



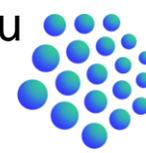
Thermodynamik I Übungsstunde 04

Juncheng Fu (Elias)
25. Oktober 2024

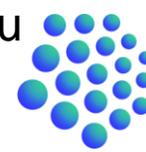


Übungsmaterial





- Die Übungsstunde wird von mir aufgezeichnet!
- **Nicht offiziell**
- (Screen recording) Lade ich später auf YT hoch
- Keine Garantie für Qualität, es ist nur in der Not zu nutzen (Falls Krank...)



Info

- Bei der Prüfung darf man lange und kurze Version der TAB verwenden.

Persönlich Tipp:

- Lange TAB gibt es Diagramme, wo man als Referenz nutzen kann

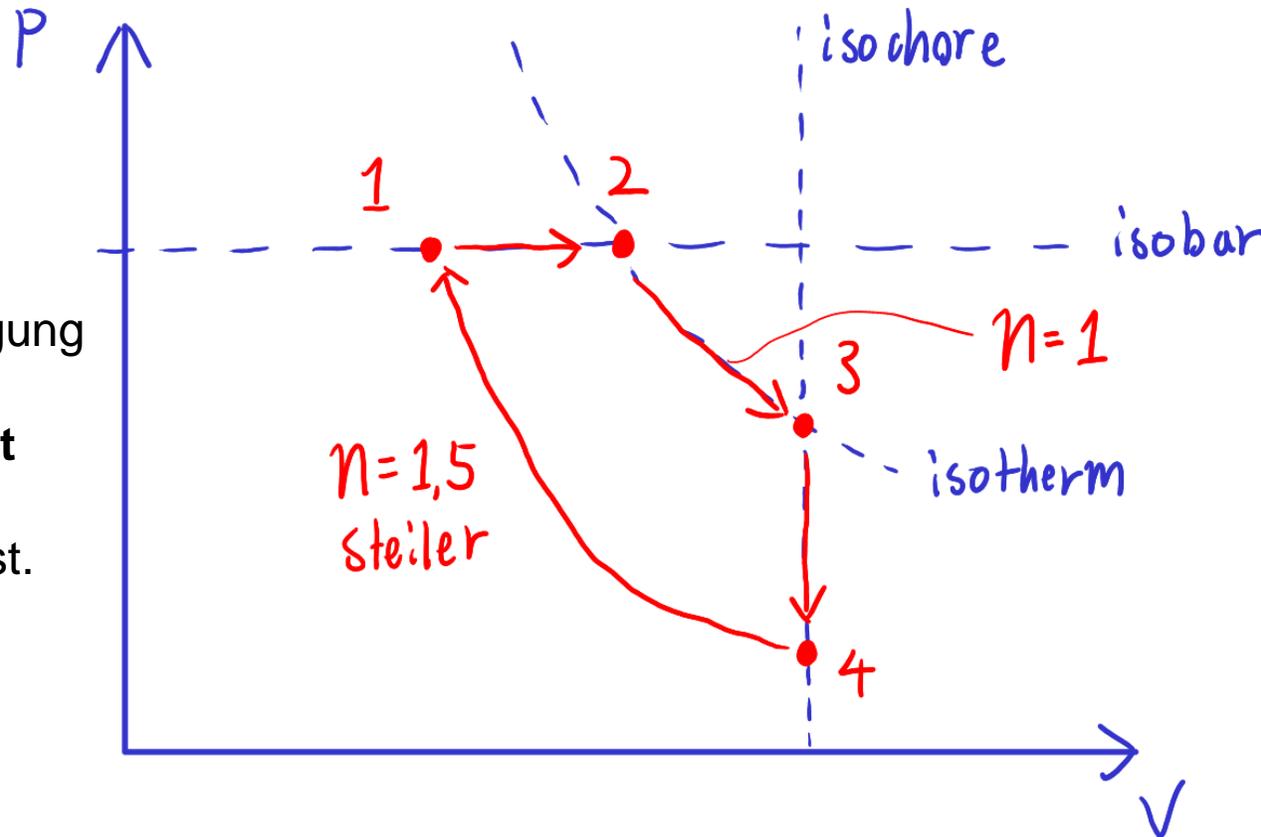
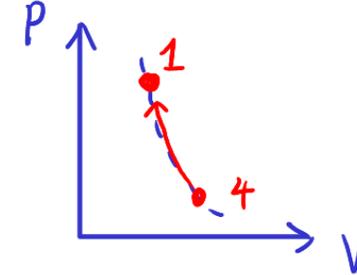
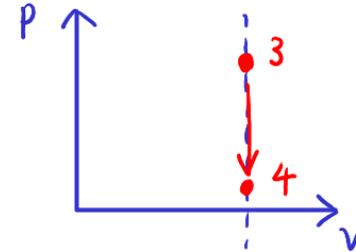
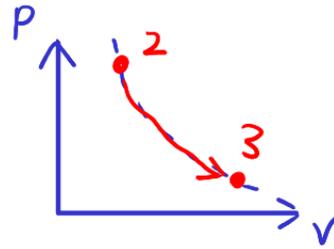
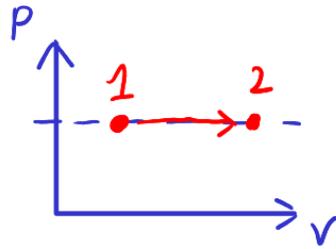
Figure A-7 Temperature–entropy diagram for water (SI units) 1026

Figure A-7E Temperature–entropy diagram for water (English units) 1027

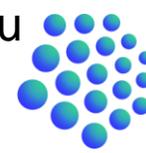
Figure A-8 Enthalpy–entropy diagram for water (SI units) 1028

Figure A-8E Enthalpy–entropy diagram for water (English units) 1029

More to this later in few weeks



Man muss nicht die Steigung angeben, aber **wenn es nicht sauber gezeichnet wird, dann notiert** lieber daneben welche steiler ist.



Thermodynamisches Sys.

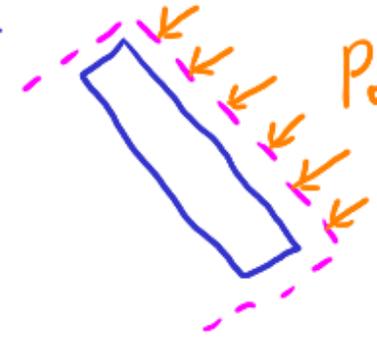
Volumenarbeit

Volumenarbeit

$$W_V = \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

Der Ausdehnung, die an dieser spezifische Grenze passiert.

↑
der Druck, der an sys. Grenze wirkt

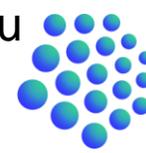


Vgl. auf zF.

Spezifische Volumenarbeit

(reversible Änderung
des Systemvolumens)

$$w_{V,12}^{\text{rev}} = \frac{W_{V,12}^{\text{rev}}}{m} = \int_1^2 p dv$$



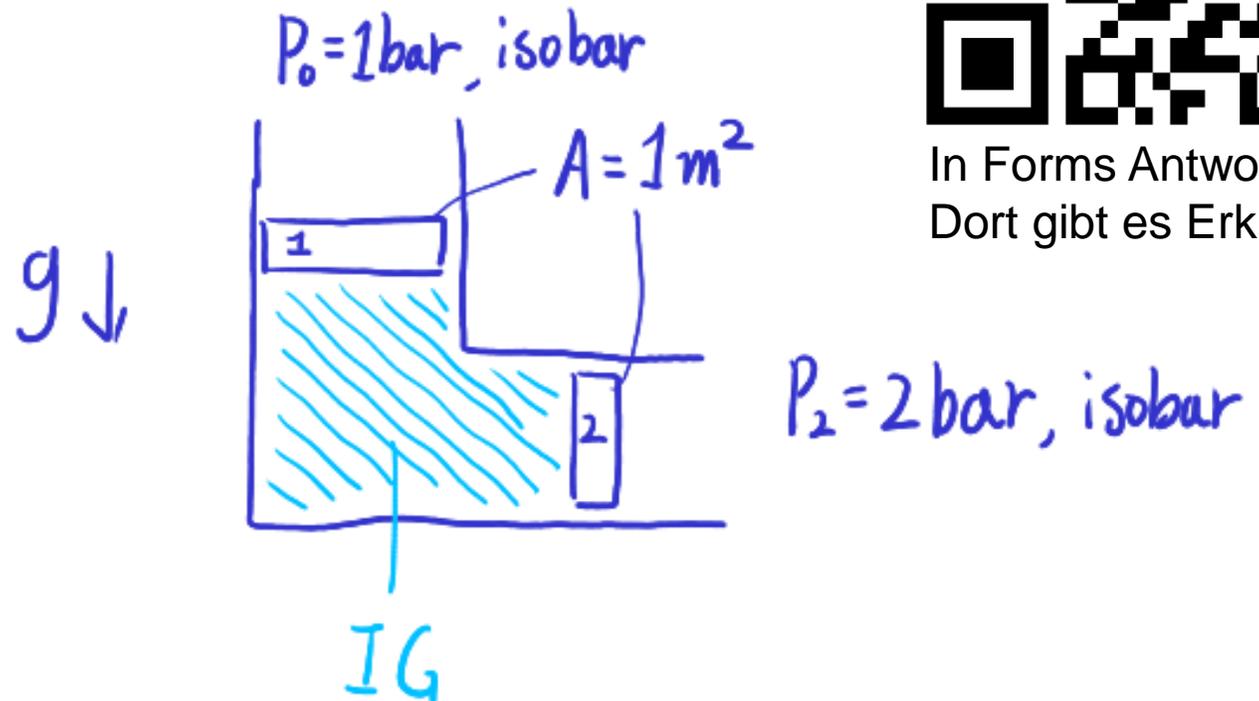
Quiz für Volumenarbeit

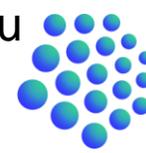
Übung für Volumenarbeit,

- Von was hängt Volumenarbeit ab?
- Wie berechnet man das, falls es verschiedene Flächen mit verschiedenem Druck gibt?



In Forms Antworten,
Dort gibt es Erklärungen.





Arbeit Berechnung

Arbeit

$$w_{12} = w_{12}^{\text{rev}} - \varphi_{12} \quad \text{mit } \varphi_{12}: \text{Dissipation}$$

Nicht für offenes Sys.

Spezifische Volumenarbeit

(reversible Änderung
des Systemvolumens)

$$w_{V,12}^{\text{rev}} = \frac{W_{V,12}^{\text{rev}}}{m} = \int_1^2 p \, dv$$

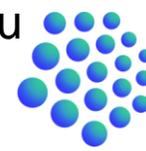
Fehler Quelle: Gefährlich für Realstoff, falls $n \neq \text{const.}$ oder unbekannt ist

- für Polytrope, $n = 1$:
- für Polytrope, $n \neq 1$:
- für Polytrope, $n \neq 1$:
(ideales Gas)

$$\left(\int_1^2 p \, dv \right)_{n=1} = p_1 v_1 \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) = p_1 v_1 \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right)$$

$$\left(\int_1^2 p \, dv \right)_{n \neq 1} = \frac{1}{1-n} (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

$$\left(\int_1^2 p \, dv \right)_{n \neq 1} = \frac{1}{1-n} (p_2 v_2 - p_1 v_1) = \frac{R (T_2 - T_1)}{1-n}$$



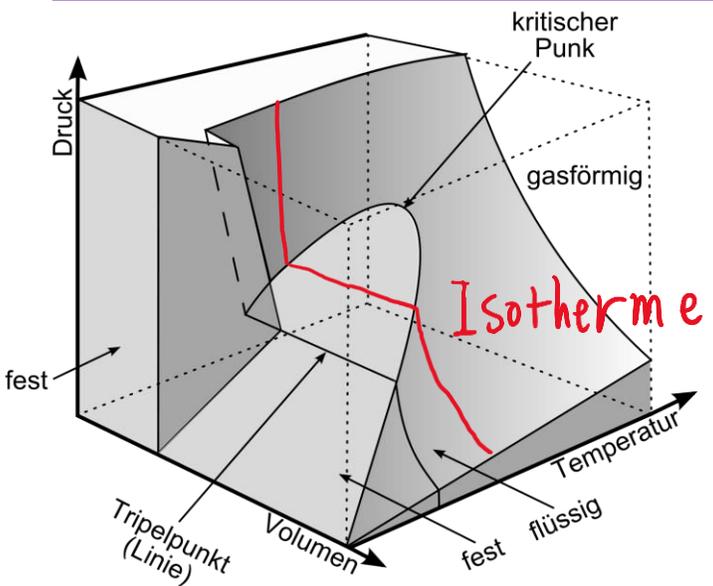
Polytrope Zustandsänderungen

Zustandsänderungen	Allgemein
Polytrope	$pV^n = \text{const.}$ (n : Polytropenexponent)
Isobare	$p = \text{const.}$ ($n \equiv 0$)
Isotherme	$T = \text{const.}$
Isochore	$v = \text{const.}$ ($n \rightarrow \infty$)

Zustandsänderungen idealer Gase	IG/PG
Isotherme	$n = 1$
Isentrope	$n = \kappa = \frac{c_p^{\text{ig}}}{c_v^{\text{ig}}}$
Polytropes Temperaturverhältnis	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}$

$p_1 \cdot v_1^n = p_2 \cdot v_2^n$

Für IG/PG falls n geg.

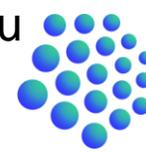


$n = ?$
Für Realstoff
we don't really know



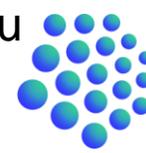
Für Wasser und Refrigerant, bitte TAB nutzen.

