	8.7792
4.0	150	0.4708830	2752.784	6.9306	400	0.7726446	3273.910	7.9002
	200	0.5343342	2860.928	7.1723	450	0.8310852	3379.018	8.0508
	250	0.5951958	2964.473	7.3804	500	0.8893574	3485.538	8.1933
	300	0.6548916	3067.078	7.5677	550	0.9475098	3593.587	8.3287
	350	0.7139578	3170.031	7.7399	600	1.0055741	3703.249	8.4580
6.0	200	0.3521206	2850.614	6.9683	450	0.5529568	3376.457	7.8611
	250	0.3939007	2957.550	7.1832	500	0.5920016	3483.398	8.0041
	300	0.4344179	3062.010	7.3740	550	0.6309255	3591.774	8.1399
	350	0.4742750	3166.120	7.5481	600	0.6697607	3701.694	8.2695
	400	0.5137413	3270.784	7.7097	650	0.7085291	3813.230	8.3937
8.0	200	0.2608815	2839.748	6.8176	450	0.4138895	3373.884	7.7257
	250	0.2932047	2950.436	7.0401	500	0.4433219	3481.253	7.8692
	300	0.3241599	3056.862	7.2345	550	0.4726322	3589.957	8.0054
	350	0.3544233	3162.172	7.4106	600	0.5018533	3700.136	8.1354
	400	0.3842843	3267.639	7.5734	650	0.5310074	3811.882	8.2598
10	200	0.2060216	2828.264	6.6955	450	0.3304467	3371.301	7.6200
	250	0.2327467	2943.122	6.9265	500	0.3541127	3479.100	7.7641
	300	0.2579879	3051.632	7.1246	550	0.3776555	3588.136	7.9008
	350	0.2825039	3158.185	7.3029	600	0.4011084	3698.575	8.0310
	400	0.3066056	3264.474	7.4669	650	0.4244940	3810.531	8.1557
15	200	0.1324536	2795.984	6.4536	450	0.2191824	3364.793	7.4262
	250	0.1520111	2923.911	6.7111	500	0.2351628	3473.691	7.5718
	300	0.1697062	3038.187	6.9198	550	0.2510172	3583.565	7.7095
	350	0.1865864	3148.046	7.1036	600	0.2667803	3694.663	7.8405
	400	0.2030211	3256.473	7.2710	650	0.2824752	3807.148	7.9658
20	250	0.1114964	2903.240	6.5475	500	0.1756834	3468.241	7.4337
	300	0.1255067	3024.182	6.7684	550	0.1876955	3578.969	7.5725
	350	0.1386002	3137.653	6.9583	600	0.1996147	3690.736	7.7043
	400	0.1512146	3248.344	7.1292	650	0.2114649	3803.755	7.8302
	450	0.1635424	3358.215	7.2866	700	0.2232623	3918.169	7.9509
30	250	0.0706271	2856.534	6.2893	500	0.1161950	3457.216	7.2359
	300	0.0811788	2994.334	6.5412	550	0.1243685	3569.703	7.3768
	350	0.0905564	3116.063	6.7449	600	0.1324459	3682.833	7.5103
	400	0.0993791	3231.686	6.9234	650	0.1404527	3796.938	7.6373
	450	0.1078867	3344.843	7.0856	700	0.1484057	3912.235	7.7590
40	300	0.0588697	2961.692	6.3639	550	0.0926998	3560.335	7.2355
	350	0.0664728	3093.322	6.5843	600	0.0988585	3674.868	7.3705
	400	0.0734313	3214.473	6.7714	650	0.1049448	3790.082	7.4988

