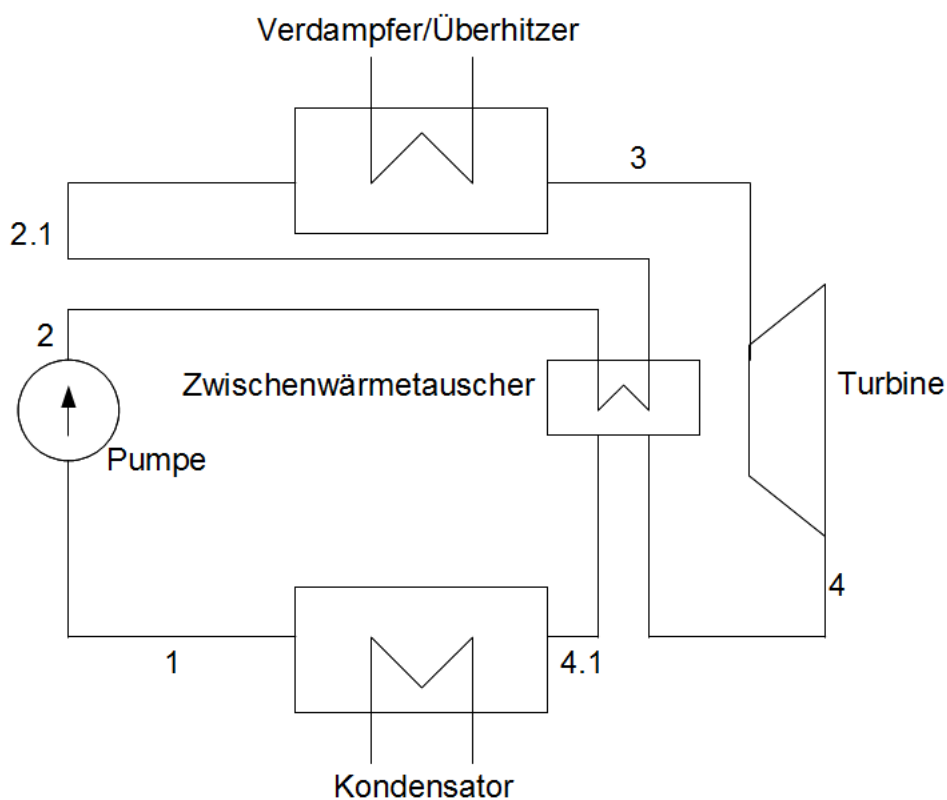


Berechnung von ORC-Prozessen mit Kältemitteln

Diplomarbeit

Christoph Wiesner

Matr.-Nr.: 1858108



1. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Franz Vinnemeier
2. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Bernd Sankol
Abgabedatum: 02.02.2012

Kurzfassung

Da der Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine die wichtigste Kenngröße ist, dessen Steigerung selbst um wenige Prozentpunkte eine deutliche Energieerhöhung, bzw. Brennstoffersparnis bedeuten kann, widmet sich diese Diplomarbeit der Untersuchung des Einflusses der Temperatur und des Druckes auf diesen.

Christoph Wiesner
Höpenweg 7
21357 Wittorf

Tel.: 0174/7111504
E-Mail: wiesnerberlin@gmx.net

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen	vi
1 Einleitung	1
2 ORC-Prozesse	3
3 Kreisprozeß und Randbedingungen	4
4 Kreisprozeßberechnung	7
4.1 Berechnung der Pumpe	7
4.2 Berechnung des Verdampfers/Überhitzers	8
4.3 Berechnung der Turbine	9
4.4 Berechnung des Kondensators	10
4.5 Berechnung der Wärmeströme	10
4.6 Berechnung des thermischen Wirkungsgrades	10
4.7 Berechnung des Zwischenwärmetauschers	10
4.8 Berechnung der Wärmeströme mit Zwischenwärmetauscher	13
4.9 Berechnung des thermischen Wirkungsgrades mit Zwischenwärmetauscher	13
4.10 Berechnung des exergetischen Wirkungsgrades ohne Zwischenwärmetauscher	13
4.10.1 Berechnung der Exergie	13
4.10.2 Berechnung der Anergie	14
4.10.3 Berechnung der Exergieverluste	15
4.10.4 Berechnung der Exergie der Wärme	15
4.10.5 Berechnung des exergetischen Wirkungsgrades	15
4.11 Berechnung des exergetischen Wirkungsgrades mit Zwischenwärmetauscher	16
4.11.1 Berechnung der Exergie	16
4.11.2 Berechnung der Anergie	16
4.11.3 Berechnung der Exergieverluste	17
4.11.4 Berechnung der Exergie der Wärme	17
4.11.5 Berechnung des exergetischen Wirkungsgrades	17

5	Ergebnisse	18
5.1	Untersuchung der Kältemittel	19
5.2	Berechnung ohne Zwischenwärmetauscher	21
5.2.1	Untersuchung des Temperatureinflusses	21
5.2.2	Untersuchung des Druckeinflusses	25
5.3	Berechnung mit Zwischenwärmetauscher	28
5.3.1	Untersuchung des Temperatureinflusses	28
5.3.2	Untersuchung des Druckeinflusses	31
5.4	Untersuchung des Zwischenwärmetauschers	34
5.5	Vergleich der Maximalwerte der Kältemittel	35
5.6	Untersuchung der Druckverluste	36
5.7	Untersuchung des exergetischen Wirkungsgrades der Pumpe	39
5.8	Untersuchung des exergetischen Wirkungsgrades der Turbine	45
6	Programm	51
6.1	Beschreibung des Quellcodes	51
6.2	Bedienung des Programms	51
7	Offene Punkte	53
8	Zusammenfassung	54
	Literatur	55
A	Beispielrechnung	57
B	Zip-Archiv	65

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schaltbild des Kreisprozesses	1
3.1	Schaltbild des Kreisprozesses	4
3.2	R123 - log p(h)-Diagramm bei $p_3 = 28,5 \text{ bar}$ und $T_3 = 468,15 \text{ K}$	6
4.1	Schaltbild der Pumpe	7
4.2	Schaltbild des Verdampfers/Überhitzers	8
4.3	Schaltbild der Turbine	9
4.4	Schaltbild des Kondensators	10
4.5	Schaltbild des Zwischenwärmetauschers	11
5.1	NH3 - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über der Temperatur	21
5.2	R22 - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über der Temperatur	22
5.3	R123 - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über der Temperatur	22
5.4	R134a - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über der Temperatur	23
5.5	R134a - Untersuchung des maximalen Wirkungsgrades	23
5.6	R152a - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über der Temperatur	24
5.7	NH3 - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über dem Druck . . .	25
5.8	R22 - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über dem Druck . . .	26
5.9	R123 - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über dem Druck . . .	26
5.10	R134a - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über dem Druck . . .	27
5.11	R152a - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über dem Druck . . .	27
5.12	NH3 - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über der Temperatur . . .	28
5.13	R22 - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über der Temperatur . . .	29
5.14	R123 - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über der Temperatur . . .	29
5.15	R134a - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über der Temperatur . . .	30
5.16	R152a - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über der Temperatur . . .	30
5.17	NH3 - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über dem Druck	31
5.18	R22 - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über dem Druck	31
5.19	R123 - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über dem Druck	32

5.20	R134a - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über dem Druck . . .	32
5.21	R152a - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über dem Druck . . .	33
5.22	R123 - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über dT	34
5.23	R123 - mit Druckverlusten in den Wärmetauschern	36
5.24	R123 - mit Druckverlust im Verdampfer/Überhitzer	37
5.25	R123 - mit Druckverlust im Kondensator	37
5.26	R123 - mit Druckverlust im Zwischenwärmetauscher	38
5.27	NH3 - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über der Temperatur . .	39
5.28	NH3 - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über dem Druck	40
5.29	R22 - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über der Temperatur . .	40
5.30	R22 - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über dem Druck	41
5.31	R123 - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über der Temperatur . .	41
5.32	R123 - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über dem Druck	42
5.33	R134a - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über der Temperatur .	42
5.34	R134a - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über dem Druck	43
5.35	R152a - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über der Temperatur .	43
5.36	R152a - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über dem Druck	44
5.37	NH3 - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über der Temperatur . .	45
5.38	NH3 - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über dem Druck	46
5.39	R22 - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über der Temperatur . .	46
5.40	R22 - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über dem Druck	47
5.41	R123 - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über der Temperatur .	47
5.42	R123 - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über dem Druck	48
5.43	R134a - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über der Temperatur .	48
5.44	R134a - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über dem Druck	49
5.45	R152a - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über der Temperatur .	49
5.46	R152a - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über dem Druck	50

Tabellenverzeichnis

5.1	Maximalwerte des therm. Wirkungsgrades mit Zwischenwärmetauscher .	35
-----	--	----

Formelzeichen, Symbole und Indizes

Formelzeichen, Symbole

b	J/kg	spezifische Anergie
\dot{B}	J/s	Anergie
c	$J/(kg K)$	spezifische Wärmekapazität
e	J/kg	spezifische Exergie
\dot{E}	J/s	Exergie
h	J/kg	spezifische Enthalpie
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
p	N/m^2	Druck
q	J/kg	spezifischer Wärmestrom
\dot{Q}	W	zugeführter (+) oder abgeführter (–) Wärmestrom
s	$J/(kg K)$	Entropie
t	$^{\circ}C$	Temperatur
T	K	Temperatur
u	J/kg	innere Energie
v	m^3/kg	spezifisches Volumen
y	J/kg	spezifische Strömungsarbeit
η	–	Wirkungsgrad
η_C	–	Carnot-Faktor
ξ	–	exergetischer Wirkungsgrad

Indizes

F	für ideale Flüssigkeit
K	Kondensator
m	misch
P	Pumpe
q	Wärme
sl	Siedelinie
t	technisch
th	thermisch
T	Turbine
u	Umgebung
v	Verlust
V	Verdampfer/Überhitzer
zwt	Zwischenwärmetauscher
1	bei Punkt 1
2	bei Punkt 2
2.1	bei Punkt 2.1

- 3 bei Punkt 3
- 4 bei Punkt 4
- 4.1 bei Punkt 4.1
- $\overline{c_F}$ arithmetischer Mittelwert (hier am Beispiel von c_F)

1 Einleitung

Als Wärmekraftmaschinen werden Maschinen bezeichnet die Wärmeenergie in mechanische Energie umwandeln. Beispiele dafür sind die Dampfmaschine, die Dampfturbine, die Gasturbine, der Verbrennungsmotor, die Heißluftmaschine oder der Stirling-Motor.

Um die durch Verbrennung entstehende Wärmeenergie nutzbar zu machen wird diese auf das Arbeitsmedium der Wärmekraftmaschine übertragen und als Wellenarbeit einer Turbine, durch expandieren des heißen Gases, abgeführt. Dafür muss die Wärmekraftmaschine einen Kreisprozeß durchlaufen, bei dem alle Zustandsgrößen am Ende die selben Werte annehmen die sie auch am Anfangszustand hatten.

Die hier betrachtete Maschine durchläuft der Reihe nach eine Speisepumpe, einen Verdampfer/Überhitzer, eine Turbine und einen Kondensator. Zur Erhöhung des Wirkungsgrades wird noch ein Zwischenwärmetauscher zwischengeschaltet, welcher dem System nach verlassen der Turbine Wärme entzieht und diese vor Eintritt in den Verdampfer/Überhitzer wieder zuführt.

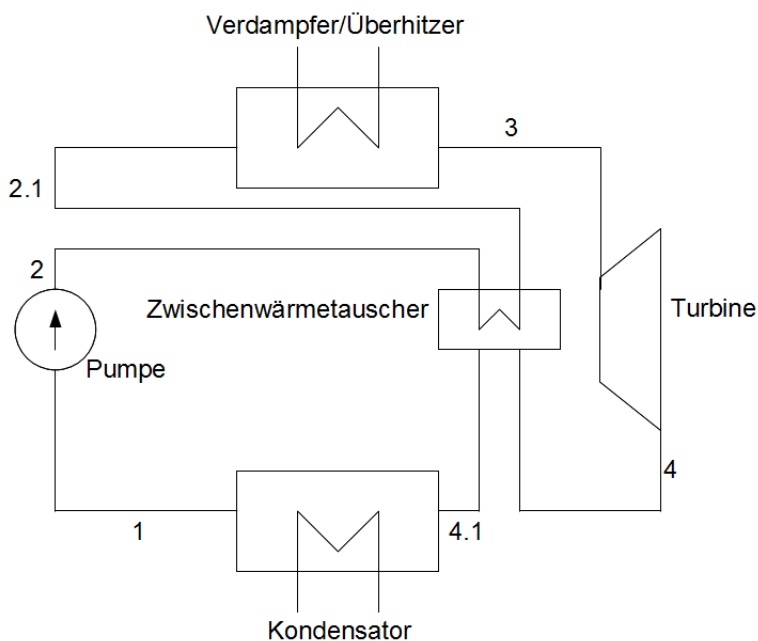


Abbildung 1.1: Schaltbild des Kreisprozesses

Als einstellbare Größen werden dabei die Temperatur und der Druck im *Punkt 3* nach verlassen des Verdampfers/Überhitzers vorgegeben.

Da der Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine die wichtigste Kenngröße ist, dessen Steigerung selbst um wenige Prozentpunkte eine deutliche Energieerhöhung, bzw. Brennstoffersparnis bedeuten kann, widmet sich diese Diplomarbeit der Untersuchung des Einflusses der Temperatur und des Druckes auf diesen.

Für die Berechnung wird ein allgemeingültiger Gleichungssatz benötigt, mit dem alle relevanten Größen, auch unter Einsatz eines realen Gases als Kühlmittel, berechnet werden können. Da dies eine sehr aufwendige Rechnung ergibt, wird zusätzlich ein C-Programm benötigt, mit dem sich relativ schnell eine große Anzahl von Variationen der Eingangsgrößen berechnen läßt.

2 ORC-Prozesse

ORC-Prozesse (Organic Rankine Cycle) sind Verfahren für den Betrieb von Dampfturbinen mit anderen Kältemitteln als Wasserdampf. Der Name Organic Rankine Cycle geht auf William John Macquorn Rankine zurück, einem schottisch-britischen Physiker und Ingenieur. Als Kältemittel werden organische Flüssigkeiten mit einer niedrigen Verdampfungstemperatur verwendet.

Aufgrund der besonderen thermodynamischen Eigenschaften der ORC-Fluide ist es möglich selbst geringe Quellen thermischer Energie (z.B. aus Abwärme, Geothermie, Biomasse oder solarthermischen Quellen) effizient in elektrische Energie umzuwandeln.

Das Verfahren kommt besonders dann zum Einsatz, wenn das Temperaturgefälle zwischen Wärmequelle und -senke zu niedrig für den Betrieb mit einer von Wasserdampf angetriebenen Turbine ist.

3 Kreisprozeß und Randbedingungen

Für die Berechnung des in *Abb. 3.2* dargestellten Kreisprozesses werden die Berechnungsgebiete wie folgt definiert:

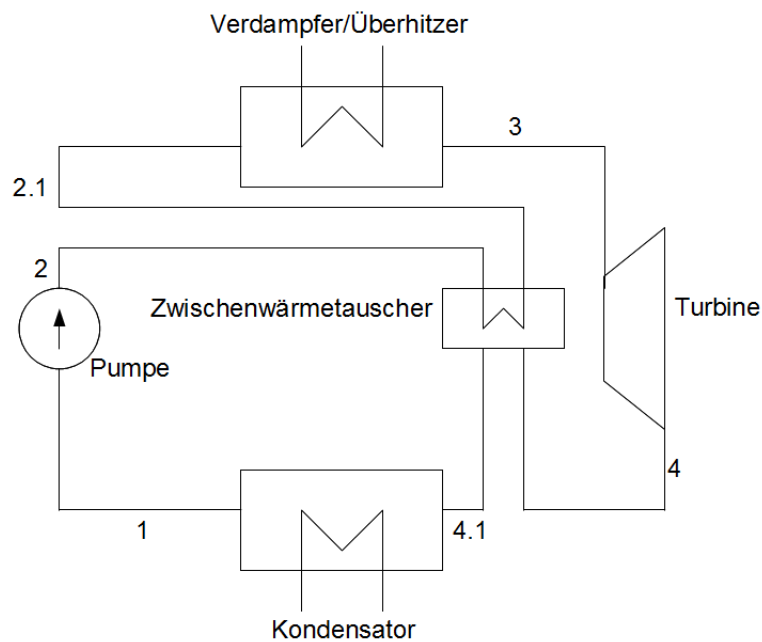


Abbildung 3.1: Schaltbild des Kreisprozesses

- Punkt 1:* Austritt Kondensator, Eintritt Speisepumpe
- Punkt 2:* Austritt Speisepumpe, Eintritt Verdampfer/Überhitzer
- Punkt 3:* Austritt Verdampfer/Überhitzer, Eintritt Turbine
- Punkt 4:* Austritt Turbine, Eintritt Kondensator

und für die Berechnung mit Zwischenwärmetauscher werden noch die folgenden Zwischenpunkte definiert:

- Punkt 2.1:* Austritt Zwischenwärmetauscher, Eintritt Verdampfer/Überhitzer
- Punkt 4.1:* Austritt Zwischenwärmetauscher, Eintritt Kondensator

Desweiteren sind folgende Daten bekannt:

- Umgebungstemperatur $t_u = 15 \text{ }^\circ\text{C}$
- Verwendetes Kältemittel: R 22, R123, R134a und NH₃
- Der *Punkt 1* liegt auf der Siedelinie.
- Eintrittstemperatur in die Speisepumpe: $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

-
- Maximale Temperatur und der maximale Druck am Austritt des Verdampfers/Überhitzers richtet sich nach der Gültigkeit der Arbeitsgleichungen nach: [2]
 - Keine Druckverluste im Kondensator, Verdampfer/Überhitzer sowie Zwischenwärmetauscher: $p_2 = p_{2.1} = p_3$ und $p_4 = p_{4.1} = p_1$
 - Isentroper Wirkungsgrad der Speisepumpe: $\eta_{Ps} = 0,6$
 - Isentroper Wirkungsgrad der Turbine: $\eta_{Ts} = 0,85$
 - Die Temperatur T_3 und der Druck p_3 sind frei wählbar.
 - Die kinetische und potentielle Energie wird vernachlässigt.
 - Die Temperaturdifferenz ΔT zwischen T_2 und $T_{4.1}$ wird auf 5° festgelegt.

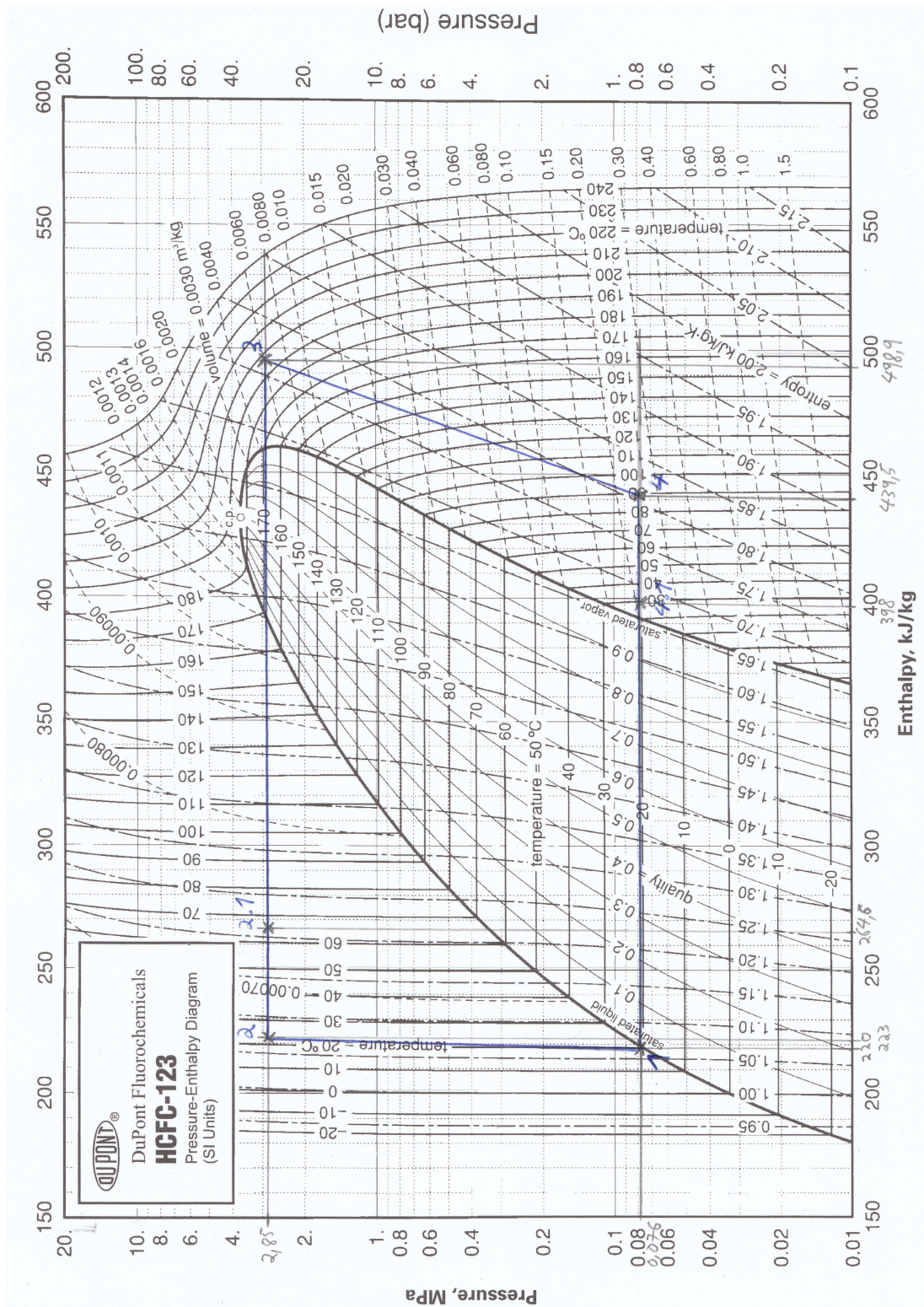


Abbildung 3.2: R123 - log p(h)-Diagramm bei $p_3 = 28,5 \text{ bar}$ und $T_3 = 468,15 \text{ K}$
 Quelle: [7] Seite 9

4 Kreisprozeßberechnung

Bei dem Kältemittel R123 handelt es sich um ein reales Fluid, für das die Formeln für ideale Fluide nicht verwendet werden können. Deshalb muss ein Weg gefunden werden wie mit den Stoffwerten die Berechnung erfolgen kann.

4.1 Berechnung der Pumpe

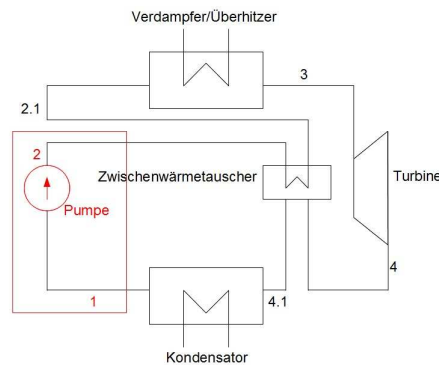


Abbildung 4.1: Schaltbild der Pumpe

Da sich der *Punkt* 1 mit der Temperatur $T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ auf der Siedelinie befindet, ist dieser bestimmt und der Druck p_1 , die Dichte ρ_1 , die Enthalpie h_1 sowie die Entropie s_1 können Stoffwerttabellen entnommen werden:

$$p_1, \rho_1, h_1, s_1 = f(T_1) \quad (4.1)$$

Der Druck im *Punkt* 2 ist $p_2 = p_3$ da angenommen wird, dass keine Druckverluste im Verdampfer/Überhitzer auftreten. Damit liegen alle benötigten Werte für die Berechnung der Speisepumpe vor.

Als erstes wird die spezifische Strömungsarbeit der Pumpe bestimmt:

$$y_P = \int v dp = \frac{p_2 - p_1}{\rho_1} \quad (4.2)$$

Für eine ideale Flüssigkeit gilt bei einer isentropen Zustandsänderung:

$$y_P = y_{Ps} = \Delta h_{Ps} \quad (4.3)$$

Über den isentropen Wirkungsgrad η_{Ps} wird die wirkliche Enthalpieänderung über die Pumpe Δh_P berechnet:

$$\eta_{Ps} = \frac{\Delta h_{Ps}}{\Delta h_P} \quad (4.4)$$

$$\Delta h_P = h_2 - h_1 = \int c_F dT + \frac{\Delta p}{\rho} = \frac{\Delta h_{Ps}}{\eta_{Ps}} \quad (4.5)$$

Da die Enthalpie h_1 bekannt ist folgt:

$$h_2 = \Delta h_P + h_1 \quad (4.6)$$

Aus der Definition der Enthalpie wird die innere Energie u_1 berechnet:

$$h_1 = u_1 + p_1 \cdot v_1 = u_1 + \frac{p_1}{\rho_1} \quad (4.7)$$

$$u_1 = h_1 - \frac{p_1}{\rho_1} \quad (4.8)$$

Mit dieser wird die spezifische Wärmekapazität c_F bestimmt:

$$c_F = \frac{u_1}{T_1} \quad (4.9)$$

Damit sind alle Werte bekannt um mit den Gleichungen 4.2 und 4.5 die Temperatur T_2 zu berechnen:

$$T_2 = T_1 + \frac{\Delta h_P - y_P}{c_F} \quad (4.10)$$

Nun wird die Entropieänderung Δs_P berechnet und mit dieser die Entropie im *Punkt 2*:

$$\Delta s_P = c_F \cdot \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \quad (4.11)$$

$$s_2 = \Delta s_P + s_1 \quad (4.12)$$

Damit ist der *Punkt 2* und somit die Pumpe vollständig bestimmt.