Obige T,p,v Verhältnis gilt nicht mehr für Realstoffe



Reale Fluide



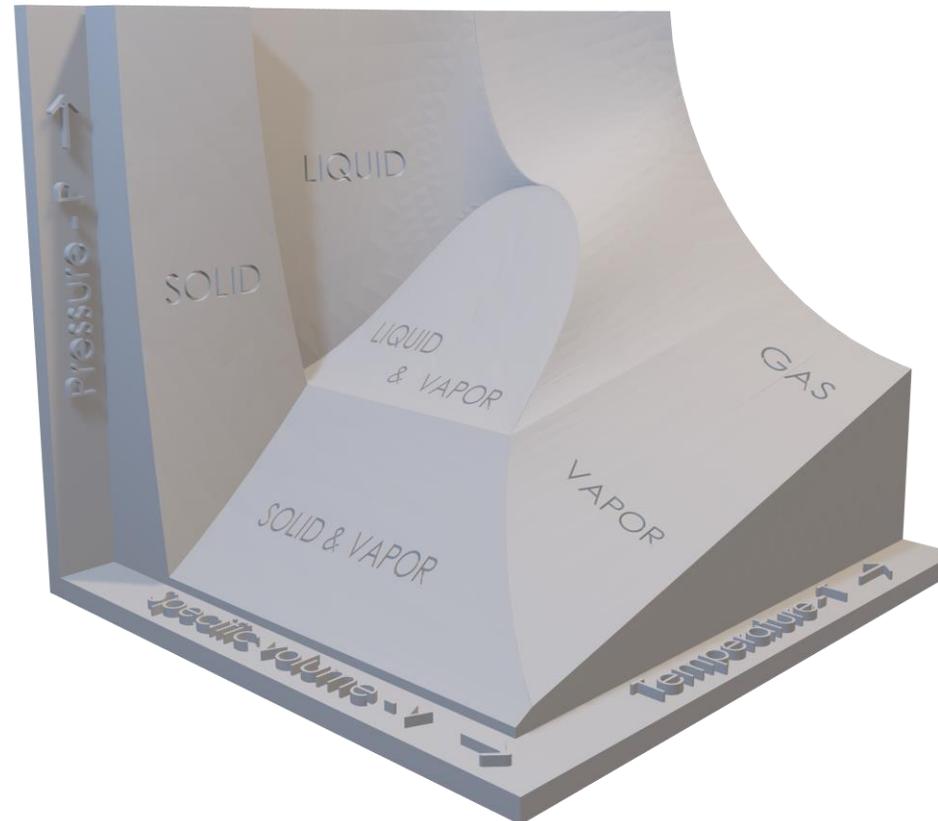


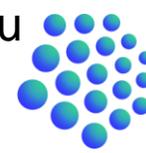
Wasser als Reale Fluide

PVT-Modelle

Komplexe Zustandsfläche

TAB
Lerp.





Nass-Dampf (ND) Gebiet

Druck und Temp sind gekoppelt.

Isobare Zustandsänderung = Isotherme Zustandsänderung
(Wasser unter 1atm. kochen, Temp bleibt konst. bis alle Wasser sich verdampfen)

Reales Fluid (2-Phasengebiet)

Spezifische Zustandsgrösse $\phi = v, u, h, s$

Dampf tafeln $\phi = f(T, p)$

Nassdampf $\phi = \phi_f + x(\phi_g - \phi_f)$

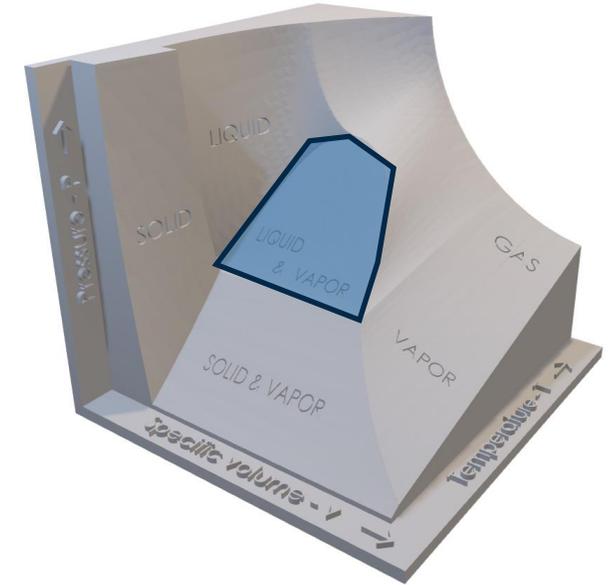
Dampfgehalt

$$x = \frac{m_g}{m_g + m_f}$$

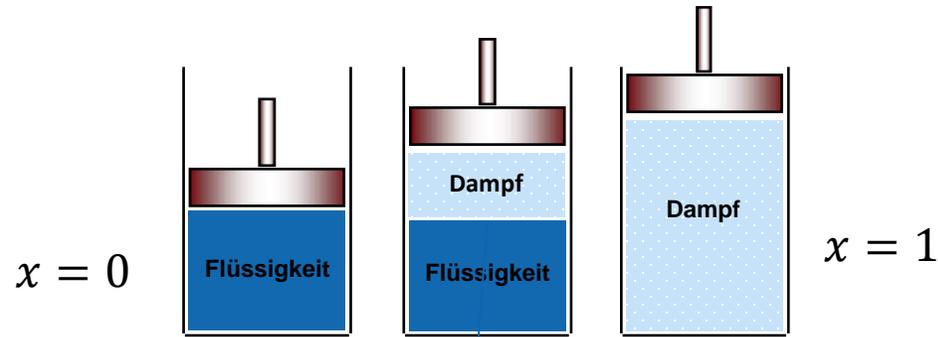
Masse der Dampf (Gas)

Gesamt Masse
(Gas + Fluid)

Verdampfungsenthalpie $h_{fg} = h_g - h_f$



Nass-Dampf (ND) Gebiet



1m^3 Dampf und 1m^3 Wasser, was ist x ?

$x \neq 50\%$

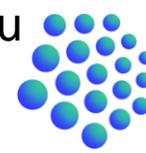
x ist von der Masse Verhältnis abhängig nicht Volume
Genauer x hier muss man noch Druck oder Temp.
kennen.

ND: Druck & Temp gekoppelt

In TAB, über
massenspezifische Volume
von Dampf und Wasser.

\longrightarrow 1m^3 Dampf ist ... kg
 1m^3 Wasser ist ...kg

$$\longrightarrow x = \frac{m_g}{m_g + m_f}$$



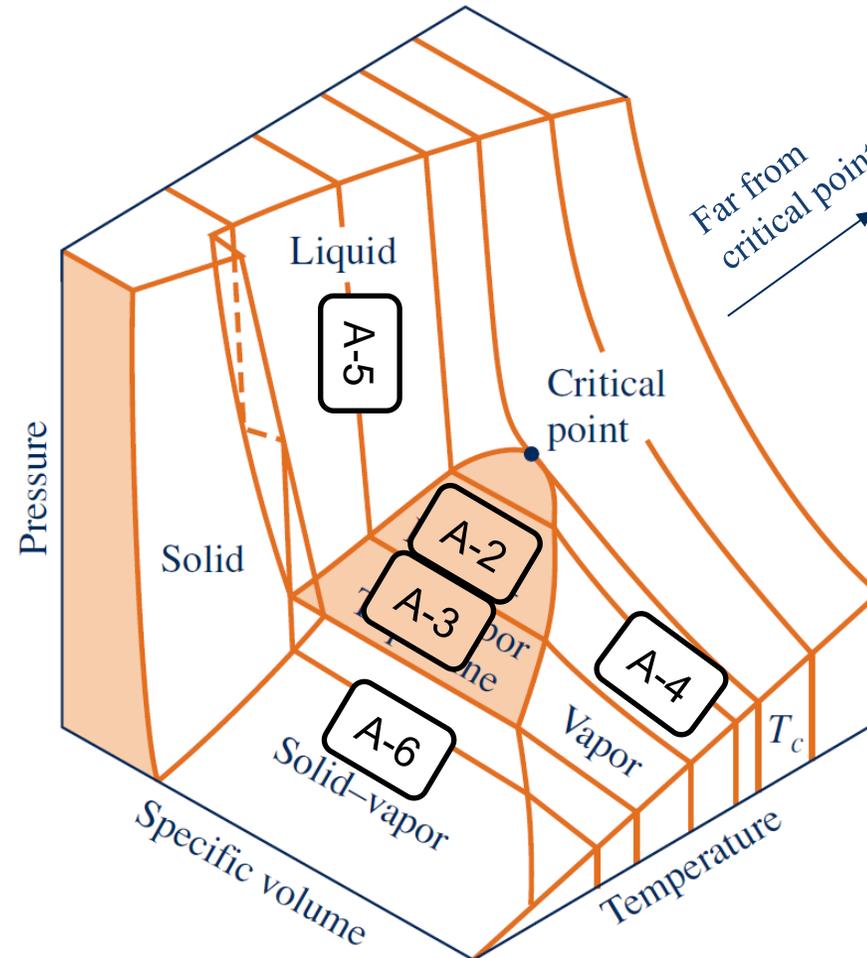
THERMODYNAMIC PROPERTIES

AND WHERE TO FIND THEM.

Hinweise:

TAB für H₂O in Moran & Shapiro

Weitere TAB für andere Reinstoffe

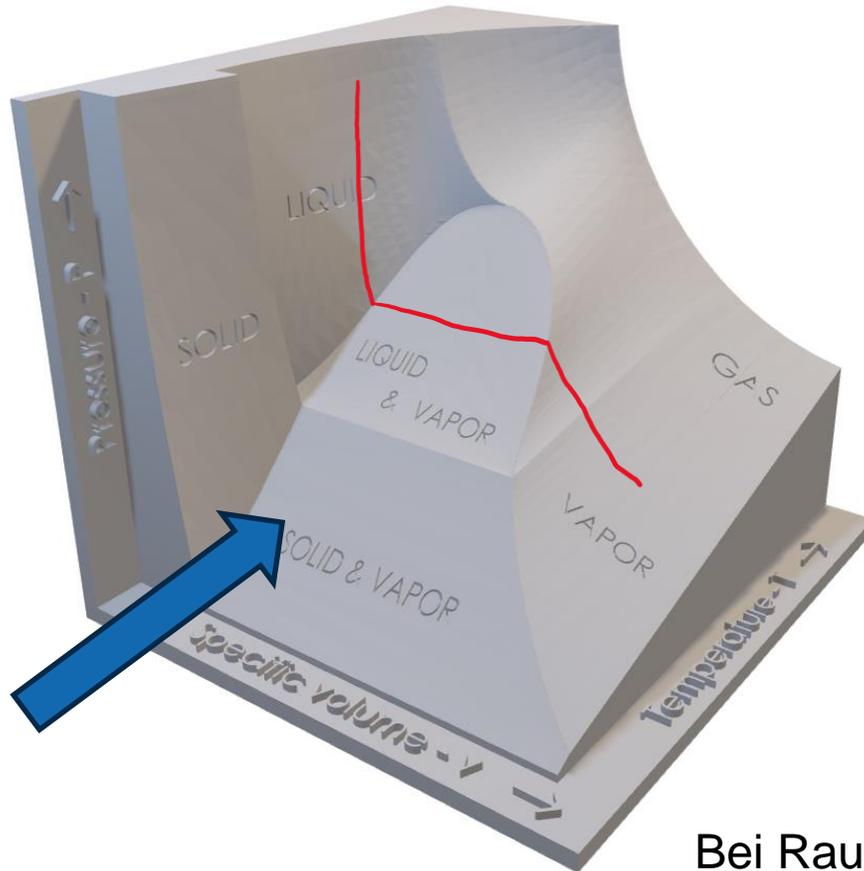


Ideal gas

A-23

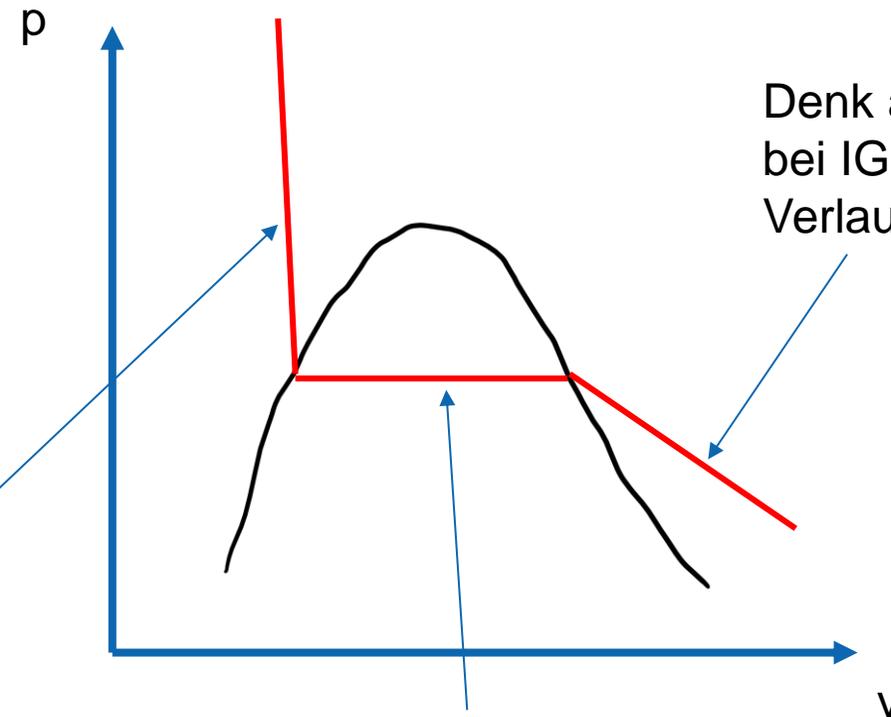
Dann verhalten sich wie IG

Wasser als Reale Fluide p-v-Diagramm



Bei Raum Temperatur,
Wasser fast inkompressibel

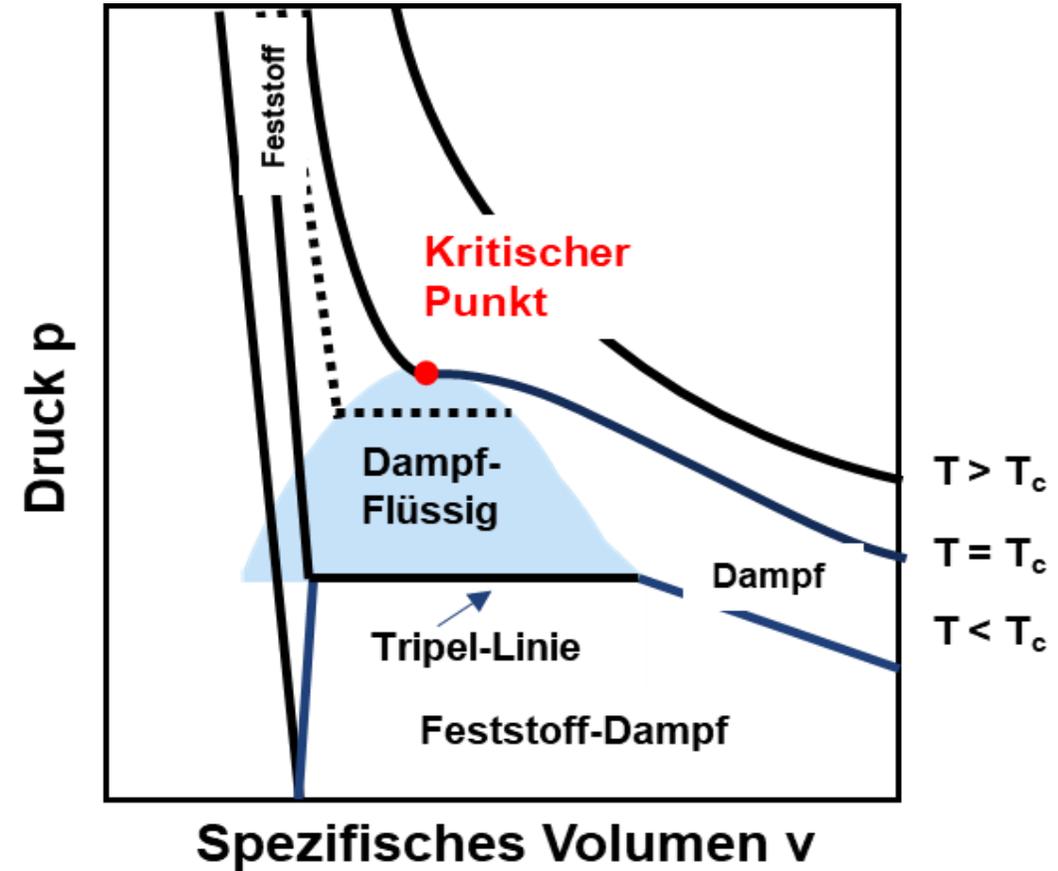
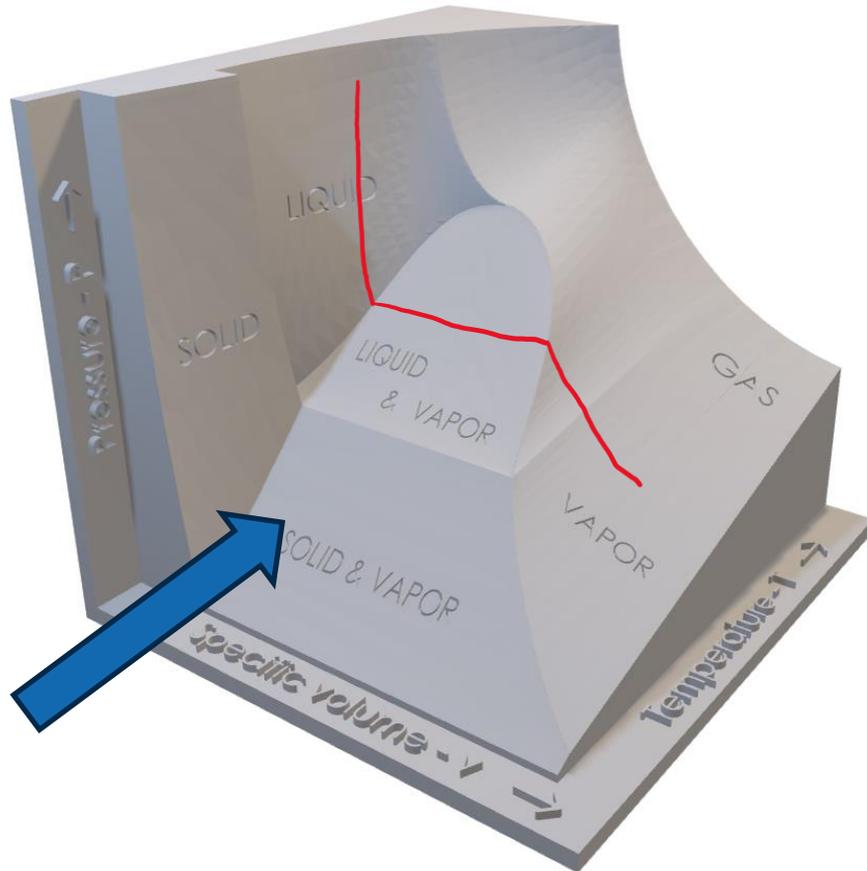
Isotherme?



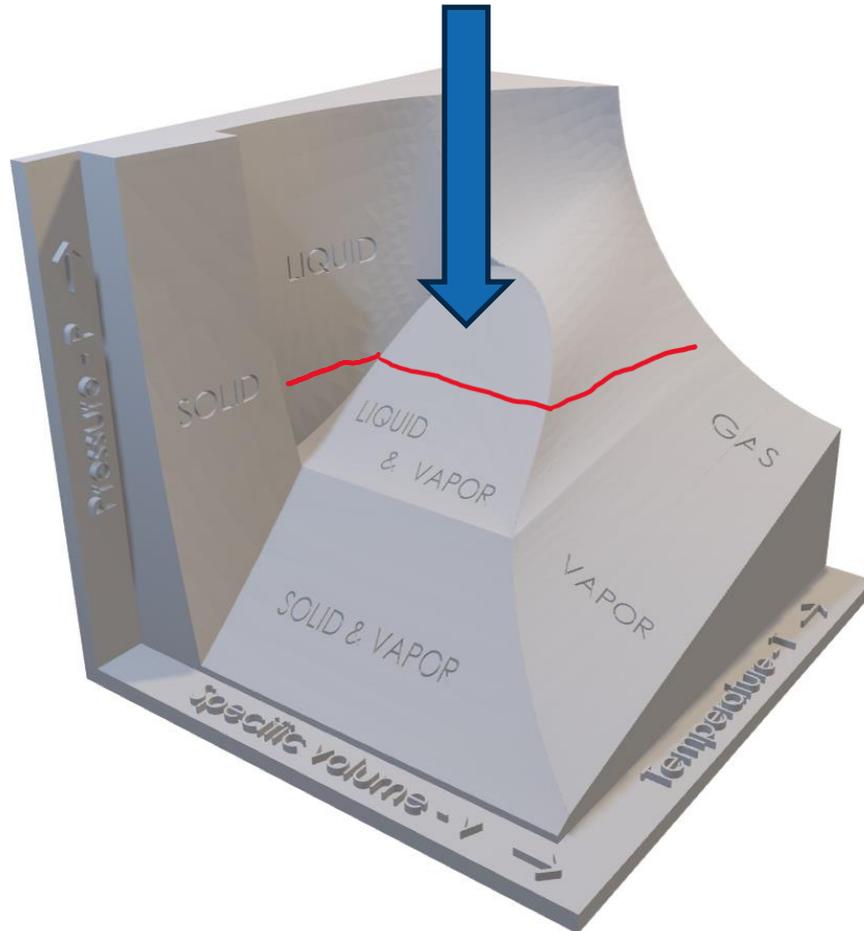
Denk an Isotherme
bei IG,
Verlauf hier ähnlich

In ND, Druck Temp gekoppelt
(Isotherm = Isobar)

Wasser als Reale Fluide p-v-Diagramm



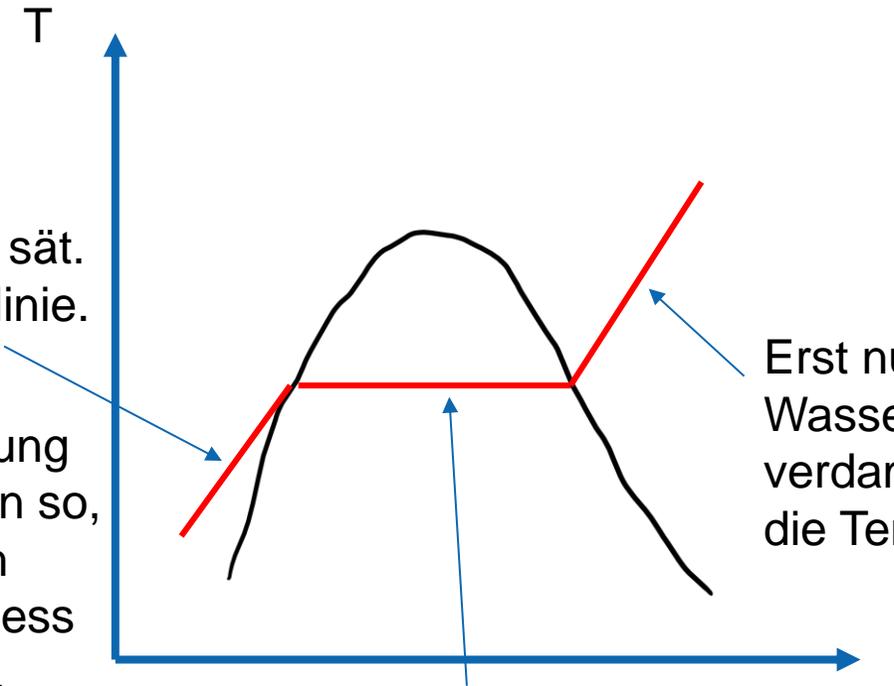
Wasser als Reale Fluide T-v-Diagramm



Isobar?

Isobar klebt
sehr nah an sät.
Flüssigkeitslinie.

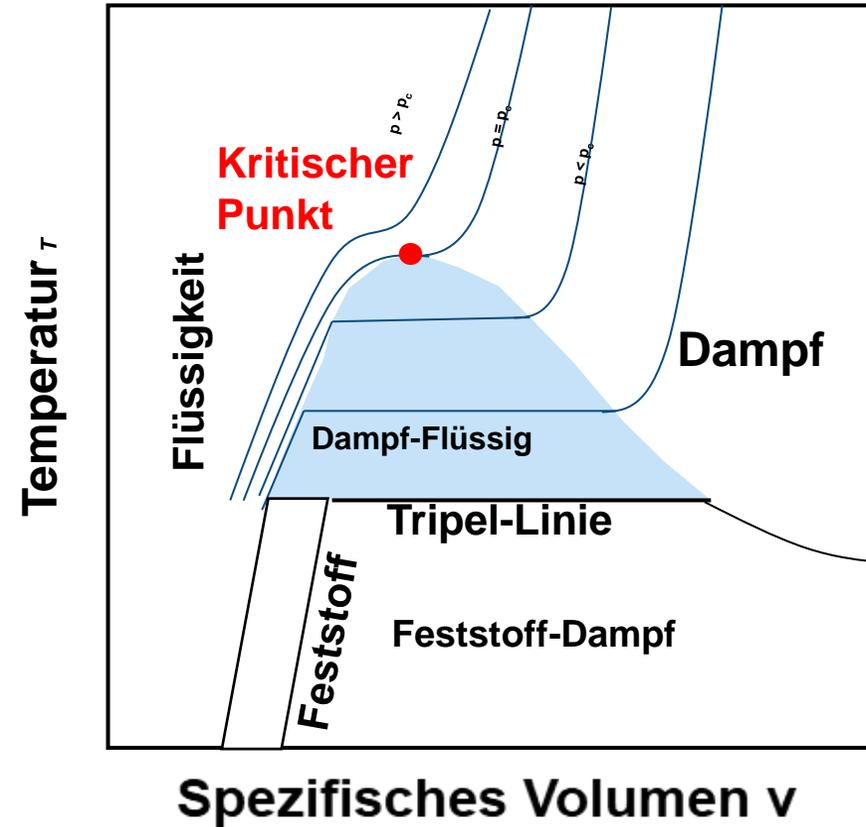
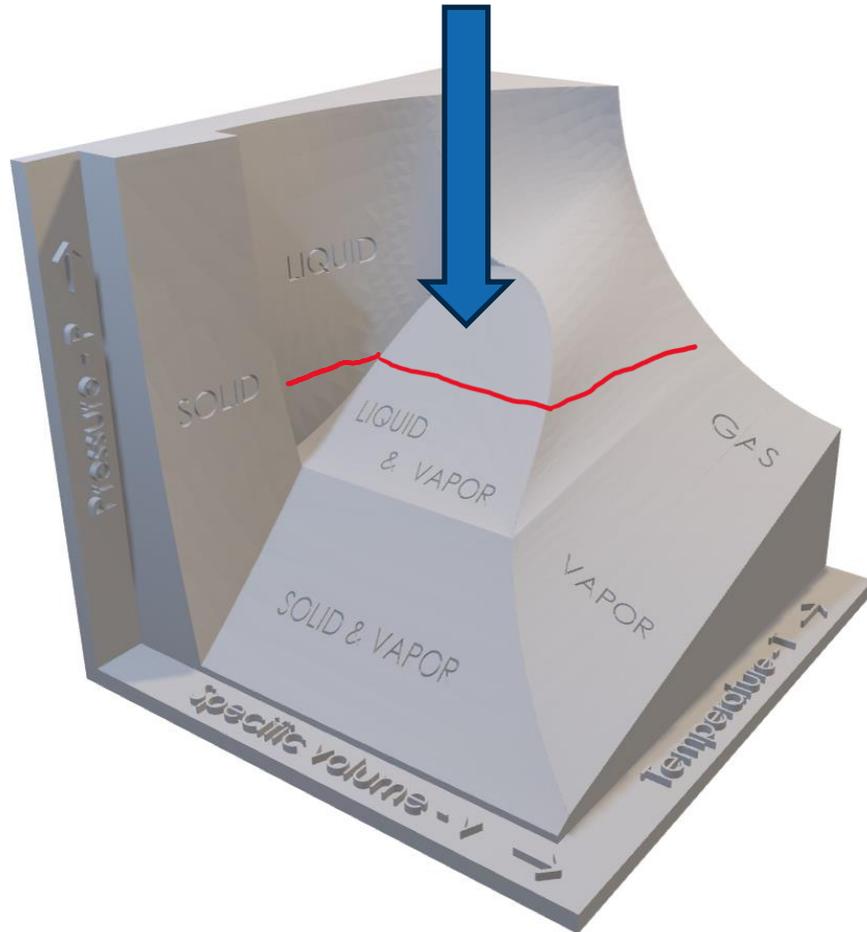
Für die Prüfung
zeichnet man so,
falls da noch
welche Prozess
Verlaufs gibt.