	450	0.0800428	3331.175	6.9386	700	0.1109764	3906.275	7.6214
	500	0.0864419	3446.022	7.0922	750	0.1169659	4023.644	7.7390
50	300	0.0453462	2925.700	6.2110	550	0.0736945	3550.865	7.1237
	350	0.0519690	3069.314	6.4516	600	0.0787037	3666.839	7.2605
	400	0.0578373	3196.672	6.6483	650	0.0836388	3783.185	7.3901
	450	0.0633234	3317.200	6.8210	700	0.0885181	3900.290	7.5136
	500	0.0685828	3434.656	6.9781	750	0.0933547	4018.407	7.6320
60	300	0.0361893	2885.541	6.0703	550	0.0610209	3541.293	7.0307
	350	0.0422506	3043.900	6.3357	600	0.0652653	3658.748	7.1693
	400	0.0474194	3178.247	6.5432	650	0.0694337	3776.249	7.3001
	450	0.0521660	3302.909	6.7219	700	0.0735454	3894.279	7.4246
	500	0.0566707	3423.114	6.8826	750	0.0776137	4013.153	7.5438
80	300	0.0242789	2786.486	5.7937	550	0.0451716	3521.836	6.8799
	350	0.0299747	2988.130	6.1321	600	0.0484632	3642.378	7.0221
	400	0.0343438	3139.367	6.3658	650	0.0516751	3762.261	7.1556
	450	0.0381936	3273.331	6.5579	700	0.0548284	3882.184	7.2821
	500	0.0417672	3399.492	6.7266	750	0.0579370	4002.598	7.4028
100	350	0.0224397	2924.024	5.9459	600	0.0383780	3625.758	6.9045
	400	0.0264363	3097.447	6.2141	650	0.0410180	3748.119	7.0408
	450	0.0297817	3242.341	6.4219	700	0.0435973	3869.994	7.1693
	500	0.0328107	3375.127	6.5995	750	0.0461308	3991.983	7.2916
	550	0.0356545	3501.959	6.7585	800	0.0486290	4114.485	7.4085
150	350	0.0114810	2693.115	5.4437	600	0.0249210	3583.132	6.6796
	400	0.0156710	2975.658	5.8819	650	0.0268040	3712.123	6.8233
	450	0.0184772	3157.908	6.1434	700	0.0286211	3839.127	6.9572
	500	0.0208275	3310.784	6.3480	750	0.0303895	3965.210	7.0836
	550	0.0229446	3450.399	6.5230	800	0.0321209	4091.055	7.2037
200	400	0.0099503	2816.856	5.5525	650	0.0196947	3675.269	6.6593
	450	0.0127211	3061.663	5.9043	700	0.0211335	3807.761	6.7990
	500	0.0147934	3241.178	6.1446	750	0.0225208	3938.147	6.9297
	550	0.0165711	3396.140	6.3389	800	0.0238695	4067.463	7.0531
	600	0.0181848	3539.014	6.5075				
300	50	0.0009993	235.053	0.6901	450	0.0067373	2821.012	5.4421
	100	0.0010290	441.742	1.2847	500	0.0086904	3084.747	5.7956
	150	0.0010720	650.888	1.8106	550	0.0101754	3279.716	6.0402
	200	0.0011304	865.016	2.2888	600	0.0114447	3446.740	6.2373
	250	0.0012113	1088.353	2.7373	650	0.0125895	3599.403	6.4074
	300	0.0013322	1328.886	3.1760	700	0.0136535	3743.869	6.5598
	350	0.0015529	1608.822	3.6436	750	0.0146611	3883.429	6.6997
	400	0.0027978	2152.809	4.4757	800	0.0156275	4020.021	6.8300
500	50	0.0009914	252.033	0.6810	450	0.0024873	2284.658	4.5896
	100	0.0010201	456.941	1.2705	500	0.0038900	2722.617	5.1762
	150	0.0010608	664.020	1.7912	550	0.0051175	3025.339	5.5563
	200	0.0011149	875.188	2.2628	600	0.0061081	3252.537	5.8245
	250	0.0011871	1093.529	2.7013	650	0.0069570	3443.446	6.0373
	300	0.0012879	1323.964	3.1218	700	0.0077166	3614.568	6.2178
	350	0.0014425	1576.056	3.5431	750	0.0084161	3773.892	6.3775
	400	0.0017307	1874.355	4.0029	800	0.0090724	3925.792	6.5225

Tabelle 7

Eigenschaften von Propan

Daten aus diversen Internet-Tabellen interpoliert sowie mit Formeln aus dem VDI-Wärmeatlas berechnet

spez. Enthalpie h

T in °C, p in bar, h in kJ/kg, gasförmig

T|p	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0
-40	529.07	105.20	105.39	105.57	105.76	105.94	106.13	106.31	106.50	106.68	106.87	107.34	107.80	108.28	108.75
-30	543.68	128.00	128.17	128.34	128.52	128.69	128.86	129.03	129.21	129.38	129.55	129.99	130.43	130.88	131.32
-20	558.61	554.20	151.48	151.64	151.79	151.95	152.11	152.27	152.42	152.58	152.74	153.14	153.55	153.96	154.37
-10	573.89	569.91	175.39	175.52	175.66	175.79	175.93	176.07	176.21	176.35	176.49	176.85	177.21	177.58	177.95
0	589.54	585.91	578.05	200.07	200.18	200.29	200.40	200.52	200.63	200.75	200.87	201.17	201.47	201.79	202.11
10	605.57	602.26	595.15	587.23	225.46	225.54	225.62	225.70	225.78	225.87	225.95	226.18	226.41	226.66	226.92
20	622.00	618.96	612.49	605.41	597.51	251.66	251.70	251.73	251.77	251.82	251.86	251.99	252.13	252.29	252.46
30	638.85	636.03	630.11	623.71	616.72	608.92	278.82	278.79	278.77	278.75	278.74	278.73	278.74	278.78	278.83
40	656.11	653.50	648.05	642.22	635.95	629.10	621.49	307.13	307.02	306.91	306.81	306.60	306.43	306.29	306.19
50	673.81	671.38	666.33	660.99	655.30	649.20	642.56	635.23	626.95	336.69	336.45	335.92	335.46	335.06	334.72
60	691.94	689.67	684.98	680.05	674.86	669.34	663.44	657.07	650.09	642.31	633.37	367.28	366.32	365.49	364.78

spez. Entropie s

T in °C, p in bar, s in kJ/(kg K), gasförmig

T|p	1.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0	18.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0
-40	2.4650	0.6272	0.6265	0.6258	0.6251	0.6244	0.6237	0.6231	0.6224	0.6217	0.6210	0.6193	0.6177	0.6160	0.6143
-30	2.5263	0.7229	0.7222	0.7214	0.7207	0.7200	0.7192	0.7185	0.7177	0.7170	0.7163	0.7145	0.7127	0.7109	0.7091
-20	2.5865	2.4436	0.8161	0.8153	0.8145	0.8137	0.8129	0.8121	0.8113	0.8105	0.8097	0.8078	0.8058	0.8039	0.8020
-10	2.6457	2.5044	0.9087	0.9078	0.9069	0.9061	0.9052	0.9043	0.9034	0.9026	0.9017	0.8996	0.8975	0.8954	0.8934
0	2.7041	2.5641	2.4130	0.9994	0.9984	0.9974	0.9965	0.9955	0.9945	0.9936	0.9926	0.9903	0.9880	0.9857	0.9835
10	2.7617	2.6229	2.4745	2.3778	1.0893	1.0882	1.0871	1.0860	1.0850	1.0839	1.0828	1.0802	1.0777	1.0751	1.0726
20	2.8187	2.6808	2.5347	2.4409	2.3668	1.1789	1.1776	1.1764	1.1752	1.1739	1.1727	1.1698	1.1669	1.1641	1.1613
30	2.8752	2.7381	2.5938	2.5023	2.4312	2.3700	1.2686	1.2671	1.2657	1.2643	1.2629	1.2595	1.2562	1.2529	1.2497
40	2.9313	2.7948	2.6520	2.5624	2.4937	2.4355	2.3828	1.3591	1.3574	1.3557	1.3540	1.3499	1.3460	1.3422	1.3385
50	2.9869	2.8510	2.7095	2.6213	2.5545	2.4986	2.4490	2.4028	2.3576	1.4493	1.4471	1.4421	1.4372	1.4326	1.4282
60	3.0421	2.9068	2.7663	2.6794	2.6141	2.5600	2.5126	2.4693	2.4282	2.3878	2.3464	1.5376	1.5313	1.5254	1.5198

