



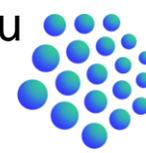
# Thermodynamik I Übungsstunde 07

Juncheng Fu (Elias)  
22. November 2024

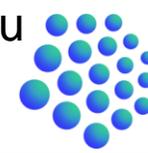


Übungsmaterial





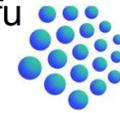
- Die Übungsstunde wird von mir aufgezeichnet!
- **Nicht offiziell**
- (Screen recording) Lade ich später auf YT hoch
- Keine Garantie für Qualität, es ist nur in der Not zu nutzen (Falls Krank...)



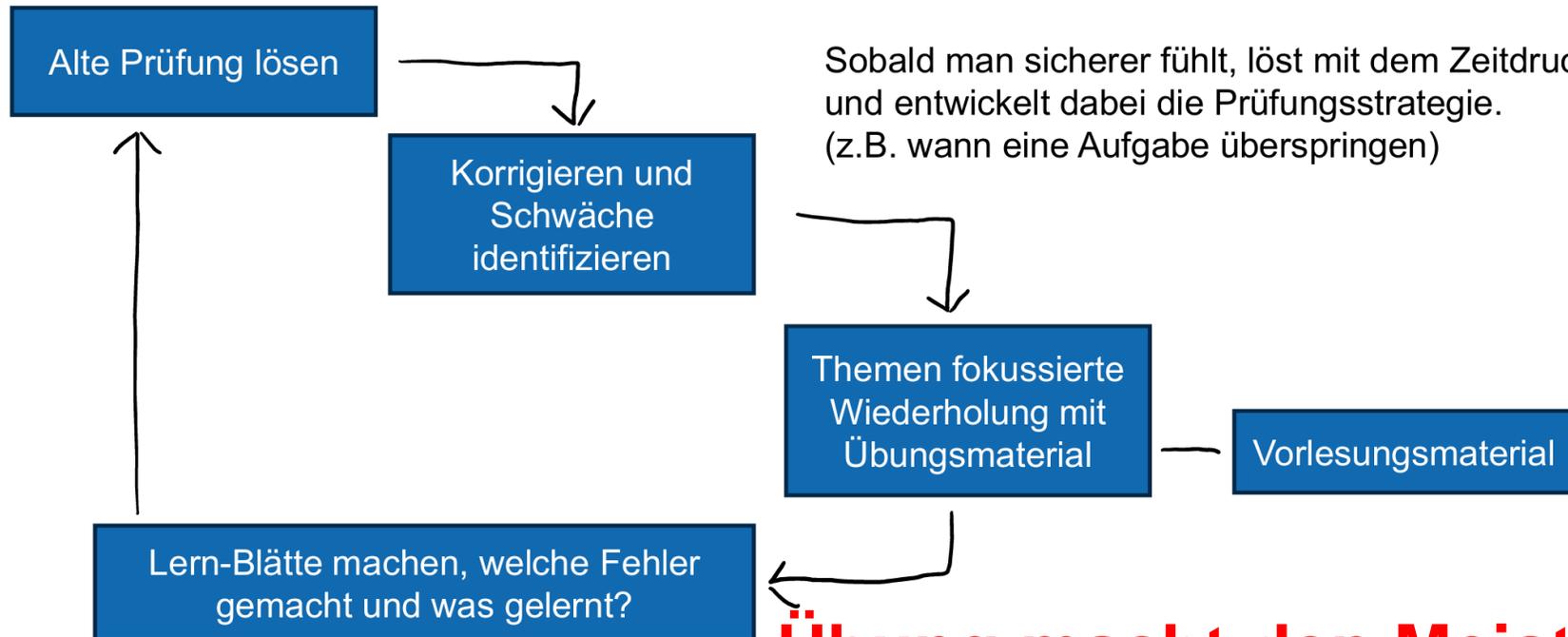
# Wie lernt man Thermo (für die Prüfung)

## Vorgehen

n.ethz.ch/~juncfu



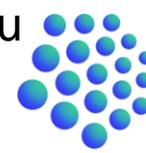
Erste ein paar Prüfungen ohne Zeitdruck lösen, um "Wissenslücke" zu identifizieren.



Es gibt viele Tricks, Ich habe sie in meiner Übungsstunde immer mit Orange Farbe markiert.

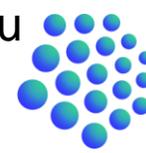
Versucht eine Kombi zw. verstehen und auswendig lernen die Fächer zu bestehen.

**Übung macht den Meister.  
Formelsammlung ist dein bester Freund!**



## Entropiebilanz & Stoffmodelle

# Entropy



# Entropie

Eine Größe „XXX“ eine Definitionssache.