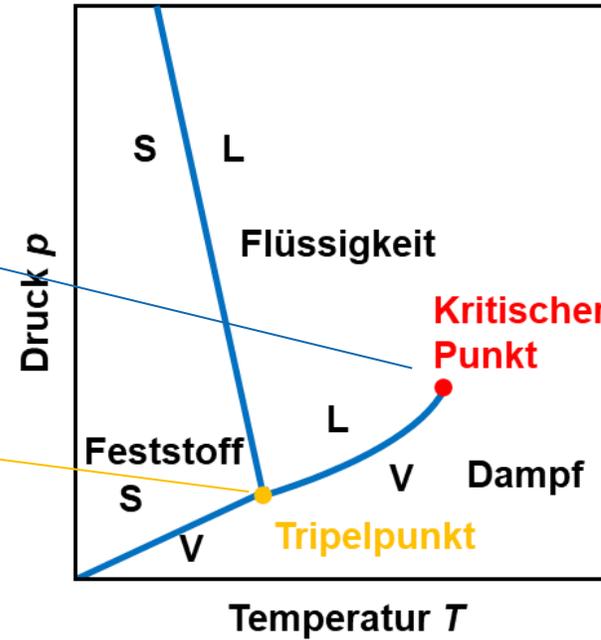
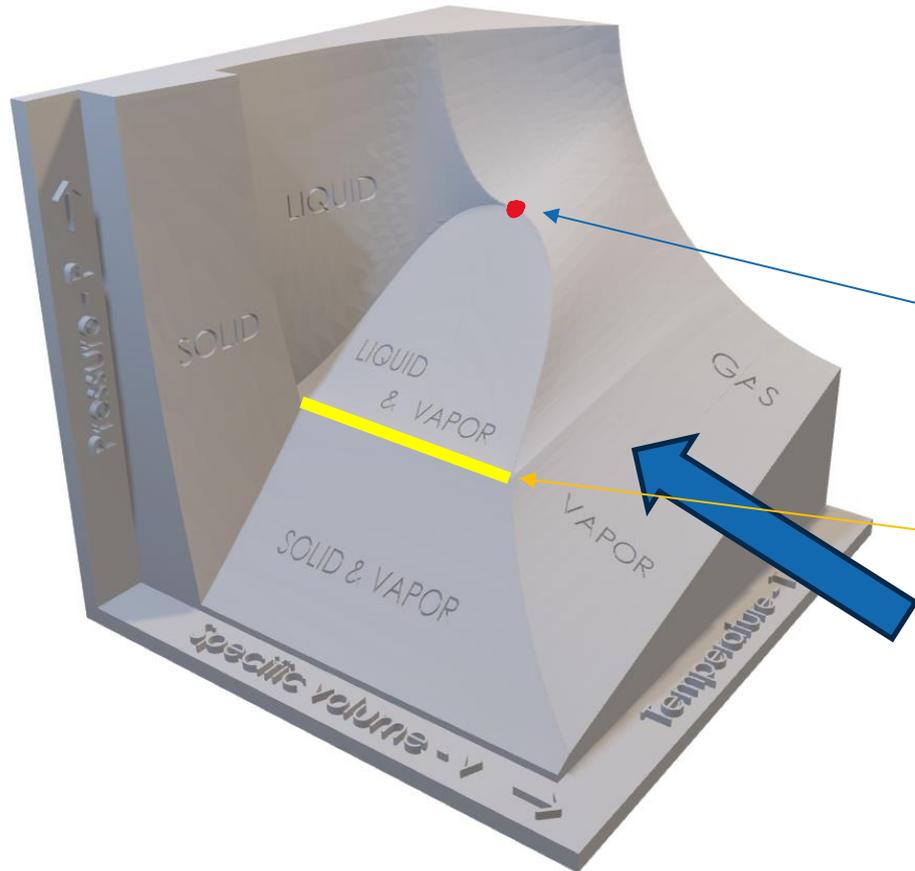
Erst nur wenn alle
Wasser sich
verdampft, dann steigt
die Temp.

In ND, Druck Temp gekoppelt
(Isotherm = Isobar)
Denk an Spagetti kochen, 100°C
geht nicht höher.

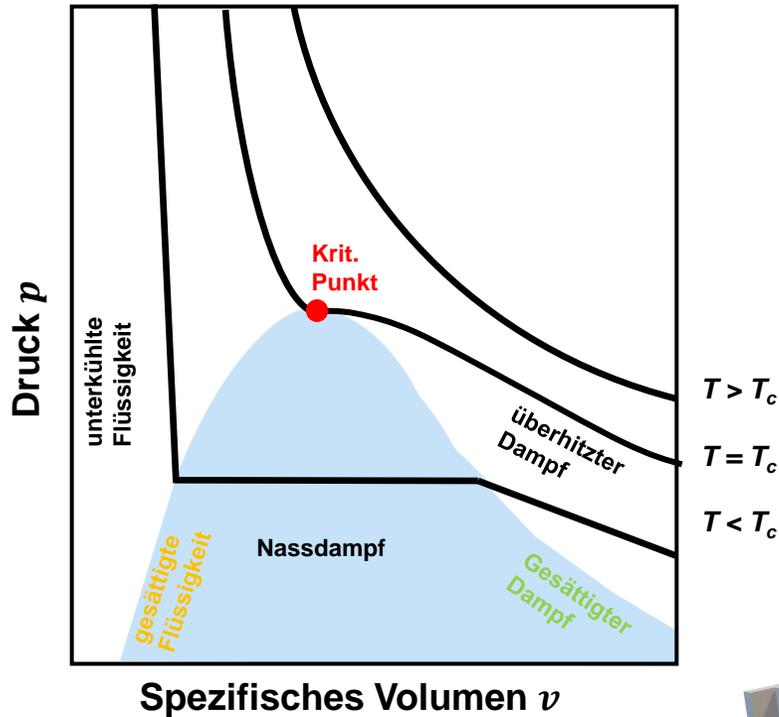
Wasser als Reale Fluide T-v-Diagramm



Wasser als Reale Fluide p-T-Diagramm



Wichtige Vokabeln



Take-Home Message (Vokabeln!)

- Überhitzter Dampf:
- (Gerade) gesättigter Dampf
- Nassdampf
- (Gerade) gesättigte Flüssigkeit
- Unterkühlte Flüssigkeit
- Kritischer Punkt
- Tripel-Punkt (oft Referenz für $u = 0$)

$$x = 1; \quad u > u_g$$

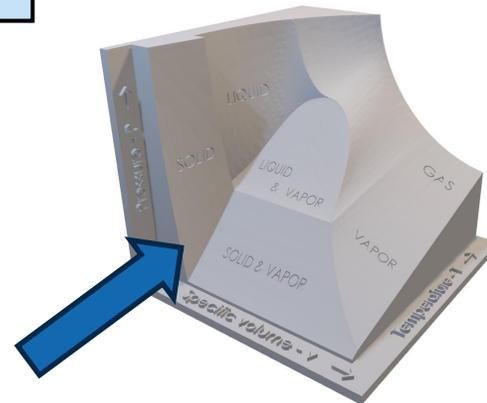
$$x = 1; \quad u = u_g$$

$$0 < x < 1; \quad u_f < u < u_g$$

$$x = 0; \quad u = u_f$$

$$x = 0; \quad u < u_f$$

$$T = T_c; \quad p = p_c$$



Berechnung von Zustandsgröße in ND

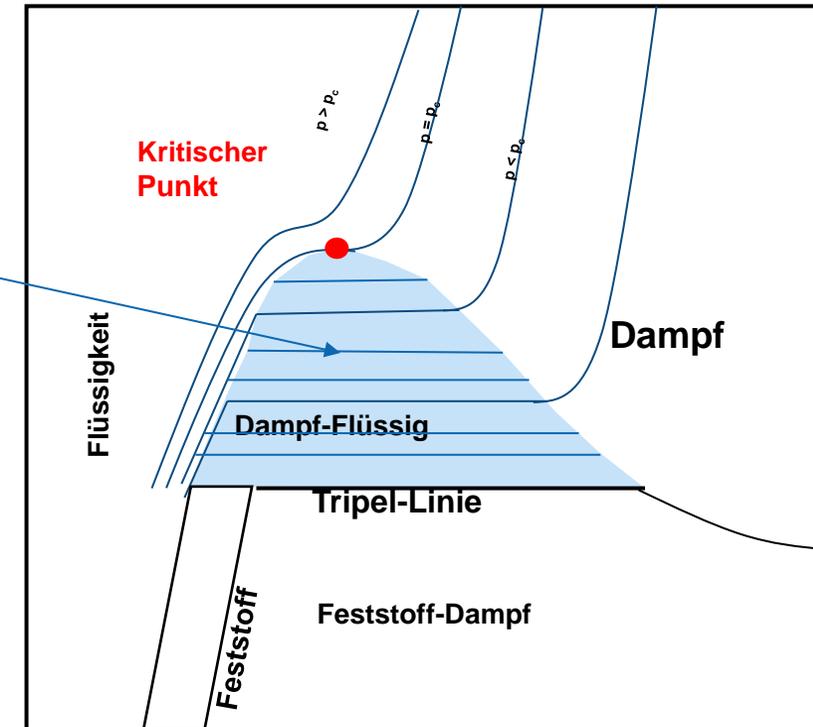
Pressure Conversions:
1 bar = 0.1 MPa
= 10² kPa

A-2 (Continued)

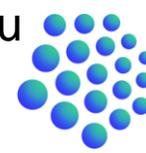
Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg	
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g
50	.1235	1.0121	12.032	209.32	2443.5
55	.1576	1.0146	9.568	230.21	2450.1
60	.1994	1.0172	7.671	251.11	2456.6
65	.2503	1.0199	6.197	272.02	2463.1
70	.3119	1.0228	5.042	292.95	2469.6

Temperatur T

Isotherme und Isobare



Spezifisches Volumen v



Berechnung von Zustandsgröße in ND

Pressure Conversions:
1 bar = 0.1 MPa
= 10² kPa

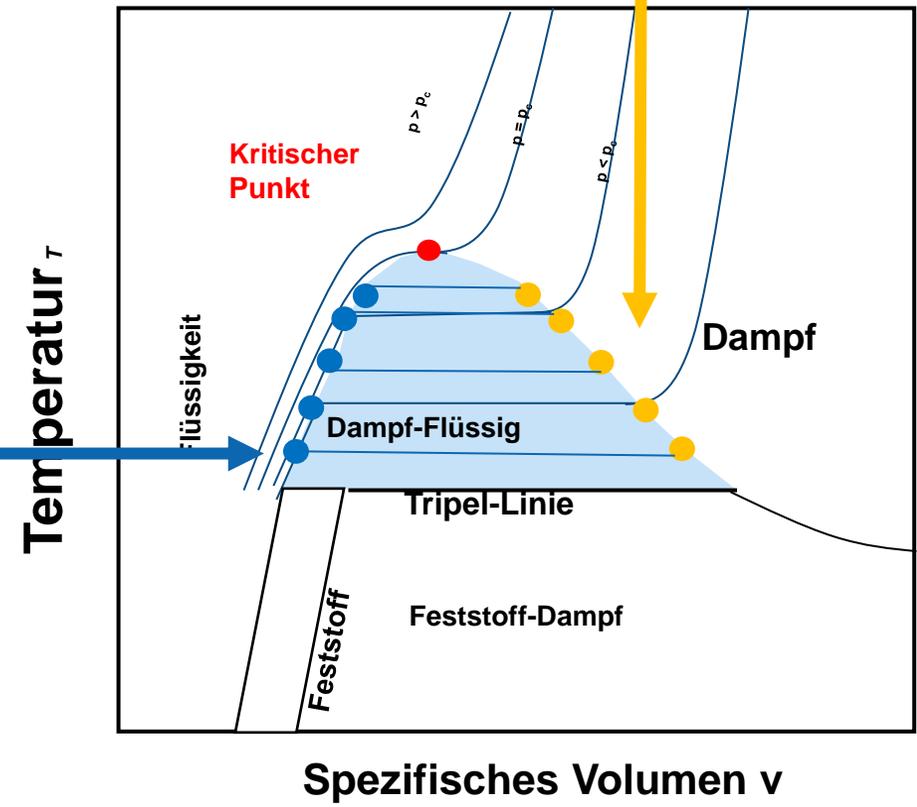
A-2 (Continued)

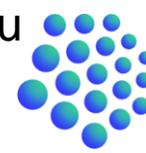
Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg	
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g
50	.1235	1.0121	12.032	209.32	2443.5
55	.1576	1.0146	9.568	230.21	2450.1
60	.1994	1.0172	7.671	251.11	2456.6
65	.2503	1.0199	6.197	272.02	2463.1
70	.3119	1.0228	5.042	292.95	2469.6

$x = 1, v = \dots$

$x = 0, v = \dots$

f für sät. Fluid
g für sät. Gas (Vapor, Dampf)





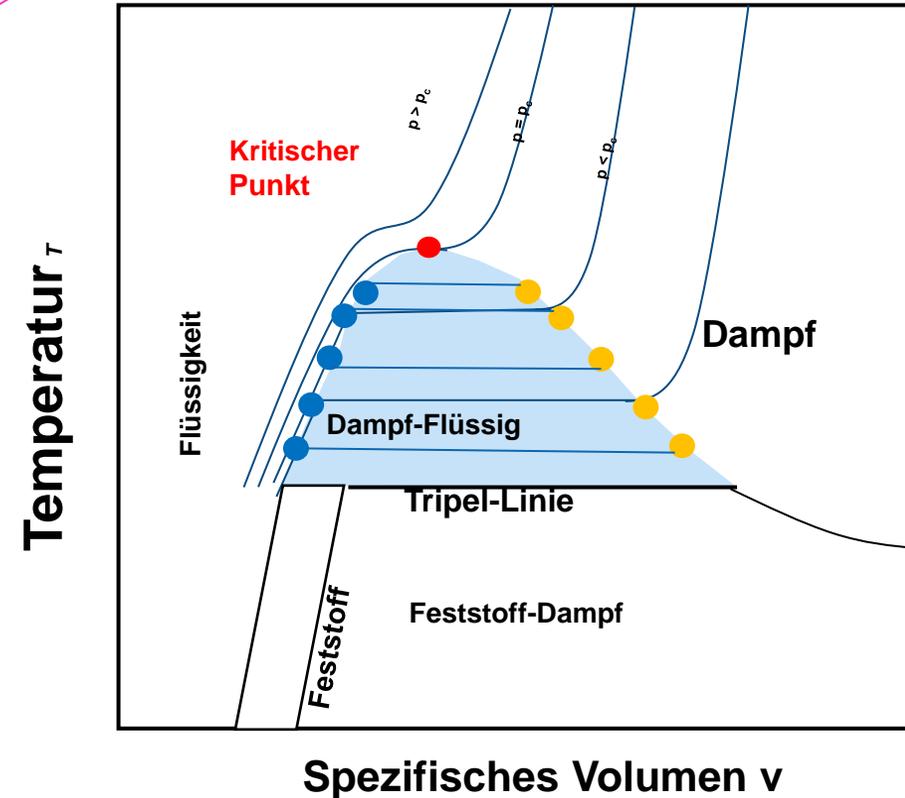
Berechnung von Zustandsgröße in ND

A-2 (Continued)

Pressure Conversions:
1 bar = 0.1 MPa
= 10² kPa

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg	
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g
50	.1235	1.0121	12.032	209.32	2443.5
55	.1576	1.0146	9.568	230.21	2450.1
60	.1994	1.0172	7.671	251.11	2456.6
65	.2503	1.0199	6.197	272.02	2463.1
70	.3119	1.0228	5.042	292.95	2469.6

Zustandsgröße in ND



Reales Fluid (2-Phasengebiet)

Spezifische Zustandsgröße

$$\phi = v, u, h, s$$

Dampftafeln

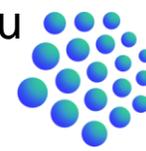
$$\phi = f(T, p)$$

Nassdampf

$$\phi = \phi_f + x(\phi_g - \phi_f)$$

Dampfgehalt

$$x = \frac{m_g}{m_g + m_f}$$



Berechnung von Zustandsgröße in ND

(Continued)

Pressure Conversions:
1 bar = 0.1 MPa
= 10² kPa

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
50	.1235	1.0121	12.032	209.32	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	.7038	8.0763	50
55	.1576	1.0146	9.568	230.21	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	.7679	7.9913	55
60	.1994	1.0172	7.671	251.11	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	.8312	7.9096	60
65	.2503	1.0199	6.197	272.02	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	.8935	7.8310	65
70	.3119	1.0228	5.042	292.95	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	.9549	7.7553	70

Reales Fluid (2-Phasengebiet)

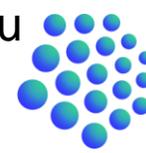
Spezifische Zustandsgröße $\phi = v, u, h, s$

Dampf tafeln $\phi = f(T, p)$

Nassdampf $\phi = \phi_f + x(\phi_g - \phi_f)$

Dampfgehalt $x = \frac{m_g}{m_g + m_f}$

Mit TAB und x kann man v,u,h,s in ND ausrechnen,
Oder von gegebene v,u,h,s -> x ausrechnen.