4.2 Berechnung des Verdampfers/Überhitzers

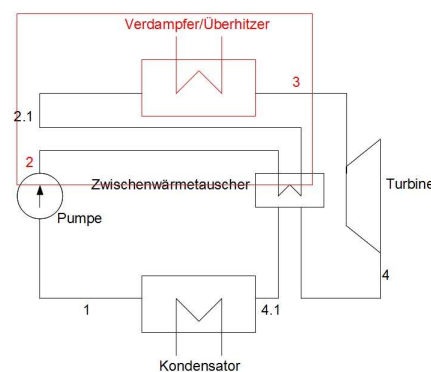


Abbildung 4.2: Schaltbild des Verdampfers/Überhitzers

Die Temperatur $T_3 < 200 \text{ }^\circ\text{C}$ und der Druck $p_3 < 30 \text{ bar}$ im *Punkt 3* können innerhalb der Grenzen frei gewählt werden, mit diesen können die restlichen Werte (Dichte ρ_3 , Enthalpie h_3 und Entropie s_3) Stoffwerttabellen entnommen werden:

$$\rho_3, h_3, s_3 = f(T_3, p_3) \quad (4.13)$$

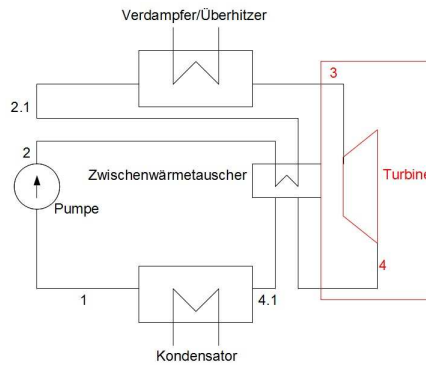


Abbildung 4.3: Schaltbild der Turbine

4.3 Berechnung der Turbine

Für die Berechnung des Zustandes am Turbinenaustritt (*Punkt 4*) wird zunächst die isentrope Enthalpie h_{4s} benötigt. Für den isentropen Austrittszustand s_{4s} kann dieser mit der Entropie s_3 im *Punkt 3* gleichgesetzt werden:

$$s_{4s} = s_3 \quad (4.14)$$

und da keine Druckverluste im Kondensator angenommen werden folgt:

$$p_4 = p_1 \quad (4.15)$$

Damit kann die isentrope Enthalpie h_{4s} den Stoffwerttabellen entnommen werden:

$$h_{4s} = f(s_{4s}, p_4) \quad (4.16)$$

Jetzt kann die isentrope Enthalpiedifferenz Δh_{Ts} berechnet werden:

$$\Delta h_{Ts} = h_{4s} - h_3 \quad (4.17)$$

Über den isentropen Wirkungsgrad η_{Ts} der Turbine wird die wirkliche Enthalpiedifferenz Δh_T und die Enthalpie h_4 im *Punkt 4* bestimmt:

$$\eta_{Ts} = \frac{\Delta h_T}{\Delta h_{Ts}} \quad (4.18)$$

$$\Delta h_T = h_4 - h_3 = \Delta h_{Ts} \cdot \eta_{Ts} \quad (4.19)$$

$$h_4 = \Delta h_T + h_3 \quad (4.20)$$

Mit dem Druck p_4 und der Enthalpie h_4 können die noch fehlenden Werte vom *Punkt 4* (Temperatur T_4 , Dichte ρ_4 und Entropie s_4) Stoffwerttabellen entnommen werden:

$$T_4, \rho_4, s_4 = f(p_4, h_4) \quad (4.21)$$

Als letztes wird noch die Entropieänderung Δs_T berechnet:

$$\Delta s_T = s_4 - s_3 \quad (4.22)$$

Damit ist der *Punkt 4* und somit die Turbine vollständig bestimmt.

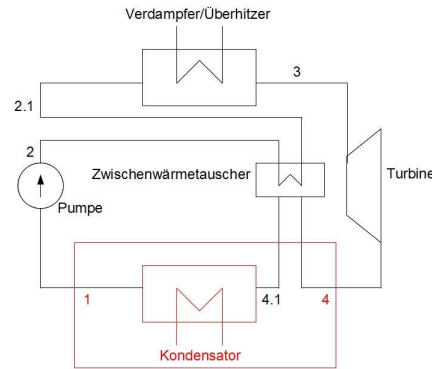


Abbildung 4.4: Schaltbild des Kondensators

4.4 Berechnung des Kondensators

Der Kondensator senkt die Temperatur T_4 des Kältemittels nach verlassen der Turbine auf die Temperatur $t_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ vor dem Eintritt in die Pumpe. Damit ist der Kreisprozeß geschlossen.

4.5 Berechnung der Wärmeströme

Die Wärmeströme des Verdampfers/Überhitzers und des Kondensators könne mit Hilfe der Enthalpien bestimmt werden:

$$\dot{Q}_{23} = \dot{m} \cdot h_3 - h_2 \quad (4.23)$$

$$\dot{Q}_{41} = \dot{m} \cdot h_1 - h_4 \quad (4.24)$$

bzw.:

$$q_{23} = h_3 - h_2 \quad (4.25)$$

$$q_{41} = h_1 - h_4 \quad (4.26)$$

für die spezifischen Wärmeströme.

4.6 Berechnung des thermischen Wirkungsgrades

Für die Berechnung des thermischen Wirkungsgrades η_{th} wird zunächst die technische Arbeit des Kreisprozesses w_t bestimmt:

$$w_t = w_{t34} - w_{t12} = (h_4 - h_3) - (h_2 - h_1) \quad (4.27)$$

$$\eta_{th} = \frac{|w_t|}{q_{23}} \quad (4.28)$$

4.7 Berechnung des Zwischenwärmetauschers

Um einen besseren Wirkungsgrad zu erzielen wird die Turbinenaustrittstemperatur T_4 vor Eintritt in den Kondensator durch einen Zwischenwärmetauscher auf die Temperatur $T_{4.1}$, gleich Pumpenaustrittstemperatur T_2 plus die Temperaturdifferenz ΔT des Zwischenwärmetauschers, gesenkt:

$$T_{4.1} = T_2 + \Delta T \quad (4.29)$$

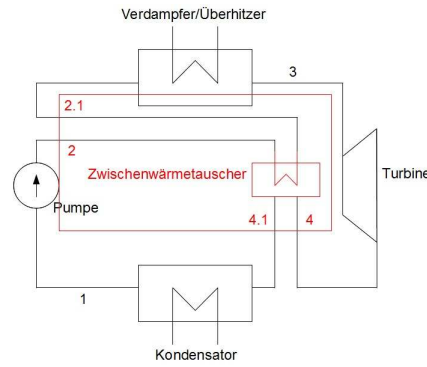


Abbildung 4.5: Schaltbild des Zwischenwärmetauschers

Dadurch erhält man den Zwischenpunkt 4.1.

Da keine Druckverluste im Zwischenwärmetauscher angenommen werden ist der Druck nach verlassen des Zwischenwärmetauschers $p_{4.1}$ gleich dem Druck nach verlassen der Turbine p_4 :

$$p_{4.1} = p_4 \quad (4.30)$$

Damit können die restlichen Werte des *Punktes* 4.1 (Dichte $\rho_{4.1}$, Enthalpie $h_{4.1}$ und Entropie $s_{4.1}$) mit Hilfe von Stoffwerttabellen bestimmt werden:

$$\rho_{4.1}, h_{4.1}, s_{4.1} = f(T_{4.1}, p_{4.1}) \quad (4.31)$$

Für die weitere Berechnung wird der Wärmestrom über den Zwischenwärmetauscher $\dot{Q}_{44.1}$ benötigt:

$$\dot{Q}_{44.1} = \dot{m} \cdot (h_{4.1} - h_4) \quad (4.32)$$

Diese im Zwischenwärmetauscher abgeführte Wärme wird zwischen dem Pumpenaustritt und dem Eintritt in den Verdampfer/Überhitzer dem Kreislauf wieder zugeführt und man erhält zusätzlich noch den *Punkt* 2.1.

$$\dot{Q}_{2.12} = -\dot{Q}_{44.1} \quad (4.33)$$

Zur Berechnung des *Punktes* 2.1 werden zunächst die Werte auf der Siedeline für den Druck p_{2sl} , die Dichte ρ_{2sl} und die Enthalpie h_{2sl} bei der Temperatur T_2 mit Hilfe von Stoffwerttabellen bestimmt:

$$p_{2sl}, \rho_{2sl}, h_{2sl} = f(T_{2sl}) \quad (4.34)$$

Mit diesen wird analog zu den bei der Berechnung der Pumpe verwendeten Gleichungen 4.8 und 4.9 die spezifische Wärmekapazität c_{2sl} bestimmt:

$$u_{2sl} = h_{2sl} - \frac{p_{2sl}}{\rho_{2sl}} \quad (4.35)$$

$$c_{2sl} = \frac{u_{2sl}}{T_{2sl}} \quad (4.36)$$

Zusammen mit dem Wärmestrom $\dot{Q}_{2.12}$ können nun die Temperatur $T_{2.1}$ und die Enthalpie $h_{2.1}$ im *Punkt* 2.1 berechnet werden. Dafür wird die Formel für den Wärmestrom

nach diesen umgestellt:

$$\dot{Q}_{2.12} = \dot{m} \cdot (h_{2.1} - h_2) = \dot{m} \cdot c_{2sl} \cdot (T_{2.1} - T_2) \quad (4.37)$$

$$T_{2.1} = \frac{\dot{Q}_{2.12}}{\dot{m} \cdot c_{2sl}} + T_2 \quad (4.38)$$

$$h_{2.1} = \frac{\dot{Q}_{2.12}}{\dot{m}} + h_2 \quad (4.39)$$

Da keine Druckverluste im Zwischenwärmetauscher angenommen werden ist der Druck nach verlassen des Zwischenwärmetauschers $p_{2.1}$ gleich dem Druck vor dem Turbineneintritt p_3 :

$$p_{2.1} = p_3 \quad (4.40)$$

Das Kältemittel befindet sich bei der Temperatur $T_{2.1}$ im Flüssigkeitsgebiet, somit entspricht die Dichte in diesem Punkt dem Wert auf der Siedelinie $\rho_{2.1sl}$ und kann mit Hilfe von Stoffwerttabellen bestimmt werden, um mit dieser die Genauigkeit der Berechnung der Temperatur $T_{2.1}$ zu erhöhen:

$$\rho_{2sl} = f(T_{2sl}) \quad (4.41)$$

Damit wird die spezifische Wärmekapazität $c_{2.1sl}$ bestimmt:

$$u_{2.1sl} = h_{21} - \frac{p_{21}}{\rho_{2sl}} \quad (4.42)$$

$$c_{2.1sl} = \frac{u_{2sl}}{T_{2sl}} \quad (4.43)$$

Mit dieser wird die mittlere spezifische Wärmekapazität $\overline{c_{2.1sl}}$ bestimmt:

$$\overline{c_{2.1sl}} = \frac{c_{2sl} + c_{2.1sl}}{2} \quad (4.44)$$

Damit wird die Temperatur $T_{2.1}$ neu bestimmt:

$$T_{2.1} = \frac{\dot{Q}_{2.12}}{\dot{m} \cdot \overline{c_{2.1sl}} + T_2} \quad (4.45)$$

Dieser Teil der Rechnung muss solange wiederholt werden bis sich die Temperatur $T_{2.1}$ nicht mehr ändert. Dafür wird die Dichte $\rho_{2.1sl}$ jeweils mit der neu berechneten Temperatur $T_{2.1}$ erneut bestimmt.

Zusätzlich kann, falls benötigt, mit der Gleichung 4.11 die Entropie $s_{2.1}$ bestimmt werden:

$$s_{2.1} = \overline{c_{2.1sl}} \cdot \ln\left(\frac{T_{2.1}}{T_1}\right) + s_1 \quad (4.46)$$

Zur Überprüfung, ob sich der *Punkt* 2.1 im Flüssigkeitsgebiet befindet, wird die Temperatur $T_{2.1sl}$ auf der Siedelinie bei dem Druck $p_{2.1}$ den Stoffwerttabellen entnommen und diese mit der Temperatur $T_{2.1}$ verglichen:

$$T_{2.1sl} = f(p_{2.1}) \quad (4.47)$$

Wenn die Temperatur $T_{2.1} < T_{2.1sl}$ ist, ist das Kühlmittel beim *Punkt* 2.1 flüssig und die verwendeten Formeln sind zulässig.

4.8 Berechnung der Wärmeströme mit Zwischenwärmetauscher

Analog zur Berechnung ohne Zwischenwärmetauscher können die Wärmeströme des Verdampfers/Überhitzers sowie des Kondensators mit Hilfe der Enthalpien bestimmt werden:

$$\dot{Q}_{2.13} = \dot{m} \cdot h_3 - h_2 \quad (4.48)$$

$$\dot{Q}_{4.11} = \dot{m} \cdot h_1 - h_4 \quad (4.49)$$

bzw.:

$$q_{2.13} = h_3 - h_{2.1} \quad (4.50)$$

$$q_{4.11} = h_1 - h_{4.1} \quad (4.51)$$

für die spezifischen Wärmeströme.

4.9 Berechnung des thermischen Wirkungsgrades mit Zwischenwärmetauscher

Die Berechnung des thermischen Wirkungsgrades η_{th} mit Zwischenwärmetauscher erfolgt analog zur Berechnung ohne Zwischenwärmetauscher. Dafür wird in Gleichung 4.28 $q_{2.13}$ anstelle von q_{23} eingesetzt.

$$\eta_{th,zwt} = \frac{|w_t|}{q_{2.13}} \quad (4.52)$$

4.10 Berechnung des exergetischen Wirkungsgrades ohne Zwischenwärmetauscher

Bei der Umwandlung von Wärme in Arbeit bleibt immer ein Teil der Energie als Wärme übrig. Mechanische und elektrische Arbeit dagegen lassen sich vollständig in Wärme umwandeln. Daher unterscheidet man zwischen wandelbaren und nicht wandelbaren Energiearten. Den wandelbaren Anteil der Energie bezeichnet man als Exergie und den nicht wandelbaren als Anergie.

Da es sich bei dem hier betrachteten System um einen Kreisprozeß handelt, muss die Summe der Exergien und Anergien null ergeben.

Somit gilt:

$$\text{Energie} = \text{Exergie} + \text{Anergie} = \sum \dot{E}_u + \sum \dot{B}_u = 0$$

4.10.1 Berechnung der Exergie

Für die Exergie im *Punkt* 1 gilt:

$$\dot{E}_{u1} = \dot{m} \cdot \left(h_1 - h_u + \frac{c_1^2}{2} + g \cdot z_1 - T_u \cdot (s_1 - s_u) \right) \quad (4.53)$$

bzw.:

$$e_{u1} = h_1 - h_u + \frac{c_1^2}{2} + g \cdot z_1 - T_u \cdot (s_1 - s_u) \quad (4.54)$$

Da in diesem Kreisprozeß keine Änderung der kinetischen und potentiellen Energie angenommen wird vereinfachen sich die Gleichungen zu:

$$\dot{E}_{u1} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_u - T_u \cdot (s_1 - s_u)) \quad (4.55)$$

$$e_{u1} = h_1 - h_u - T_u \cdot (s_1 - s_u) \quad (4.56)$$

Analog gilt für die Exergie nach der Zustandsänderung im *Punkt 2*:

$$\dot{E}_{u2} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_u - T_u \cdot (s_2 - s_u)) \quad (4.57)$$

$$e_{u2} = (h_2 - h_u - T_u \cdot (s_2 - s_u)) \quad (4.58)$$

Damit ergibt sich die Exergieänderung von *Punkt 1* nach *Punkt 2* zu:

$$\dot{E}_{u2} - \dot{E}_{u1} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1 - T_u \cdot (s_2 - s_1)) \quad (4.59)$$

$$e_{u2} - e_{u1} = h_2 - h_1 - T_u \cdot (s_2 - s_1) \quad (4.60)$$

Analog gilt für die anderen Zustandsänderungen:

$$\dot{E}_{u3} - \dot{E}_{u2} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2 - T_u \cdot (s_3 - s_2)) \quad (4.61)$$

$$\dot{E}_{u4} - \dot{E}_{u3} = \dot{m} \cdot (h_4 - h_3 - T_u \cdot (s_4 - s_3)) \quad (4.62)$$

$$\dot{E}_{u1} - \dot{E}_{u4} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4 - T_u \cdot (s_1 - s_4)) \quad (4.63)$$

bzw.:

$$e_{u3} - e_{u2} = h_3 - h_2 - T_u \cdot (s_3 - s_2) \quad (4.64)$$

$$e_{u4} - e_{u3} = h_4 - h_3 - T_u \cdot (s_4 - s_3) \quad (4.65)$$

$$e_{u1} - e_{u4} = h_1 - h_4 - T_u \cdot (s_1 - s_4) \quad (4.66)$$

4.10.2 Berechnung der Anergie

Die Anergie im *Punkt 1* erhält man aus:

$$\dot{B}_{u1} = \dot{m} \cdot (h_u + T_u \cdot (s_1 - s_u)) \quad (4.67)$$

bzw.:

$$b_{u1} = h_u + T_u \cdot (s_1 - s_u) \quad (4.68)$$

Analog gilt für die Anergie nach der Zustandsänderung im *Punkt 2*:

$$\dot{B}_{u2} = \dot{m} \cdot (h_u + T_u \cdot (s_2 - s_u)) \quad (4.69)$$

$$b_{u2} = h_u + T_u \cdot (s_2 - s_u) \quad (4.70)$$

Damit ergibt sich die Anergieänderung von *Punkt 1* nach *Punkt 2* zu:

$$\dot{B}_{u2} - \dot{B}_{u1} = \dot{m} \cdot (T_u \cdot (s_2 - s_1)) \quad (4.71)$$

$$b_{u2} - b_{u1} = T_u \cdot (s_2 - s_1) \quad (4.72)$$

Analog gilt für die anderen Zustandsänderungen:

$$\dot{B}_{u3} - \dot{B}_{u2} = \dot{m} \cdot (T_u \cdot (s_3 - s_2)) \quad (4.73)$$

$$\dot{B}_{u4} - \dot{B}_{u3} = \dot{m} \cdot (T_u \cdot (s_4 - s_3)) \quad (4.74)$$

$$\dot{B}_{u1} - \dot{B}_{u4} = \dot{m} \cdot (T_u \cdot (s_1 - s_4)) \quad (4.75)$$

bzw.:

$$b_{u3} - b_{u2} = T_u \cdot (s_3 - s_2) \quad (4.76)$$

$$b_{u4} - b_{u3} = T_u \cdot (s_4 - s_3) \quad (4.77)$$

$$b_{u1} - b_{u4} = T_u \cdot (s_1 - s_4) \quad (4.78)$$

4.10.3 Berechnung der Exergieverluste

Die Exergieverluste einer Zustandsänderung errechnen sich aus:

$$e_{v12} = T_u \cdot \Delta s_{irr} \quad (4.79)$$

Mit der Entropiedifferenz:

$$s_2 - s_1 = \Delta s_{Aus} + \Delta s_{irr} \quad (4.80)$$

Und der Annahme, dass der Kreisprozeß adiabat ist und somit $\Delta s_{Aus} = 0$ ist, wird der Exergieverlust zu:

$$e_{v12} = T_u \cdot (s_2 - s_1) = b_{u2} - b_{u1} \quad (4.81)$$

Analog gilt für die restlichen Zustandsänderungen:

$$e_{v23} = T_u \cdot (s_3 - s_2) = b_{u3} - b_{u2} \quad (4.82)$$

$$e_{v34} = T_u \cdot (s_4 - s_3) = b_{u4} - b_{u3} \quad (4.83)$$

$$e_{v41} = T_u \cdot (s_1 - s_4) = b_{u1} - b_{u4} \quad (4.84)$$

4.10.4 Berechnung der Exergie der Wärme

Für die in der Wärme erhaltene Exergie einer Zustandsänderung gilt:

$$e_{q12} = q_{12} - T_u \cdot \Delta s_{Aus} = e_2 - e_1 - w_{t12} \quad (4.85)$$

$$(4.86)$$

Damit ergeben sich für die Zustandsänderungen des Kreisprozesses:

$$e_{q12} = e_{u2} - e_{u1} - w_{t12} \quad (4.87)$$

$$e_{q23} = q_{23} - 0 \quad (4.88)$$

$$e_{q34} = e_{u4} - e_{u3} - w_{t34} \quad (4.89)$$

$$e_{q41} = q_{41} - 0 \quad (4.90)$$

4.10.5 Berechnung des exergetischen Wirkungsgrades

Allgemein ergibt sich der Wirkungsgrad aus zugeführter durch abgeführter Leistung. Im Falle der Exergie bedeutet dies, die Exergie einer Zustandsänderung abzüglich des Exergieverlustes durch die Exergie der Zustandsänderung. Daraus folgt für Pumpe und Turbine:

$$\xi_P = \frac{e_{u12} - e_{v12}}{e_{u12}} \quad (4.91)$$

$$\xi_T = \frac{e_{u34} - e_{v34}}{e_{u34}} \quad (4.92)$$

Für den Verdichter/Überhitzer und den Kondensator wird die Exergie der Wärme verwendet:

$$\xi_V = \frac{e_{q23} - e_{v23}}{e_{q23}} \quad (4.93)$$

$$\xi_K = \frac{e_{q41} - e_{v41}}{e_{q41}} \quad (4.94)$$

4.11 Berechnung des exergetischen Wirkungsgrades mit Zwischenwärmetauscher

Für die Berechnung des exergetischen Wirkungsgrades mit Zwischenwärmetauscher müssen noch zusätzlich die Exergien und Anergien der Zustandsänderungen $2 \rightarrow 2.1$, $2.1 \rightarrow 3$, $4 \rightarrow 4.1$ und $4.1 \rightarrow 1$ berechnet werden.

4.11.1 Berechnung der Exergie

Analog zu der Berechnung ohne Zwischenwärmetauscher ergeben sich die Formeln für die Exergie zu:

$$\dot{E}_{u2.1} - \dot{E}_{u2} = \dot{m} \cdot (h_{2.1} - h_2 - T_u \cdot (s_{2.1} - s_2)) \quad (4.95)$$

$$\dot{E}_{u3} - \dot{E}_{u2.1} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_{2.1} - T_u \cdot (s_3 - s_{2.1})) \quad (4.96)$$

$$\dot{E}_{u4.1} - \dot{E}_{u4} = \dot{m} \cdot (h_{4.1} - h_4 - T_u \cdot (s_{4.1} - s_4)) \quad (4.97)$$

$$\dot{E}_{u1} - \dot{E}_{u4.1} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_{4.1} - T_u \cdot (s_1 - s_{4.1})) \quad (4.98)$$

bzw.:

$$e_{u2.1} - e_{u2} = h_{2.1} - h_2 - T_u \cdot (s_{2.1} - s_2) \quad (4.99)$$

$$e_{u3} - e_{u2.1} = h_3 - h_{2.1} - T_u \cdot (s_3 - s_{2.1}) \quad (4.100)$$

$$e_{u4.1} - e_{u4} = h_{4.1} - h_4 - T_u \cdot (s_{4.1} - s_4) \quad (4.101)$$

$$e_{u1} - e_{u4.1} = h_1 - h_{4.1} - T_u \cdot (s_1 - s_{4.1}) \quad (4.102)$$

4.11.2 Berechnung der Anergie

Analog zu der Berechnung ohne Zwischenwärmetauscher ergeben sich die Formeln für die Anergie zu:

$$\dot{B}_{u2.1} - \dot{B}_{u2} = \dot{m} \cdot (T_u \cdot (s_{2.1} - s_2)) \quad (4.103)$$

$$\dot{B}_{u3} - \dot{B}_{u2.1} = \dot{m} \cdot (T_u \cdot (s_3 - s_{2.1})) \quad (4.104)$$

$$\dot{B}_{u4.1} - \dot{B}_{u4} = \dot{m} \cdot (T_u \cdot (s_{4.1} - s_4)) \quad (4.105)$$

$$\dot{B}_{u1} - \dot{B}_{u4.1} = \dot{m} \cdot (T_u \cdot (s_1 - s_{4.1})) \quad (4.106)$$

bzw.:

$$b_{u2.1} - b_{u2} = T_u \cdot (s_{2.1} - s_2) \quad (4.107)$$

$$b_{u3} - b_{u2.1} = T_u \cdot (s_3 - s_{2.1}) \quad (4.108)$$

$$b_{u4.1} - b_{u4} = T_u \cdot (s_{4.1} - s_4) \quad (4.109)$$

$$b_{u1} - b_{u4.1} = T_u \cdot (s_1 - s_{4.1}) \quad (4.110)$$

4.11.3 Berechnung der Exergieverluste

Analog zu der Berechnung ohne Zwischenwärmetauscher ergeben sich die Formeln für die Exergieverluste zu:

$$e_{v22.1} = T_u \cdot (s_{2.1} - s_2) = b_{u2.1} - b_{u2} \quad (4.111)$$

$$e_{v2.13} = T_u \cdot (s_3 - s_{2.1}) = b_{u3} - b_{u2.1} \quad (4.112)$$

$$e_{v44.1} = T_u \cdot (s_{4.1} - s_4) = b_{u4.1} - b_{u4} \quad (4.113)$$

$$e_{v4.11} = T_u \cdot (s_1 - s_{4.1}) = b_{u1} - b_{u4.1} \quad (4.114)$$

4.11.4 Berechnung der Exergie der Wärme

Analog zu der Berechnung ohne Zwischenwärmetauscher ergeben sich die Formeln für die Exergie der Wärme zu:

$$e_{q22.1} = q_{22.1} \quad (4.115)$$

$$e_{q2.13} = q_{2.13} \quad (4.116)$$

$$e_{q44.1} = q_{44.1} \quad (4.117)$$

$$e_{q4.11} = q_{4.11} \quad (4.118)$$

4.11.5 Berechnung des exergetischen Wirkungsgrades

Analog zu der Berechnung ohne Zwischenwärmetauscher ergeben sich die Formeln für die exergetischen Wirkungsgrade zu:

$$\xi_{22.1} = \frac{e_{q22.1} - e_{v22.1}}{e_{q22.1}} \quad (4.119)$$

$$\xi_{2.13} = \frac{e_{q2.13} - e_{v2.13}}{e_{q2.13}} \quad (4.120)$$

$$\xi_{44.1} = \frac{e_{q44.1} - e_{v44.1}}{e_{q44.1}} \quad (4.121)$$

$$\xi_{4.11} = \frac{e_{q4.11} - e_{v4.11}}{e_{q4.11}} \quad (4.122)$$

5 Ergebnisse

Da für einen Kreisprozess dessen Wirkungsgrad die wichtigste Kenngröße ist, wurde dieser genauer untersucht. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf den Einfluss der Temperatur und des Druckes, als steuerbare Parameter des Prozesses, gelegt. Außerdem wurde untersucht, wie sich ein Zwischenwärmetauscher, sowie Druckverluste in den Wärmetauschern auf den Wirkungsgrad auswirken und die Maximalwerte der erreichbaren Wirkungsgrade innerhalb des hergeleiteten Gleichungssatzes verglichen. Zusätzlich wurden noch die exergetischen Wirkungsgrade der Pumpe und der Turbine untersucht.