Entropie Video

<https://youtu.be/DxL2HoqLbyA>

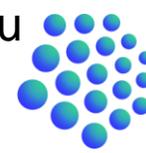
Umzubeschreiben:

- Wie unordentlich das System ist.
- Wie verbreitet ist die Energie.

Merkmale:

- **Massen** „tragen“ eine Entropie Wert
- **Wärme** „schleppen“ auch Entropie
- Entropie **kann NICHT vernichtet werden!** (Kann aber abtransportiert werden)
- Entropie **kann** aber **erzeugt werden**, bei **irreversiblen Prozess**

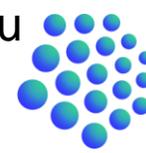
$S_{erz} \geq 0$  definiert auch die Prozessverlaufsrichtung



## Typische Irreversibilität ( $S_{erz} > 0$ )

- Wärmeübertragung bei einer endlichen Temperaturdifferenz  
(immer von  $T_{\text{heiss}}$  nach  $T_{\text{kalt}}$ )
- Unkontrollierte Expansion von Fluiden zu einem tieferen Druck
- Spontane chemische Reaktionen
- Spontane Mischung von Materie unterschiedlicher Zusammensetzung  
oder in unterschiedlichen Zuständen
- Gleitreibung (zwischen Festkörpern als auch in Fluiden)
- Inelastische Deformation
- Stromleitung durch elektrische Widerstände





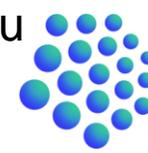
Welche Bedeutung hat diese Entropieerzeugung für uns?

Wir werden sehen...

Zuerst, wie berechnen wir Entropie?

Wie berechnen wir Innere Energie und Enthalpie?

Entropie ist auch ähnlich.



# Recap: Energie Bilanz

Stationäre Masse, die **nicht über** Sys. Grenze geht, benutzen  $U; u$

Geschlossenes Sys.

$$\Delta E = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

$$m \cdot u$$

Halboffenes Sys.  
linke Seite der Bilanzgleichung  
(Zustandsgröße-Änderung)

$$\Delta E = \underline{m_2 u_2 - m_1 u_1} + \Delta KE + \Delta PE =$$

Fließende Masse, die **über** Sys. Grenze geht, die Ein/Ausschiebarbeit benötigt, benutzen  $H; h$

Offenes  
Sys.

**Energiebilanz**

**Massenflussprozess**

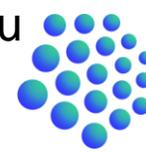
**&**

**Prozessgrößen**

$$\frac{dE}{dt} = \sum_i \dot{m}_i(t) \left[ h_i(t) + ke_i(t) + pe_i(t) \right] + \sum_j \dot{Q}_j(t) - \sum_n \dot{W}_n(t)$$

$$m \cdot h$$

Für halboffenes Sys. rechte Seite der Bilanzgleichung Analog



# Ähnlichkeiten? s, u, h

Massen tragen **Energie** und **Entropie**

**Massenverbundene Energie**

gibt es 2 Forme:

Massenverbundene Entropie gibt es nur 1 Form:

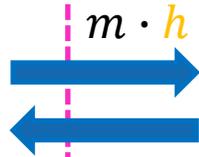
$$m \cdot u$$

In System bleibende Masse;  
Linke Seite der Energiebilanzgleichung  
Innere Energie:  $U; u$

$$m \cdot s$$

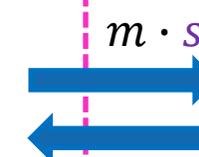
In System bleibende Masse;  
Entropie:  $S; s$

$$m \cdot h$$



Über Grenze gehende Masse  
Rechten Seite der Energiebilanzgleichung  
Enthalpie:  $H; h$

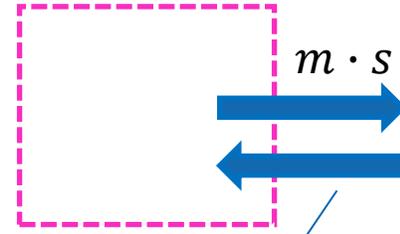
$$m \cdot s$$



Über Grenze gehende Masse  
Entropie:  $S; s$

# Entropiebilanz (auf ZF)

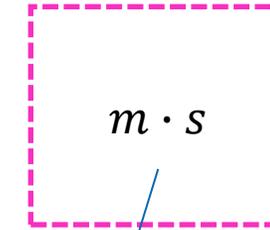
- Stationärer Fließprozess mit einem Massenstrom:
- Geschlossenes System:
- Halboffenes System:  
(Systemmasse nicht konstant, Ein-/Ausschubbedingungen konstant)



$$0 = \dot{m} [s_e - s_a] + \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{S}_{\text{erz}}$$

$$\frac{dS}{dt} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{S}_{\text{erz}}$$

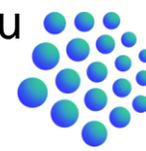
$$\Delta S = m_2 s_2 - m_1 s_1 = \sum_i \Delta m_i s_i + \sum_j \frac{Q_j}{T_j} + S_{\text{erz}}$$



$$\Delta S = S_2 - S_1 = m (s_2 - s_1) = \sum_j \frac{Q_j}{T_j} + S_{\text{erz}}$$

Über dieser Temperatur wird Wärme transportiert

Genauso wie Energie, man kann Entropie auch über **Wärmefluss** über Systemgrenze transportieren.