Wie entscheidet man?

- **Unterkühlte Flüssigkeit** (Compressed Liquid)
- **ND** (Liquid–Vapor)
- **Überhitzter Dampf** (Superheated Vapor)

- Welcher Zustand ist 4bar 120°C Wasser?

Vergleich mit ND TAB

TABLE A-3

Pressure Conversions:
1 bar = 0.1 MPa
= 10² kPa

Properties of Saturated Water (Liquid–Vapor): Pressure Table

Press. bar	Temp. °C	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg	
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}
4.00	143.6						

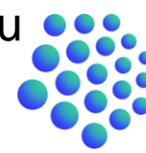
120°C < 143.6°C (ND 4bar gekoppelte Temp.)

Information steckt schon drin, **Unterkühlte Flüssigkeit**

- Falls wir 4bar 150°C haben, dann?

150°C > 143.6°C (ND 4bar gekoppelte Temp.)

Überhitzter Dampf



Wie entscheidet man?

- **Unterkühlte Flüssigkeit** (Compressed Liquid)
- **ND** (Liquid–Vapor)
- **Überhitzter Dampf** (Superheated Vapor)

Both Pressure & Temp. TAB can be used to determine the state.

- Welcher Zustand ist 4bar 120°C Wasser?

Vergleich mit ND TAB

TABLE A-2

Pressure Conversions:
1 bar = 0.1 MPa
= 10² kPa

Properties of Saturated Water (Liquid–Vapor): Temperature Table

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg	
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}
120	1.985						

4 bar > 1.985 bar (ND 120°C gekoppelter Druck)

Information steckt schon drin, **Compressed Liquid**

- Falls wir 4bar 150°C haben, dann?

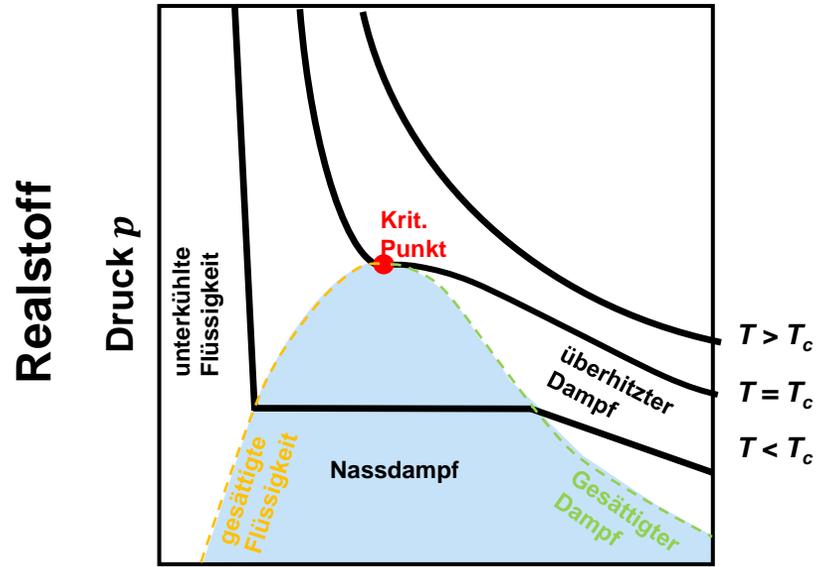
150 | 4.758

4 bar < 4.758 bar (ND 150°C gekoppelter Druck)

Lower Pressure than ND Pressure -> Superheated Vapor

Formeln für reales Fluid?

3 Stoffmodelle



- Realstoff als **Flüssigkeit** (pure Liquid)
- Realstoff als **ND** (Liquid-Vapor mix)
- Realstoff als **Dampf** (pure Vapor)

TAB
Lerp.

Ideale Flüssigkeit ($v^{if} = \text{const.}$)

$$c_p^{if}(T) = c_v^{if}(T) = c^{if}(T)$$

$$u^{if}(T_2) - u^{if}(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c^{if}(T) dT$$

$$h^{if}(T_2, p_2) - h^{if}(T_1, p_1) = \int_{T_1}^{T_2} c^{if}(T) dT + v^{if}(p_2 - p_1)$$

$$s^{if}(T_2) - s^{if}(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c^{if}(T)}{T} dT$$

Näherung bei Verwendung von Tabellenwerten (gesättigte Flüssigkeit):

$$v^{if}(T, p) = v_f(T) \quad u^{if}(T, v) = u_f(T)$$

$$h^{if}(T, p) = h_f(T) + v^{if}(p - p_{\text{sat}}(T))$$

Wenn $h_f(T) \gg v^{if}(p - p_{\text{sat}}(T))$: $h^{if}(T, p) \approx h_f(T)$

$$s^{if}(T, p) = s_f(T)$$

Reales Fluid (2-Phasengebiet)

Spezifische Zustandsgrösse	$\phi = v, u, h, s$
Dampf tafeln	$\phi = f(T, p)$
Nassdampf	$\phi = \phi_f + x(\phi_g - \phi_f)$
Dampfgehalt	$x = \frac{m_g}{m_g + m_f}$
Verdampfungsenthalpie	$h_{fg} = h_g - h_f$

Ideales Gas ($pV = n\bar{R}T \quad pv = RT \quad pV = mRT$)

$$\bar{R} = 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \quad R = c_p^{\text{ig}} - c_v^{\text{ig}} = \frac{\bar{R}}{M}$$

$$c_v^{\text{ig}}(T) = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

$$c_p^{\text{ig}}(T) = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

$$\kappa = \frac{c_p^{\text{ig}}}{c_v^{\text{ig}}}$$

$$u^{\text{ig}}(T_2) - u^{\text{ig}}(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_v^{\text{ig}}(T) dT$$

$$h^{\text{ig}}(T_2) - h^{\text{ig}}(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_p^{\text{ig}}(T) dT$$

$$s^{\text{ig}}(T_2, p_2) - s^{\text{ig}}(T_1, p_1) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p^{\text{ig}}(T)}{T} dT - R \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

Bei Verwendung von Tabellenwerten:

$$s^{\text{ig}}(T_2, p_2) - s^{\text{ig}}(T_1, p_1) = s^0(T_2) - s^0(T_1) - R \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

Perfektes Gas

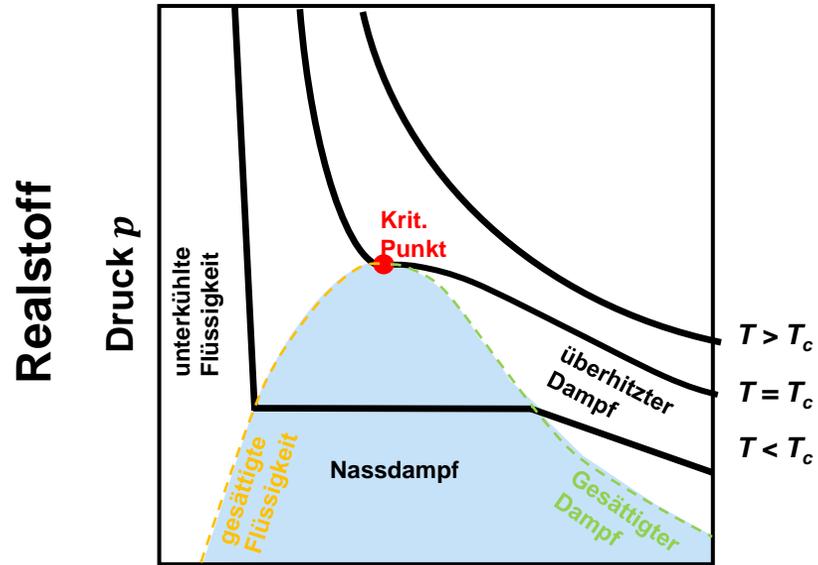
$$c_v^{\text{PG}} = \text{const.} \quad c_p^{\text{PG}} = \text{const.} \quad \kappa = \frac{c_p^{\text{PG}}}{c_v^{\text{PG}}} = \text{const.}$$

$$u^{\text{PG}}(T_2) - u^{\text{PG}}(T_1) = c_v^{\text{PG}}(T_2 - T_1)$$

$$h^{\text{PG}}(T_2) - h^{\text{PG}}(T_1) = c_p^{\text{PG}}(T_2 - T_1)$$

$$s^{\text{PG}}(T_2, p_2) - s^{\text{PG}}(T_1, p_1) = c_p^{\text{PG}} \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)$$

Formeln für reales Fluid?



- Reale Flüssigkeit (pure Liquid)
 - Fast inkompressible
- Ideale Flüssigkeit
 - Inkompressible

TAB
Lerp.

3 Stoffmodelle

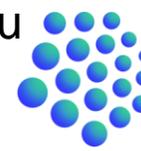
Ideale Flüssigkeit ($v^{if} = \text{const.}$)

$$c_p^{if}(T) = c_v^{if}(T) = c^{if}(T)$$

$$u^{if}(T_2) - u^{if}(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c^{if}(T) dT$$

$$h^{if}(T_2, p_2) - h^{if}(T_1, p_1) = \int_{T_1}^{T_2} c^{if}(T) dT + v^{if}(p_2 - p_1)$$

$$s^{if}(T_2) - s^{if}(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c^{if}(T)}{T} dT$$

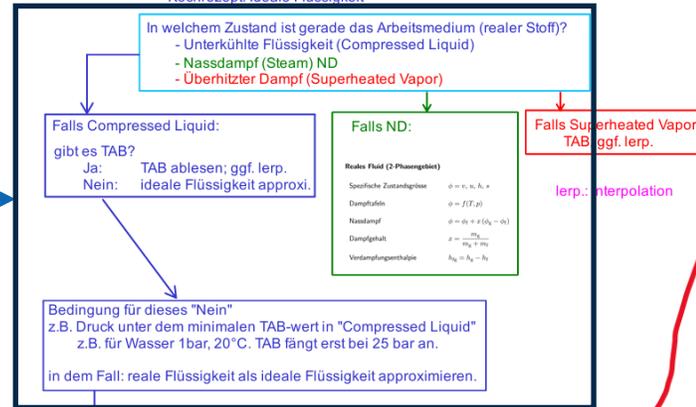


Reale Fluide als Ideale zu approximieren

Kochrezept auf meiner Webseite

Wann macht man?

Appendix Kochrezept: Ideale Flüssigkeit Juncheng Fu (Elias) 2023-11-27



Appendix

TABLE A-2 Properties of Saturated Water (Liquid-Vapor): Temperature Table

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg		Entropy kJ/kg · K		Temp. °C	
		Sat. Liquid v _f × 10 ³	Sat. Vapor v _g	Sat. Liquid u _f	Sat. Vapor u _g	Sat. Liquid h _f	Evap. h _{fg}	Sat. Vapor h _g	Sat. Liquid s _f		Sat. Vapor s _g
.01	0.00611	1.0002	206.136	0.00	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	.01
4	0.00813	1.0001	157.232	16.77	2380.9	16.78	2491.9	2508.7	0.0610	9.0514	4
5	0.00872	1.0001	147.120	20.97	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	9.0257	5
6	0.00935	1.0001	137.734	25.19	2383.6	25.20	2487.2	2512.4	0.0912	9.0003	6
8	0.01072	1.0002	120.917	33.59	2386.4	33.60	2482.5	2516.1	0.1212	8.9501	8
10	0.01228	1.0004	106.379	42.00	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.9008	10

(angenommen wir haben „Compressed Water“ 10°C, 1bar, ges. v, u, h, s)

Näherung bei Verwendung von Tabellenwerten (gesättigte Flüssigkeit):

$$v^f(T, p) = v_f(T) \quad u^f(T, v) = u_f(T)$$

$$h^f(T, p) = h_f(T) + v^f(p - p_{sat}(T))$$

Wenn $h_f(T) \gg v^f(p - p_{sat}(T))$: $h^f(T, p) \approx h_f(T)$

$$s^f(T, p) = s_f(T)$$

vgl.

$$v^f(10^\circ\text{C}, 1\text{bar}) = v_f(10^\circ\text{C}) = 1.0004 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$u^f(10^\circ\text{C}, v) = u_f(10^\circ\text{C}) = 42 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h^f(10^\circ\text{C}, 1\text{bar}) = h_f(10^\circ\text{C}) + v_f(10^\circ\text{C}) \cdot (1\text{bar} - p_{sat}(10^\circ\text{C}))$$

$$= 42.01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 1.0004 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} (100\text{kPa} - 1.228\text{kPa}) = 42.1088 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s^f(10^\circ\text{C}, 1\text{bar}) = s_f(10^\circ\text{C}) = 0.151 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Achten auf Einheiten!

Wie macht man?

Approximation: verwendet man ND (Temperatur) TAB & ZF Formeln

Näherung bei Verwendung von Tabellenwerten (gesättigte Flüssigkeit):

$$v^f(T, p) = v_f(T) \quad u^f(T, v) = u_f(T)$$

$$h^f(T, p) = h_f(T) + v^f(p - p_{sat}(T))$$

Wenn $h_f(T) \gg v^f(p - p_{sat}(T))$: $h^f(T, p) \approx h_f(T)$

$$s^f(T, p) = s_f(T)$$

3. Gehen auf ND TAB & ZF

Näherung bei Verwendung von Tabellenwerten (gesättigte Flüssigkeit):

gesuchte Zustandsgröße hat diesen Druck

$$v^f(T, p) = v_f(T) \quad u^f(T, v) = u_f(T)$$

gesuchte Zustandsgröße hat diese Temp.

$$h^f(T, p) = h_f(T) + v^f(p - p_{sat}(T))$$

Bei der Prüfung immer diese Formel für Enthalpie verwenden

große Abweichung bei der Prüfung kann falsch sein

Wenn $h_f(T) \gg v^f(p - p_{sat}(T))$: $h^f(T, p) \approx h_f(T)$

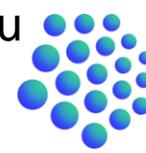
$$s^f(T, p) = s_f(T)$$

Sind alle TAB-Werte in ND mit Index "f"

Zusatz:

Jens Metzger (Haupt TA):
 "Im Fall von sehr tiefen Temperaturen: Wenn du keine weiteren Information hast über die Flüssigkeit hast und die Tabelle erst bei 20°C anfängt, würde ich persönlich auch mit der idealen Flüssigkeit rechnen. Das wird zwar mit zunehmendem Druck >100 bar unkorrekt, aber ist immer noch eine gute Approximation. Man sollte allerdings immer checken, ob man nicht vielleicht schon im Feststoffbereich ist. Für Stoffe ohne Dichteanomalie (nicht Wasser!) kann es sein, dass hohe T und hohe p bereits im Feststoffgebiet liegt. Dann gilt die Ideale Flüssigkeit natürlich nicht mehr, dann der Stoff bereits erstarrt ist (hat vor allem einen Einfluss auf h, u und s)."