Für die Kältemittel ist der Gültigkeitsbereich der verwendeten Stoffwerte:

- *NH3*: $200\text{ K} \leq T_3 \leq 450\text{ K}$ und $p_3 < 60\text{ bar}$
- *R22*: $190\text{ K} \leq T_3 \leq 450\text{ K}$ und $p_3 < 35\text{ bar}$
- *R123*: $200\text{ K} \leq T_3 \leq 480\text{ K}$ und $p_3 < 30\text{ bar}$
- *R134a*: $195\text{ K} \leq T_3 \leq 455\text{ K}$ und $p_3 < 35\text{ bar}$
- *R152a*: $190\text{ K} \leq T_3 \leq 435\text{ K}$ und $p_3 < 35\text{ bar}$

Um eine qualitativ möglichst aussagekräftige Untersuchung der berechneten Werte durchzuführen, musste innerhalb dieser Grenzen ein Bereich gefunden werden, in dem der hergeleitete Gleichungssatz gültig ist.

Für das Kältemittel *NH3* muss bei $p_3 = 59\text{ bar}$ $T_3 > 370,19\text{ K}$ sein, damit der *Punkt 3* sich im Gasgebiet befindet. Allerdings muss $T_3 > 406\text{ K}$ sein, damit nach Gleichung 4.34 die Temperatur T_2 bestimmt werden kann. Des weiteren gibt es, abhängig vom Druck p_3 , eine maximale Temperatur T_3 , bei der sich der *Punkt 2.1* nicht mehr im Flüssigkeitsgebiet befindet. Bei $p_3 < 46\text{ bar}$ ist dies bei $T_3 > 444\text{ K}$ der Fall. Für einen anschaulichen Wertebereich wurde daher die minimale Temperatur auf $T_3 = 410\text{ K}$ und der minimale Druck auf $p_3 = 50\text{ bar}$ gesetzt.

Für die anderen Kältemittel wurden durch Berechnungen vergleichbare Grenzen gefunden. Diese sind:

- *NH3*: $410\text{ K} \leq T_3 \leq 450\text{ K}$ und $50\text{ bar} \leq p_3 \leq 59\text{ bar}$
- *R22*: $350\text{ K} \leq T_3 \leq 389\text{ K}$ und $25\text{ bar} \leq p_3 \leq 34\text{ bar}$
- *R123*: $444\text{ K} \leq T_3 \leq 480\text{ K}$ und $17\text{ bar} \leq p_3 \leq 30\text{ bar}$
- *R134a*: $370\text{ K} \leq T_3 \leq 400\text{ K}$ und $28\text{ bar} \leq p_3 \leq 34\text{ bar}$
- *R152a*: $370\text{ K} \leq T_3 \leq 400\text{ K}$ und $28\text{ bar} \leq p_3 \leq 34\text{ bar}$

Mit diesen Grenzen wurde mit Hilfe des für diese Diplomarbeit geschriebenen C-Programmes zur genaueren Untersuchung des thermischen Wirkungsgrades Berechnungen durchgeführt und aus den Ergebnissen Diagramme erstellt, die den Verlauf des Wirkungsgrades in Abhängigkeit von der Temperatur, des Druckes oder des Zwischenwärmetauschers zeigen.

5.1 Untersuchung der Kältemittel

An den Diagrammen für das Kältemittel NH_3 (Abb. 5.1, Abb. 5.7, Abb. 5.12 und Abb. 5.17) sieht man, dass der Wirkungsgrad durch einen höheren Druck, bzw. Temperatur noch deutlich gesteigert werden kann, da die Kurven durchgängig eine nahezu konstante Steigung haben.

Bei dem Kältemittel $R22$ haben die Kurven von Abb. 5.2 einen sinusförmigen Verlauf. Daraus kann man schließen, dass der Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher durch eine weitere Steigerung der Temperatur nur noch geringfügig steigen würde und ab einem bestimmten Wert (abhängig vom Druck) wieder sinkt. Auch scheint es im unteren Temperaturbereich einen bestimmten, druckabhängigen, Wert zu geben, unterhalb dessen der Wirkungsgrad zumindest geringfügig wieder steigt. Eine weitere Steigerung des Druckes hingegen würde den Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher (Abb. 5.8) noch weiter steigern. An Abb. 5.18 erkennt man wiederum, dass eine weitere Erhöhung des Druckes, bei hohen Temperaturen, den Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher zwar ebenfalls steigert, aber bei niedrigeren Temperaturen ist bereits eine deutliche Abflachung der Steigung zu erkennen. Daraus kann man schließen, dass auch bei hohen Temperaturen sich der Wirkungsgrad nicht viel mehr steigern lässt. Bei Abb. 5.13 erkennt man bei genauer Betrachtung zwar ebenfalls eine leichte Abflachung der Kurven, allerdings ist diese nur gering und eine weitere Erhöhung der Temperatur würde den Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher noch stark verbessern.

Das Diagramm Abb. 5.3 des Kältemittels $R123$ zeigt, dass der Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher, innerhalb des Gültigkeitsbereiches des hergeleiteten Gleichungssatzes bereits sein Maximum von ca. $\eta_{th} = 22,8\%$ bei $T_3 = 470\text{ K}$ und $p_3 = 30\text{ bar}$ erreicht hat und eine weitere Steigerung der Temperatur diesen nur senken würde. Abb. 5.9 wiederum zeigt, dass eine weitere Erhöhung des Druckes den Wirkungsgrad weiter steigert. Interessant ist hier wiederum, dass unterhalb von ca. 25 bar niedrigere Temperaturen einen höheren Wirkungsgrad erzielen als höhere. Dies erkennt man ebenfalls an Abb. 5.14. Speziell der Verlauf der Kurve bei $p_3 = 30\text{ bar}$ deutet an, dass je dichter die Temperatur T_3 am minimalen Wert liegt, bei dem sich der Punkt 3 noch außerhalb des Nassdampfgebietes befindet, der Wirkungsgrad stark sinkt. Durch eine Erhöhung der Temperatur wiederum würde der Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher weiter steigen. Abb. 5.19 bestätigt dies, zeigt aber auch, dass ähnlich wie ohne Zwischenwärmetauscher, eine weitere Erhöhung des Druckes den Wirkungsgrad nur bei sehr hohen Temperaturen steigert, bei niedrigeren allerdings senkt, z.B. hat die Kurve $T_3 = 444\text{ K}$ bei ca. $p_3 = 26\text{ bar}$ ihr Maximum von ca. $\eta_{th,zwt} = 24,5\%$.

Die Diagramme des Kältemittels $R134a$ (Abb. 5.4, Abb. 5.10, Abb. 5.15 und Abb. 5.20) entsprechen qualitativ denen des $R123$, daher gelten auch hier die zuvor gemachten Überlegungen.

Das Kältemittel $R152a$ (Abb. 5.6, Abb. 5.11, Abb. 5.16 und Abb. 5.21) ähnelt in seinen Kurvenverläufen dem $R22$ und entspricht somit den dort gemachten Überlegungen. Nur Abb. 5.16 entspricht eher den entsprechenden Diagrammen und somit Beobachtungen von $R123$ und $R134a$, allerdings deuten die Kurvenverläufe von Abb. 5.13 an, dass auch für das $R22$ die Überlegung gilt, dass je dichter die Temperatur T_3 am minimalen Wert

liegt, bei dem sich der *Punkt 3* noch außerhalb des Nassdampfgebietes befindet, der Wirkungsgrad stark sinkt.

5.2 Berechnung ohne Zwischenwärmetauscher

5.2.1 Untersuchung des Temperatureinflusses

Die Untersuchung des Temperatureinflusses auf den thermischen Wirkungsgrad zeigt, dass diese einen leicht sinusförmigen Verlauf des Wirkungsgrades bewirkt (deutlich zu sehen in *Abb. 5.2*). Demnach gibt es für jedes Kältemittel nur einen bestimmten Bereich, in dem eine Änderung der Temperatur auch eine deutliche Änderung des Wirkungsgrades bewirkt. Wird die Temperatur zu sehr erhöht, sinkt der Wirkungsgrad wieder (erkennbar in *Abb. 5.3*). Verbindet man, wie in *Abb. 5.5*, die Punkte der Kurven mit den maximalen Wirkungsgrad miteinander, zeigt sich ein annähernd linearer Verlauf der Steigerung des Wirkungsgrades in Abhängigkeit von Druck und Temperatur.

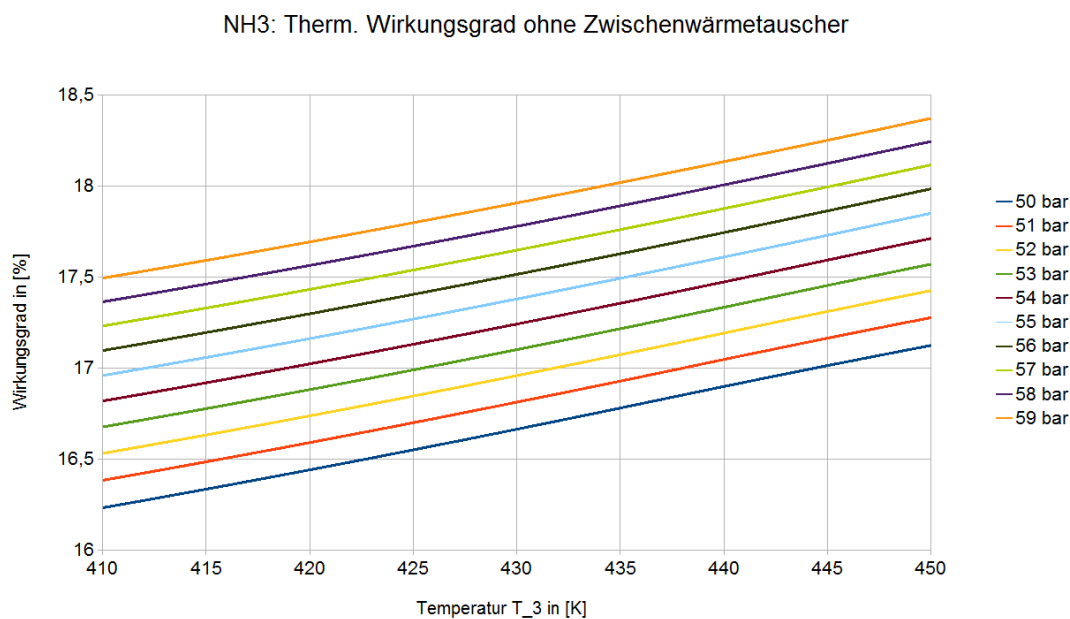


Abbildung 5.1: NH3 - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über der Temperatur

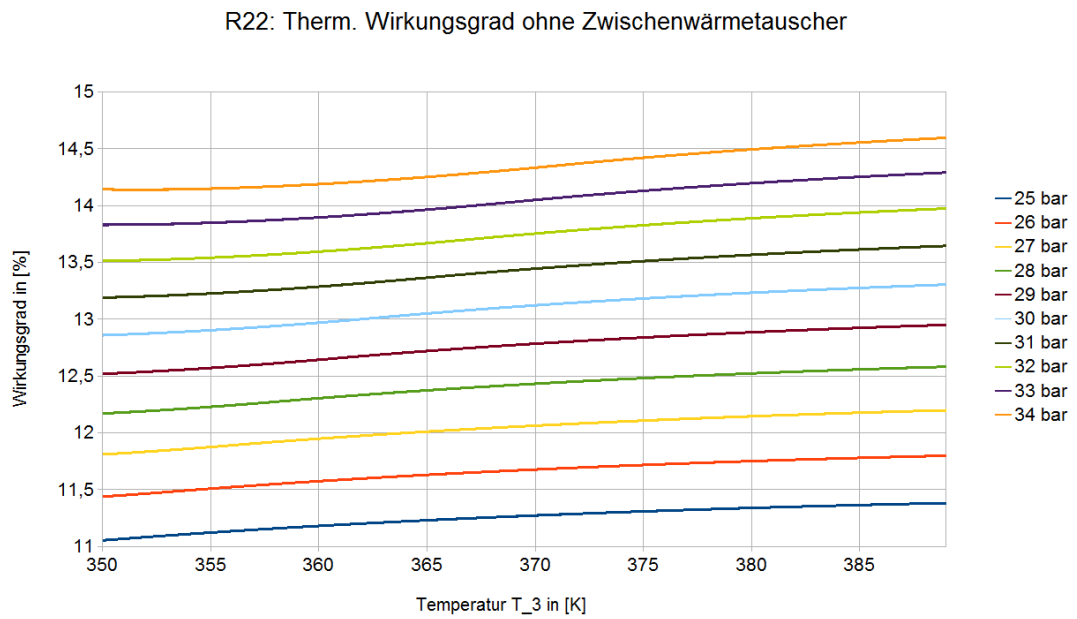


Abbildung 5.2: R22 - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über der Temperatur

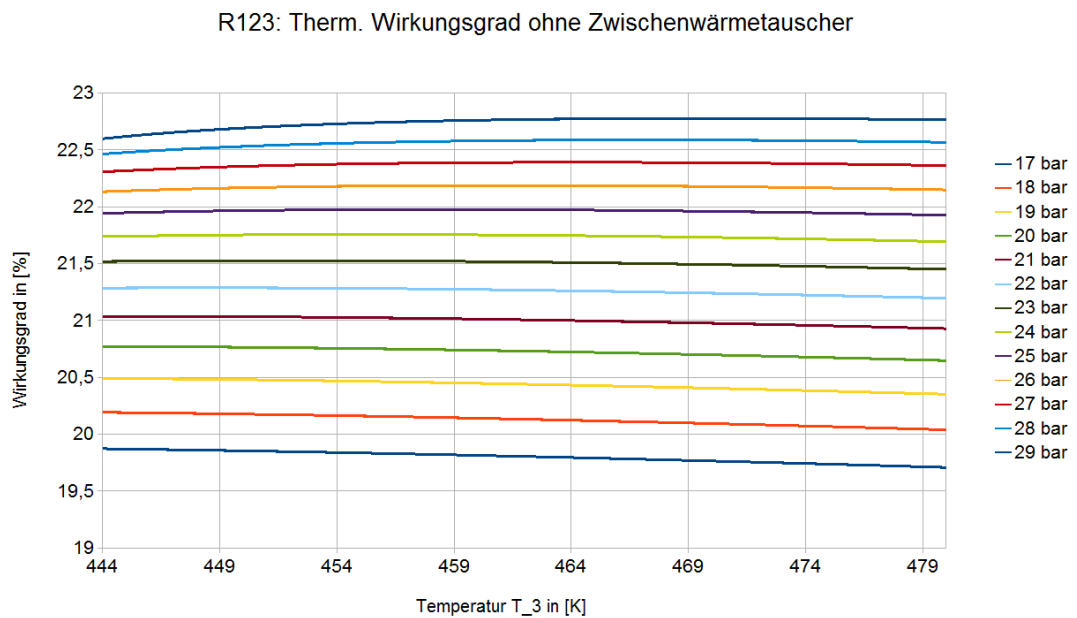


Abbildung 5.3: R123 - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über der Temperatur

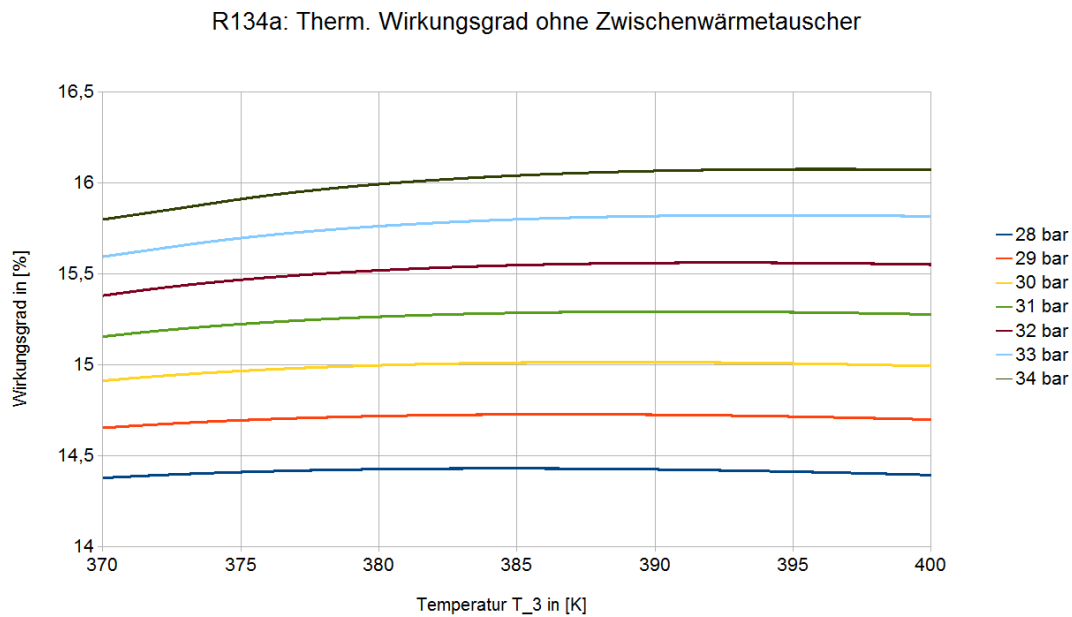


Abbildung 5.4: R134a - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über der Temperatur

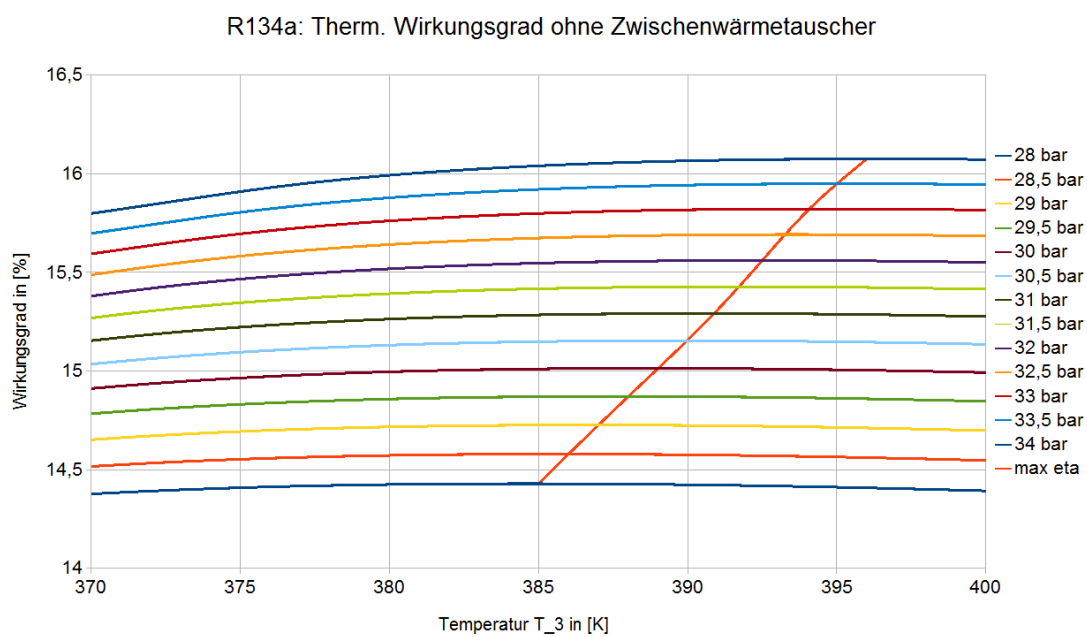


Abbildung 5.5: R134a - Untersuchung des maximalen Wirkungsgrades

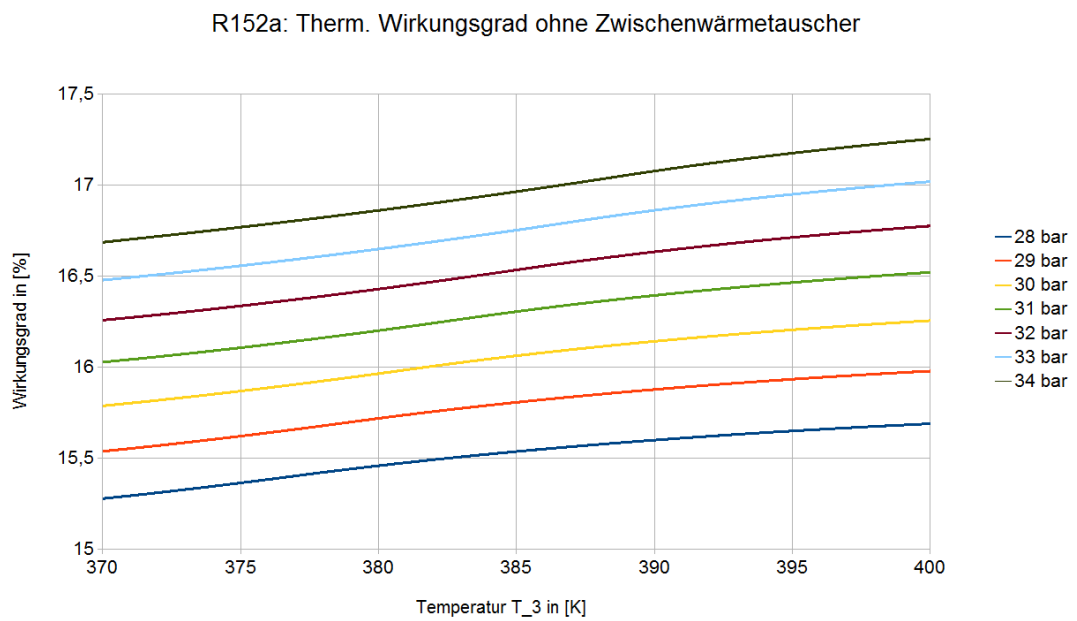


Abbildung 5.6: R152a - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über der Temperatur

5.2.2 Untersuchung des Druckeinflusses

Die Untersuchung des Druckeinflusses auf den thermischen Wirkungsgrad deutet an, dass es auch hier einen Maximalwert gibt, der eine Erhöhung des Wirkungsgrades bewirkt, dieser aber außerhalb des Gültigkeitsbereiches des hergeleiteten Gleichungssatzes liegt. Interessant ist, dass bei niedrigeren Drücken, eine niedrigere Temperatur einen höheren Wirkungsgrad erzielt als höhere Temperaturen (erkennbar in *Abb. 5.9* und *Abb. 5.10*).

Daraus kann man folgern, dass der Druck einen wesentlich stärkeren Einfluss auf den Wirkungsgrad hat als die Temperatur, es aber auch sehr Wichtig ist das richtige Verhältnis zwischen diesen beiden Werten zu wählen.