# Vergleich Entropie- und Energiebilanz

## Energiebilanz

$$\frac{dE}{dt} = \sum_i \dot{m}_i(t) [h_i(t) + ke_i(t) + pe_i(t)] + \sum_j \dot{Q}_j(t) - \sum_n \dot{W}_n(t)$$

Arbeitsfluss  
Term

Man sieht die  
Ähnlichkeiten  
zw. Energie- &  
Entropiebilanz

zeitl. Ä der  
Zustandsgröße  
des Sys.

Massenfluss

massenverbundene  
Zustandsgröße  
(massenspezifische)

Wärmefluss  
Term

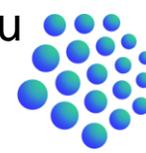
## Entropiebilanz

$$\frac{dS}{dt} = \sum_i \dot{m}_i(t) s_i(t) + \int_G \frac{\delta \dot{Q}(t)}{T_G(t)} + \dot{S}_{erz}(t) = \sum_i \dot{m}_i(t) s_i(t) + \sum_j \frac{\dot{Q}_j(t)}{\bar{T}_j(t)} + \dot{S}_{erz}(t)$$

Entropie  
Erzeugung

Spezialfälle: mit der thermodynamischen Mitteltemperatur  $\bar{T} = \frac{\int_e^a T ds}{s_a - s_e}$  Kommt noch

Vorzeichen!!!



# Stoffmodell ideales Gas (ZF basierte Besprechung)

Wir wollen **s** berechnen zu können.

ZF.

Wenn ihr die beiden könnt.  $\longrightarrow$

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

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

Quasi Analog

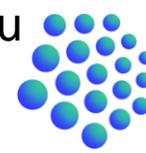
$$s^{\text{ig}}(T_2, p_2) - s^{\text{ig}}(T_1, p_1) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p^{\text{ig}}(T)}{T} dT - R \ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right)$$

Enthalpie & Entropie benutzt man  $c_p$

Achtung:  $C_p$

Verschiedene Möglichkeiten, um Druck zu berechnen.  
(Sehe Ü2. 3... Thema: IG)

Schwerpunkt:  $C_v$ ,  $C_p$ , wann IG? wann PG? Wann TAB? Wann no TAB? Wann IG -> PG Approximation?



# Stoffmodell ideales Gas (ZF basierte Besprechung)

Schwerpunkt:  $C_v$ ,  $C_p$ , wann IG? wann PG? Wann TAB? Wann no TAB? Wann IG  $\rightarrow$  PG Approximation?

IG:	$PV = mRT$	$u(T)$ $h(T)$
	$U = m u$	
PG		
<u><math>C_v, C_p = \text{const. geg. ?}</math></u>	$\checkmark \Rightarrow$ PG $\Rightarrow$	$\Delta u = C_v \cdot \Delta T$ $\Delta h = C_p \cdot \Delta T$
	$X \rightarrow$ TAB $u^{ig}(T)$ ?	$\checkmark$ $X$

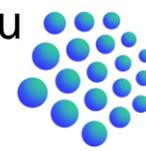
$$u^{ig}(T_2) - u^{ig}(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_v^{ig}(T) dT$$

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

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

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

① get  $\bar{T}$ , ② read  $C_v, C_p$  ③ plug in PG get  $u, h$



# Stoffmodell ideales Gas (ZF basierte Besprechung)

Schwerpunkt:  $C_v$ ,  $C_p$ , wann IG? wann PG? Wann TAB? Wann no TAB? Wann IG -> PG Approximation?

IG:  $PV = mRT$  |  $u(T)$   
 $h(T)$

PG:  $U = m u$

$C_v, C_p = \text{const. geg. ?}$  |  $\checkmark \Rightarrow PG \Rightarrow \Delta u = C_v \cdot \Delta T$   
 $\Delta h = C_p \cdot \Delta T$

$X \rightarrow \text{TAB } u^{ig}(T) ?$  |  $\checkmark \Rightarrow \text{TAB ablesen}$   
 $X \Rightarrow IG \rightarrow PG \text{ app.}$

Bei Verwendung von Tabellenwerten:

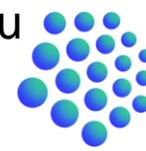
$$s^{ig}(T_2, p_2) - s^{ig}(T_1, p_1) = s^0(T_2) - s^0(T_1) - R \ln \left( \frac{p_2}{p_1} \right)$$

*T(K), h and u(kJ/kg), s° (kJ/kg · K)*  
 when  $\Delta s = 0^1$

$p_r$	$v_r$	$T$	$h$	$u$	$s^\circ$
35	57.63	1300	1395.97	1022.82	3.27345
27	55.54	1320	1419.76	1040.88	3.29160
21	54.00	1340	1444.76	1058.94	3.30950

Einheiten achten!  
 Manche TAB [... / kmol...]