Falls noch Unklarheit, bitte mail an juncfu@ethz.ch



Reale Fluide als Ideale zu approximieren

Appendix

Juncheng Fu (Elias)

2023-11-27

Kochrezept: Ideale Flüssigkeit

In welchem Zustand ist gerade das Arbeitsmedium (realer Stoff)?

- Unterkühlte Flüssigkeit (Compressed Liquid)
- **Nassdampf (Steam) ND**
- **Überhitzter Dampf (Superheated Vapor)**

Falls Compressed Liquid:

gibt es TAB?

Ja: TAB ablesen; ggf. lerp.

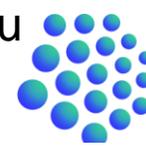
Nein: ideale Flüssigkeit approxi.

Falls ND:

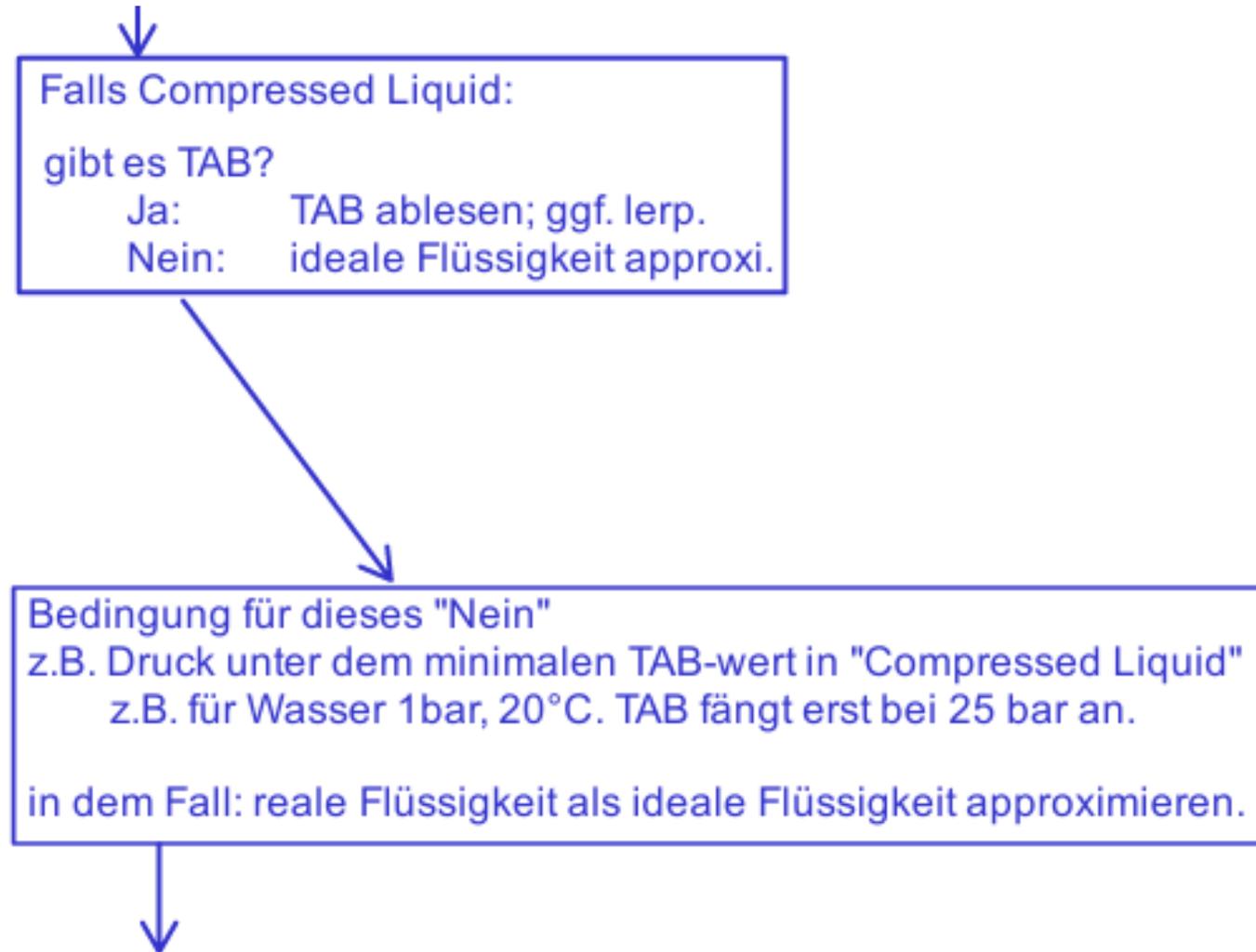
Reales Fluid (2-Phasengebiet)

Spezifische Zustandsgröße $\phi = v, u, h, s$ Dampfataein $\phi = f(T, p)$ Nassdampf $\phi = \phi_f + x(\phi_g - \phi_f)$ Dampfgehalt $x = \frac{m_g}{m_g + m_f}$ Verdampfungsenthalpie $h_{fg} = h_g - h_f$ Falls Superheated Vapor:
TAB, ggf. lerp.

lerp.: Interpolation



Reale Fluide als Ideale zu approximieren



Reale Fluide als Ideale zu approximieren

Approximation: verwendet man ND (Temperatur) TAB & ZF Formeln

TABLE A-2
Properties of Saturated Water (Liquid-Vapor): Temperature Table

Pressure Conversions:
1 bar = 0.1 MPa
= 10⁵ Pa

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
.01	0.00611	1.0002	206.136	0.00	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	.01
4	0.00813	1.0001	157.232	16.77	2380.9	16.78	2491.9	2508.7	0.0610	9.0514	4
5	0.00872	1.0001	147.120	20.97	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	9.0257	5
6	0.00935	1.0001	137.734	25.79	2383.6	25.20	2487.2	2512.4	0.0912	9.0003	6
8	0.01072	1.0002	120.917	33.59	2386.4	33.60	2482.5	2516.1	0.1212	8.9501	8
10	0.01228	1.0004	106.379	42.00	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.9008	10
..

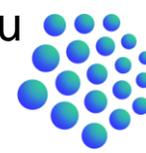
Näherung bei Verwendung von Tabellenwerten
(gesättigte Flüssigkeit):

$$v^{if}(T, p) = v_f(T) \quad u^{if}(T, v) = u_f(T)$$

$$h^{if}(T, p) = h_f(T) + v^{if}(p - p_{\text{sat}}(T))$$

Wenn $h_f(T) \gg v^{if}(p - p_{\text{sat}}(T))$: $h^{if}(T, p) \approx h_f(T)$

$$s^{if}(T, p) = s_f(T)$$



Reale Fluide als Ideale zu approximieren

↓

gesuchte Zustandsgröße hat diesen Druck

gesuchte Zustandsgröße hat diese Temp.

3. Gehen auf ND TAB & ZF

Näherung bei Verwendung von Tabellenwerten (gesättigte Flüssigkeit):

$v^{if}(T, p) = v_f(T)$
 $u^{if}(T, v) = u_f(T)$

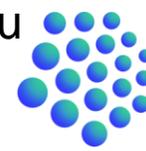
$h^{if}(T, p) = h_f(T) + v^{if}(p - p_{sat}(T))$
← Bei der Prüfung immer diese Formel für Enthalpie verwenden

Wenn $h_f(T) \gg v^{if}(p - p_{sat}(T))$: $h^{if}(T, p) \approx h_f(T)$
← große Abweichung bei der Prüfung kann falsch sein

$s^{if}(T, p) = s_f(T)$

Sind alle TAB-Werte in ND mit Index "f"

suchen nach der gleichen Temp. die TAB-Wert an gerade gesättigter Flüssigkeit



Reale Fluide als Ideale zu approximieren

TABLE A-2

Pressure Conversions:
1 bar = 0.1 MPa
= 10² kPa

Properties of Saturated Water (Liquid–Vapor): Temperature Table

Temp. °C	Press. bar	Specific Volume m ³ /kg		Internal Energy kJ/kg		Enthalpy kJ/kg			Entropy kJ/kg · K		Temp. °C
		Sat. Liquid $v_f \times 10^3$	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Sat. Vapor u_g	Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Sat. Vapor s_g	
.01	0.00611	1.0002	206.136	0.00	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.0000	9.1562	.01
4	0.00813	1.0001	157.232	16.77	2380.9	16.78	2491.9	2508.7	0.0610	9.0514	4
5	0.00872	1.0001	147.120	20.97	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	9.0257	5
6	0.00935	1.0001	137.734	25.19	2383.6	25.20	2487.2	2512.4	0.0912	9.0003	6
8	0.01072	1.0002	120.917	33.59	2386.4	33.60	2482.5	2516.1	0.1212	8.9501	8
10	0.01228	1.0004	106.379	42.00	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.9008	10

(angenommen wir haben „Compressed Water“ 10°C, 1bar, ges. v, u, h, s)

Näherung bei Verwendung von Tabellenwerten
(gesättigte Flüssigkeit):

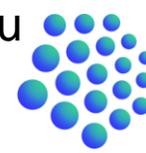
$$v^{if}(T, p) = v_f(T) \quad u^{if}(T, v) = u_f(T)$$

$$h^{if}(T, p) = h_f(T) + v^{if}(p - p_{\text{sat}}(T))$$

Wenn $h_f(T) \gg v^{if}(p - p_{\text{sat}}(T))$: $h^{if}(T, p) \approx h_f(T)$

$$s^{if}(T, p) = s_f(T)$$

vgl. ↗



Reale Fluide als Ideale zu approximieren

6	0.00935	1.0001	137.734	25.19	2383.6	25.20	2487.2	2512.4	0.0912	9.0003	6
8	0.01072	1.0002	120.917	33.59	2386.4	33.60	2482.5	2516.1	0.1212	8.9501	8
10	0.01228	1.0004	106.379	42.00	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.9008	10

(angenommen wir haben „Compressed Water“ 10°C, 1bar, ges. v, u, h, s)

Näherung bei Verwendung von Tabellenwerten
(gesättigte Flüssigkeit):

$$v^{if}(T, p) = v_f(T) \quad u^{if}(T, v) = u_f(T)$$

$$h^{if}(T, p) = h_f(T) + v^{if}(p - p_{sat}(T))$$

Wenn $h_f(T) \gg v^{if}(p - p_{sat}(T))$: $h^{if}(T, p) \approx h_f(T)$

$$s^{if}(T, p) = s_f(T)$$

vgl.

$$v^{if}(10^\circ\text{C}, 1\text{bar}) = v_f(10^\circ\text{C}) = 1.0004 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

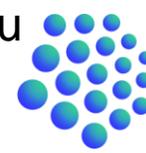
$$u^{if}(10^\circ\text{C}, v) = u_f(10^\circ\text{C}) = 42 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h^{if}(10^\circ\text{C}, 1\text{bar}) = h_f(10^\circ\text{C}) + v_f(10^\circ\text{C}) \cdot (1\text{bar} - p_{sat}(10^\circ\text{C}))$$

$$= 42.01 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 1.0004 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} (100\text{kpa} - 1.228\text{kpa}) = 42.1088 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$s^{if}(10^\circ\text{C}, 1\text{bar}) = s_f(10^\circ\text{C}) = 0.151 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Achten auf Einheiten!



Vorrechenübung



Vorrechenübung

Aufgabe 4.1 ●●○ Verbindung zweier Wassertanks

In Abbildung 1 sind zwei starre Tanks dargestellt, die durch ein Ventil verbunden sind. Tank A enthält anfangs $V_A = 0.2 \text{ m}^3$ Wasser bei $p_{1,A} = 400 \text{ kPa}$ und 80% Dampfgehalt (Zustand 1A). Tank B enthält $V_B = 0.5 \text{ m}^3$ Wasser bei $p_{1,B} = 200 \text{ kPa}$ und $T_{1,B} = 250 \text{ °C}$ (Zustand 1B). Das Ventil wird geöffnet und ein Stoffaustausch zwischen beiden Tanks findet statt, bis in beiden Tanks derselbe Zustand (Zustand 2) herrscht. In diesem Endzustand ist das System im thermischen Gleichgewicht mit der Umgebung, die eine Temperatur von $T_0 = 25 \text{ °C}$ besitzt.

a) Bestimmen Sie für den Gleichgewichtszustand

$$\overset{\text{Handwritten}}{T_2 = 25 \text{ °C}}$$

- das spezifische Volumen v_2 ,
- den Dampfgehalt x_2 ,
- den Druck p_2 ,
- die spezifische innere Energie u_2 .

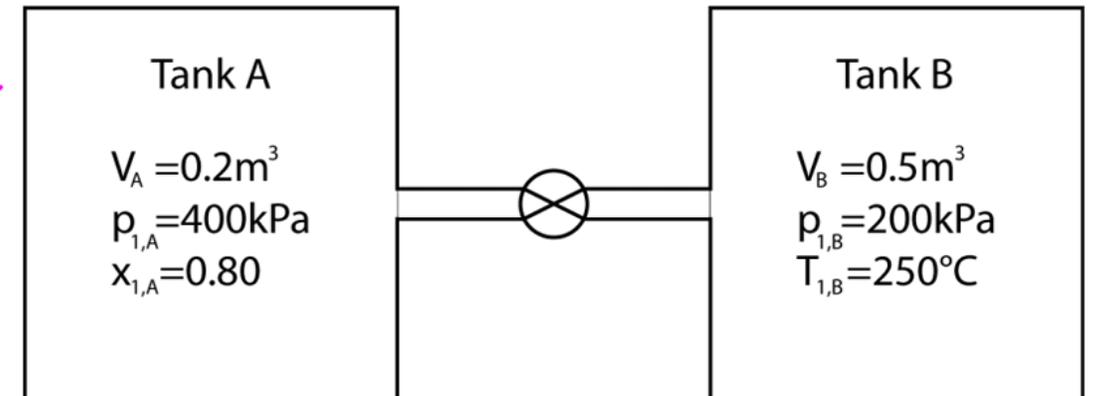


Abbildung 1: Tank A und B im Zustand 1

① System klassifizieren, Systemgrenze

Geschlossenes System, diatherm (nicht isoliert)

Gesamtmasse bleibt konst.