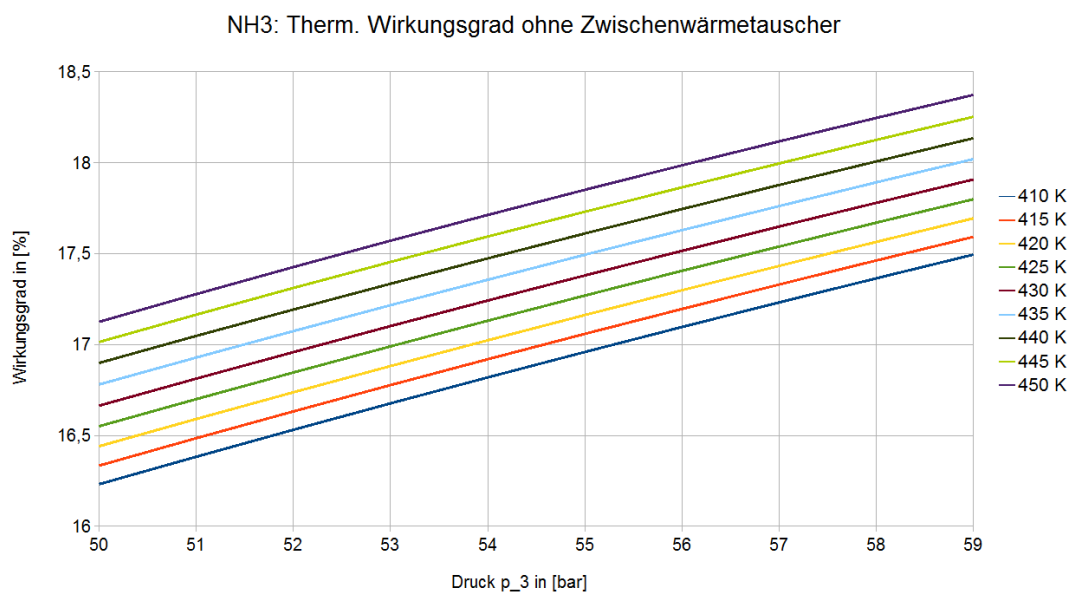


Abbildung 5.7: NH3 - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über dem Druck

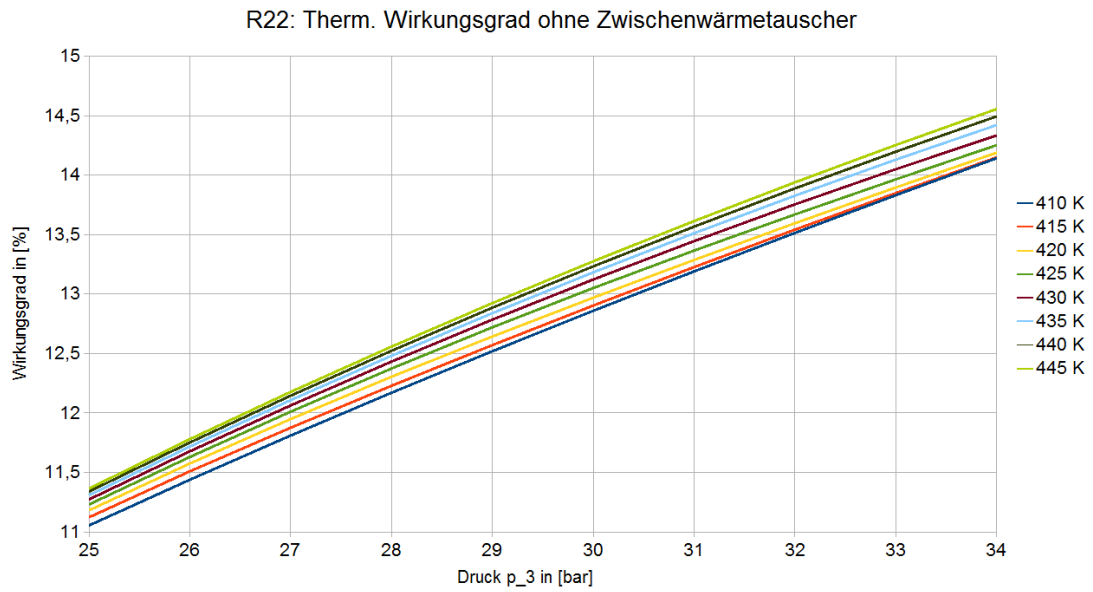


Abbildung 5.8: R22 - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über dem Druck

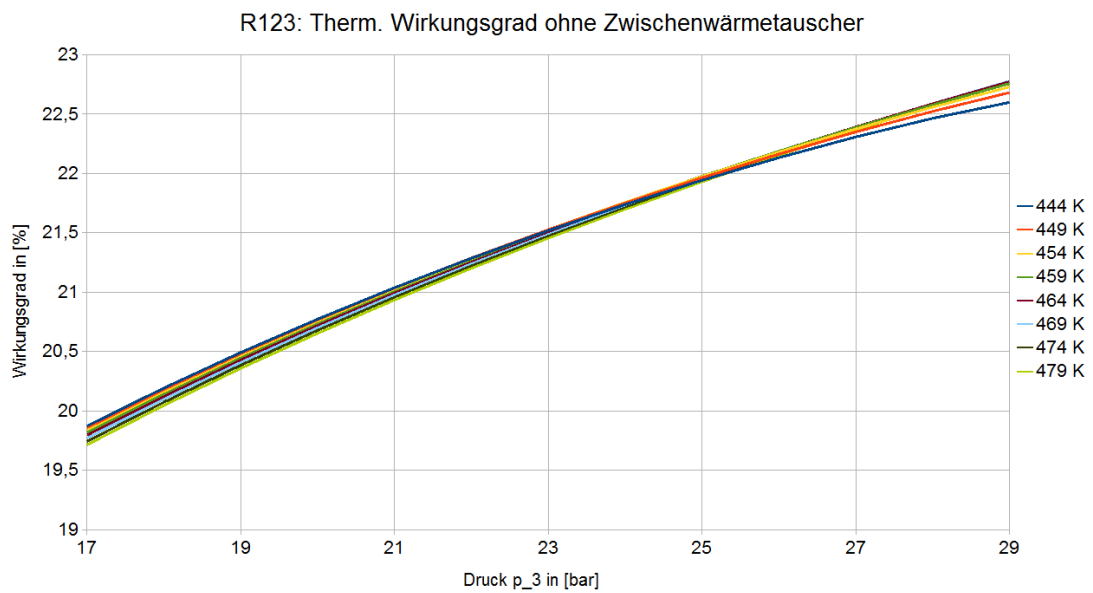


Abbildung 5.9: R123 - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über dem Druck

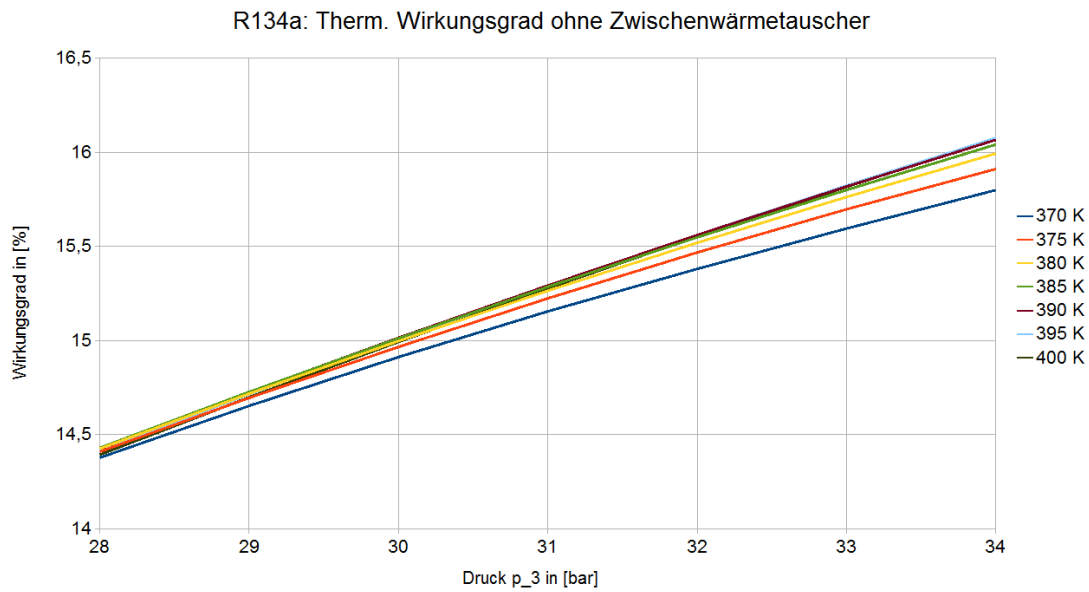


Abbildung 5.10: R134a - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über dem Druck

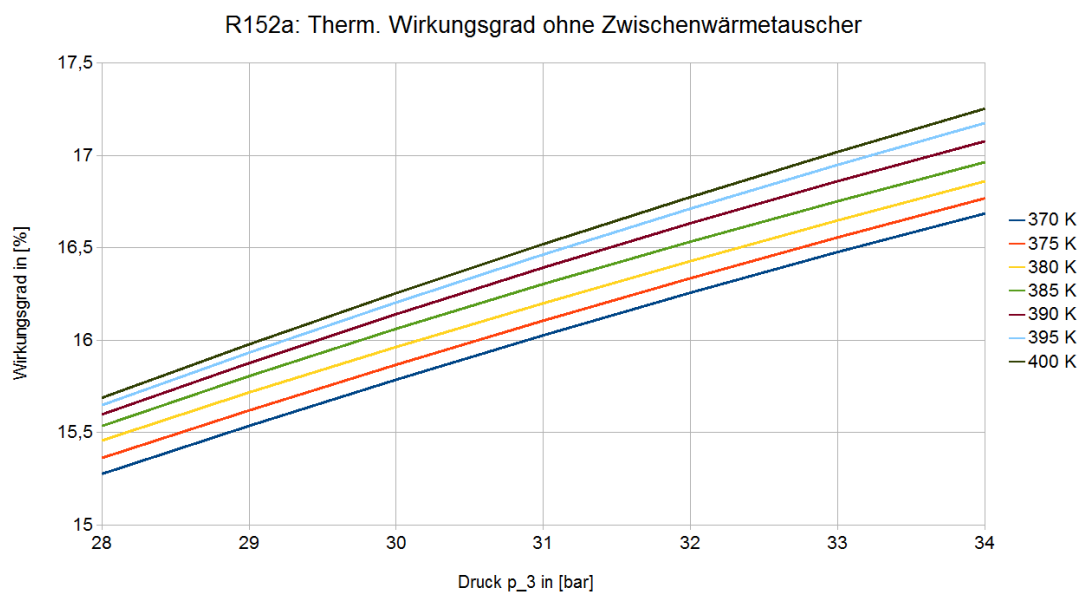


Abbildung 5.11: R152a - Wirkungsgrad ohne Zwischenwärmetauscher über dem Druck

5.3 Berechnung mit Zwischenwärmetauscher

Die Berechnung mit Zwischenwärmetauscher zeigt, dass mit diesem eine Steigerung des Wirkungsgrades um mehrere Prozent möglich ist. Allerdings zeigt ein Vergleich von *Abb. 5.10* mit *Abb. 5.20*, dass bei niedrigen Temperaturen und hohen Drücken sich der Wirkungsgrad durch den Einsatz eines Zwischenwärmetauschers auch verschlechtern kann.

Daraus lässt sich folgern, dass beim Einsatz eines Zwischenwärmetauschers die Temperatur einen stärkeren Einfluss hat als ohne und dass diese möglichst hoch sein sollte.

5.3.1 Untersuchung des Temperatureinflusses

Die Untersuchung des Temperatureinflusses mit Zwischenwärmetauscher auf den thermischen Wirkungsgrad zeigt, dass bei niedrigeren Drücken, höhere Temperaturen einen niedrigeren Wirkungsgrad bewirken als niedrigere Temperaturen (deutlich zu sehen in *Abb. 5.16*). Dies zeigt ebenfalls wie wichtig es ist das richtige Verhältnis zwischen Druck und Temperatur einzustellen.

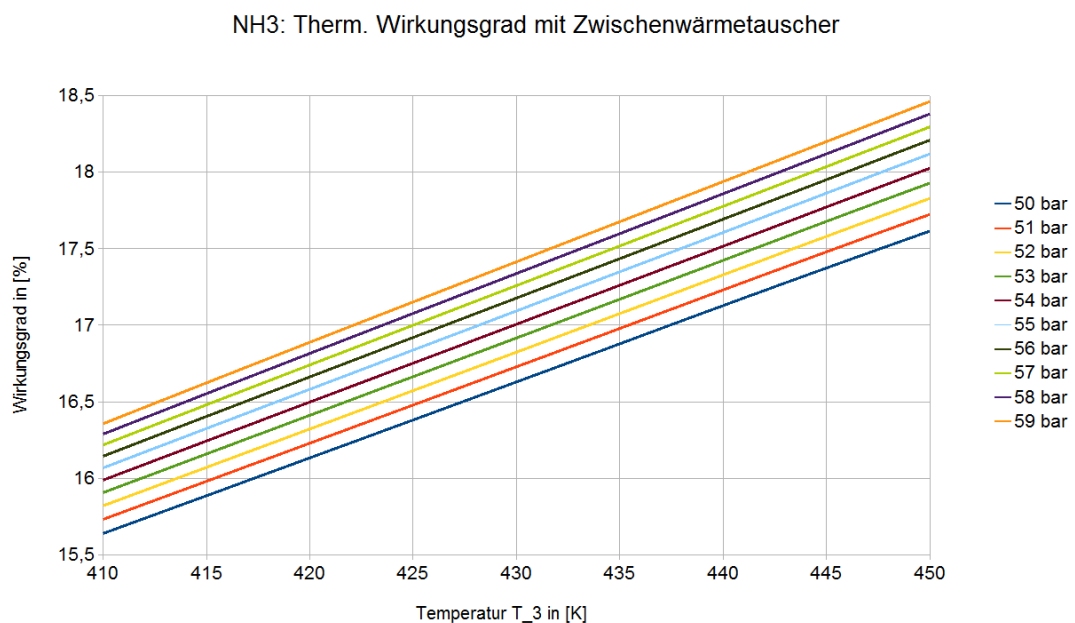


Abbildung 5.12: NH3 - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über der Temperatur

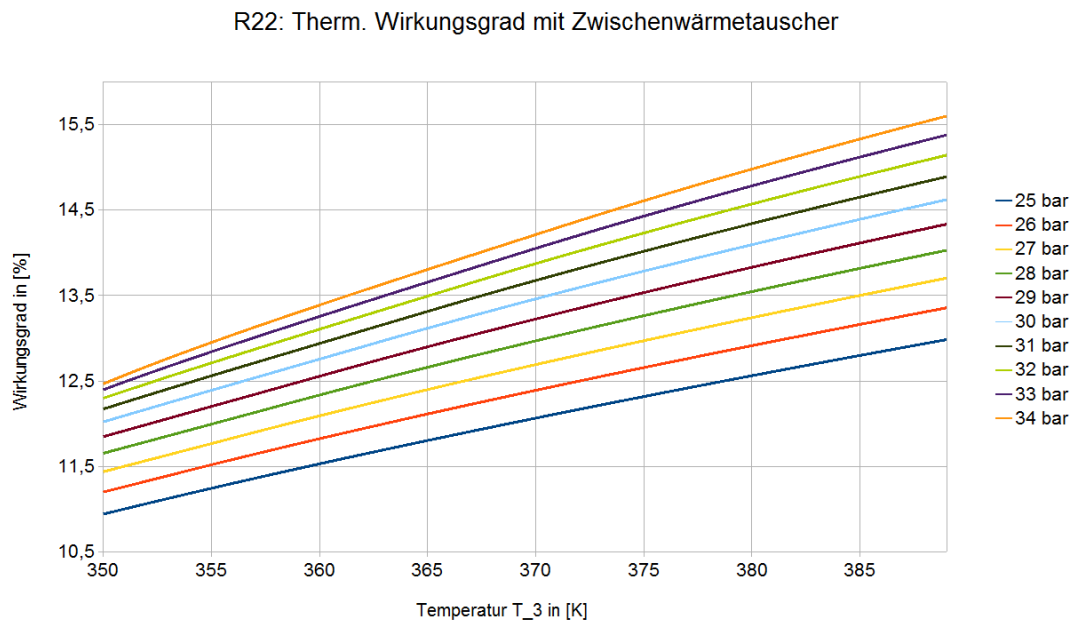


Abbildung 5.13: R22 - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über der Temperatur

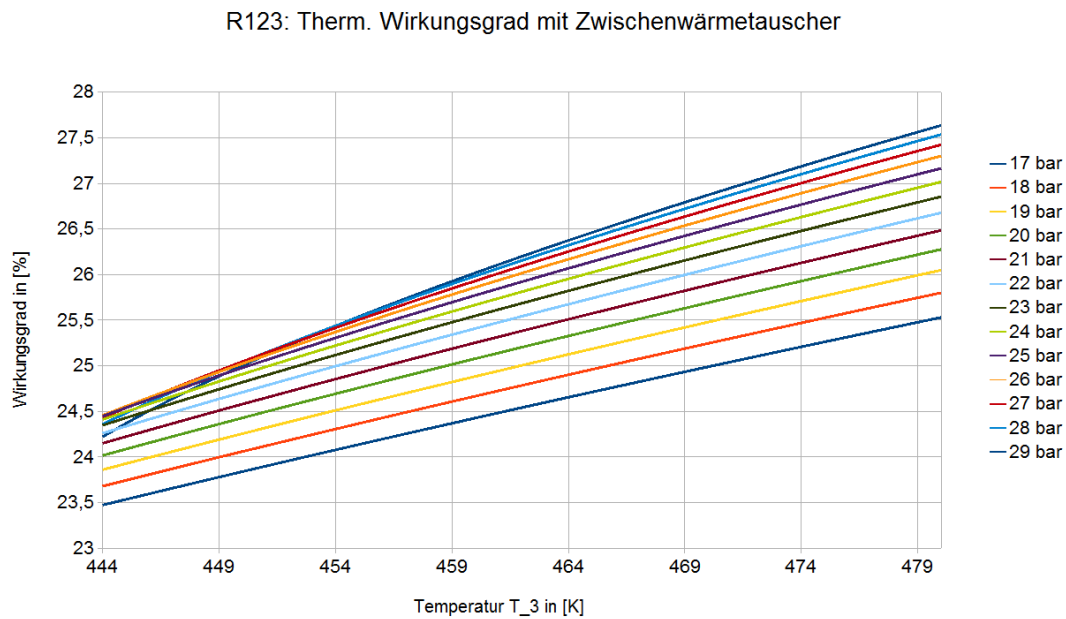


Abbildung 5.14: R123 - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über der Temperatur

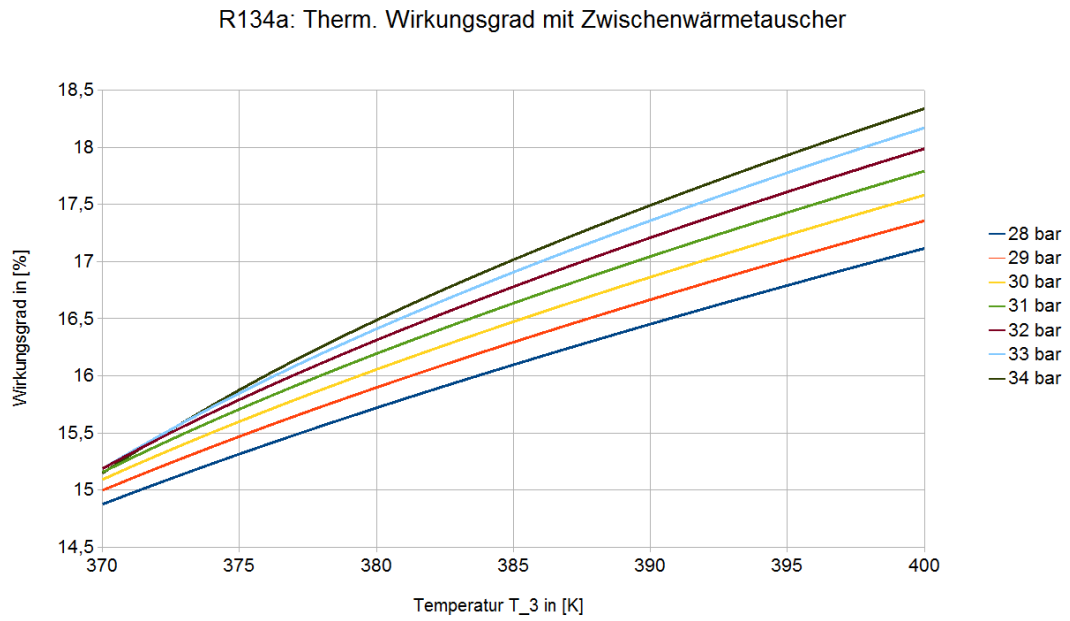


Abbildung 5.15: R134a - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über der Temperatur

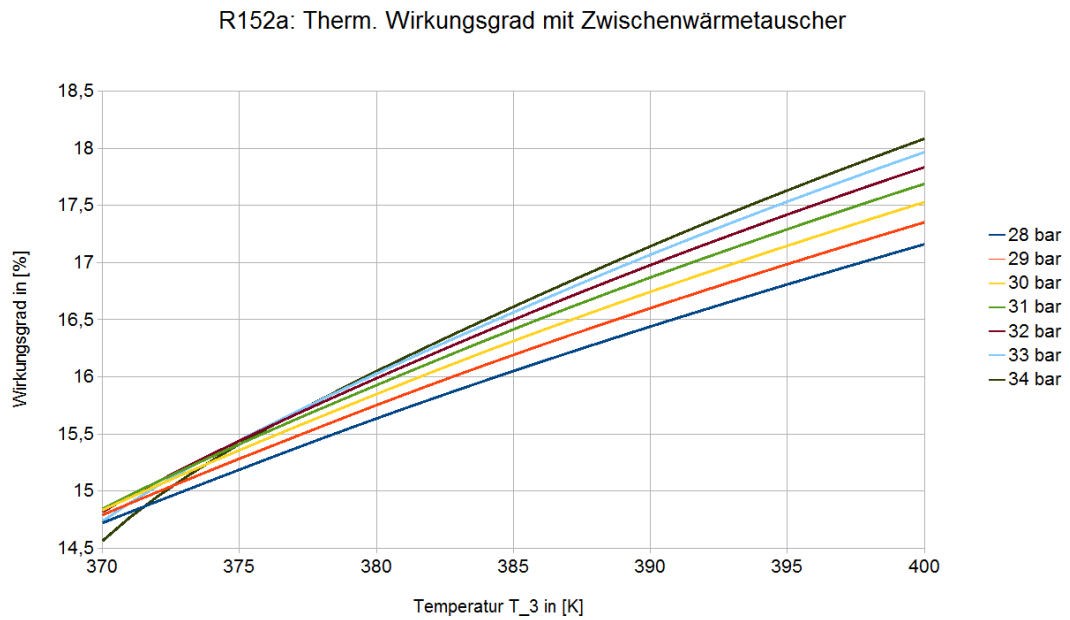


Abbildung 5.16: R152a - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über der Temperatur

5.3.2 Untersuchung des Druckeinflusses

Die Untersuchung des Druckeinflusses mit Zwischenwärmetauscher auf den thermischen Wirkungsgrad zeigt deutlich, dass es je nach gewähltem Kältemittel und Verhältnis zwischen Druck und Temperatur es einen Maximalwert gibt, bis zu dem eine Erhöhung des Druckes den Wirkungsgrad erhöht (deutlich zu sehen in *Abb. 5.19* und *Abb. 5.21*).

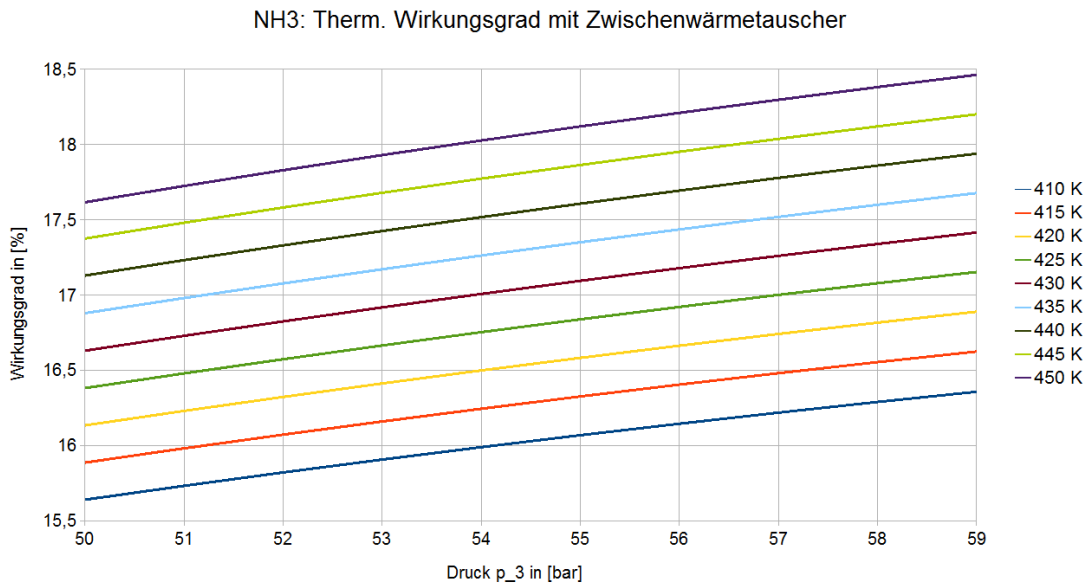


Abbildung 5.17: NH3 - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über dem Druck

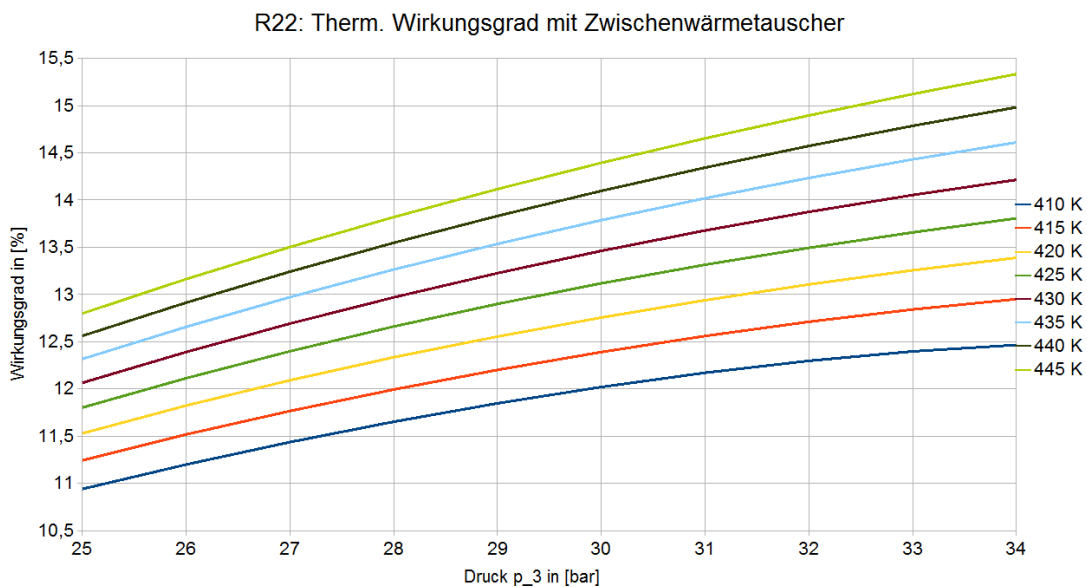


Abbildung 5.18: R22 - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über dem Druck

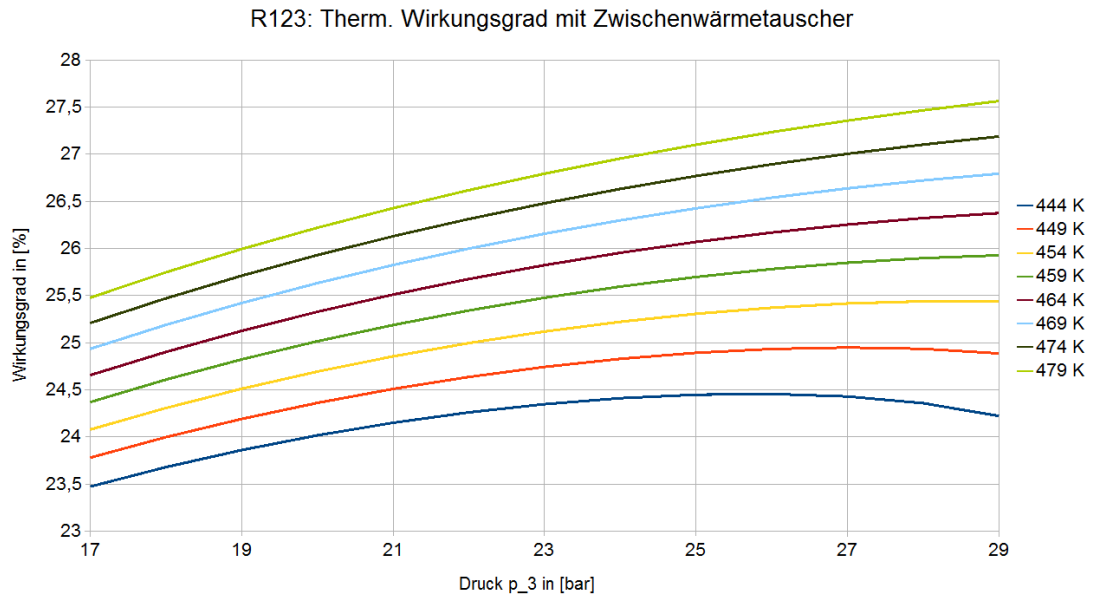


Abbildung 5.19: R123 - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über dem Druck