$s^\circ(T)$ , in kJ/kmol · K.



# Stoffmodell ideales Gas (ZF basierte Besprechung)

Schwerpunkt:  $C_v$ ,  $C_p$ , wann IG? wann PG? Wann TAB? Wann no TAB? Wann IG  $\rightarrow$  PG Approximation?

IG:  $PV = mRT$  |  $u(T)$   
 $h(T)$   
 $U = m u$

PG  $\rightarrow$   $C_v, C_p = \text{const. geg. ?}$  |  $\checkmark \Rightarrow$  PG  $\Rightarrow$   $\Delta u = C_v \cdot \Delta T$   
 $\Delta h = C_p \cdot \Delta T$

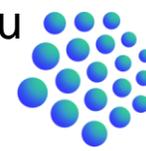
X  $\rightarrow$  TAB  $u^ig(T)$  ? |  $\checkmark \Rightarrow$  TAB ablesen  
X  $\Rightarrow$  IG  $\rightarrow$  PG approxi.

TAB A-20 ideal Gas Specific Heats ...  $\Delta S$   
 ① get  $\bar{T}$ , ② read  $C_v, C_p$  ③ plug in PG get ~~...~~

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

$$\frac{T_1 + T_2}{2}$$

Es ist **NICHT** thermodynamische Mitteltemperatur  $\bar{T} = \frac{\int_e^a T ds}{s_a - s_e}$



# Stoffmodell reales Fluid (ZF basierte Besprechung)

Entropie in ND ist genauso wie wir schon kennen.

## Reales Fluid (2-Phasengebiet)

Spezifische Zustandsgrösse

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

Dampf tafeln

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

Nassdampf

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

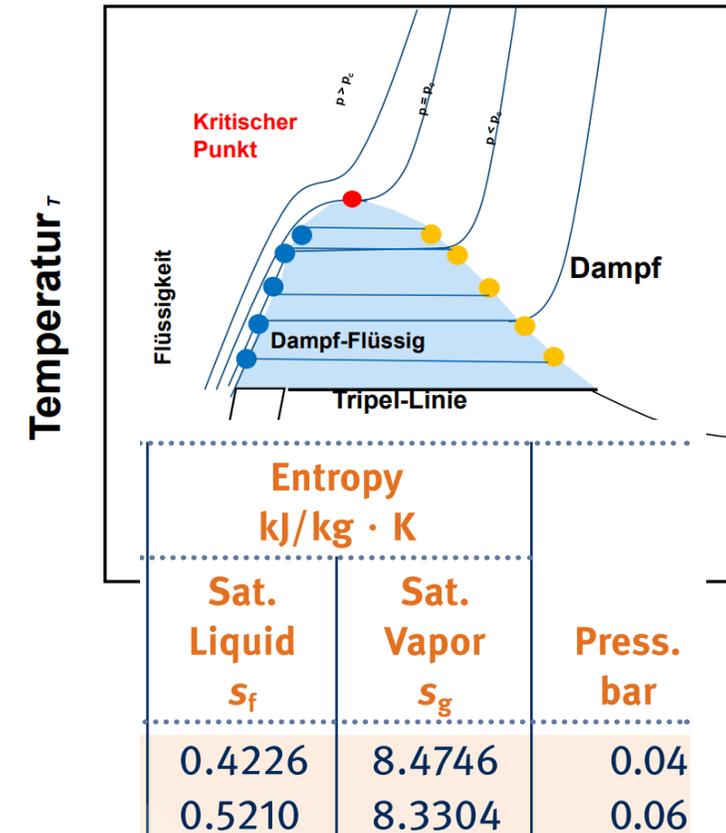
Dampfgehalt

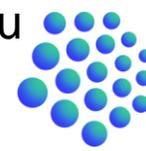
$$x = \frac{m_g}{m_g + m_f}$$

Verdampfungsenthalpie

$$h_{fg} = h_g - h_f$$

Falls no TAB???