Dampfdruckkurve

T in °C, p in bar, h in kJ/kg, s in kJ/(kg K)

T	p_S	h'	h''	s'	s''
-40	1.1117	105.12	528.95	0.6275	2.4453
-30	1.6786	127.97	540.67	0.7231	2.4204
-20	2.4452	151.36	552.24	0.8168	2.4003
-10	3.4526	175.35	563.60	0.9090	2.3844
0	4.7444	200.00	574.69	1.0000	2.3717
10	6.3661	225.40	585.43	1.0902	2.3617
20	8.3658	251.64	595.70	1.1799	2.3536
30	10.793	278.83	605.34	1.2694	2.3465
40	13.701	307.15	614.14	1.3593	2.3397
50	17.145	336.80	621.74	1.4502	2.3319
60	21.187	368.08	627.54	1.5427	2.3215

Nachweise

- Bilder:
  - Die Daten zu Bild 35 entstammen dem NIST Chemistry WebBook. Die genaue Referenz lautet:

    E.W. Lemmon, M.O. McLinden and D.G. Friend, "Thermophysical Properties of Fluid Systems" in NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69, Eds. P.J. Linstrom and W.G. Mallard, June 2005, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD, 20899 (http://webbook.nist.gov).
  - Bild 37 wurde der Wasser-Info-Seite des Mathmol-Projekts entnommen, mit freundlicher Genehmigung des MathMol-Projekts am NYU/ACF Scientific Visualization Laboratory
  - Bild 51 basiert auf dem Bild Wärmeschaltbild KW Staudinger.jpg aus der freien Enzyklopädie Wikipedia. Es ist lizenziert unter der Creative Commons-Lizenz Namensnennung-Weitergabe unter gleichen Bedingungen 2.0 Deutschland. Der Urheber des Bildes ist Volker Sperlich. Originale Quelle: Volker Sperlich: "Übungsaufgaben zur Thermodynamik mit Mathcad" (2002) Fachbuchverlag Leipzig
  - Bild 52 basiert auf dem Bild Niederdruck-Turbinenläufer.jpg aus der freien Enzyklopädie Wikipedia und steht unter der GNU-Lizenz für freie Dokumentation. Der Urheber des Bildes ist Wilfried Wittkowsky.
- Tabellen:

Tabellen-Nr	Herkunft
1,2,3	[1]

Lösung von Aufgabe 1

a. Bestimmen der Gasgrößen

Zunächst gilt wegen der Isothermen:

$T_1 = T_2$, $T_3 = T_4$

Die Adiabate 2 → 3 liefert

$$\begin{aligned} \frac{T_3}{T_2} &= \left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \\ \Rightarrow \quad T_3 &= 631.4\,\mathrm{K} \end{aligned}$$

Mit Hilfe der Beziehungen aus dem Abschnitt Carnot-Prozess erhält man die aufgenommene Wärme

$Q_{12} = -W_{V12} = - p_1 V_1 \ln (p_2/p_1)$

Das fehlende V_1 folgt aus der Gasgleichung zu

$V_1 = m R_i T_1/p_1 = 1.435\ m^3$

Damit

$Q_{12} = 1989$ kJ

Daraus erhält man die abgegebene Wärme

$Q_{34} = -W_{V34} = - Q_{12} T_3 / T_1 = - 1256$ kJ

somit Nutzarbeit und Wirkungsgrad

$W_k = - (Q_{12} + Q_{34}) = -733.3$ kJ

$\eta = -W_k/Q_{12} = 0.3686$

- Entropieänderungen bei Isentropen = 0. Bei Isothermen:

  $S_2 - S_1 = Q_{12}/T_1 = 1.989$ kJ/K

  $S_4 - S_3 = Q_{34}/T_4 = -1.989$ kJ/K

Die Gesamtentropie des Gases ändert sich nicht.

b. Entropieänderung der Wärmebäder:

bei A abgegebene Wärme Q_{12} bei Temperatur T_1 →

$\Delta S_A = - 1989$ kJ / 1000 K = -1.989 kJ/K

bei C aufgenommene Wärme Q_{34} bei Temperatur T_3 →

$\Delta S_C = 1256$ kJ / 631.4 K = 1.989 kJ/K

Entropie des Gesamtsystems aus Wärmebädern und Gas hat sich nicht geändert (reversibler Vorgang).

Lösung von Aufgabe 2

a. Bestimmen der Energien

Wie in Aufgabe 1 gilt für die Volumenänderungsarbeiten:

W_{V12} = -1989 kJ, W_{V34} = 1256 kJ.