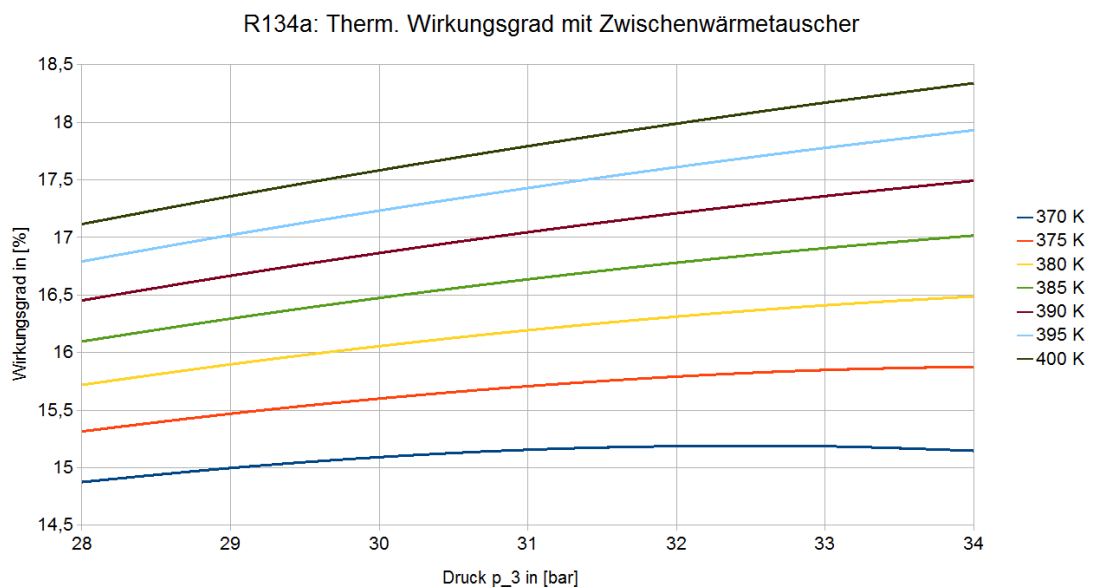


Abbildung 5.20: R134a - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über dem Druck

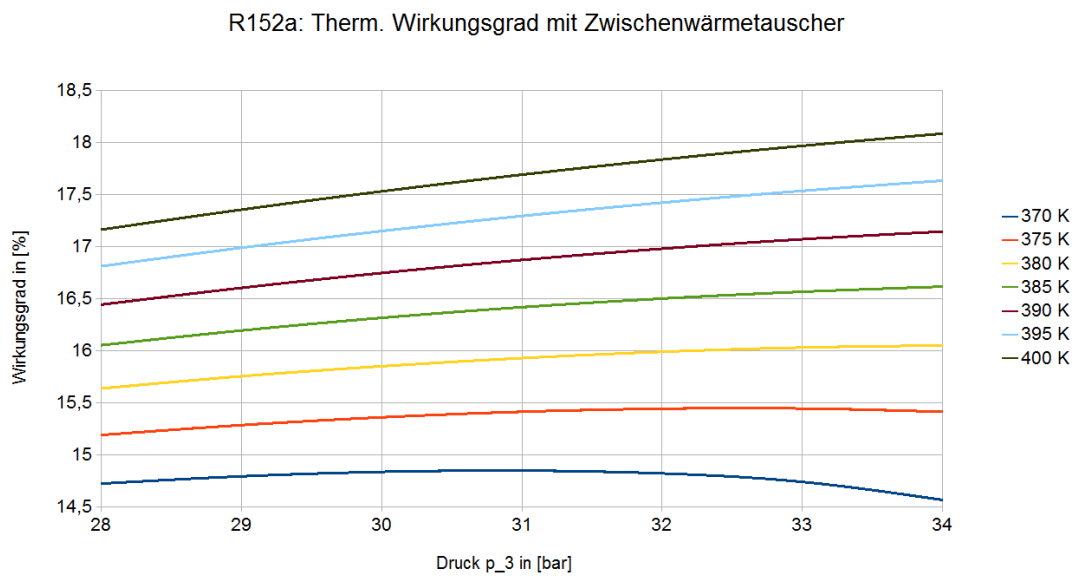


Abbildung 5.21: R152a - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über dem Druck

5.4 Untersuchung des Zwischenwärmetauschers

Die Untersuchung des Zwischenwärmetauschers zeigt, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem thermischen Wirkungsgrad und der Temperaturdifferenz des Zwischenwärmetauschers besteht. So bewirkt ein Unterschied von 10° eine Änderung des Wirkungsgrades um ca. 0,7 % bei dem Kältemittel R123.

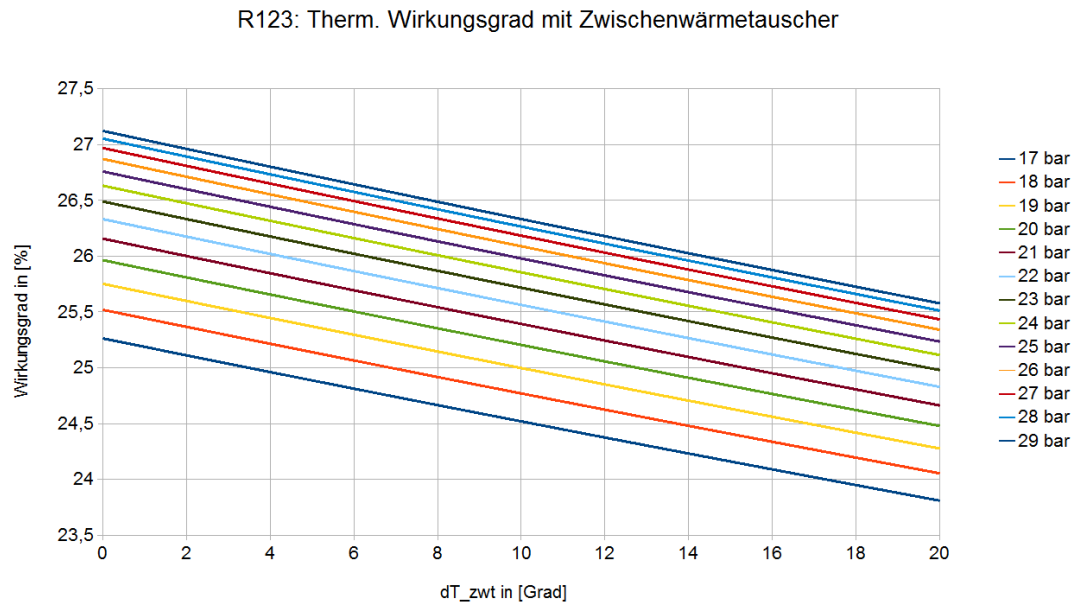


Abbildung 5.22: R123 - Wirkungsgrad mit Zwischenwärmetauscher über dT

5.5 Vergleich der Maximalwerte der Kältemittel

Wenn man die Wirkungsgrade der Kältemittel nahe der Obergrenze des Gültigkeitsbereiches des Gleichungssatzes vergleicht (*Tabelle 5.1*), sieht man, dass mit dem *R123* ein um bis zu 10 % höherer Wirkungsgrad erreicht werden kann, als mit den anderen Kältemitteln. Dafür wird zwar mit $T_3 = 480 \text{ K}$ die höchste Temperatur benötigt, aber mit $p_3 = 29 \text{ bar}$ auch der niedrigste Druck. Die Kältemittel *R134a* und *R152a* haben, wie die Diagramme bereits zeigen, sehr ähnliche Werte. Zwar erreicht das *R152a* einen um ca. 0,6 % höheren Wirkungsgrad, benötigt dafür aber auch eine um 10° höhere Temperatur. Mit 17,436047 % scheint das *R22* auf den ersten Blick den niedrigsten Wirkungsgrad zu haben, allerdings benötigt das *NH3* für seine 18,462829 % einen um 25 bar höheren Druck und eine um 30° höhere Temperatur. Somit besitzt es den schlechtesten Wirkungsgrad im Verhältnis zu Druck und Temperatur.

Stoff	Druck in [bar]	Temperatur in [K]	therm. Wirkungsgrad in [%]
	p_3	T_3	$\eta_{th,zwt}$
<i>NH3</i>	59	450	18,462829
<i>R22</i>	34	420	17,436047
<i>R123</i>	29	480	27,635763
<i>R134a</i>	34	420	19,779905
<i>R152a</i>	34	430	20,343112

Tabelle 5.1: Maximalwerte des therm. Wirkungsgrades mit Zwischenwärmetauscher

5.6 Untersuchung der Druckverluste

Die bisherigen Berechnungen wurden ohne Druckverluste in den Wärmetauschern durchgeführt. Da dies in der Realität nicht der Fall ist, wurde der Einfluss der Druckverluste auf den Wirkungsgrad untersucht.

Dafür wurden diese zuerst in allen drei Wärmetauschern (Verdampfer/Überhitzer, Kondensator und Zwischenwärmetauscher) gleichmäßig von 0,9–1 bar/bar erhöht (Abb. 5.23). Danach wurden noch die einzelnen Wärmetauscher untersucht (Abb. 5.24, Abb. 5.25 und Abb. 5.26). Zu beachten ist dabei, dass die Drücke in *Punkt 1* und *Punkt 3* konstant gehalten wurden und somit ein angenommener Druckverlust in den Wärmetauschern zu einer Erhöhung des Druckes vor Eintritt in diese führt.

Der Verlauf der Kurven zeigt, dass es einen linearen Zusammenhang zwischen den Druckverlusten und dem Wirkungsgrad gibt. Somit bestätigt sich das zu erwartende Verhalten, dass der Wirkungsgrad mit zunehmenden Druckverlusten sinkt. Dass der Wirkungsgrad in Abb. 5.24 sich gegenteilig verhält, liegt daran, dass dadurch, wie zuvor erwähnt, der Druck und somit auch die Temperatur im *Punkt 2*, mit zunehmendem Druckverlust, steigen und dadurch wiederum der Wirkungsgrad ebenfalls steigt. Wäre der Druck im *Punkt 3* nicht konstant gehalten, würde auch hier ein Druckverlust zum sinken des Wirkungsgrades führen.

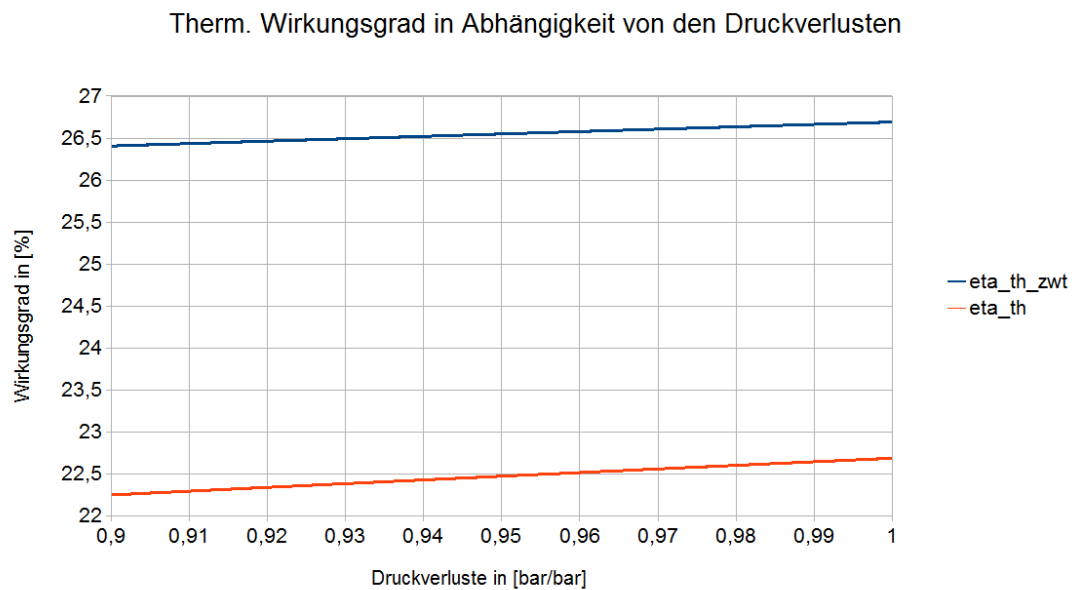


Abbildung 5.23: R123 - mit Druckverlusten in den Wärmetauschern

Therm. Wirkungsgrad in Abhängigkeit von den Druckverlusten des Verdampfers

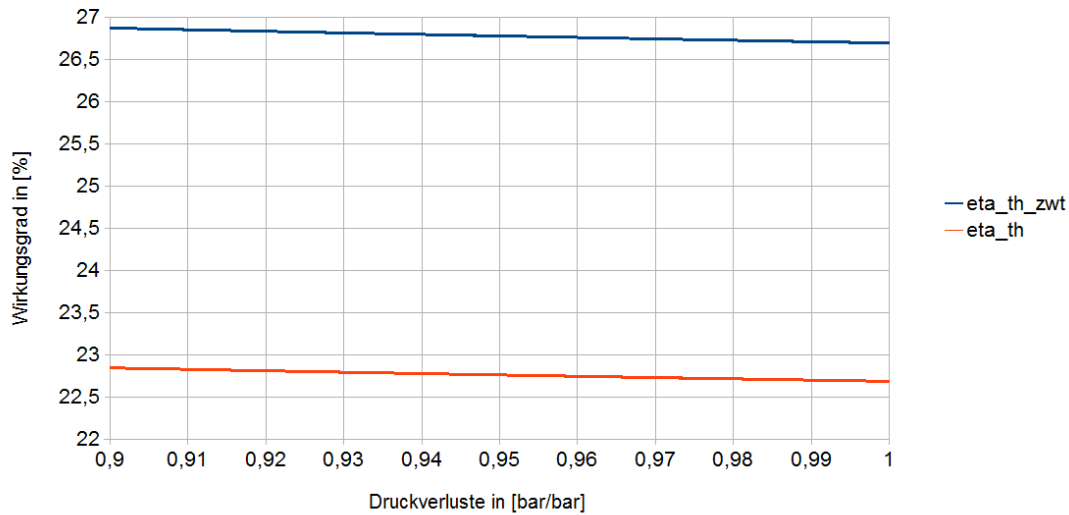


Abbildung 5.24: R123 - mit Druckverlust im Verdampfer/Überhitzer

Therm. Wirkungsgrad in Abhängigkeit von den Druckverlusten im Kondensator

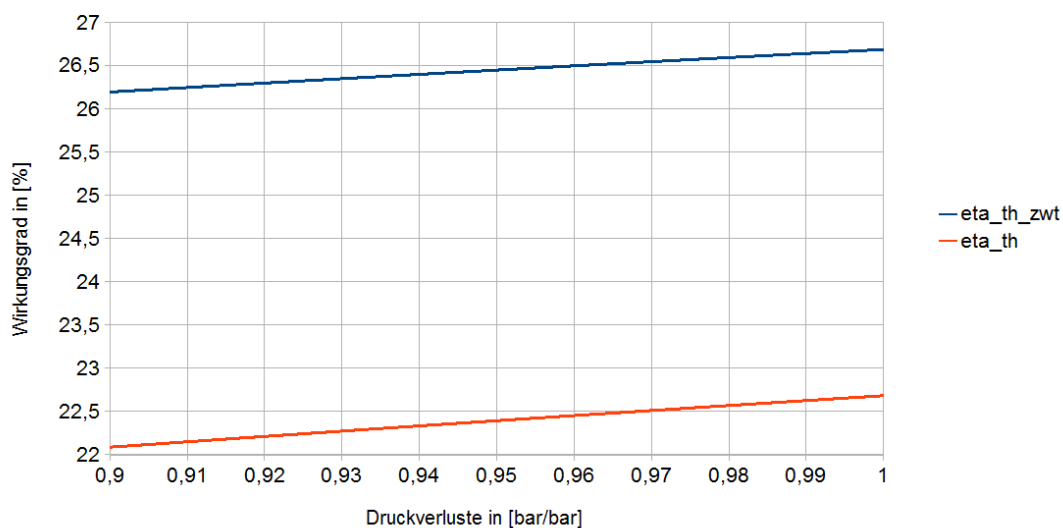


Abbildung 5.25: R123 - mit Druckverlust im Kondensator

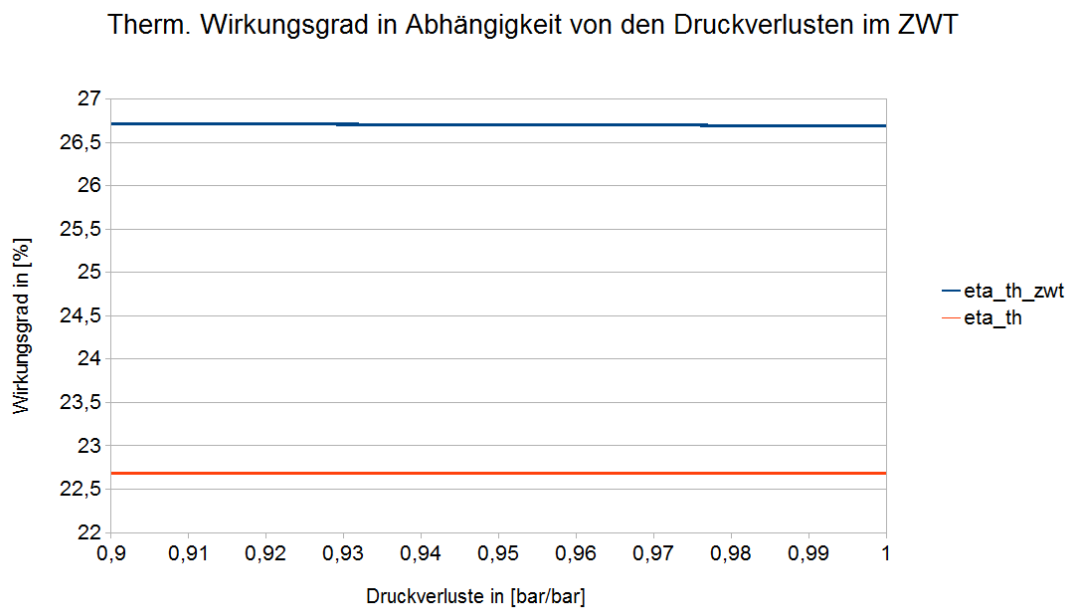


Abbildung 5.26: R123 - mit Druckverlust im Zwischenwärmetauscher

5.7 Untersuchung des exergetischen Wirkungsgrades der Pumpe

Die Untersuchung des exergetischen Wirkungsgrades der Pumpe zeigt, dass dieser nur vom Druck und nicht von der Temperatur im *Punkt 3* abhängt. Zudem zeigt die Steigung der Kurven an, dass es einen linearen Zusammenhang zwischen dem Druck und dem exergetischen Wirkungsgrad gibt.

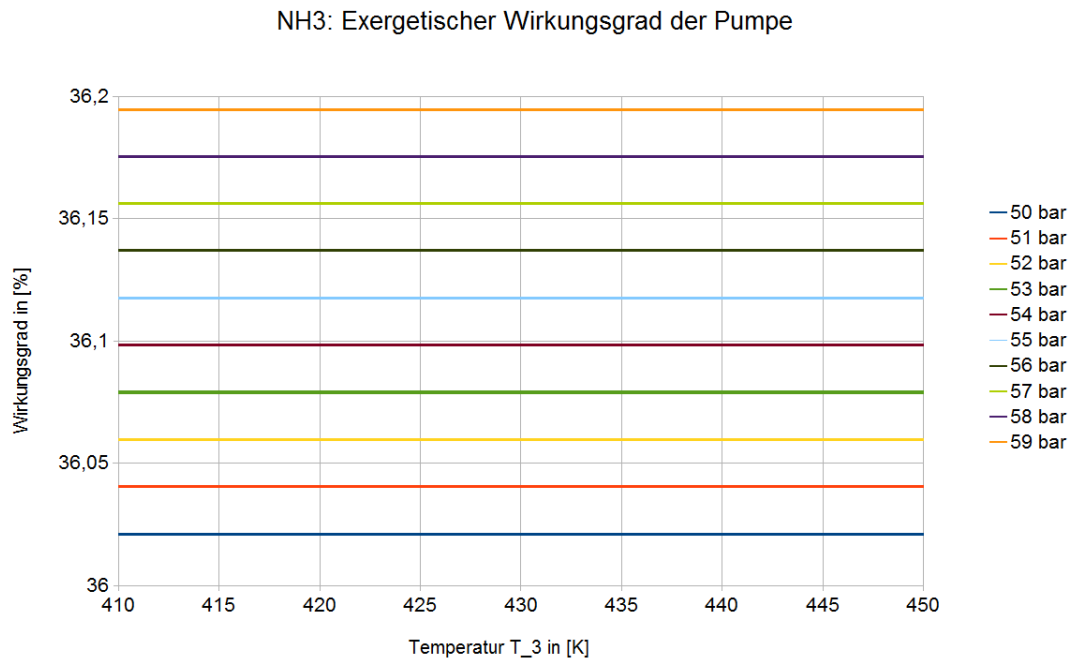


Abbildung 5.27: NH3 - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über der Temperatur

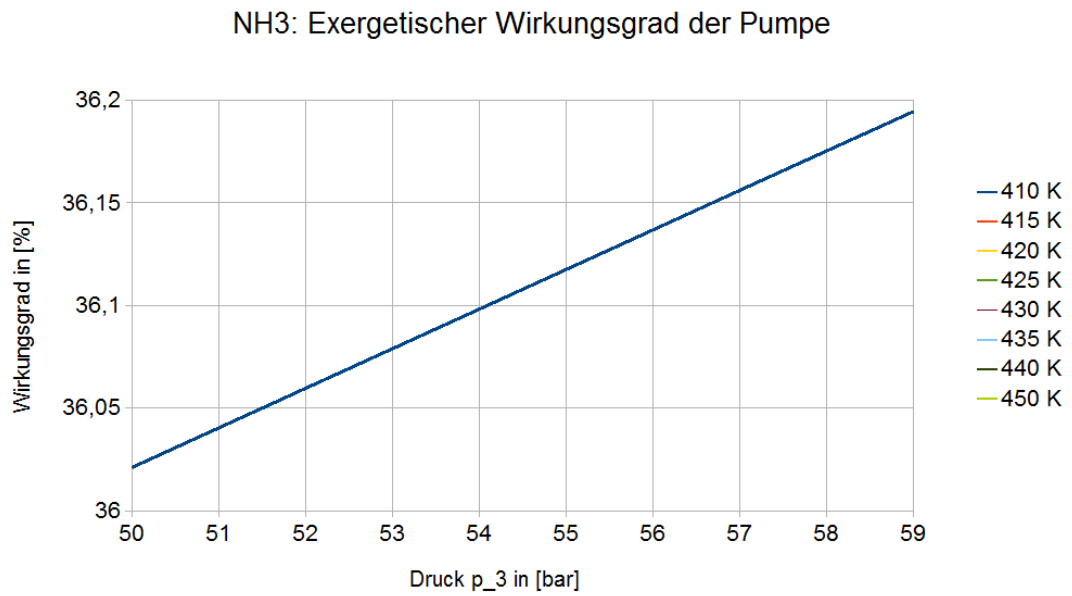


Abbildung 5.28: NH3 - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über dem Druck

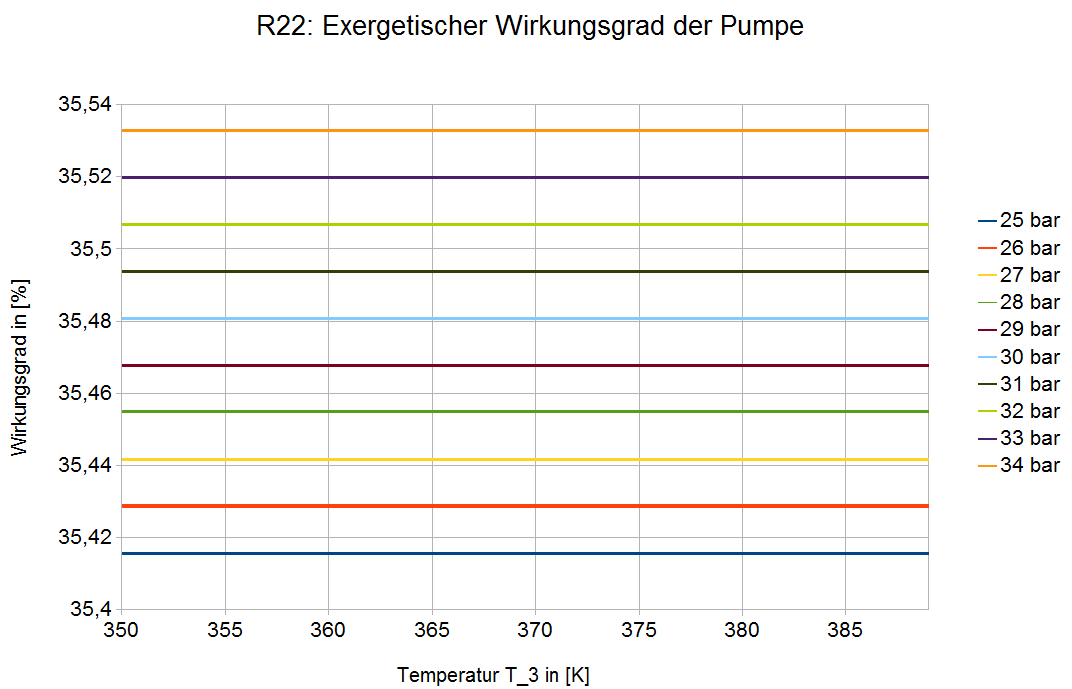


Abbildung 5.29: R22 - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über der Temperatur