# Stoffmodell ideales Fluid (ZF basierte Besprechung)

## Properties of Compressed Liquid Water

$T$ °C	$v \times 10^3$ m <sup>3</sup> /kg	$u$ kJ/kg	$h$ kJ/kg	$s$ kJ/kg · K
$p = 25 \text{ bar} = 2.5 \text{ MPa}$ ( $T_{\text{sat}} = 223.99^\circ\text{C}$ )				
20	1.0006	83.80	86.30	.2961
40	1.0067	167.25	169.77	.571
80	1.0280	334.29	336.86	1.07

Falls no TAB???

Druck kleiner als minimale TAB wert  
Dort no TAB

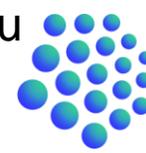
Aus W. 06 Ü. 04 Slides

## Reale Fluide als Ideale zu approximieren

Kochrezept auf meiner Webseite

Wann macht man?

Wie macht man?



## Stoffmodell ideales Fluid (ZF basierte Besprechung)

Falls no TAB, dann

Näherung bei Verwendung von Tabellenwerten  
(gesättigte Flüssigkeit):

$$v^{\text{if}}(T, p) = v_{\text{f}}(T) \quad u^{\text{if}}(T, v) = u_{\text{f}}(T)$$

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

**Einheiten!!!**  $[kJ] = [m^3] \cdot [kPa]$

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

Bei der Prüfung immer diese verwenden

$$s^{\text{if}}(T, p) = s_{\text{f}}(T)$$

7 01. Nov

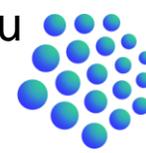
Prozesse in offenen Systemen

PDF

PDF

RF-IF Approxi.

YouTube



# Stoffmodell ideales Fluid (ZF basierte Besprechung)

Falls Annahme über ideales Fluid geg. ist

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

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

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

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

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

Formeln häufig sind für  $\Delta$  (Änderung) gedacht (**auch für andere Stoffmodelle**).  
Um sie zu nutzen, sollte man irgendwie die Masse ausklammern, um auf **Änderung der massenspezifische Grösse** zu kommen.

$$\Delta S = S_2 - S_1 = m s_2 - m s_1 = m(s_2 - s_1)$$

# Isentrope ZÄ

# adiabat & reversibel => Isentrop

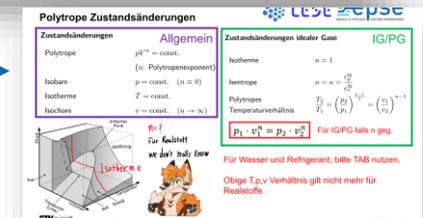
## Zustandsänderungen

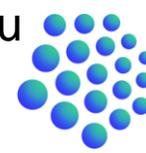
Polytrope	$pV^n = \text{const.}$ ( $n$ : Polytropenexponent)
Isobare	$p = \text{const.}$ ( $n \equiv 0$ )
Isotherme	$T = \text{const.}$
Isochore	$v = \text{const.}$ ( $n \rightarrow \infty$ )
Isenthalpe	$h = \text{const.}$
<b>Isentrope</b>	<b><math>s = \text{const.}</math></b> Entropie

## Zustandsänderungen idealer Gase

Isotherme	$n = 1$
<b>Isentrope</b>	<b><math>n = \kappa = \frac{c_p^{\text{ig}}}{c_v^{\text{ig}}}</math></b>
Polytropes Temperaturverhältnis	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}$

W.05 Ü.03 noch mehr Info →  
W.08 Ü.06 in **Appendix**  
paar Formel und Ansätze  
für Isentrope Sachen ↓





# Isentrope ZÄ

## adiabat & reversibel => Isentrop

thermisch isoliert  
keine Wärmeübertragung  
Wärmefluss = 0

$$\sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} = 0$$

reibungsfrei  
Dissipation = 0  
Entropieerzeugung = 0

$$\dot{S}_{\text{erz}} = 0$$

ZF.

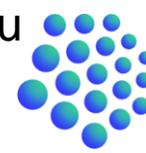
$$s = \text{const.}$$

ZF.

- Stationärer Fließprozess  
mit einem Massenstrom:

$$0 = \dot{m} [s_e - s_a] + \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{S}_{\text{erz}}$$

$$s_e = s_a$$



# Isentrope ZÄ

## adiabat & reversibel => Isentrop

thermisch isoliert  
keine Wärmeübertragung  
Wärmefluss = 0

$$\sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} \overset{0}{\cancel{=}}$$

reibungsfrei  
Dissipation = 0  
Entropieerzeugung = 0

$$\dot{S}_{\text{erz}}$$

ZF.

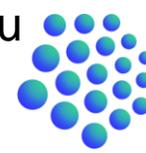
$$s = \text{const.}$$

Entropie kann durch irrev.  
Prozess (Entropieerzeugung)  
geändert werden

ZF.