Daher betragen die Dissipationsenergien

W_{diss12} = 198.9 kJ, W_{diss34} = 125.6 kJ

Bei der Isotherme 1 → 2 wird daher weniger Wärme vom Wärmebad A aufgenommen:

$Q_{12} = -W_{V12} - W_{diss12}$ = 1790 kJ

Bei der Isothermen 3 → 4 muss die zusätzliche Reibungswärme abgegeben werden:

$Q_{34} = -W_{V34} - W_{diss34}$ = -1382 kJ

Die Nutzarbeit nimmt aufgrund der Reibungsverluste ab, der Wirkungsgrad sinkt:

$W_k = W_{k,rev} + W_{diss12} + W_{diss34}$ = -408.8 kJ

$\eta = -W_k/Q_{12}$ = 0.2283

b. Bestimmen der Entropien:

Die Entropieänderungen am Gas sind wie vorher, weil aufgenommene Wärmemenge und Dissipationswärme mitzählen:

$S_2 - S_1 = (Q_{12} + W_{diss12}) / T_1$ = 1.989 kJ/K

$S_4 - S_3 = (Q_{34} + W_{diss34}) / T_3$ = -1.989 kJ/K

Entropieänderung am Wärmebad A:

ΔS_A = - 1790 kJ / 1000 K = -1.790 kJ/K

Entropieänderung am Wärmebad C:

ΔS_C = 1381 kJ / 631 K = 2.188 kJ/K

gesamte Entropieänderung:

$\Delta S = \Delta S_A + \Delta S_C + \Delta S_{Gas}$
= 0.3979 kJ/K
> 0 (irreversibler Prozess)

Lösung von Aufgabe 3

- Die Entropieänderung beim idealen Gas ist

  $S_2 - S_1 = m\, c_V \ln(T_2/T_1) + m\, R_i \ln(V_2/V_1)$

- also für konstantes Volumen

  $S_2 - S_1 = m\, c_V \ln(T_2/T_1)$

- Die Masse folgt aus der idealen Gasgleichung

  $m = p\, V /(R_i\, T) = 10.45$ kg

  mit $R_i = 287.2$ J/(kg K) für Luft

- Die Wärmekapazität ist dann

  $c_V = R_i/(\kappa - 1) = 718.0$ J/(kg K)

- Damit

  $S_2 - S_1 = 4.071$ kJ/K

Lösung von Aufgabe 4

- Die Entropieänderung beim idealen Gas für isobare Prozesse ergibt sich zu

  $S_2 - S_1 = m\, c_p \ln(T_2/T_1)$

- der Entropiestrom $\dot{S}$ bei einem Massestrom $\dot{m}$ ist also

  $\dot{S}_2 - \dot{S}_1 = \dot{m}\, c_p \ln(T_2/T_1)$

- Die spezifische Wärmekapazität beim einatomigen Gas Helium ist

  $c_p = 5/2\, R_i$
  $= 5/2\, R/M_{He}$
  $= 2.5 \cdot 8.31$ kJ/(kmol K) / (4.0026 kg/kmol)
  $= 5.190$ kJ/(kg K)

- Die Endtemperatur ergibt sich aus der zugeführten Wärmemenge $\dot{Q}_{12} = \dot{m}\, c_p\, (T_2 - T_1)$

  $T_2 = T_1 + \dot{Q}_{12} / (\dot{m}\, c_p)$
  $= 283$ K + 1000 kJ/s / (1.9 kg/s · 5.19 kJ/(kg K))
  $= 384.6$ K

- Damit erhält man als Änderung des Entropiestroms:

  $\dot{S}_2 - \dot{S}_1 = \dot{m}\, c_p \ln(T_2/T_1)$
  $= 1.9$ kg/s · 5.19 kJ/(kg K) · ln(384/283)
  $= 3.019$ kW/K

Lösung von Aufgabe 5

a. Temperatur T_2 nach dem Befüllen

$$\begin{aligned} T_2 &= T_1 \frac{\kappa}{1+(\kappa-1)p_1/p_2} \\ &= 293.15\,\mathrm{K}\,\frac{1.40}{1+0.40\cdot 0.2/0.8} \\ &= 373.1\,\mathrm{K} \\ &= 100.1\,^\circ\mathrm{C} \end{aligned}$$

b. Für die Berechnung der Entropieänderung sind die Massen vorher und nachher nötig:

$m_1 = p_1\, V/(R_i\, T_1)$

$= 0.2\ 10^5\ \mathrm{N/m^2} \cdot 10^{-2}\ \mathrm{m^3}\ /(287.2\ \mathrm{J/(kg\ K)} \cdot 293\ \mathrm{K})$

$= 2.376\ \mathrm{g}$

$m_2 = p_2\, V/(R_i\, T_2) = 7.466\ \mathrm{g}$

Entropiedifferenz der Anfangsmasse m_1:

$$\begin{aligned} \Delta S(m_1) &= m_1 c_p \ln\frac{T_2}{T_1} - m_1 R_i \ln\frac{p_2}{p_1} \\ &= m_1 R_i \left(\frac{\kappa}{\kappa-1}\ln\frac{T_2}{T_1} - \ln\frac{p_2}{p_1}\right) \\ &= -0.3699\,\mathrm{J/K} \end{aligned}$$

Entropiedifferenz der zuströmenden Masse m_2 - m_1:

$$\begin{aligned} \Delta S(m_2-m_1) &= (m_2-m_1) R_i \left(\frac{\kappa}{\kappa-1}\ln\frac{T_2}{T_1} - \ln\frac{p_2}{p_a}\right) \\ &= 1.560\,\mathrm{J/K} \end{aligned}$$

Gesamte Entropieänderung:

$S_2 - S_1 = \Delta S(m_1) + \Delta S(m_2 - m_1)$

$= 1.190\ \mathrm{J/K}$

Lösung von Aufgabe 6

- Die Exergie des Methans ändert sich um die Exergie der abgeführten Wärme, also mit $W_{diss} = 0$:

  $$E_{q12} = Q_{12} - T_b(S_2 - S_1)$$

- abgeführte Wärme:

  $$Q_{12} = m\, c_p\, (T_2 - T_1)$$
  $$= -1.294 \cdot 10^8 \text{ J}$$

- Entropiedifferenz bei konstantem Druck:

  $$S_2 - S_1 = m\, c_p \ln(T_2/T_1)$$
  $$= -5.833 \cdot 10^5 \text{ J/K}$$

- Damit:

  $$E_{q12} = 41.62 \text{ MJ}$$

- Exergie steigt, obwohl Wärme abgeführt wird!
- Erklärung: Das kältere Methan kann besser zur Energiegewinnung genutzt werden als das wärmere.

Lösung von Aufgabe 7

a. Die beiden auftretenden Drücke sind bekannt. Die Temperaturen erhält man aus den Isentropengleichungen:

Isentrope 1 → 2

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

→ $T_2 = 505.8$ K

analog aus Isentrope 3 → 4

$T_4 = 553.3$ K

b. Der Wirkungsgrad des Joule-Prozesses beträgt

$$\begin{aligned}\eta_{th} &= 1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \\ &= 1 - \left(\frac{1}{6}\right)^{2/7} \\ &= 0.4007\end{aligned}$$

c. Um das Arbeitsverhältnis zu bestimmen, braucht man die spezifischen technischen Arbeiten. Bei den Isobaren hat man sofort

$w_{t23} = w_{t41} = 0$

Die spezifischen technischen Arbeiten bei Adiabaten erhält man z. B. aus

$$w_{t12} = \frac{W_{t12}}{m} = c_p(T_2 - T_1)$$

Die dazu benötigte Wärmekapazität ergibt sich aus dem Adiabatenkoeffizienten

$$c_p = \frac{\kappa}{\kappa - 1} R_i = 1005 \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\,K}}$$

Damit

$w_{t12} = 203.7$ kJ/kg

$w_{t34} = -371.8$ kJ/kg

Das Arbeitsverhältnis ist daher

$$r_w = 1 + \frac{W_t^+}{W_t^-} = 1 + \frac{w_{t12}}{w_{t34}} = 0.4521$$

Lösung von Aufgabe 8

- Bestimmung der mittleren Wärmekapazitäten:

  Für die Isentrope 1 → 2 gilt nach Aufgabe 7 T_1 = 30 °C, T_2 = 233 °C. Daher berechnet man mit der Tabelle (Zwischenwerte linear interpoliert):

$$\begin{aligned}\overline{c_p}|_{T1}^{T2} &= \frac{\overline{c_p}|_{0^\circ\,\mathrm{C}}^{233^\circ\,\mathrm{C}}\,233^\circ\,\mathrm{C} - \overline{c_p}|_{0^\circ\,\mathrm{C}}^{30^\circ\,\mathrm{C}}\,30^\circ\,\mathrm{C}}{233^\circ\,\mathrm{C} - 30^\circ\,\mathrm{C}} \\ &= \frac{1.014\cdot 233 - 1.005\cdot 30}{203}\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kgK}} \\ &= 1.016\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kgK}}\end{aligned}$$

  Damit ist

$$\begin{aligned}\overline{\kappa}|_{T1}^{T2} &= \frac{\overline{c_p}}{\overline{c_V}} \\ &= \frac{\overline{c_p}}{\overline{c_p} - R_i} \\ &= \frac{1.015}{1.015 - 0.287} \\ &= 1.394\end{aligned}$$

  Ganz analog ergibt sich für die Isentrope 3 → 4, ausgehend von T_3 = 650 °C, T_4 = 280 °C:

$$\begin{aligned}\overline{c_p}|_{T3}^{T4} &= 1.084\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kgK}} \\ \overline{\kappa}|_{T3}^{T4} &= 1.361\end{aligned}$$

- Verbesserte Bestimmung der Temperaturen aus den Isentropengleichungen:

  Isentrope 1 → 2

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\kappa-1)/\kappa} = 503.1\,\mathrm{K}$$

  hinreichend dicht beim alten Wert von 506 K → keine Iteration nötig.

  analog aus Isentrope 3 → 4

  T_4 = 574.2 K

  Schätzwert war 553 K, Iterieren wäre also sinnvoll.

- Die Berechnung der Wärmekapazitäten erfolgt wie üblich aus den Tabellenwerten. Damit

$$\begin{aligned}\overline{c_p}|_{T2}^{T3} &= 1.078\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kgK}} \\ \overline{c_p}|_{T4}^{T1} &= 1.021\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kgK}}\end{aligned}$$

- Daraus ergibt sich der Wirkungsgrad

$$\begin{aligned}\eta_{th} &= 1 + \frac{\overline{c_p}|_{T_1}^{T_4}(T_1 - T_4)}{\overline{c_p}|_{T_2}^{T_3}(T_3 - T_2)} \\ &= 0.3889\end{aligned}$$

  also 3% weniger als bei konstant gesetztem κ.