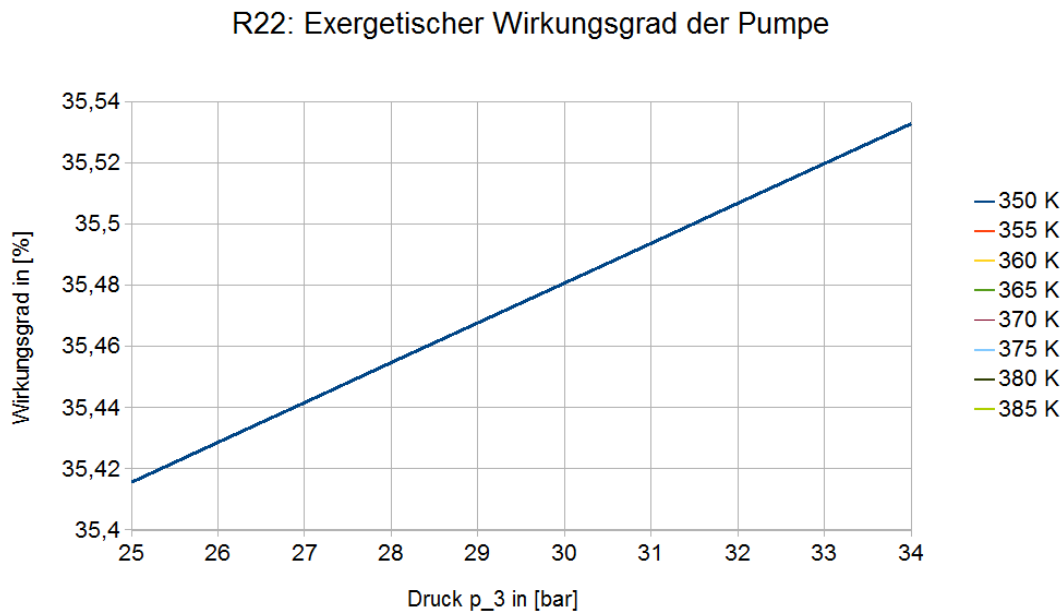


Abbildung 5.30: R22 - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über dem Druck

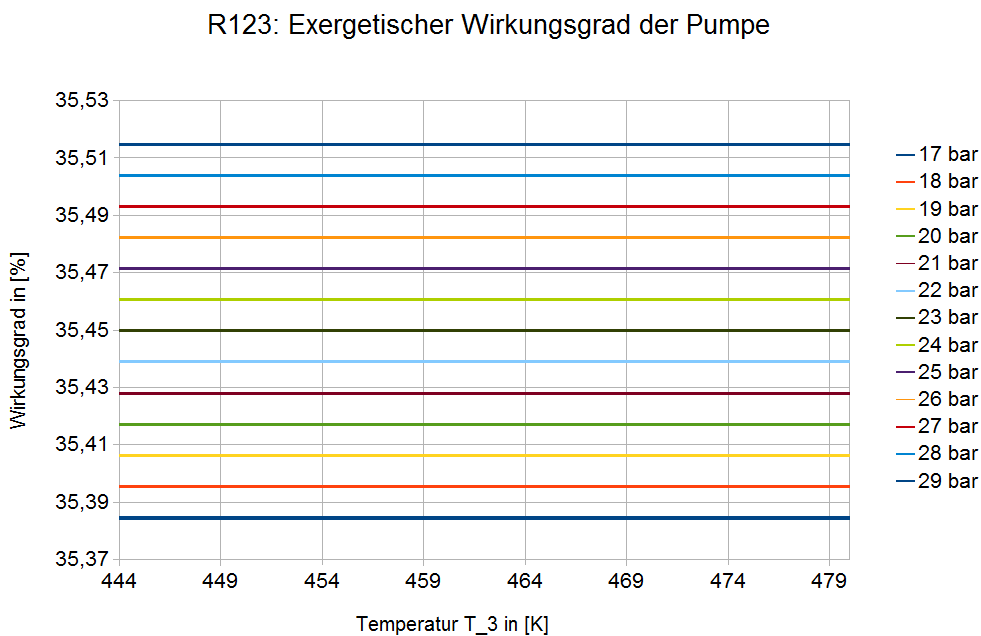


Abbildung 5.31: R123 - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über der Temperatur

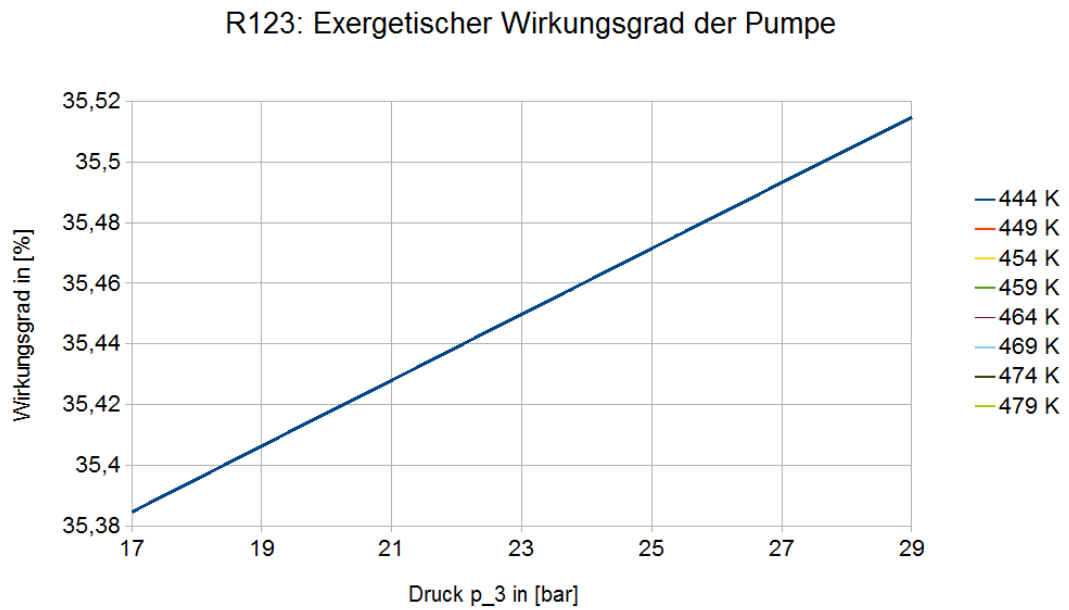


Abbildung 5.32: R123 - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über dem Druck

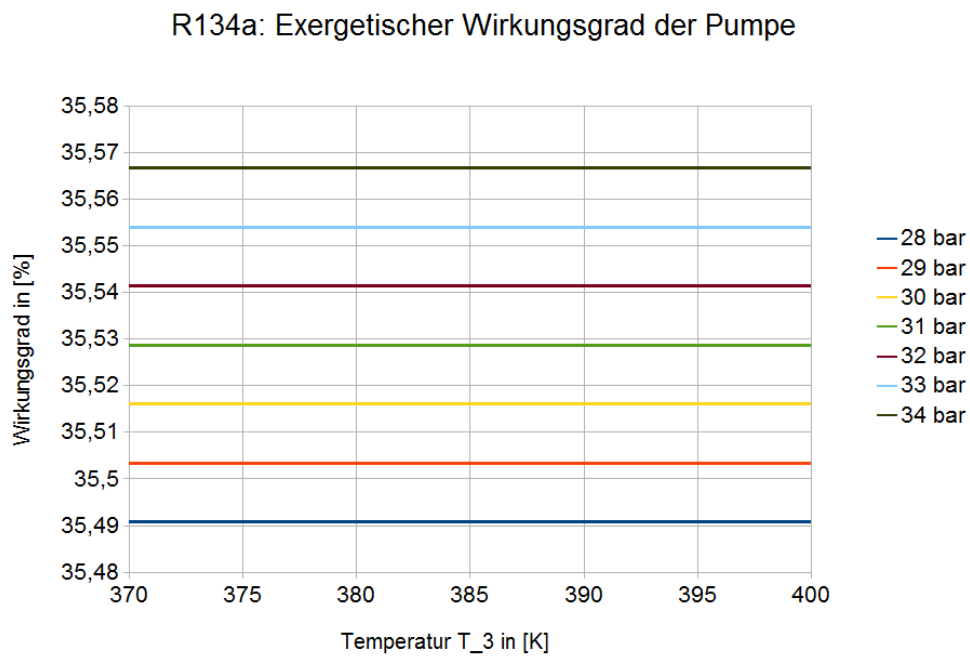


Abbildung 5.33: R134a - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über der Temperatur

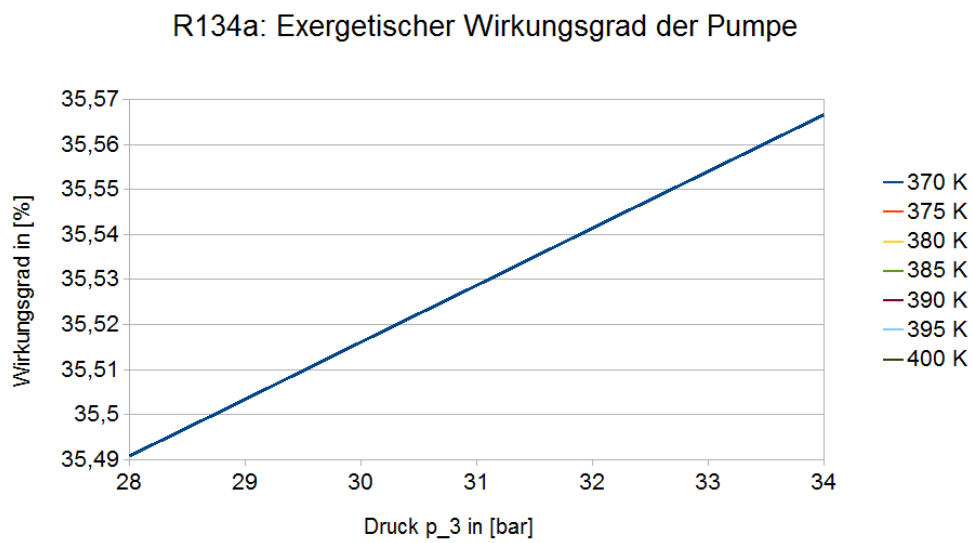


Abbildung 5.34: R134a - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über dem Druck

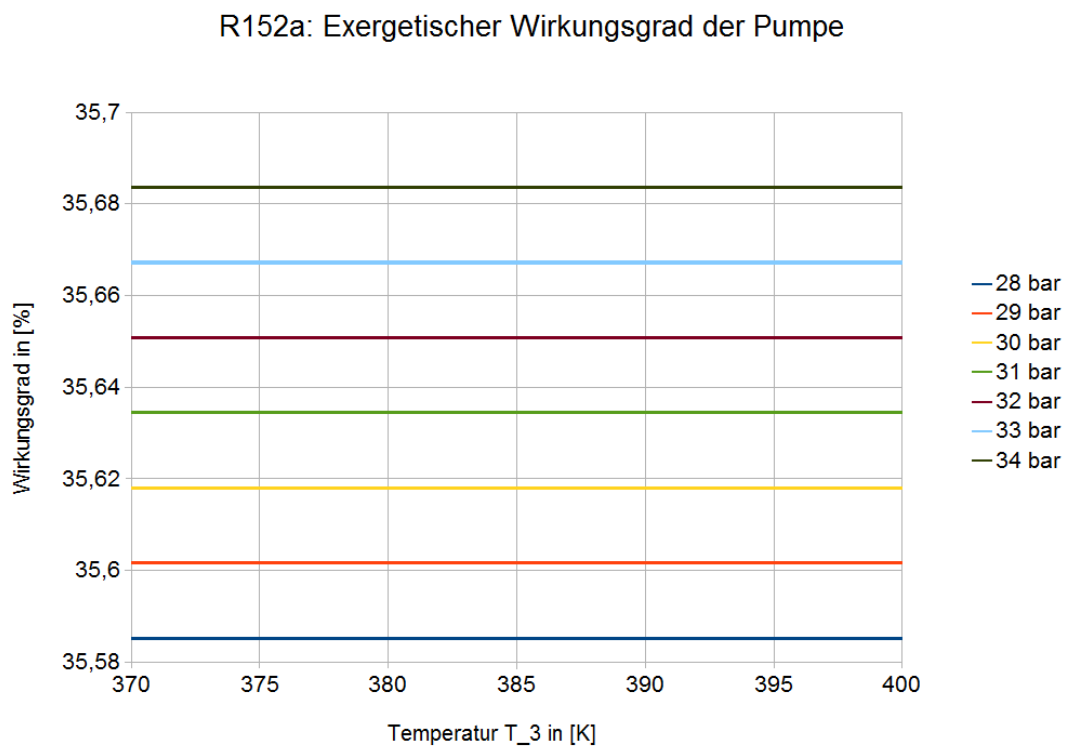


Abbildung 5.35: R152a - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über der Temperatur

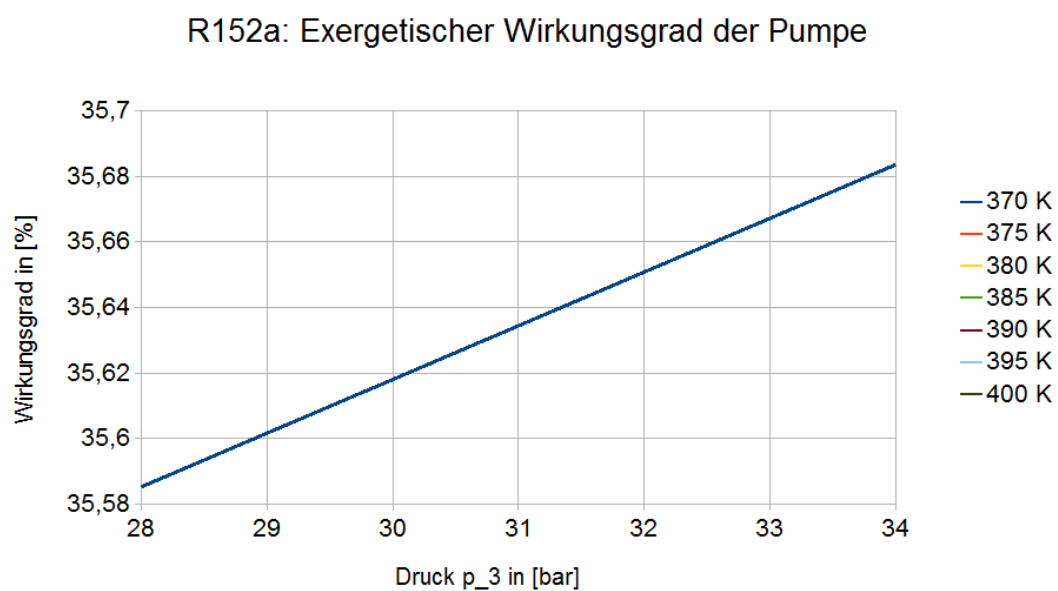


Abbildung 5.36: R152a - Exergetischer Wirkungsgrad der Pumpe über dem Druck

5.8 Untersuchung des exergetischen Wirkungsgrades der Turbine

Die Untersuchung des exergetischen Wirkungsgrades der Turbine zeigt, dass dieser mit Zunahme der Temperatur T_3 zunimmt, durch eine Steigerung des Druckes p_3 hingegen sinkt. Zudem hat sich gezeigt, dass es, unabhängig vom Kältemittel, einen Minimalwert des exergetischen Wirkungsgrades der Turbine gibt. Dieser liegt bei $\xi_{T,min} = 87,1217\%$. Eine genaue Betrachtung der berechneten Werte deutet an, dass durch eine Erhöhung der Temperatur der exergetische Wirkungsgrad kurzfristig vom Minimalwert an exponentiell steigt, diese Steigung aber auch schnell wieder geringfügig abflacht.

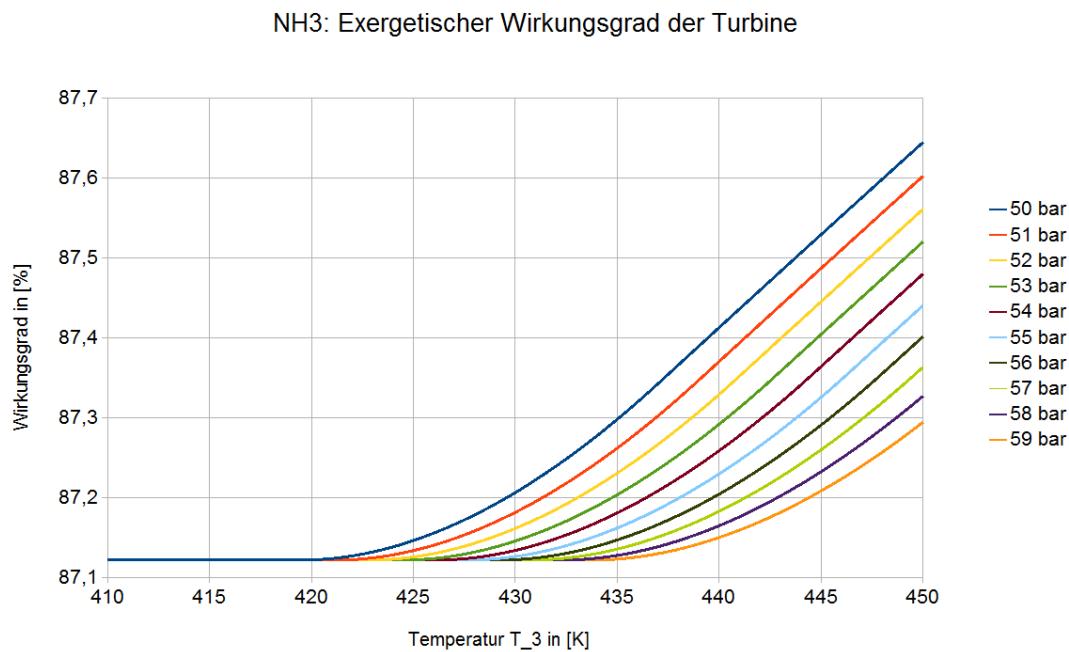


Abbildung 5.37: NH3 - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über der Temperatur

NH3: Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine

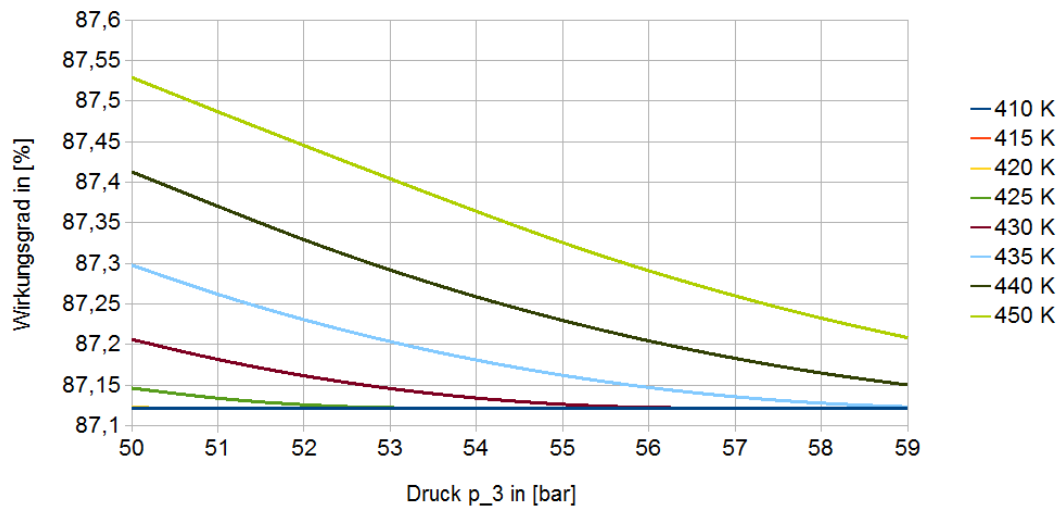


Abbildung 5.38: NH3 - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über dem Druck

R22: Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine

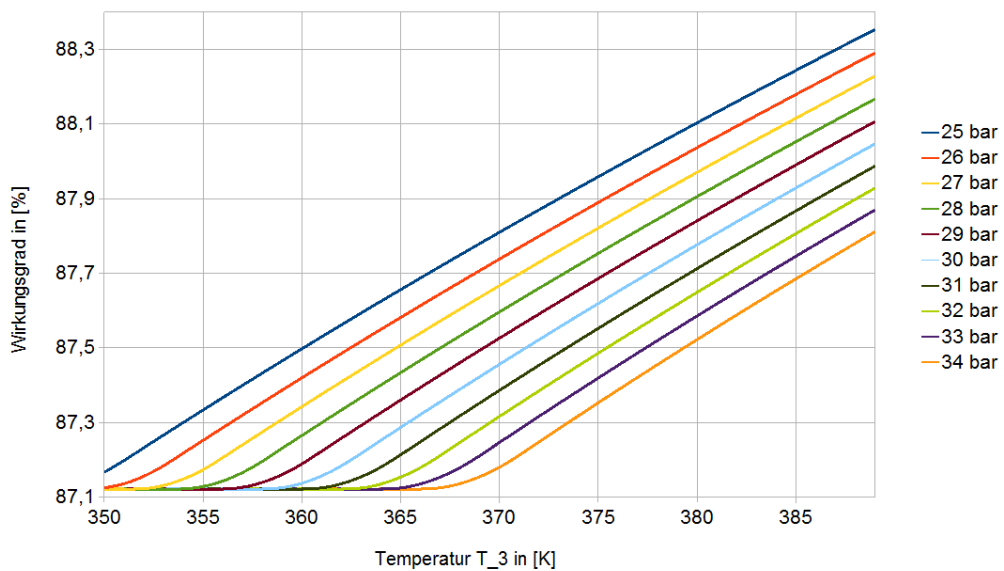


Abbildung 5.39: R22 - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über der Temperatur

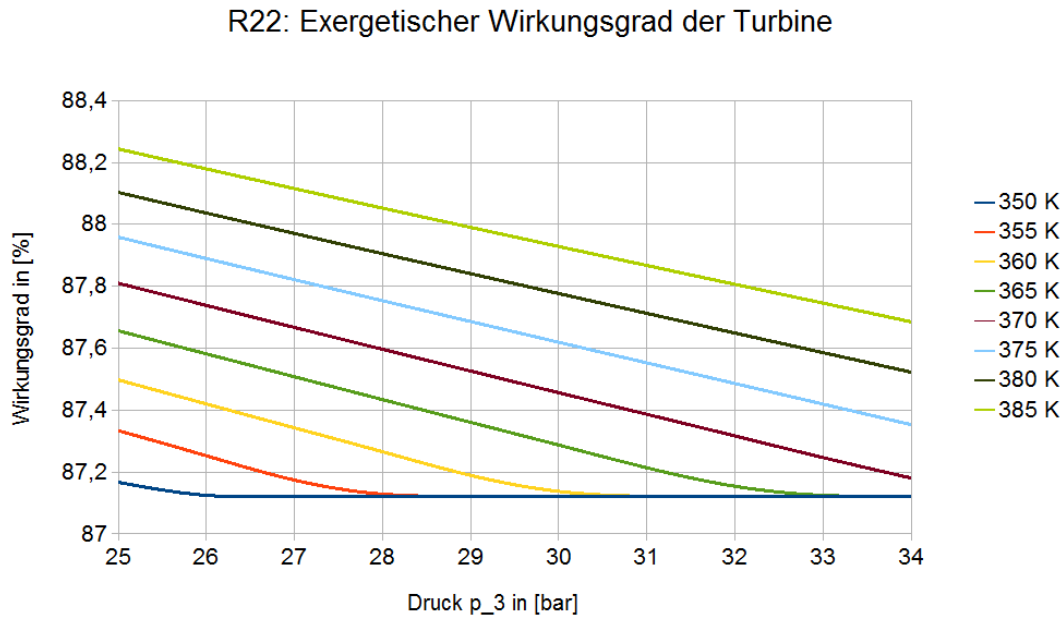


Abbildung 5.40: R22 - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über dem Druck

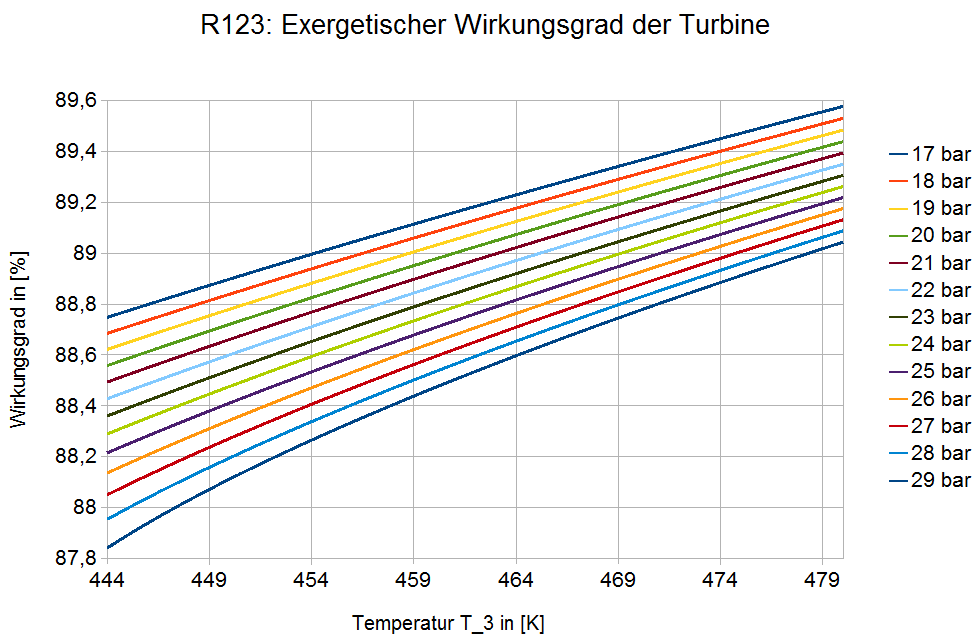


Abbildung 5.41: R123 - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über der Temperatur