- Stationärer Fließprozess  
mit einem Massenstrom:

$$0 = \dot{m} [s_e - s_a] + \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{S}_{\text{erz}}$$



# Isentrope ZÄ

## adiabat & reversibel => Isentrop

thermisch isoliert  
keine Wärmeübertragung  
Wärmefluss = 0

reibungsfrei  
Dissipation = 0  
Entropieerzeugung = 0

ZF.  
 $s = \text{const.}$

$$\sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j}$$

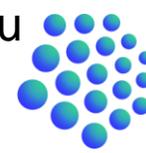


Entropie kann durch  
Wärmeübertragung geändert  
werden

ZF.

- Stationärer Fließprozess  
mit einem Massenstrom:

$$0 = \dot{m} [s_e - s_a] + \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{S}_{\text{erz}}$$



# Isentrope ZÄ

## Isentrop $s = \text{const.}$

Nicht jeder isentrope Prozess ist automatisch adiabat und reversibel. Dazu benötigen wir zusätzliche Informationen, wie z.B.:

- Isentrop + Adiabat  $\Rightarrow$  Entropieerzeugung = 0  $\Rightarrow$  Reversibel

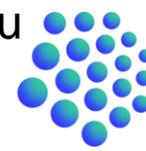
- Stationärer Fließprozess mit einem Massenstrom:

$$0 = \dot{m} [s_e - s_a] + \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{S}_{\text{erz}} \rightarrow 0$$

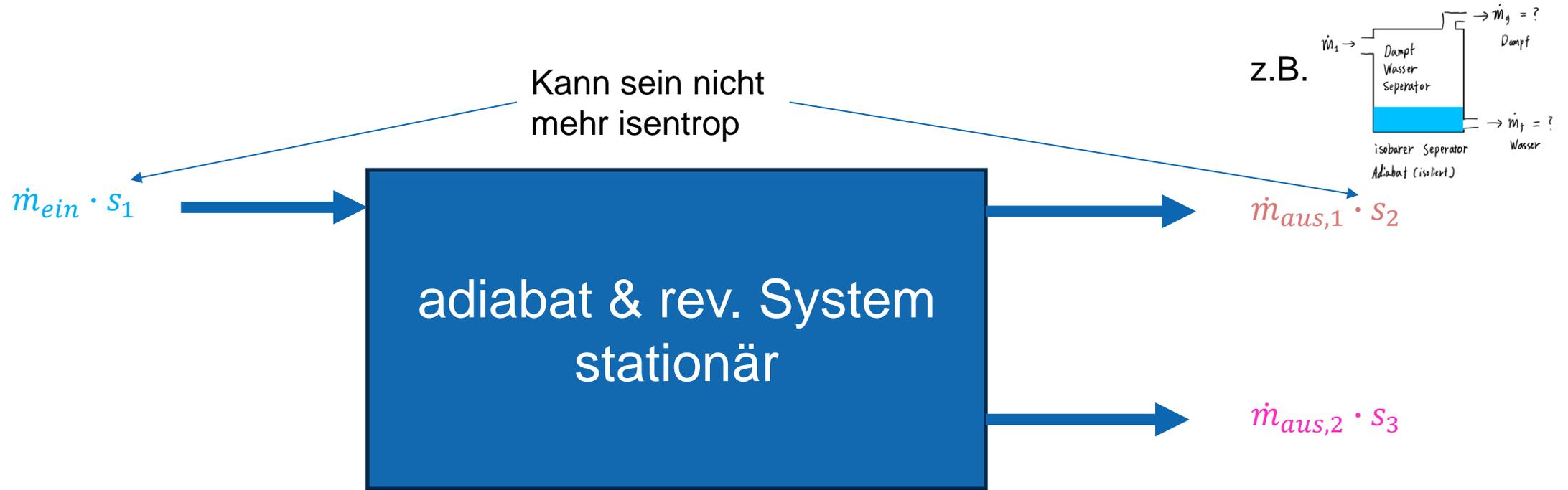
- Isentrop + Reversibel  $\Rightarrow$  Sum  $Q/T = Q/T = 0 \Rightarrow$  adiabat

- Stationärer Fließprozess mit einem Massenstrom:

$$0 = \dot{m} [s_e - s_a] + \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{S}_{\text{erz}}$$



# Entropie Bilanz



## Entropiebilanz

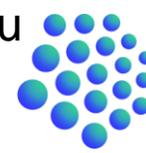
$$\frac{dS}{dt} = \sum_i \dot{m}_i(t) s_i(t) + \sum_j \frac{\dot{Q}_j(t)}{T_j(t)} + \dot{S}_{erz}(t) \Rightarrow$$

$\downarrow 0$                        $\downarrow 0$                        $\downarrow 0$

Spezifische Entropie muss nicht zwingend gleich sein, aber gesamt Bilanz muss erhalten!

$$\dot{m}_{ein} \cdot s_1 = \dot{m}_{aus,1} \cdot s_2 + \dot{m}_{aus,2} \cdot s_3$$

Was reingehen muss rauskommen



# Isentrope / Entropie Bilanz

Info von Haupt TA:

In der Klausur können solche Fälle theoretisch drankommen. Wichtig ist, dass ihr mit den **Bilanzgleichungen umgehen könnt** und diese anhand der Informationen innerhalb der Aufgabenstellung vereinfachen können.