- Die spezifischen technischen Arbeiten sind

$$\begin{aligned}w_{t12} &= \overline{c_p}|_{T1}^{T2}(T_2 - T_1) = 203.1\,\mathrm{kJ/kg} \\ w_{t34} &= \overline{c_p}|_{T3}^{T4}(T_4 - T_3) = -378.2\,\mathrm{kJ/kg}\end{aligned}$$

- Daher ist das Arbeitsverhältnis

$$r_w = 1 + \frac{w_{t12}}{w_{t34}} = 0.4629$$

Lösung von Aufgabe 9

- Aus der Isentropen 1 → 2 erhält man

$$
\begin{aligned}
\frac{T_1}{T_2} &= \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\kappa-1} \\
\Rightarrow \qquad \epsilon &= \frac{V_1}{V_2} \\
&= \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{1/(\kappa-1)} \\
&= 10.06 \\
\Rightarrow \qquad \eta_{th} &= 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} \\
&= 0.6028
\end{aligned}
$$

Lösung von Aufgabe 10

- Aus der Isentropen 1 → 2 erhält man

$$
\begin{aligned}
p_2 / p_1 &= (V_1 / V_2)^\kappa \\
&= \varepsilon^\kappa \\
&= 18^{1.40} \\
&= 57.20 \\
\rightarrow \quad p_2 &= 57.20 \text{ bar} \\
T_2 / T_1 &= \varepsilon^{\kappa - 1} \\
&= 18^{0.40} = 3.178 \\
\rightarrow \quad T_2 &= 1090 \text{ K}
\end{aligned}
$$

- Mit der Isobaren 2 → 3 bestimmt man

$$\varphi = V_3 / V_2 = T_3 / T_2 = 1973 \text{ K} / 1091 \text{ K} = 1.810$$

$$p_3 = p_2 = 57.20 \text{ bar}$$

- Die Isentrope 3 → 4 liefert s

$$
\begin{aligned}
\frac{p_4}{p_3} &= \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^\kappa \\
&= \left(\frac{V_3}{V_1}\right)^\kappa \\
&= \left(\frac{V_3}{V_2} \cdot \frac{V_2}{V_1}\right)^\kappa \\
&= (\varphi/\epsilon)^\kappa \\
&= 0.0401
\end{aligned}
$$

$$\Rightarrow \quad p_4 = 2.295 \,\text{bar}$$

$$
\begin{aligned}
\frac{T_4}{T_3} &= \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{(\kappa-1)/\kappa} \\
&= 0.3990
\end{aligned}
$$

$$\Rightarrow \quad T_4 = 787.2K$$

- Damit ist der thermischer Wirkungsgrad

$$
\begin{aligned}
\eta_{th} &= 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} \frac{\varphi^\kappa - 1}{\kappa(\varphi - 1)} \\
&= 0.6407
\end{aligned}
$$

- Bei gleichen Werten für Maximal-Druck und -Temperatur hat der Otto-Motor den niedrigeren Wirkungsgrad:

$$\eta_{Otto} = 0.6019$$

Lösung von Aufgabe 11

- Bezeichnungen:

  Werte des Dampfes: $m_D = 1500$ kg, $T_D = 120$ °C

  Werte des Wassers: $m_W = 14300$ kg, T_W gesucht

  Mischungstemperatur $T_{Mi} = 75$ °C, Siedetemperatur $T_S = 100$ °C

- Vom Dampf abgegebene Wärme

  $$Q_D = m_D\, c_D\, (T_S - T_D) - m_D\, r + m_D\, c_W\, (T_{Mi} - T_S)$$
  $$= -\,3.598 \cdot 10^3 \text{ MJ}$$

- Vom Wasser aufgenommene Wärme

  $$Q_W = c_W\, m_W\, (T_{Mi} - T_W)$$
  $$= -Q_D$$

- Nach T_W auflösen →

  $$T_W = T_{Mi} + Q_D/(m_W\, c_W)$$
  $$= 14.90 \text{ °C}$$

- Bei $T_D = 100$ °C fällt der erste Term von Q_D weg → $T_W = 15.83$ °C

Lösung von Aufgabe 12

a. Die Parameter der van-der-Waals-Gleichung sind

$a = 3\ p_k\ v_k^2 = 638.6\ m^5/(s^2\ kg)$

$b = v_k/3 = 0.001035\ m^3/kg$

b. Temperaturen jeweils aus den Zustandsgleichungen

$T_{id} = p\ v\ /\ R_i$

$T_{vdW} = (p + a/v^2)(v - b)/R_i$

p [bar]	v [m^3/kg]	$t_{Messung}$[°C]	t_{id} [°C]	t_{vdW} [°C]
1	1.696	100	94.33	94.92
1	2.172	200	197.5	197.9
1	2.639	300	298.7	299.0
4	0.5343	200	189.9	191.6
10	0.2060	200	173.2	177.6

Werte der van-der-Waals-Gleichung sind besser, aber nicht wesentlich besser als die mit idealem Gas gerechneten → für Wasserdampf ist die van-der-Waals-Gleichung nicht gut geeignet.

Wie zu erwarten gilt: Je höher die Temperatur oder je niedriger der Druck, umso besser die Werte des idealen Gases.

Lösung von Aufgabe 13

a. spezifisches Volumen des Nassdampfs

allgemein gilt

$V_x = V'' + V'$

$\Rightarrow \quad v_x = x\, v'' + (1-x)\, v'$

aus Tabelle:

$v' = 1.286 \cdot 10^{-3}\ m^3/kg$

$v'' = 0.03945\ m^3/kg$

also

$v_x = 0.02418\ m^3/kg$

b. Bestimmung der Massen:

Masse des Nassdampfs

$m = V / v_x$
$= 80\ m^3 / 0.02418\ m^3/kg$
$= 3308\ kg$

Masse des Wassers:

$m' = (1-x)\, m$
$= 1323\ kg$

c. spezifische Enthalpie des Nassdampfs

für Dampfanteil x gilt

$h_x = h' + x\,(h'' - h') = h' + x\, r$

aus Tabelle bei 50 bar:

$h' = 1155\ kJ/kg$

$h'' = 2794\ kJ/kg\ (\rightarrow r = 1640\ kJ/kg)$

Also

$h_x = 2138\ kJ/kg$

Lösung von Aufgabe 14

- Massenstrom

  $\dot{m}$ = 25000 kg/h = 6.944 kg/s

- isobare Erwärmung, daher Wärmemenge aus der Enthalpiedifferenz

  $Q_{12} = H_2 - H_1$

- Wärmeleistung bei Massenstrom $\dot{m}$

  $\dot{Q} = \dot{m}\,(h_2 - h_1)$

- Enthalpien bei 4 bar und angegebenen Temperaturen aus der Tabelle

  h_1 = 2753 kJ/kg

  h_2 = 3379 kJ/kg

- Daher

  $\dot{Q}$ = 4.349 MW

Lösung von Aufgabe 15

a. Endtemperatur:

Der Endpunkt der Adiabate ist bestimmt durch den gegebenen Enddruck und die konstante Entropie. Daher liest man aus Tabelle 6 zunächst die spezifische Entropie beim Startpunkt ab:

s_1 = 7620 J/(kg K)

Dann sucht man beim Enddruck die Temperaturwerte, die um s_1 herumliegen. Durch Interpolation bestimmt man so die Endtemperatur:

t_2 = 194.2 °C

b. technische Arbeit:

Wegen Q_{12} = 0 (Adiabate) wird aus dem 1. Hauptsatz

$H_2 - H_1 = W_{t12}$

mit den Tabellenwerten für die spez. Enthalpie

h_1 = 3.371 MJ/kg

h_2 = 2.862 MJ/kg

erhält man also:

$W_{t12} = m\ (h_2 - h_1)$ = -50.98 MJ

Lösung von Aufgabe 16

- Enthalpien h_1 und h_3:

  Tabelle 6 entnimmt man

  $h_1 = 3423$ kJ/kg

  Tabelle 5 liefert

  $h_3 = 191.8$ kJ/kg

- Bestimmung von h_2:

  aus der Isentropen 1 → 2 folgt

  $s_2 = s_1 = 6.883$ kJ/(kg K)

  wobei der Wert von s_1 aus Tabelle 6 stammt.

  Punkt 2 liegt auf der Dampfdruckkurve bei p = 0.1 bar, dort gilt für die Randwerte (x = 0, x = 1)

  $s' = 0.6492$ kJ/(kg K)

  $s'' = 8.149$ kJ/(kg K)

  Die fehlende Zustandsgröße x erhält man aus

  $s_2 = s' + x\,(s'' - s')$

  zu

  $x = (s_2 - s')/(s'' - s') = 0.8312$

  Damit bestimmt man h_2 aus h' und h'' zu

  $h_2 = h' + x\,(h'' - h') = 2180$ kJ/kg

- Bestimmung von h_4 über die Wassertafel (Tabelle 4)

  Isobare 4 → 1 ergibt

  $p_4 = p_1 = 60$ bar

  Adiabate 1 → 2 liefert

  $s_4 = s_3 = s' = 0.6492$ kJ/(kg K)

  lineare Interpolation mit Tabelle 4 ergibt dann

  $h_4 = 197.8$ kJ/kg

- alternativ Bestimmung von h_4 über das Modell der idealen Flüssigkeit:

  wie immer ist

  $h_4 - h_3 = q_{43} + w_{t43}$

  3 → 4 isentrop, somit $q_{43} = 0$

  Volumen nahezu konstant

  $v_4 \approx v_3 = 1.010 \cdot 10^{-3}$ m^3/kg (Tabelle 5)

  technische Arbeit bei konstantem Volumen einfach

  $w_{t34} = v_3\,(p_4 - p_3)$

  zusammengefasst

  $h_4 = h_3 + v_3\,(p_4 - p_3) = 197.9$ kJ/kg

- Vergleichszahlen:

  Wirkungsgrad

  $$\eta_{th} = 1 + \frac{h_3 - h_2}{h_1 - h_4} = 0.3836$$

  Arbeitsverhältnis

  $$r_W = 1 - \frac{h_4 - h_3}{h_1 - h_2} = 0.9951$$

- Alternative Lösung mit Matlab und der WATER95-Bibliothek

ex16.m

```
function ex16()
% Clausius-Rankine
addpath('/pfad/zu/water95');

% gegebene Werte
T1 = celsiusToKelvin(500);
p1 = 60e5;
p2 = 0.1e5;

% Punkt 3 im Nassdampfbereich, ggb. p3 = p2, x3 = 0
p3 = p2;
T3 = saturationTemperature(p3);
[~, rhop3, rhopp3] = saturationPressure(T3);
rho3 = rhop3;      % x3 = 0
h3 = enthalpy(rho3, T3)
s3 = entropy(rho3, T3)

% Punkt 4 im Wasserbereich, ggb. p4 = p1, s4 = s3
p4 = p1;
s4 = s3;
T4 = temperaturePS(p4, s4);
rho4 = density(p4, T4);
h4 = enthalpy(rho4, T4)

% Punkt 1 im Heißdampfbereich, ggb. p1, T1
rho1 = density(p1, T1);
h1 = enthalpy(rho1, T1)
s1 = entropy(rho1, T1)

% Punkt 2 im Nassdampfbereich, ggb. p2, s2 = s1
s2 = s1;
rhop2 = rhop3;
rhopp2 = rhopp3;
T2 = T3;
sp2 = entropy(rhop2, T2)
spp2 = entropy(rhopp2, T2)
x2 = (s2 - sp2)/(spp2 - sp2)

hp2 = enthalpy(rhop2, T2)
hpp2 = enthalpy(rhopp2, T2)
h2 = hp2 + x2*(hpp2 - hp2)

eta = 1 + (h3 - h2)/(h1 - h4)
rW = 1 - (h4 - h3)/(h1 - h2)
```