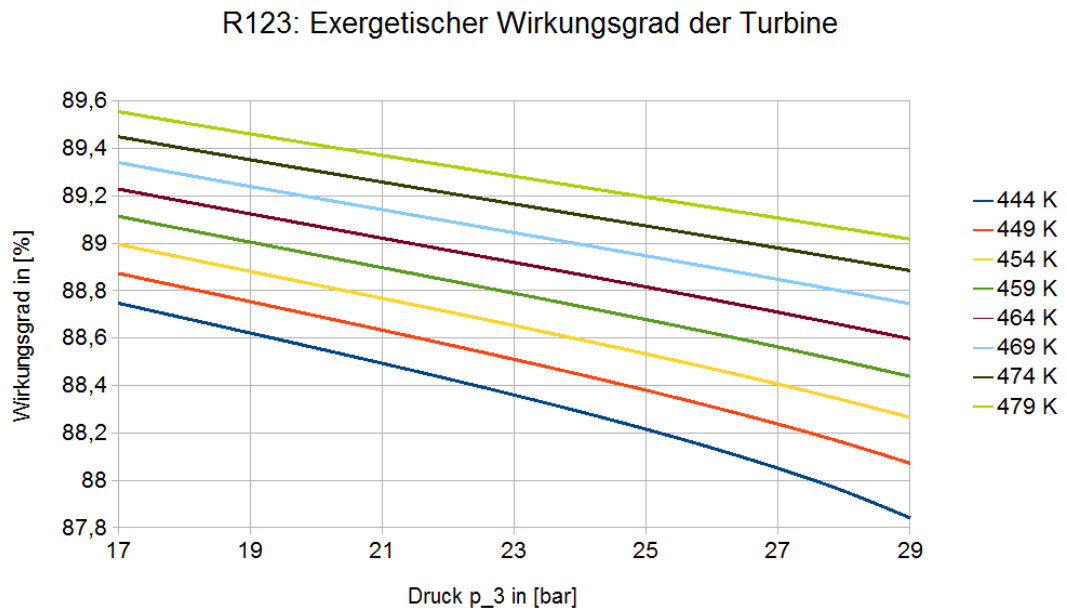


Abbildung 5.42: R123 - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über dem Druck

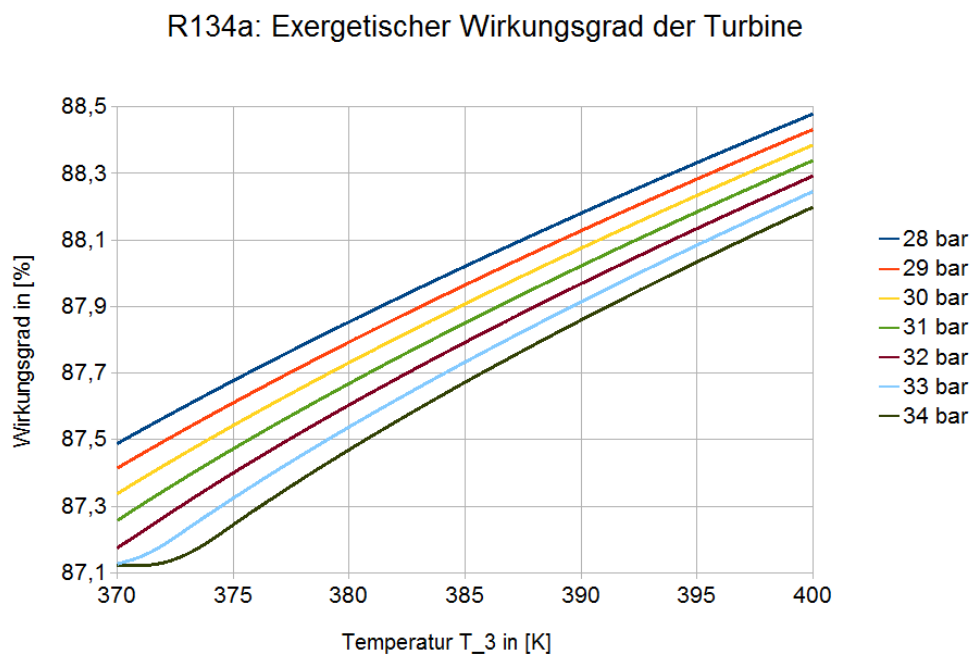


Abbildung 5.43: R134a - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über der Temperatur

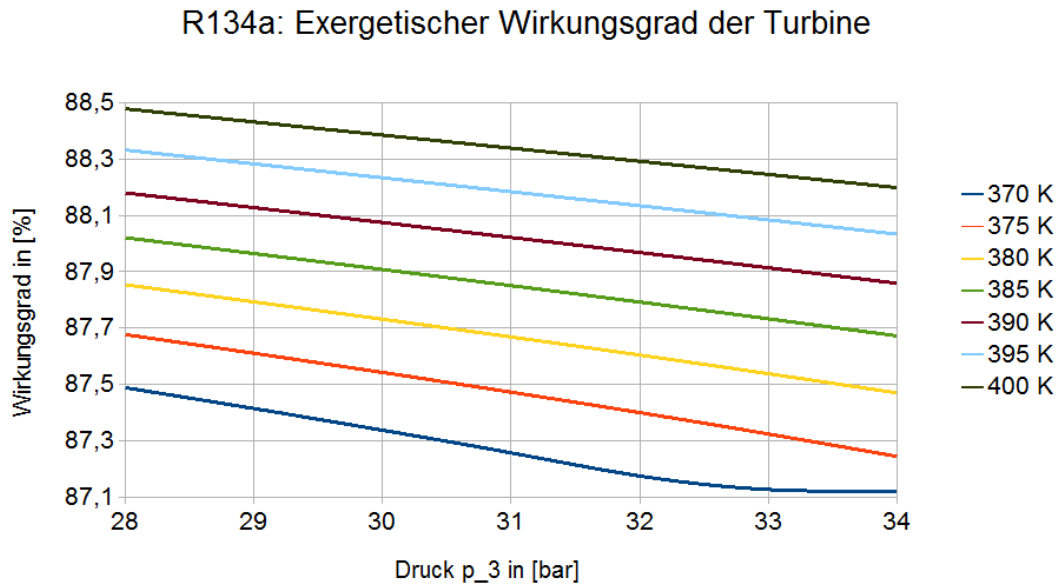


Abbildung 5.44: R134a - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über dem Druck

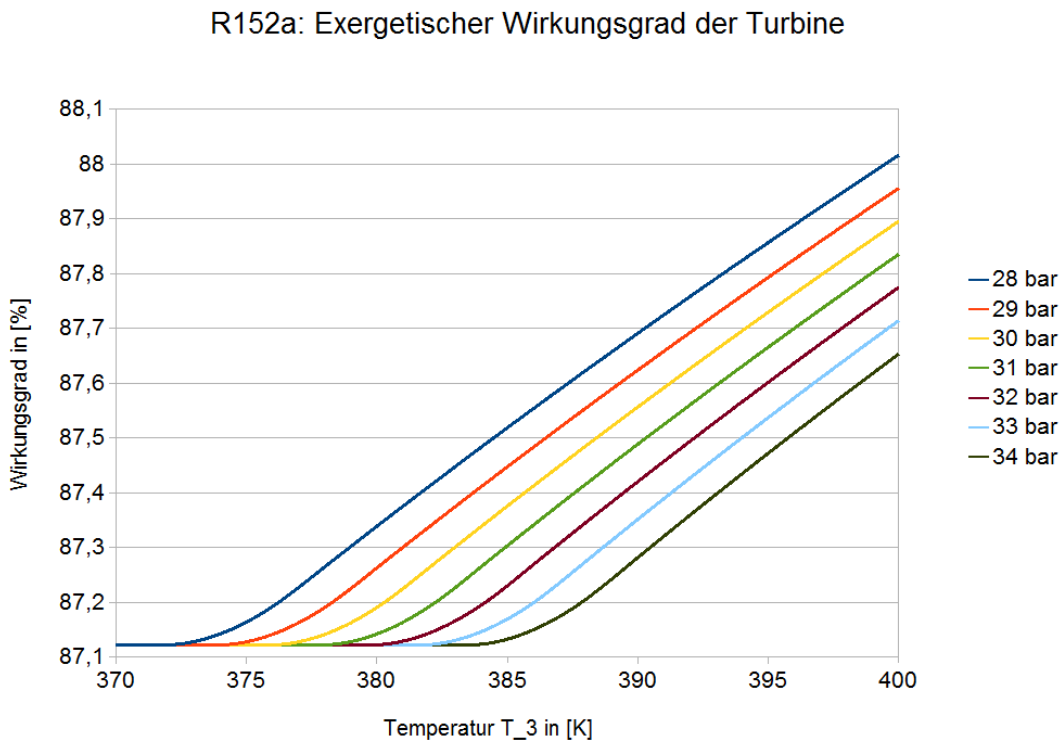


Abbildung 5.45: R152a - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über der Temperatur

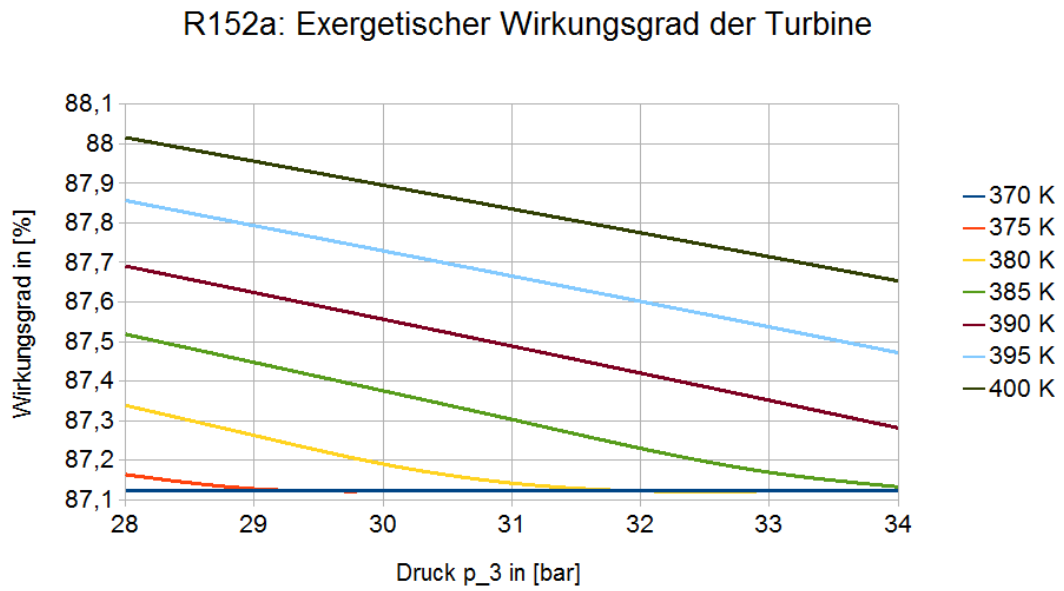


Abbildung 5.46: R152a - Exergetischer Wirkungsgrad der Turbine über dem Druck

6 Programm

Da der hergeleitete Gleichungssatz zu komplex und aufwendig für eine mehrmalige Handrechnung ist, wurde für die schnelle Durchführung mehrerer Berechnungen das für Linux ausgelegte C-Programm *wkm* geschrieben.

6.1 Beschreibung des Quellcodes

Beim schreiben des Programms wurde auf die Verwendung von Funktionen verzichtet und die für die Berechnung der Stoffwerte benötigten Stoffwertbibliotheken wurden mittels der Pakete *fmvc01.h* und *fmvtr.h* eingebunden.

Der Quellcode gliedert sich folgendermaßen:

- Definition der Variablen
- Abfrage der Eingabe
- Überprüfung der eingegeben Werte
- Berechnung
- Speichern der Werte in Dateien
- Bildschirmausgabe der Werte
- Plotten von Diagrammen mittels Gnuplot

6.2 Bedienung des Programms

Zur Bedienung des Programms stehen drei Möglichkeiten zur Auswahl:

Durch Eingabe von *wkm* wird das Programm normal gestartet und alle Werte können nacheinander eingegeben werden.

Durch Eingabe von *wkm test* wird eine Variante gestartet bei der nur das Kältemittel, die Temperatur T_3 und der Druck p_3 frei wählbar sind, die restlichen Werte sind festgelegt auf:

- Umgebungstemperatur: $T_u = 288.15 \text{ K}$
- Massenstrom: $\dot{m} = 1 \text{ kg/s}$
- Isentroper Wirkungsgrad der Pumpe: $\eta_{P_s} = 60 \%$
- Isentroper Wirkungsgrad der Turbine: $\eta_{T_s} = 85 \%$

- Zwischenwärmetauscher: $\Delta T_{zwt} = 5 \text{ Grad}$
- Druckverlust des Überhitzers: $p_{verl,23} = 1 \text{ bar/bar}$
- Druckverlust des Kondensators: $p_{verl41} = 1 \text{ bar/bar}$
- Druckverlust des Zwischenwärmetauschers: $p_{verl,zwt} = 1 \text{ bar/bar}$
- Temperatur im Punkt 1: $T_1 = 293.15 \text{ K}$

Als dritte Möglichkeit können alle Werte an den Programmnamen angehängt werden. Dafür müssen folgende Werte der Reihenfolge nach an den Programmnamen angehängt werden:

1. Kältemittel: *nh3 | r22 | r123 | r134a | r152a*
2. Umgebungstemperatur: *T_u in [K]*
3. Massenstrom: *ṁ in [kg/s]*
4. Isentroper Wirkungsgrad der Pumpe: *η_{Ps} in [%]*
5. Isentroper Wirkungsgrad der Turbine: *η_{Ts} in [%]*
6. Zwischenwärmetauscher: *ΔT_{zwt} in [Grad]*
7. Druckverlust des Überhitzers: *p_{verl,23} in [bar/bar]*
8. Druckverlust des Kondensators: *p_{verl,41} in [bar/bar]*
9. Druckverlust des Zwischenwärmetauschers: *p_{verl,zwt} in [bar/bar]*
10. Temperatur im Punkt 1: *T₁ in [K]*
11. Temperatur im Punkt 3: *T₃ in [K]*
12. Maximale Temperatur im Punkt 3: *T_{3,max} in [K]*
13. Druck im Punkt 3: *p₃ in [bar]*
14. Auswahl welcher Wert variabel sein soll: *T_3 | p_3 | dT_zwt | keiner*
15. Erhöhung des Wertes: *in [Grad] oder [bar]*
16. Auswahl ob ein weiterer Wert variabel sein soll: *T_3 | p_3 | keiner*
17. Erhöhung des Wertes: *in [Grad] oder [bar]*
18. Auswahl der Ausgabe der Werte: *Bildschirm | Datei | beides*

Mit der Auswahl bei den Punkten 14 und 16 kann gesteuert werden, ob nur ein Berechnungspunkt berechnet werden soll, oder ob die Berechnung über einen größeren Bereich des Kältemittels durchgeführt werden soll.

Durch Eingabe von *wkm hilfe* oder *wkm help* wird diese Beschreibung zur Bedienung des Programms ausgegeben.

7 Offene Punkte

Mit dem hier gezeigten Verfahren ist die Berechnung eines Kreisprozesses möglich. Allerdings beruht der hier hergeleitete Gleichungssatz auf den in der Literatur ([2]) hergeleiteten Arbeitsgleichungen und ist somit nur für einen begrenzten Temperatur- und Druckbereich gültig. In einer weiterführenden Arbeit müsste der Gleichungssatz um die Fundamentalgleichungen erweitert werden, um das ganze Spektrum der Kältemittel berechnen zu können. Des weiteren müssten die Gleichungen so erweitert werden, dass die *Punkte* 2.1 und 4.1 auch berechnet werden können, wenn diese ins Nassdampfgebiet fallen.

Mit diesem erweiterten Gleichungssatz müssten neue Diagramme über einen wesentlich größeren Anwendungsbereich erstellt werden, um zu überprüfen, ob die hier gemachten Überlegungen zum Verlauf des thermischen und exergetischen Wirkungsgrades außerhalb der berechneten Bereiche zutreffen und wo genau das jeweilige Maximum des Wirkungsgrades der Kältemittel liegt.

Das z.B. in *Abb. 5.9* erkennbare Verhalten, dass bei niedrigeren Drücken höhere Temperaturen einen geringeren Wirkungsgrad bewirken als niedrigere Temperaturen sollte ebenfalls weiter untersucht werden.

Ein Vergleich der hier gemachten Beobachtungen mit anderen Kältemitteln und vor allem mit Wasser wäre ebenfalls sehr wünschenswert, um zu überprüfen ob die hier verwendeten Kältemittel eine wirkliche Alternative sind.

Das erstellte C-Programm *wkm* ist in seiner finalen Version sehr ausgereift, allerdings wäre es wünschenswert, wenn die zugrundeliegenden Stoffwertbibliotheken um weitere Kältemittel erweitert würden und diese ins Programm eingebunden werden.

Um die Genauigkeit dieses Verfahrens zu überprüfen, sollten die berechneten Werte mit Messwerten einer Wärmekraftmaschine verglichen werden.

8 Zusammenfassung

Die Untersuchung der Wärmekraftmaschine hat gezeigt, dass durch den Einsatz eines Zwischenwärmetauschers der Wirkungsgrad um ca. 4 – 5 % gesteigert werden kann. Des weiteren deuten die Ergebnisse an, dass selbst wenn der Druck und die Temperatur am Turbineneintritt beliebig stark erhöht werden könnten, es dennoch einen maximalen Wert für den Wirkungsgrad gibt, der nicht überschritten werden kann. Dieser liegt allerdings außerhalb der vorgegebenen Maximalwerte und lässt sich durch den Einsatz eines Zwischenwärmetauschers noch weiter Verschieben, so dass der Wirkungsgrad noch deutlich gesteigert werden kann. Die Ergebnisse haben ebenfalls gezeigt, dass je dichter die Temperatur T_3 am minimalen Wert liegt, bei dem sich der *Punkt 3* noch außerhalb des Nassdampfgebietes befindet, der Wirkungsgrad stark sinkt. Abschließend kann man sagen, dass es für den Betrieb einer Wärmekraftmaschine sehr wichtig ist, das richtige Verhältnis zwischen Druck und Temperatur zu finden.

Der Vergleich der Kältemittel hat gezeigt, dass mit dem *R123* (auch *Dichlortrifluorethan*, *HFA – 123* oder *HCFC – 123* genannt) ein um bis zu 10 % höherer Wirkungsgrad erreichbar ist und dieses somit von den Werten her das beste Kältemittel ist. Allerdings enthält es zwei Chlortome und trägt somit zur Ozonzerstörung bei, dies aber nur in sehr geringem Maße, da es sich schnell verflüchtigt und nur in geringen Mengen in die Stratosphäre gelangt.

Literaturverzeichnis

- [1] Baehr/Kabelac: Thermodynamik. 14. Auflage. Springer-Verlag, 2009, ISBN 978-3-642-00555-8.
- [2] Baehr/Tillner-Roth: Thermodynamische Eigenschaften umweltverträglicher Kältemittel. Springer-Verlag, 1995, ISBN 3-540-58693-8.
- [3] Vinnemeier, Franz: Skript - Thermodynamik.
- [4] Vinnemeier, Franz: Skript - Strömungsmaschinen.
- [5] Vinnemeier, Franz: Programm zur Berechnung von Stoffwerten - btr.
- [6] VDI Berichte 539: ORC-HP-Technology. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1984, ISBN 3-18-090539-5.
- [7] http://www2.dupont.com/Refrigerants/en_US/assets/downloads/h52157_Suva123_push.pdf (abgerufen am 26.01.2012)

A Beispielrechnung

Ebene 1: Austritt Kondensator, Eintritt Speisepumpe
 Ebene 2: Austritt Speisepumpe, Eintritt Verdampfer/Überhitzer
 Ebene 3: Austritt Verdampfer/Überhitzer, Eintritt Turbine
 Ebene 4: Austritt Turbine, Eintritt Kondensator

geg: $\dot{m} = 1 \text{ kg/s}$; $T_u = 15 \text{ }^\circ\text{C}$
 $T_1 = 293,15 \text{ K}$; $T_3 = 468,15 \text{ K}$; $p_3 = 2850000 \text{ N/m}^2 < 30 \text{ bar}$;
 $\eta_{Ps} = 0,6$; $\eta_{Ts} = 0,85$

Zunächst werden mit Hilfe des Stoffwertberechnungsprogramm `btr` die restlichen Werte bestimmt, die für die weitere Rechnung benötigt werden:

mit T_1 über `btr` Siedelinie $\Rightarrow p_1 = 75591,43 \text{ N/m}^2$; $\rho_1 = 1476,52 \text{ kg/m}^3$; $h_1 = 220060,3 \text{ J/kg}$ und $s_1 = 1070,79 \text{ J/(kgK)}$

mit T_3 und p_3 über `btr` überhitztes Gebiet $\Rightarrow \rho_3 = 162,07 \text{ kg/m}^3$; $h_3 = 498851,1 \text{ J/kg}$ und $s_3 = 1774,04 \text{ J/(kgK)}$

mit $s_4 = s_3$ und $p_4 = p_1$ über `btr` überhitztes Gebiet $\Rightarrow h_{4s} = 428968,31 \text{ J/kg}$

Pumpe:

$$p_2 = p_3 = 2850000 \text{ N/m}^2 \quad (\text{A.1})$$

$$y_P = \int v dp = \frac{p_2 - p_1}{\rho_1} = y_{Ps} = \Delta h_{Ps} \quad (\text{A.2})$$

$$y_P = \frac{2850000 \text{ N/m}^2 - 75591,43 \text{ N/m}^2}{1476,52 \text{ kg/m}^3} = 1879,02 \text{ J/kg} \quad (\text{A.3})$$

$$\eta_{Ps} = \frac{\Delta h_{Ps}}{\Delta h_P} \quad (\text{A.4})$$

$$\Delta h_P = \frac{\Delta h_{Ps}}{\eta_{Ps}} = h_2 - h_1 \quad (\text{A.5})$$

$$\Delta h_P = \frac{1879,02 \text{ J/kg}}{0,6} = 3131,7 \text{ J/kg} \quad (\text{A.6})$$

$$h_2 = \Delta h_P + h_1 \quad (\text{A.7})$$

$$h_2 = 3131,7 \text{ J/kg} + 220060,3 \text{ J/kg} = 223192 \text{ J/kg} \quad (\text{A.8})$$

$$h_1 = u_1 + p_1 \cdot v_1 = u_1 + \frac{p_1}{\rho_1} \quad (\text{A.9})$$

$$u_1 = h_1 - \frac{p_1}{\rho_1} \quad (\text{A.10})$$

$$u_1 = 220060,3 \text{ J/kg} - \frac{75581,43 \text{ N/m}^2}{1476,52 \text{ kg/m}^3} = 220009,11 \text{ J/kg} \quad (\text{A.11})$$

$$c_F = \frac{u_1}{T_1} \quad (\text{A.12})$$

$$c_F = \frac{220009,11 \text{ J/kg}}{293,15 \text{ K}} = 750,5 \text{ J/(kgK)} \quad (\text{A.13})$$

$$T_2 = T_1 + \frac{\Delta h_P - y_P}{c_F} \quad (\text{A.14})$$

$$T_2 = 293,15 \text{ K} + \frac{3131,7 \text{ J/kg} - 1879,02 \text{ J/kg}}{750,5 \text{ J/(kgK)}} = 294,82 \text{ K} \quad (\text{A.15})$$

$$\Delta s_P = c_F \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = s_2 - s_1 \quad (\text{A.16})$$

$$\Delta s_P = 750,5 \text{ J/(kgK)} \cdot \ln\left(\frac{294,82 \text{ K}}{293,15 \text{ K}}\right) = 4,26 \text{ J/(kgK)} \quad (\text{A.17})$$

$$s_2 = \Delta s_P + s_1 \quad (\text{A.18})$$

$$s_2 = 4,26 \text{ J/(kgK)} + 1070,79 \text{ J/(kgK)} = 1075,05 \text{ J/(kgK)} \quad (\text{A.19})$$

Turbine:

$$\Delta h_{Ts} = h_{4s} - h_3 \quad (\text{A.20})$$

$$\Delta h_{Ts} = 428968,31 \text{ J/kg} - 498851,1 \text{ J/kg} = -69882,79 \text{ J/kg} \quad (\text{A.21})$$

$$\eta_{Ts} = \frac{\Delta h_T}{\Delta h_{Ts}} \quad (\text{A.22})$$

$$\Delta h_T = \Delta h_{Ts} \cdot \eta_{Ts} \quad (\text{A.23})$$

$$\Delta h_T = -69882,79 \text{ J/kg} \cdot 0,85 = -59400,37 \text{ J/kg} \quad (\text{A.24})$$

$$h_4 = \Delta h_T + h_3 \quad (\text{A.25})$$

$$h_4 = -59400,37 \text{ J/kg} + 498851,1 \text{ J/kg} = 439450,73 \text{ J/kg} \quad (\text{A.26})$$

mit p_4 und h_4 über **btr** überhitztes Gebiet $\Rightarrow T_4 = 357,29 \text{ K}$; $\rho_4 = 3,96 \text{ kg/m}^3$ und $s_4 = 1803,97 \text{ J/(kgK)}$

$$\Delta s_T = s_4 - s_3 \quad (\text{A.27})$$

$$\Delta s_T = 1803,97 \text{ J/(kgK)} - 1774,04 \text{ J/(kgK)} = 29,93 \text{ J/(kgK)} \quad (\text{A.28})$$

Zwischenwärmetauscher:

Punkt 4.1:

$$p_{4.1} = p_4 = 75591,43 \text{ N/m}^2 \quad (\text{A.29})$$

$$T_{4.1} = T_2 + 5 \text{ K} \quad (\text{A.30})$$

$$T_{4.1} = 294,82 \text{ K} + 5 \text{ K} = 299,82 \text{ K} \quad (\text{A.31})$$

mit $p_{4.1}$ und $T_{4.1}$ über **btr** überhitztes Gebiet $\Rightarrow \rho_{4.1} = 4,79 \text{ kg/m}^3$; $h_{4.1} = 398074,24 \text{ J/kg}$ und $s_{4.1} = 1677,85 \text{ J/(kgK)}$

$$\dot{Q}_{44.1} = \dot{m} \cdot (h_{4.1} - h_4) \quad (\text{A.32})$$

$$\dot{Q}_{44.1} = 1 \text{ kg/s} \cdot (398074,24 \text{ J/kg} - 439450,73 \text{ J/kg}) = -41376,49 \text{ W} \quad (\text{A.33})$$

Punkt 2.1:

mit T_2 über **btr** Siedelinie $\Rightarrow p_{2sl} = 80589,43 \text{ N/m}^2$; $\rho_{2sl} = 1472,3 \text{ kg/m}^3$ und

$$h_{2sl} = 221757,2 \text{ J/kg}$$

$$u_{2sl} = h_{2sl} - \left(\frac{p_{2sl}}{\rho_{2sl}} \right) \quad (\text{A.34})$$

$$u_{2sl} = 221757,2 - \left(\frac{80589,43 \text{ J/kg}}{1472,3 \text{ N/m}^2 \text{ kg/m}^3} \right) = 221702,46 \text{ J/kg} \quad (\text{A.35})$$

$$c_{2sl} = \frac{u_{2sl}}{T_2} \quad (\text{A.36})$$

$$c_{2sl} = \frac{221702,46 \text{ J/kg}}{294,82 \text{ K}} = 751,99 \text{ J/(kgK)} \quad (\text{A.37})$$

$$\dot{Q}_{2.12} = \dot{m} \cdot (h_{2.1} - h_2) = \dot{m} \cdot c_{2sl} \cdot (T_{2.1} - T_2) \quad (\text{A.38})$$

$$\dot{Q}_{2.12} = -\dot{Q}_{44.1} = 41376,49 \text{ W} \quad (\text{A.39})$$

$$T_{2.1} = \frac{\dot{Q}_{2.12}}{\dot{m} \cdot c_{2sl}} + T_2 \quad (\text{A.40})$$

$$T_{2.1} = \frac{41376,49 \text{ W}}{1 \text{ kg/s} \cdot 751,99 \text{ J/(kgK)}} + 294,82 \text{ K} = 349,84 \text{ K} \quad (\text{A.41})$$

$$h_{2.1} = \frac{\dot{Q}_{2.12}}{\dot{m}} + h_2 \quad (\text{A.42})$$

$$h_{2.1} = \frac{41376,49 \text{ W}}{1 \text{ kg/s}} + 223192 \text{ J/kg} = 264568,49 \text{ J/kg} \quad (\text{A.43})$$

$$s_{2.1} = c_F \cdot \ln \left(\frac{T_{2.1}}{T_1} \right) + s_1 \quad (\text{A.44})$$

$$s_{2.1} = 750,5 \text{ J/(kgK)} \cdot \ln \left(\frac{349,84 \text{ K}}{293,15 \text{ K}} \right) + 1070,79 \text{ J/(kgK)} \quad (\text{A.45})$$

$$s_{2.1} = 1203,47 \text{ J/(kgK)} \quad (\text{A.46})$$

mit $p_{2.1} = p_2$ über **btr** Siedelinie $\Rightarrow T_{2.1sl} = 441,32 \text{ K}$

Da $T_{2.1} < T_{2.1sl}$ ist das Kühlmittel r123 beim Punkt 2.1 flüssig und die verwendeten Formeln sind zulässig.