Meistens gilt folgendes schon, aber ich empfehle euch Bilanzgleichung aufzustellen (Gib Punkte) und dann einzelne Terme wegstreichen, so seid ihr auf sicherer Seite.

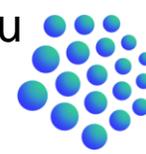
**adiabat & reversibel => Isentrop**

ZF.

- Stationärer Fließprozess mit einem Massenstrom:

$$0 = \dot{m} [s_e - s_a] + \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{S}_{erz}$$

Diagramm zur Entropiebilanzgleichung: Die Gleichung ist dargestellt mit blauen durchgehenden Linien durch die Terme  $\frac{\dot{Q}_j}{T_j}$  und  $\dot{S}_{erz}$ , die jeweils mit einem '0' beschriftet sind. Ein blauer Pfeil zeigt auf den Term  $s_e = s_a$  in der Klammer, was die Isentropiebedingung darstellt.



# Vorrechenübung



# Vorrechenübung

## Aufgabe 7.1 ●●● Zwei-Kammer-System

In zwei **adiabaten** Behältern A und B befindet sich zu Beginn Stickstoff mit den folgenden Zuständen:

Behälter A:  $V_A = 1 \text{ m}^3$ ;  $p_{1,A} = 22 \text{ bar}$ ;  $T_{1,A} = 300 \text{ K}$

Behälter B:  $V_B = 1 \text{ m}^3$ ;  $p_{1,B} = 2 \text{ bar}$ ;  $T_{1,B} = 300 \text{ K}$

Die Behälter werden **durch eine Leitung anschließend so verbunden**, dass sich der **Druck** und die **Temperatur ausgleichen können**. Während dieses Prozesses wird **keine Wärme mit der Umgebung ausgetauscht**. Aus der Energiebilanz folgt für die Temperatur nach dem Ausgleich  $T_2 = 300 \text{ K}$ .

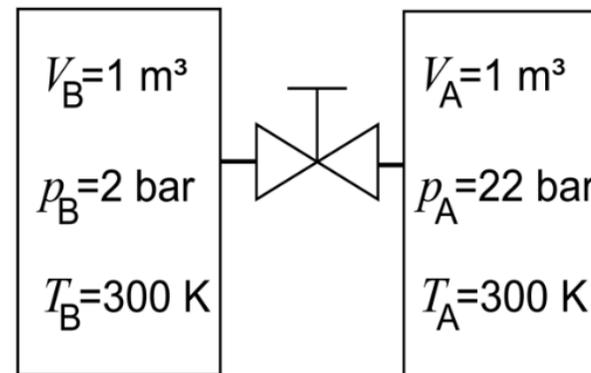


Abbildung 1: Schematische Darstellung der verbundenen Behälter

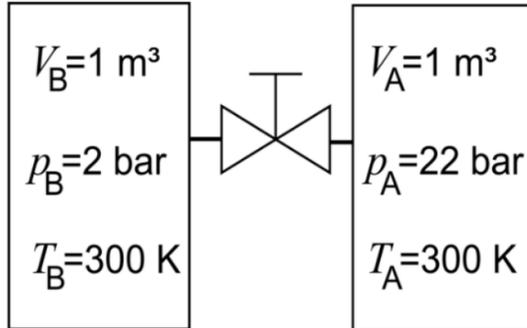
### Annahmen:

- Stickstoff ist als **ideales Gas** mit **konstanter Wärmekapazität** zu modellieren.

a) Bestimmen Sie die **Entropieänderung** des gesamten Systems  $\Delta S$  bei diesem Ausgleichsprozess.

System Klassifizierung :

- Geschlossenes Sys. mit 2 halboffenes sub sys.
  - Nach drauBen adiabat
- diese brauchen wir nicht umzulösen



Verstehen, Was passiert ?

Zustand 1: 2 Sub-Sys. getrennt.

Zustand 2: 2 Sub-Sys verbunden.

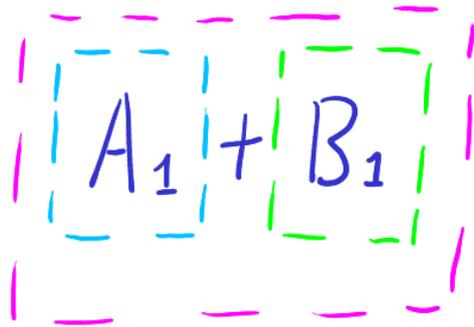
herrscht gleiche Bedingung

$\Rightarrow$  homogen,

$\Rightarrow$  als "Ein" betrachten.

a) Bestimmen Sie die Entropieänderung des gesamten Systems  $\Delta S$  bei diesem Ausgleichsprozess.