Lösung von Aufgabe 17

a. Thermischer Wirkungsgrad ohne Vorwärmung:

Direkt aus Tabelle 6 erhält man

h_1 = 3626 kJ/kg

s_1 = 6.904 kJ/(kg K)

Tabelle 5 liefert

h_3 = 191.8 kJ/kg

s_3 = 0.6492 kJ/(kg K)

Punkt 2 liegt auf der Dampfdruckkurve bei p_3, außerdem ist $s_2 = s_1$. Die Randwerte sind

$s'_2 = s_3$ = 0.6492 kJ/(kg K)

s''_2 = 8.149 kJ/(kg K)

damit ist der Feuchtegehalt

$$x_2 = \frac{s_2 - s'_2}{s''_2 - s'_2} = 0.8341$$

somit die spezifische Enthalpie

$h_2 = h'_2 + x_2 (h''_2 - h'_2)$ = 2187 kJ/kg

Für Punkt 4 sind $s_4 = s_3$ und $p_4 = p_1$ bekannt. Durch Interpolation der Wassertafel erhält man damit

h_4 = 201.9 kJ/kg

t_4 = 46.14 °C

Der Wirkungsgrad ist also

$$\eta_{th} = 1 - \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4} = 41.73\%$$

und das Arbeitsverhältnis

$$r_W = 1 - \frac{h_4 - h_3}{h_1 - h_2} = 99.30\%$$

b. Enthalpien des abgezweigten Dampfs:

Punkt 2a ist gegeben durch

$s_{2a} = s_1$ = 6.904 kJ/(kg K)

p_{2a} = 10 bar

also ist seine Enthalpie

h_{2a} = 2932 kJ/kg

Bei Punkt 4a gilt

t_{4a} = 150 °C

$p_{4a} = p_1$ = 100 bar

also hat man sofort

h_{4a} = 638.1 kJ/kg

s_{4a} = 1.831 kJ/(kg K)

Schließlich ist Punkt 3a bestimmt durch

$p_{3a} = p_{2a}$, $s_{3a} = s_{4a}$

damit ergibt sich

$h_{3a} = 628.3$ kJ/kg

$t_{3a} = 149.0$ °C

Check: $t_{3a} > t_4$ (sonst wäre keine vollständige Wärmeübertragung möglich!)

c. Thermischer Wirkungsgrad mit Vorwärmung

Aus der Energiebilanz des entnommenen Dampfes im Vorwärmer erhält man seinen Massenanteil

$$\alpha = \frac{h_{4a} - h_4}{h_{2a} - h_{3a} + h_{4a} - h_4} = 15.92\%$$

spez. technische Arbeit, die in der Turbine abgegeben wird

$w_t^- = (1 - \alpha)\, w_{t12} + \alpha\, w_{t12a}$

längs der Adiabaten ist $w_{t12} = h_2 - h_1$ etc., also

$w_t^- = (1 - \alpha)\,(h_2 - h_1) + \alpha\,(h_{2a} - h_1) = -1320$ kJ/kg

Aufgewandt wird technische Arbeit in den beiden Pumpen, daher

$$\begin{aligned} w_t^+ &= (1-\alpha) w_{t34} + \alpha w_{t3a4a} \\ &= (1-\alpha)(h_4 - h_3) + \alpha(h_{4a} - h_{3a}) = 10.02\,\mathrm{kJ/kg} \end{aligned}$$

Wegen der Speisewasservorwärmung wird Wärme nur ab Punkt 4a zugeführt, also

$q_{zu} = q_{4a1} = h_1 - h_{4a} = 2988$ kJ/kg

Damit ist der Wirkungsgrad der gesamten Anlage

$$\eta = \frac{-(w_t^+ + w_t^-)}{q_{zu}} = 43.85\%$$

und das Arbeitsverhältnis

$r_W = 1 + w_t^+/w_t^- = 0.9924$

Lösung von Aufgabe 18

a. Berechnung von COP:

P1, P2 und P2b bleiben gleich

Punkt 3 (flüssig) mit T_3 = 19 °C, $p_3 = p_2$ = 14 bar

- Interpolation liefert h_3 = 249.13 kJ/kg

damit COP_{max} = 10.176

b. Bestimmung von x_4:

ggb: $T_4 = T_1$ = 10 °C, $h_4 = h_3$ = 249.13 kJ/kg

aus Dampfdruckkurve liest man ab: h'_4 = 225.40 kJ/kg, h''_4 = 585.43 kJ/kg

damit

$$h_4 = h'_4 + x_4(h''_4 - h'_4) \quad \Rightarrow \quad x_4 = \frac{h_4 - h'_4}{h''_4 - h'_4} = 0.0659 = 6.59\%$$

c. Ermittlung des Kühlmittelstroms:

bei Gütegrad von 50%

$COP = \eta_{WP}\, COP_{max}$ = 5.088

für die verlangte Heizleistung benötigt man

$$\dot{W}_k = \frac{-\dot{Q}_{ab}}{COP} = 5.896\,\mathrm{kW}$$

1. Hauptsatz für den adiabaten Prozess 1 → 2 ergibt

$$\begin{aligned} \dot{W}_k &= \dot{W}_{t12} = \dot{m}(h_2 - h_1) \\ \Rightarrow \quad \dot{m} &= \frac{\dot{W}_{t12}}{h_2 - h_1} = 0.1609\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}} \end{aligned}$$