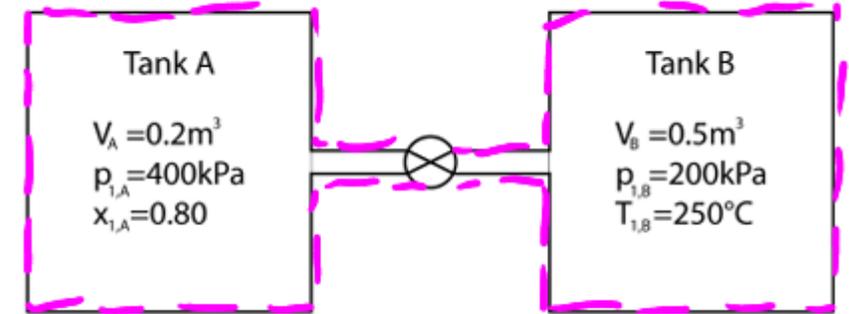
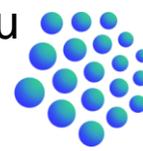


Abbildung 1: Tank A und B im Zustand 1

Endzustand: $T_2 = T_0 = 25^\circ\text{C}$ Tank A, B herrscht gleiche Bedingung (p, T)

System als Ein betrachten

② Ansatz für V_2 ? $\Rightarrow V_2 = \frac{V_{\text{tot}}}{m_{\text{tot}}}$



$$V_2 = \frac{V_{tot}}{M_{tot}}$$

$$V_{tot} = V_A + V_B = 0,2 \text{ m}^3 + 0,5 \text{ m}^3 = 0,7 \text{ m}^3$$

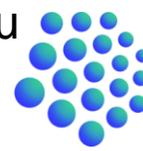
Zustand 2 zu viel Unbekannte, M_{tot} davon nicht lösbar,

Gesamtmasse bleibt Konst.

Zustand 1A, V, P, X geg. $\Rightarrow M_{A,1}$ lösbar

Sowie Zustand 1B mit $V, P, T \Rightarrow M_{B,1}$ lösbar

$$\left. \begin{array}{l} \Rightarrow M_{A,1} \text{ lösbar} \\ \Rightarrow M_{B,1} \text{ lösbar} \end{array} \right\} \Rightarrow M_{tot} = M_{A,1} + M_{B,1}$$



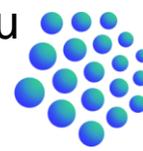
$$V_2 = \frac{V_{\text{tot}}}{m_{\text{tot}}}$$

$$m_{\text{tot}} = m_{A,1} + m_{B,1}$$

③ Lösen für $m_{A,1}$, $m_{B,1}$

$$P_{1,A} = 400 \text{ kPa} = 4 \text{ bar}, \text{ ND. } x = 80\%, V_A = 0,2 \text{ m}^3$$

Falls x (Dampfgehalt) geg. ist, ist der Stoff in ND. (Nassdampf-Gebiet), hier ist P (Druck) und T (Temp.) gekoppelt \Rightarrow In ND. eine Druck-Wert für eine Temp.-Wert.



③ Lösen für $m_{A,1}$, $m_{B,1}$

$$P_{1,A} = 400 \text{ kPa} = 4 \text{ bar}, \text{ ND. } x = 80\%, V_A = 0,2 \text{ m}^3$$

$$V_{1,A} = \frac{V_A}{m_{A,1}} \Rightarrow m_{A,1} = \frac{V_A}{V_{1,A}}$$

$V_{1,A}$ ist mit x (Dampfgehalt)
gut lösbar

$$V_2 = \frac{V_{\text{tot}}}{m_{\text{tot}}}$$

$$m_{\text{tot}} = m_{A,1} + m_{B,1}$$

$$m_{A,1} = \frac{V_A}{V_{1,A}}$$

Aus ZF

Reales Fluid (2-Phasengebiet)

Spezifische Zustandsgrösse $\phi = v, u, h, s$

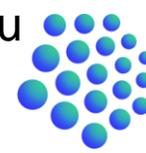
Dampf tafeln $\phi = f(T, p)$

Nassdampf $\phi = \phi_f + x(\phi_g - \phi_f)$

Dampfgehalt $x = \frac{m_g}{m_g + m_f}$

Verdampfungsenthalpie $h_{fg} = h_g - h_f$

$$\Rightarrow V_{1,A} = V_f + x(V_g - V_f)$$

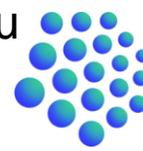


Vorwarnung: , ist kein , auf Deutsch

230	6,938	5,026	204.464
240	7,280	5,285	205.920
250	7,627	5,548	207.337

5'548

207,337



$$V_{1,A} = V_f + X (V_g - V_f)$$

⇒ TAB A-3 Pressure TAB

$$V_f \times 10^3 = 1,0836 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

Achtung:

$$v_f = (\text{table value})/1000$$

$$v_f = 1,0836 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$V_g = 0,4625 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$V_{1,A} = V_f + X (V_g - V_f) = [1,0836 \times 10^{-3} + 0,8(0,4625 - 1,0836 \times 10^{-3})] \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$= 0,37021672 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$m_{A,1} = \frac{V_A}{V_{1,A}} = \frac{0,2 \text{ m}^3}{0,3702167 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 0,540224 \text{ kg}$$

$$V_2 = \frac{V_{\text{tot}}}{m_{\text{tot}}}$$

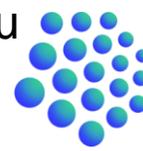
$$m_{\text{tot}} = m_{A,1} + m_{B,1}$$

$$m_{A,1} = \frac{V_A}{V_{1,A}}$$

$$V_2 = \frac{V_{\text{tot}}}{m_{\text{tot}}}$$

$$m_{\text{tot}} = m_{A,1} + m_{B,1}$$

$$m_{A,1} = \frac{V_A}{V_{1,A}}$$



Nun für $m_{B,1}$

$$V_{B,1} = 0,5 \text{ m}^3 \quad P_{1,B} = 2 \text{ bar} \quad T_{1,B} = 250^\circ\text{C}$$

$$V_2 = \frac{V_{\text{tot}}}{m_{\text{tot}}}$$

$$m_{\text{tot}} = m_{A,1} + m_{B,1}$$

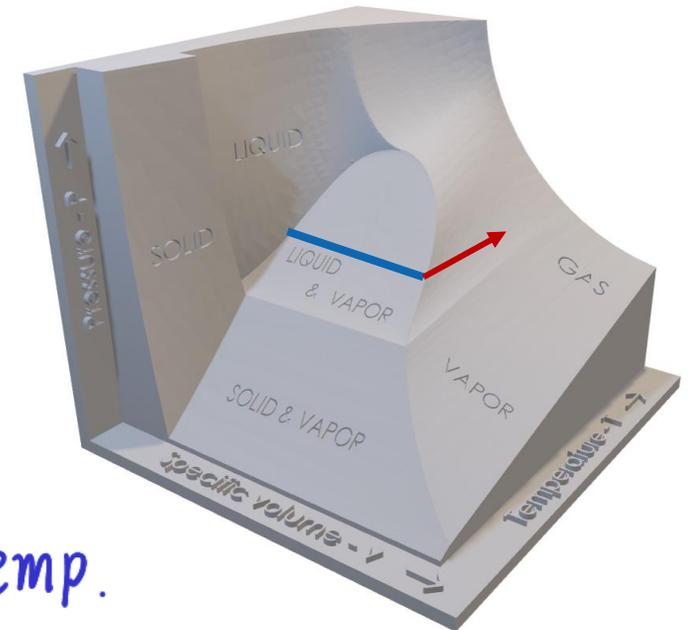
$$m_{B,1} = \frac{V_B}{V_{1,B}}$$

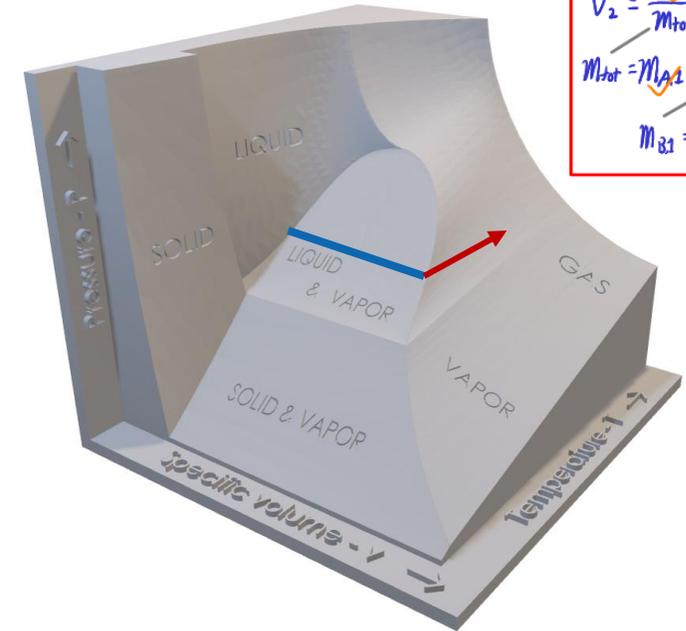
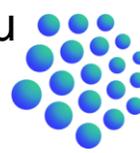
Compressed Water? ND? Superheated Vapor?

check TAB A-3 Pressure TAB for ND

2 bar \rightarrow 120,2°C wir haben $T_{1,B} = 250^\circ\text{C}$

Unserer Stoff ist heisser als ND gekoppelte Temp.





$$v_2 = \frac{V_{tot}}{M_{tot}}$$

$$M_{tot} = M_{A,1} + M_{B,1}$$

$$M_{B,1} = \frac{V_{B,1}}{v_{1,B}}$$

⇒ Stoff nicht mehr in ND.

⇒ heissere Temp. nur in "Superheated Vapor"

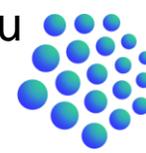
⇒ TAB A-4 verwenden

2 bar liegt zw. 1,5 bar, 3 bar

250°C liegt zw. 240°C, 280°C

Muss 3 mal lerp.





- lerp. Formel hinschreiben

$$\text{lerp. } y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) + y_1$$

$$V_2 = \frac{V_{\text{tot}}}{m_{\text{tot}}}$$
$$m_{\text{tot}} = m_{A,1} + m_{B,1}$$
$$m_{B,1} = \frac{V_B}{V_{1,B}}$$

- lerp. TAB machen, mit Bemerkung aus welcher TAB

$$V_2 = \frac{V_{tot}}{m_{tot}}$$

$$m_{tot} = m_{A,1} + m_{B,1}$$

$$m_{B,1} = \frac{V_B}{V_{1,B}}$$

↓ u_2 ist auch gefragt,

1,5 bar		T [K]	$V_g \left[\frac{m^3}{kg} \right]$	$u \left[\frac{kJ}{kg} \right]$	
	x_1	240	1,570	2717,2	y_1
		250			
	x_2	280	1,695	2778,6	y_2
3 bar	x_1	240	0,781	2713,1	y_1
		250			
	x_2	280	0,844	2775,4	y_2

Aus TAB A-4



$$V_2 = \frac{V_{tot}}{m_{tot}}$$

$$m_{tot} = m_{A,1} + m_{B,1}$$

$$m_{B,1} = \frac{V_B}{V_{1,B}}$$

- lerp. TAB machen, mit Bemerkung aus welcher TAB

↙ u_2 ist auch gefragt,

1,5 bar		T [K]	$V_g [\frac{m^3}{kg}]$	$u [\frac{kJ}{kg}]$	
	x_1	240	1,570	2717,2	y_1
lerp.	→	250	1,60125	2732,55	←
	x_2	280	1,695	2778,6	y_2
3 bar	x_1	240	0,781	2713,1	y_1
lerp.	→	250	0,79675	2728,675	←
	x_2	280	0,844	2775,4	y_2

Aus TAB A-4

→ lerp. 2 bar

lerp. $\begin{cases} \rightarrow V_g @ 2 \text{ bar}, 250 \text{ K} = 1,333 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \\ \rightarrow u_{1,B} @ 2 \text{ bar}, 250 \text{ K} = 2731,2583 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{cases}$

$$V_2 = \frac{V_{\text{tot}}}{m_{\text{tot}}}$$

$$m_{\text{tot}} = m_{A,1} + m_{B,1}$$

$$m_{B,1} = \frac{V_B}{V_{1,B}}$$

ML. checked ✓

$$m_{B,1} = \frac{V_B}{V_g} = \frac{0,5 \text{ m}^3}{1,333 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}} = 0,3751 \text{ kg}$$

$$V_2 = \frac{V_{\text{tot}}}{m_{\text{tot}}}$$

$$m_{\text{tot}} = m_{A,1} + m_{B,1}$$

$$m_{\text{tot}} = m_{A,1} + m_{B,1} = (0,540224 + 0,3751) \text{ kg} = 0,915324 \text{ kg}$$

$$V_2 = \frac{V_{\text{tot}}}{m_{\text{tot}}} = \frac{0,7 \text{ m}^3}{0,915324 \text{ kg}} = \underline{\underline{0,764756 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}}}$$

ML. $0,765 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ ✓

- den Dampfgehalt x_2 ,

Wenn es schon nach Dampfgehalt fragt, dann sollte Stoffzustand in ND. (Nass-Dampf) sein

Endzustand $T_2 = 25^\circ\text{C}$, aus oben $v_2 = 0,764756 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

Mit unserer Überlegung, es muss in ND sein \Rightarrow TAB-A2 (Liquid-Vapor)

ges.: χ_2

Aus ZF

Reales Fluid (2-Phasengebiet)Spezifische Zustandsgrösse $\phi = v, u, h, s$ Dampftafeln $\phi = f(T, p)$

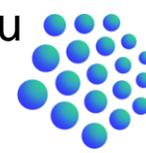
Nassdampf	$\phi = \phi_f + x(\phi_g - \phi_f)$
-----------	--------------------------------------

Dampfgehalt $x = \frac{m_g}{m_g + m_f}$ Verdampfungsenthalpie $h_{fg} = h_g - h_f$ Endzustand $T_2 = 25^\circ\text{C}$, aus oben $v_2 = 0,764756 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ Mit unserer Überlegung, es muss in ND sein \Rightarrow TAB-A2 (Liquid-Vapor)

$$\Rightarrow v_2 = v_f + \chi(v_g - v_f)$$

$$\downarrow$$

$$\chi_2 = \frac{v_2 - v_f}{v_g - v_f}$$



$$\Rightarrow v_2 = v_f + \chi (v_g - v_f)$$



$$\chi_2 = \frac{v_2 - v_f}{v_g - v_f}$$

aus oben $v_2 = 0,764756 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

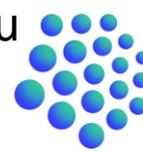
Endzustand $T_2 = 25^\circ\text{C}$

$T [^\circ\text{C}]$	p	$v_f \times 10^3$	$v_g \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$
25	0.03169	1.0029	43.360

TAB-A2

$$\chi_2 = \frac{0,764756 - 1,0029 \times 10^{-3}}{43,360 - 1,0029 \times 10^{-3}} = \underline{\underline{0,017615}}$$

ML. 0,0176 ✓

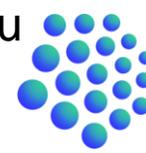


- den Druck p_2 ,

Es ist in ND, was bedeutet es?