Technische Arbeit:

$$w_t = w_{t34} - w_{t12} = (h_4 - h_3) - (h_2 - h_1) \quad (\text{A.47})$$

$$w_{t12} = (223192 \text{ J/kg} - 220060,3 \text{ J/kg}) = 3131,7 \text{ J/kg} \quad (\text{A.48})$$

$$w_{t34} = (439450,73 \text{ J/kg} - 498851,1 \text{ J/kg}) = -59400,37 \text{ J/kg} \quad (\text{A.49})$$

$$w_t = -59400,37 \text{ J/kg} - 3131,7 \text{ J/kg} = -62532,07 \text{ J/kg} \quad (\text{A.50})$$

Thermischer Wirkungsgrad: ohne Zwischenwärmetauscher:

$$q_{23} = h_3 - h_2 \quad (\text{A.51})$$

$$q_{23} = 498851,1 \text{ J/kg} - 223192 \text{ J/kg} = 275659,11 \text{ J/kg} \quad (\text{A.52})$$

$$q_{41} = h_1 - h_4 \quad (\text{A.53})$$

$$q_{41} = 220060,3 \text{ J/kg} - 439450,73 \text{ J/kg} = -219390,43 \text{ J/kg} \quad (\text{A.54})$$

$$\eta_{th} = 100 \cdot \frac{|w_t|}{q_{23}} \quad (\text{A.55})$$

$$\eta_{th} = 100 \cdot \frac{62532,07 \text{ J/kg}}{275659,11 \text{ J/kg}} = 22,68 \% \quad (\text{A.56})$$

mit Zwischenwärmetauscher:

$$q_{2,13} = h_3 - h_{2,1} \quad (\text{A.57})$$

$$q_{2,13} = 498851,1 \text{ J/kg} - 264568,49 \text{ J/kg} = 234282,61 \text{ J/kg} \quad (\text{A.58})$$

$$q_{4,11} = h_1 - h_{4,1} \quad (\text{A.59})$$

$$q_{4,11} = 220060,3 \text{ J/kg} - 398074,24 \text{ J/kg} = -178013,94 \text{ J/kg} \quad (\text{A.60})$$

$$\eta_{th,zwt} = 100 \cdot \frac{|w_t|}{q_{2,13}} \quad (\text{A.61})$$

$$\eta_{th,zwt} = 100 \cdot \frac{62532,07 \text{ J/kg}}{234282,61 \text{ J/kg}} = 26,69 \% \quad (\text{A.62})$$

Exergetischer Wirkungsgrad:

ohne Zwischenwärmetauscher:

Exergie:

$$\dot{E}_{u1} = \dot{m} \cdot \left(h_1 - h_u + \frac{c_1^2}{2} + g \cdot z_1 - T_u \cdot (s_1 - s_u) \right) \quad (\text{A.63})$$

$$\dot{E}_{u1} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_u - T_u \cdot (s_1 - s_u)) \quad (\text{A.64})$$

$$\dot{E}_{u2} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_u - T_u \cdot (s_2 - s_u)) \quad (\text{A.65})$$

$$\dot{E}_{u2} - \dot{E}_{u1} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1 - T_u \cdot (s_2 - s_1)) \quad (\text{A.66})$$

$$\dot{E}_{u3} - \dot{E}_{u2} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_2 - T_u \cdot (s_3 - s_2)) \quad (\text{A.67})$$

$$\dot{E}_{u4} - \dot{E}_{u3} = \dot{m} \cdot (h_4 - h_3 - T_u \cdot (s_4 - s_3)) \quad (\text{A.68})$$

$$\dot{E}_{u1} - \dot{E}_{u4} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4 - T_u \cdot (s_1 - s_4)) \quad (\text{A.69})$$

$$\sum \dot{E}_u = \dot{E}_{u2} - \dot{E}_{u1} + \dot{E}_{u3} - \dot{E}_{u2} + \dot{E}_{u4} - \dot{E}_{u3} + \dot{E}_{u1} - \dot{E}_{u4} \quad (\text{A.70})$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{u2} - \dot{E}_{u1} &= 1 \text{ kg/s} \cdot (223191,99 \text{ J/kg} - 220060,3 \text{ J/kg}) \\ &\quad - 1 \text{ kg/s} \cdot 288,15 \text{ K} \cdot (1075,04 \text{ J/(kgK)} - 1070,79 \text{ J/(kgK)}) \\ \dot{E}_{u2} - \dot{E}_{u1} &= 1903,9 \text{ J/s} \end{aligned} \quad (\text{A.71})$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{u3} - \dot{E}_{u2} &= 1 \text{ kg/s} \cdot (498851,1 \text{ J/kg} - 223191,99 \text{ J/kg}) \\ &\quad - 1 \text{ kg/s} \cdot 288,15 \text{ K} \cdot (1774,04 \text{ J/(kgK)} - 1075,04 \text{ J/(kgK)}) \\ \dot{E}_{u3} - \dot{E}_{u2} &= 74245,1 \text{ J/s} \end{aligned} \quad (\text{A.72})$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{u4} - \dot{E}_{u3} &= 1 \text{ kg/s} \cdot (439450,7 \text{ J/kg} - 498851,1 \text{ J/kg}) \\ &\quad - 1 \text{ kg/s} \cdot 288,15 \text{ K} \cdot (1803,97 \text{ J/(kgK)} - 1774,04 \text{ J/(kgK)}) \\ \dot{E}_{u4} - \dot{E}_{u3} &= -68025,8 \text{ J/s} \end{aligned} \quad (\text{A.73})$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{u1} - \dot{E}_{u4} &= 1 \text{ kg/s} \cdot (220060,3 \text{ J/kg} - 439450,7 \text{ J/kg}) \\ &\quad - 1 \text{ kg/s} \cdot 288,15 \text{ K} \cdot (1070,79 \text{ J/(kgK)} - 1803,97 \text{ J/(kgK)}) \\ \dot{E}_{u1} - \dot{E}_{u4} &= -8123,2 \text{ J/s} \end{aligned} \quad (\text{A.74})$$

$$\begin{aligned} \sum \dot{E}_u &= 1903,9 \text{ J/s} + 74245,1 \text{ J/s} - 68025,8 \text{ J/s} - 8123,2 \text{ J/s} \\ \sum \dot{E}_u &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.75})$$

Anergie:

$$\dot{B}_{u1} = \dot{m} \cdot (h_u + T_u \cdot (s_1 - s_u)) \quad (\text{A.76})$$

$$\dot{B}_{u2} = \dot{m} \cdot (h_u + T_u \cdot (s_2 - s_u)) \quad (\text{A.77})$$

$$\dot{B}_{u2} - \dot{B}_{u1} = \dot{m} \cdot (T_u \cdot (s_2 - s_1)) \quad (\text{A.78})$$

$$\dot{B}_{u3} - \dot{B}_{u2} = \dot{m} \cdot (T_u \cdot (s_3 - s_2)) \quad (\text{A.79})$$

$$\dot{B}_{u4} - \dot{B}_{u3} = \dot{m} \cdot (T_u \cdot (s_4 - s_3)) \quad (\text{A.80})$$

$$\dot{B}_{u1} - \dot{B}_{u4} = \dot{m} \cdot (T_u \cdot (s_1 - s_4)) \quad (\text{A.81})$$

$$\sum \dot{B}_u = \dot{B}_{u2} - \dot{B}_{u1} + \dot{B}_{u3} - \dot{B}_{u2} + \dot{B}_{u4} - \dot{B}_{u3} + \dot{B}_{u1} - \dot{B}_{u4} \quad (\text{A.82})$$

$$\begin{aligned} \dot{B}_{u2} - \dot{B}_{u1} &= 1 \text{ kg/s} \cdot (288,15 \text{ K} \cdot (1075,04 \text{ J/(kgK)} - 1070,79 \text{ J/(kgK)})) \\ \dot{B}_{u2} - \dot{B}_{u1} &= 1227,8 \text{ J/s} \end{aligned} \quad (\text{A.83})$$

$$\begin{aligned} \dot{B}_{u3} - \dot{B}_{u2} &= 1 \text{ kg/s} \cdot (288,15 \text{ K} \cdot (1774,04 \text{ J/(kgK)} - 1075,04 \text{ J/(kgK)})) \\ \dot{B}_{u3} - \dot{B}_{u2} &= 201414 \text{ J/s} \end{aligned} \quad (\text{A.84})$$

$$\begin{aligned} \dot{B}_{u4} - \dot{B}_{u3} &= 1 \text{ kg/s} \cdot (288,15 \text{ K} \cdot (1803,97 \text{ J/(kgK)} - 1774,04 \text{ J/(kgK)})) \\ \dot{B}_{u4} - \dot{B}_{u3} &= 8625,4 \text{ J/s} \end{aligned} \quad (\text{A.85})$$

$$\begin{aligned} \dot{B}_{u1} - \dot{B}_{u4} &= 1 \text{ kg/s} \cdot (288,15 \text{ K} \cdot (1070,79 \text{ J/(kgK)} - 1803,97 \text{ J/(kgK)})) \\ \dot{B}_{u2} - \dot{B}_{u1} &= -211267,2 \text{ J/s} \end{aligned} \quad (\text{A.86})$$

$$\begin{aligned} \sum \dot{B}_u &= 1227,8 \text{ J/s} + 201414 \text{ J/s} + 8625,4 \text{ J/s} - 211267,2 \text{ J/s} \\ \sum \dot{B}_u &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.87})$$

Exergieverluste:

$$e_{v12} = T_u \cdot \Delta s_{irr} = T_u \cdot (s_2 - s_1) = b_{u2} - b_{u1} \quad (\text{A.88})$$

$$e_{v23} = T_u \cdot (s_3 - s_2) = b_{u3} - b_{u2} \quad (\text{A.89})$$

$$e_{v34} = T_u \cdot (s_4 - s_3) = b_{u4} - b_{u3} \quad (\text{A.90})$$

$$e_{v41} = T_u \cdot (s_1 - s_4) = b_{u1} - b_{u4} \quad (\text{A.91})$$

$$e_{v12} = 1227,8 \text{ J/kg} \quad (\text{A.92})$$

$$e_{v23} = 201414 \text{ J/kg} \quad (\text{A.93})$$

$$e_{v34} = 8625,4 \text{ J/kg} \quad (\text{A.94})$$

$$e_{v41} = -211267,2 \text{ J/kg} \quad (\text{A.95})$$

Exergie der Wärme:

$$e_{q12} = q_{12} - T_u \cdot \Delta s_{Aus} = e_2 - e_1 - w_{t12} \quad (\text{A.96})$$

$$e_{q12} = e_{u2} - e_{u1} - w_{t12} \quad (\text{A.97})$$

$$e_{q23} = q_{23} - 0 \quad (\text{A.98})$$

$$e_{q34} = e_{u4} - e_{u3} - w_{t34} \quad (\text{A.99})$$

$$e_{q41} = q_{41} - 0 \quad (\text{A.100})$$

$$e_{q12} = 1903,9 \text{ J/kg} - 3131,7 \text{ J/kg} = -1227,8 \text{ J/kg}$$

$$e_{q23} = 275659,11 \text{ J/kg}$$

$$e_{q34} = -68025,8 \text{ J/kg} + 59400,37 \text{ J/kg} = -8625,4 \text{ J/kg}$$

$$e_{q41} = -219390,43 \text{ J/kg}$$

Exergetischer Wirkungsgrad:

$$\xi_P = \frac{e_{u12} - e_{v12}}{e_{u12}} \quad (\text{A.101})$$

$$\xi_P = \frac{1903,9 \text{ J/kg} - 1227,8 \text{ J/kg}}{1903,9 \text{ J/kg}}$$

$$\xi_P = 0,36 = 36 \% \quad (\text{A.102})$$

$$\xi_T = \frac{e_{u34} - e_{v34}}{e_{u34}} \quad (\text{A.103})$$

$$\xi_T = \frac{-68025,8 \text{ J/kg}}{-68025,8 \text{ J/kg} - 8625,4 \text{ J/kg}} \quad (\text{A.104})$$

$$\xi_V = \frac{e_{q23} - e_{v23}}{e_{q23}} \quad (\text{A.105})$$

$$\xi_V = \frac{275659,11 \text{ J/kg} - 201414 \text{ J/kg}}{275659,11 \text{ J/kg}} \quad (\text{A.106})$$

$$\xi_K = \frac{e_{q41} - e_{v41}}{e_{q41}} \quad (\text{A.107})$$

$$\xi_K = \frac{-219390,43 \text{ J/kg} + 211267,2 \text{ J/kg}}{-219390,43 \text{ J/kg}} \quad (\text{A.108})$$

mit Zwischenwärmetauscher:

Exergie:

$$\dot{E}_{u2.1} - \dot{E}_{u2} = \dot{m} \cdot (h_{2.1} - h_2 - T_u \cdot (s_{2.1} - s_2)) \quad (\text{A.109})$$

$$\dot{E}_{u3} - \dot{E}_{u2.1} = \dot{m} \cdot (h_3 - h_{2.1} - T_u \cdot (s_3 - s_{2.1})) \quad (\text{A.110})$$

$$\dot{E}_{u4.1} - \dot{E}_{u4} = \dot{m} \cdot (h_{4.1} - h_4 - T_u \cdot (s_{4.1} - s_4)) \quad (\text{A.111})$$

$$\dot{E}_{u1} - \dot{E}_{u4.1} = \dot{m} \cdot (h_1 - h_{4.1} - T_u \cdot (s_1 - s_{4.1})) \quad (\text{A.112})$$

$$\begin{aligned} \sum \dot{E}_u &= \dot{E}_{u2} - \dot{E}_{u1} + \dot{E}_{u2.1} - \dot{E}_{u2} + \dot{E}_{u3} - \dot{E}_{u2.1} \\ &+ \dot{E}_{u4} - \dot{E}_{u3} + \dot{E}_{u4.1} - \dot{E}_{u4} + \dot{E}_{u1} - \dot{E}_{u4.1} \end{aligned} \quad (\text{A.113})$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{u2.1} - \dot{E}_{u2} &= 1 \text{ kg/s} \cdot (264568,5 \text{ J/kg} - 223191,99 \text{ J/kg}) \\ &- 1 \text{ kg/s} \cdot 288,15 \text{ K} \cdot (1203,7 \text{ J/(kgK)} - 1075,04 \text{ J/(kgK)}) \end{aligned}$$

$$\dot{E}_{u2.1} - \dot{E}_{u2} = 4303,1 \text{ J/s} \quad (\text{A.114})$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{u3} - \dot{E}_{u2.1} &= 1 \text{ kg/s} \cdot (498851,1 \text{ J/kg} - 264568,5 \text{ J/kg}) \\ &- 1 \text{ kg/s} \cdot 288,15 \text{ K} \cdot (1774,04 \text{ J/(kgK)} - 1203,7 \text{ J/(kgK)}) \end{aligned}$$

$$\dot{E}_{u3} - \dot{E}_{u2.1} = 69939,1 \text{ J/s} \quad (\text{A.115})$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{u4.1} - \dot{E}_{u4} &= 1 \text{ kg/s} \cdot (398074,2 \text{ J/kg} - 439450,7 \text{ J/kg}) \\ &- 1 \text{ kg/s} \cdot 288,15 \text{ K} \cdot (1677,9 \text{ J/(kgK)} - 1803,97 \text{ J/(kgK)}) \end{aligned}$$

$$\dot{E}_{u4.1} - \dot{E}_{u4} = -5049,4 \text{ J/s} \quad (\text{A.116})$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{u1} - \dot{E}_{u4.1} &= 1 \text{ kg/s} \cdot (220060,3 \text{ J/kg} - 398074,2 \text{ J/kg}) \\ &- 1 \text{ kg/s} \cdot 288,15 \text{ K} \cdot (1070,79 \text{ J/(kgK)} - 1677,9 \text{ J/(kgK)}) \end{aligned}$$

$$\dot{E}_{u1} - \dot{E}_{u4.1} = -3075,2 \text{ J/s} \quad (\text{A.117})$$

$$\begin{aligned} \sum \dot{E}_u &= 1903,9 \text{ J/s} + 4303,1 \text{ J/s} + 69939,1 \text{ J/s} - 68025,8 \text{ J/s} \\ &- 5049,4 \text{ J/s} - 3075,2 \text{ J/s} \end{aligned}$$

$$\sum \dot{E}_u = 0 \quad (\text{A.118})$$

Anergie:

$$\dot{B}_{u2.1} - \dot{B}_{u2} = \dot{m} \cdot (T_u \cdot (s_{2.1} - s_2)) \quad (\text{A.119})$$

$$\dot{B}_{u3} - \dot{B}_{u2.1} = \dot{m} \cdot (T_u \cdot (s_3 - s_{2.1})) \quad (\text{A.120})$$

$$\dot{B}_{u4.1} - \dot{B}_{u4} = \dot{m} \cdot (T_u \cdot (s_{4.1} - s_4)) \quad (\text{A.121})$$

$$\dot{B}_{u1} - \dot{B}_{u4.1} = \dot{m} \cdot (T_u \cdot (s_1 - s_{4.1})) \quad (\text{A.122})$$

$$\begin{aligned} \sum \dot{B}_u &= \dot{B}_{u2} - \dot{B}_{u1} + \dot{B}_{u2.1} - \dot{B}_{u2} + \dot{B}_{u3} - \dot{B}_{u2.1} \\ &+ \dot{B}_{u4} - \dot{B}_{u3} + \dot{B}_{u4.1} - \dot{B}_{u4} + \dot{B}_{u1} - \dot{B}_{u4.1} \end{aligned} \quad (\text{A.123})$$

$$\begin{aligned} \dot{B}_{u2.1} - \dot{B}_{u2} &= 1 \text{ kg/s} \cdot (288,15 \text{ K} \cdot (1203,7 \text{ J/(kgK)} - 1075,04 \text{ J/(kgK)})) \\ \dot{B}_{u2.1} - \dot{B}_{u2} &= 37073,4 \text{ J/s} \end{aligned} \quad (\text{A.124})$$

$$\begin{aligned} \dot{B}_{u3} - \dot{B}_{u2.1} &= 1 \text{ kg/s} \cdot (288,15 \text{ K} \cdot (1774,04 \text{ J/(kgK)} - 1203,7 \text{ J/(kgK)})) \\ \dot{B}_{u3} - \dot{B}_{u2.1} &= 164343,5 \text{ J/s} \end{aligned} \quad (\text{A.125})$$

$$\begin{aligned} \dot{B}_{u4.1} - \dot{B}_{u4} &= 1 \text{ kg/s} \cdot (288,15 \text{ K} \cdot (1677,9 \text{ J/(kgK)} - 1803,97 \text{ J/(kgK)})) \\ \dot{B}_{u4.1} - \dot{B}_{u4} &= -36327,1 \text{ J/s} \end{aligned} \quad (\text{A.126})$$

$$\begin{aligned} \dot{B}_{u1} - \dot{B}_{u4.1} &= 1 \text{ kg/s} \cdot (288,15 \text{ K} \cdot (1070,79 \text{ J/(kgK)} - 1677,9 \text{ J/(kgK)})) \\ \dot{B}_{u1} - \dot{B}_{u4.1} &= -174938,7 \text{ J/s} \end{aligned} \quad (\text{A.127})$$

$$\begin{aligned} \sum \dot{B}_u &= 1227,8 \text{ J/kg} + 37073,4 \text{ J/s} + 164343,5 \text{ J/s} + 8625,4 \text{ J/s} \\ &- 36327,1 \text{ J/s} - 174938,7 \text{ J/s} \\ \sum \dot{B}_u &= 0 \end{aligned} \quad (\text{A.128})$$

Exergieverluste:

$$e_{v22.1} = T_u \cdot (s_{2.1} - s_2) = b_{u2.1} - b_{u2} \quad (\text{A.129})$$

$$e_{v2.13} = T_u \cdot (s_3 - s_{2.1}) = b_{u3} - b_{u2.1} \quad (\text{A.130})$$

$$e_{v44.1} = T_u \cdot (s_{4.1} - s_4) = b_{u4.1} - b_{u4} \quad (\text{A.131})$$

$$e_{v4.11} = T_u \cdot (s_1 - s_{4.1}) = b_{u1} - b_{u4.1} \quad (\text{A.132})$$

$$e_{v22.1} = 37073,4 \text{ J/kg} \quad (\text{A.133})$$

$$e_{v2.13} = 164343,5 \text{ J/kg} \quad (\text{A.134})$$

$$e_{v44.1} = -36327,1 \text{ J/kg} \quad (\text{A.135})$$

$$e_{v4.11} = -174938,7 \text{ J/kg} \quad (\text{A.136})$$

Exergie der Wärme:

$$e_{q22.1} = q_{22.1} \quad (\text{A.137})$$

$$e_{q2.13} = q_{2.13} \quad (\text{A.138})$$

$$e_{q44.1} = q_{44.1} \quad (\text{A.139})$$

$$e_{q4.11} = q_{4.11} \quad (\text{A.140})$$

$$e_{q22.1} = 41376,5 \text{ J/kg}$$

$$e_{q2.13} = 234282,6 \text{ J/kg}$$

$$e_{q44.1} = -41376,5 \text{ J/kg}$$

$$e_{q4.11} = -178013,9 \text{ J/kg}$$

Exergetischer Wirkungsgrad:

$$\xi_{22.1} = \frac{e_{q22.1} - e_{v22.1}}{e_{q22.1}} \quad (\text{A.141})$$

$$\xi_{22.1} = \frac{41376,5 \text{ J/kg} - 37073,4 \text{ J/kg}}{41376,5 \text{ J/kg}} \quad (\text{A.142})$$

$$\xi_{22.1} = 0,1 = 10 \% \quad (\text{A.142})$$

$$\xi_{2.13} = \frac{e_{q2.13} - e_{v2.13}}{e_{q2.13}} \quad (\text{A.143})$$

$$\xi_{2.13} = \frac{234282,6 \text{ J/kg} - 164343,5 \text{ J/kg}}{234282,6 \text{ J/kg}} \quad (\text{A.144})$$

$$\xi_{2.13} = 0,3 = 30 \% \quad (\text{A.144})$$

$$\xi_{44.1} = \frac{e_{q44.1} - e_{v44.1}}{e_{q44.1}} \quad (\text{A.145})$$

$$\xi_{44.1} = \frac{|-41376,5 \text{ J/kg}| - |-36327,1 \text{ J/kg}|}{|-41376,5 \text{ J/kg}|} \quad (\text{A.146})$$

$$\xi_{44.1} = 0,12 = 12 \% \quad (\text{A.146})$$

$$\xi_{4.11} = \frac{e_{q4.11} - e_{v4.11}}{e_{q4.11}} \quad (\text{A.147})$$

$$\xi_{4.11} = \frac{|-178013,9 \text{ J/kg}| - |-174938,7 \text{ J/kg}|}{|-178013,9 \text{ J/kg}|} \quad (\text{A.148})$$

$$\xi_{4.11} = 0,02 = 2 \% \quad (\text{A.148})$$

B Zip-Archiv

In dem Zip-Archiv finden Sie:

- Dieses Dokument im .pdf Format
- Das C-Programm *wkm*
- Den Quellcode des Programms
- Die Ergebnisse der Berechnungen als OpenOffice-Tabellen



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Hamburg University of Applied Sciences

Erklärung zur selbständigen Bearbeitung einer ausgeführten Diplomarbeit

Zur Erläuterung des Zwecks dieses Blattes:

§ 27 Abs. 5 der Prüfungs- und Studienordnung M+P vom 13. November 2001 lautet:

„Zusammen mit der Diplomarbeit ist eine schriftliche Erklärung abzugeben, dass die Arbeit — bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit — ohne fremde Hilfe selbständig verfaßt und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Dieses Blatt mit der folgenden Erklärung ist nach Fertigstellung der Arbeit durch jede/n Kandidat/en/in auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift (keine Ablichtungen !) als letztes Blatt des als Prüfungsexemplar der Diplomarbeit gekennzeichneten Exemplars einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann — auch nachträglich — zur Ungültigkeit der Diplomprüfung führen.

Erklärung

Hiermit versichere ich,

Name: Wiesner Vorname: Christoph

daß ich die vorliegende Diplomarbeit — bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit — mit dem Thema

Berechnung von ORC-Prozessen mit Kältemitteln

ohne fremde Hilfe selbständig verfaßt und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten:

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Diplomarbeit ist erfolgt durch ...

Ort	Datum	Unterschrift im Original
-----	-------	--------------------------