Dort Druck und Temp sind gekoppelt.

$\Rightarrow T_2 = 25^\circ\text{C}$ bekannt $\Rightarrow P_2 = \underline{\underline{0,03169 \text{ bar}}}$ aus TAB A-2
M.L. 3,169 Kpa ✓



- die spezifische innere Energie u_2 .

$$u_{1,B} @ 2 \text{ bar}, 250 \text{ K} = 2731,2583 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad \text{aus Vorher}$$

Diese lerp. Wert bringt uns nicht weiter ...

Opps. u lerp. umsonst. Zeit verschwendet **Mist!**

Option: ① lerp. wegstreichen, weitere Ansatz finden

② lerp. stehen lassen, weitere Ansatz finden

3. Aufgabe skippen, nächste Aufgabe

Neu Überlegung : Bekannt

ges. u_2

Aus ZF

Reales Fluid (2-Phasengebiet)

Spezifische Zustandsgrösse $\phi = v, u, h, s$

Dampf tafeln $\phi = f(T, p)$

Nassdampf $\phi = \phi_f + x(\phi_g - \phi_f)$

Dampfgehalt $x = \frac{m_g}{m_g + m_f}$

Verdampfungsenthalpie $h_{fg} = h_g - h_f$

ND, χ_2, T_2, P_2

Schau noch in TAB A-2

u_f, u_g in TAB

$$\Rightarrow u_2 = u_f + \chi_2 (u_g - u_f)$$

$$u_2 = u_f + x_2 (u_g - u_f)$$

$$u_f @ 25^\circ\text{C} = 104,88 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$u_g @ 25^\circ\text{C} = 2409,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

TAB A-2

$$u_2 = [104,88 + 0,017615 (2409,8 - 104,88)] \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = \underline{\underline{145,4817 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}}$$

$$\text{ML. } 145,45 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \checkmark$$

- b) Berechnen Sie den Wärmeübergang Q_{12} zwischen System und Umgebung, der nötig ist, um vom Anfangszustand zum Gleichgewichtszustand zu gelangen.

Systemgrenz, Ansatz?

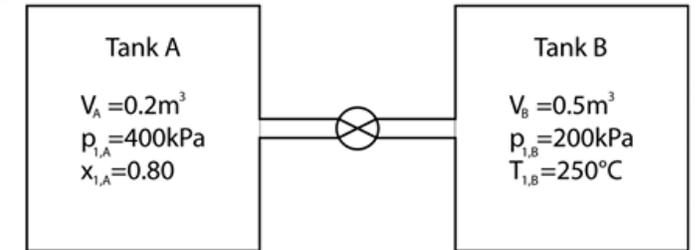


Abbildung 1: Tank A und B im Zustand 1

Überlegung für Ansatz-Findung

Zustand
1

Q, W

Zustand
2

Zustand 1, 2 bekannt
ges.: Prozessgrößen wie Q, W

1. HS nützlich

$$\Delta E = Q - W$$

Energieänderung
zw. 2
Zustände



Die rein/aus gehende
Energie, diese ΔE verursacht

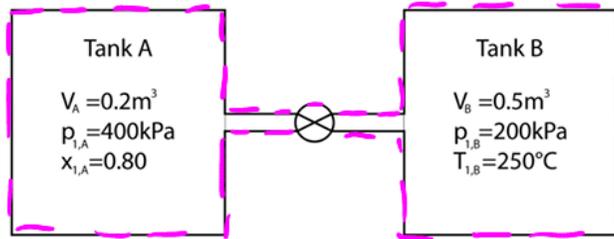


Abbildung 1: Tank A und B im Zustand 1

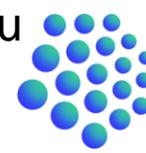
- Geschlossenes System, diatherm (nicht isoliert)

$$Q \neq 0$$

- Von Zustand 1 \rightarrow 2 : $V_{\text{tot}} = \text{const}$

$$\Rightarrow p dV = 0 \Rightarrow \text{Keine Volumenarbeit}$$

$$\Rightarrow W_{V,12} = 0$$



$$\Rightarrow \Delta \bar{E} = \Delta U + \cancel{\Delta KE} + \cancel{\Delta PE} = Q_{12} - \cancel{W_{v,12}} \rightarrow 0, V = \text{const}$$

Ruhe
Gas.

$$\Delta U = Q_{12}$$

$$\downarrow$$

$$U_2 - U_1 = Q_{12}$$

Wie berechnen wir U auf Zustand 1 und 2 ?

U_1 : Tank A, B getrennt \Rightarrow Unseres Gesamtes Sys. besteht aus 2 Sub-Sys.

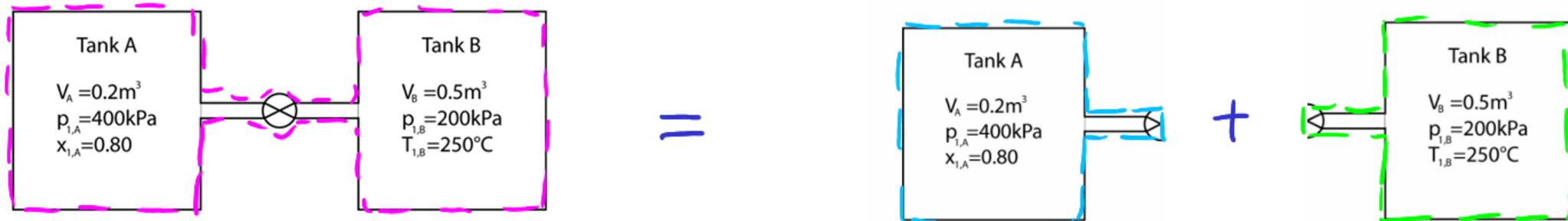


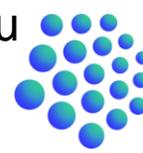
Abbildung 1: Tank A und B im Zustand 1

$$U_1 = U_{1,A} + U_{1,B}$$

m_A, m_B aus a)

$$= m_A \cdot u_{1,A} + m_B \cdot u_{1,B}$$

$u_{1,A}, u_{1,B}$ unbekannt



ges: $u_{1,A}$?

geg: $x_{1,A} = 0,8 \Rightarrow$ ND $P_{1,A} = 400 \text{ kPa} = 4 \text{ bar} \Rightarrow$ in TAB A-3

LSG: Aus ZF

Reales Fluid (2-Phasengebiet)

Spezifische Zustandsgrösse $\phi = v, u, h, s$

Dampf tafeln $\phi = f(T, p)$

Nassdampf $\phi = \phi_f + x(\phi_g - \phi_f)$

Dampfgehalt $x = \frac{m_g}{m_g + m_f}$

Verdampfungsenthalpie $h_{fg} = h_g - h_f$

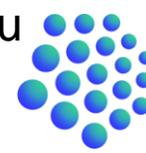
$$u_{1,A} = u_f + x_{1,A} (u_g - u_f)$$

$$u_f = 604,31 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$u_g = 2553,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

aus TAB A-3

$$u_{1,A} = \left[604,31 + 0,8 (2553,6 - 604,31) \right] \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 2163,742 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$



ges: $u_{1,B}$

geg: $P_{1,B} = 2 \text{ bar}$ $T_{1,B} = 250^\circ\text{C}$

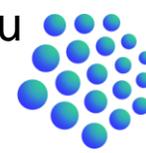
Lsg: "Superheated Vapor"

Aus a), wir hatten für $u_{1,B}$ aus falscher Intension gelernt.

Falls ihr diese Option genommen habt

② lerp. stehen lassen, weitere Ansatz finden

$$\text{aus a) } u_{1,B} = 2731,2583 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$



Falls ihr diese Option genommen habt

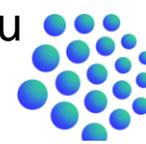
① lerp. wegstreichen, weitere Ansatz finden

Pech gehabt!

- Du musst doppelte Lerp. für $u_{1,B}$ nochmals machen.

- Weil wir in dieser großen Aufgabe lerp. Formel schon hingeschrieben haben, müssen wir sie nicht mehr nochmals schreiben.

- Stellt die lerp. TAB auf, Oder einfach schreiben, Welche Werte genutzt werden, und aus welcher TAB sie kommt.



z.B.

Aus TAB ...

@ P = ... bar

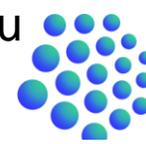
Wert 1 @ T = ...] lerp.
 Wert 2 @ T = ...] → Wert A @ Ziel Temp.

@ P = ... bar

Wert 3 @ T = ...] lerp.
 Wert 4 @ T = ...] → Wert B @ Ziel Temp.

lerp. für Ziel Druck

→ Wert, Final @ Ziel P, T



$$U_1 = U_{1,A} + U_{1,B}$$

|

$$= m_A \cdot u_{1,A} + m_B \cdot u_{1,B}$$

↓

$$= 1168,90536 \text{ kJ} + 1024,494988 \text{ kJ} = 2193,4 \text{ kJ}$$

$$u_{1,A} = 2163,742 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$u_{1,B} = 2731,2583 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$m_{A,1} = 0,540224 \text{ kg}$$

$$m_{B,1} = 0,3751 \text{ kg}$$

$$\Delta U = Q_{12}$$

$$U_2 - U_1 = Q_{12}$$

Rote Faden nicht verlieren, brauchen noch U_2

$$\Delta U = Q_{12}$$

$$U_2 - U_1 \stackrel{\downarrow}{=} Q_{12}$$

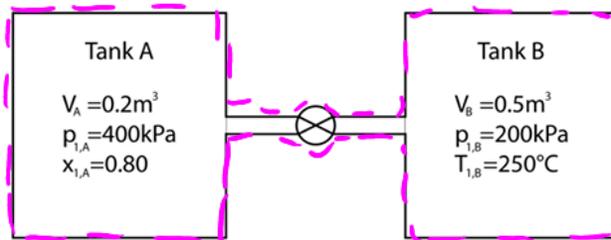


Abbildung 1: Tank A und B im Zustand 1

Endzustand :

Tank A, B herrscht gleiche Bedingung (P, T)

⇒ Man kann das Sys. als Ein betrachten

$$U_2 = m_{\text{tot}} \cdot u_2$$

$$m_{\text{tot}} = 0,915324 \text{ kg} \quad \text{aus a)}$$

$$u_2 = 145,4811 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$= 133,1623 \text{ kJ}$$

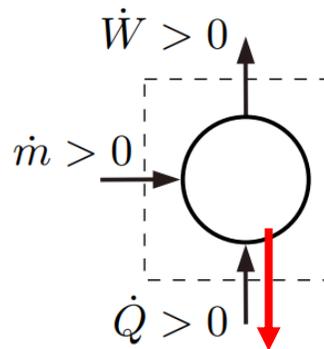
$$Q_{12} = \Delta U = U_2 - U_1 = \underline{\underline{-2060,23765 \text{ kJ}}}$$

$$\text{ML. } -2059,5 \text{ kJ } \checkmark$$

$$Q_{12} = \Delta U = U_2 - U_1 = \underline{\underline{-2060,23765 \text{ kJ}}}$$

$$ML. -2059,5 \text{ kJ } \checkmark$$

Sys. Verliert oder bekommt die Wärme ?



\Rightarrow Wärme geht raus

Geschafft!

Prüfungsaufgabe in Appendix, Falls ihr Lust & Zeit habt.

Sessionsprüfung

HS 16

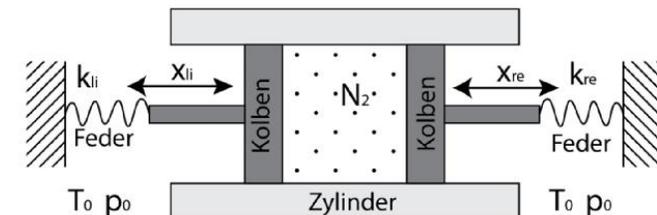
Thermodynamik I

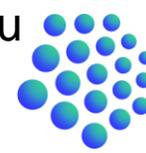
Aufgabe 3 – Stickstoff im Doppelkolben-Zylinder-System (~25% der Punkte)

In einem Doppelkolben-Zylinder-System befindet sich Stickstoff (N_2 , Annahme: ideales Gas). Im Anfangszustand (Zustand 1) gilt $V_1 = 4 \text{ m}^3$, $p_1 = 1 \text{ bar}$, $T_1 = 700 \text{ K}$. Jeder der beiden Kolben ist nach aussen mit einer Feder verbunden (siehe Skizze). In Zustand 1 üben die Federn keine Kraft auf den jeweiligen Kolben aus. Je nach Auslenkung der Feder $|x|$ (Stauchung oder Dehnung) ist die Federrückstellkraft $|F| = k \cdot |x|$, mit den Federkonstanten $k_{li} = 10 \text{ kN/m}$ (linke Feder) und $k_{re} = 20 \text{ kN/m}$ (rechte Feder). Die Querschnittsfläche der Kolben beträgt jeweils $A = 1 \text{ m}^2$.

Nun gibt der Stickstoff Wärme an die Umgebung ab, wodurch sich das Stickstoffvolumen halbiert und das System Zustand 2 erreicht. Der Umgebungsdruck beträgt $p_0 = 1 \text{ bar}$, die Umgebungstemperatur beträgt $T_0 = 280 \text{ K}$.

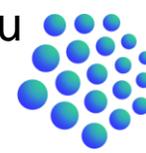
- (8 Punkte) Bestimmen Sie die Masse des Stickstoffs, sowie den Druck p_2 und die Temperatur T_2 des Stickstoffs in Zustand 2.
- (5 Punkte) Bestimmen Sie die gesamte Arbeit W_{12} , die der Stickstoff mit seiner Umgebung während der Zustandsänderung 1 nach 2 austauscht. Geben Sie an, ob der Stickstoff Arbeit leistet, oder Arbeit an ihm geleistet wird.
- (4 Punkte) Bestimmen Sie die Wärme Q_{12} der Zustandsänderung 1 nach 2.
- (3 Punkte) Berechnen Sie die vom System erzeugte Entropie S_{er} während der Zustandsänderung 1 nach 2.





Danke für die Aufmerksamkeit!





Selbstrechenübung

Feedback