Ansatz:



Änderung

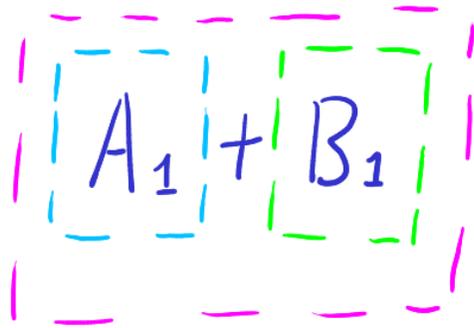


Zustand 1: 2 Sub-Sys. getrennt.

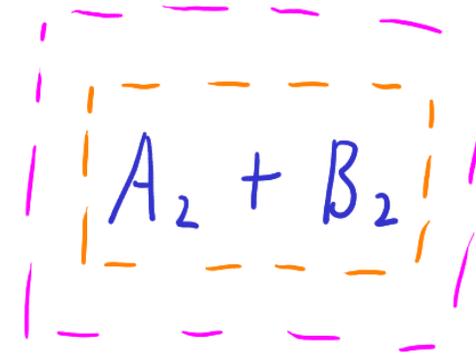
Zustand 2: 2 Sub-Sys verbunden,  
herrscht gleiche Bedingung  
 $\Rightarrow$  homogen,  
 $\Rightarrow$  als "Ein" betrachten.

a) Bestimmen Sie die **Entropieänderung** des gesamten Systems  $\Delta S$  bei diesem Ausgleichsprozess.

Ansatz:



Änderung



$A_1$   $B_1$  Separat berechnen,

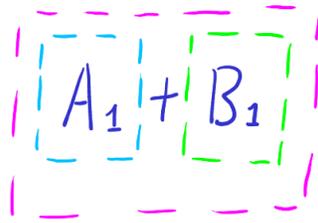
Sumieren  $\Rightarrow$  Gesamte Entropie  
bei Zustand 1

$A_2 = B_2$  homogenes Sys

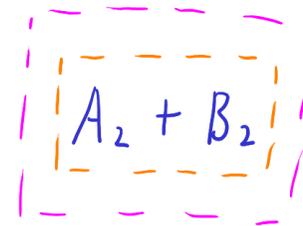
Gesamte Entropie  
bei Zustand 2

a) Bestimmen Sie die Entropieänderung des gesamten Systems  $\Delta S$  bei diesem Ausgleichsprozess.

Ansatz:



$\Delta$   
Änderung



$A_1$   $B_1$  separat berechnen,

Summieren  $\Rightarrow$  Gesamte Entropie  
bei Zustand 1

$A_2 = B_2$  homogenes Sys

Gesamte Entropie  
bei Zustand 2

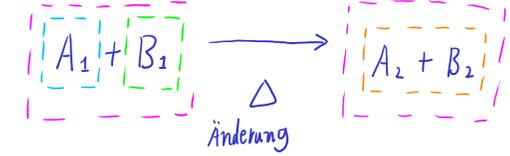
$$\Delta S = \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 2}} - \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 1}}$$

$$\Delta S = S_2 - S_1$$

a) Bestimmen Sie die Entropieänderung des gesamten Systems  $\Delta S$  bei diesem Ausgleichsprozess.

$$\Delta S = \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 2}} - \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 1}}$$

$$\Delta S = S_2 - S_1$$



Wir suchen nach Größe  $S$ : Entropie

Welche Formel passen zu unserem Ansatz?

Aus ZF

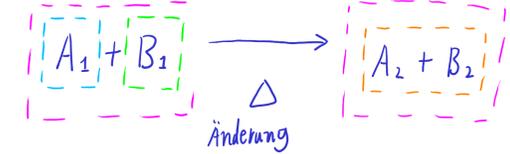
- Geschlossenes System:

$$\frac{dS}{dt} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{S}_{\text{erz}}$$

$$\Delta S = S_2 - S_1 = m(s_2 - s_1) = \sum_j \frac{Q_j}{T_j} + S_{\text{erz}}$$

a) Bestimmen Sie die Entropieänderung des gesamten Systems  $\Delta S$  bei diesem Ausgleichsprozess.

$$\Delta S = \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 2}} - \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 1}}$$



Aus ZF

- Geschlossenes System:

$$\frac{dS}{dt} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{S}_{\text{erz}}$$

$$\Delta S = S_2 - S_1 = m(s_2 - s_1) = \sum_j \frac{Q_j}{T_j} + S_{\text{erz}}$$

Sys. Zustand 2

$$\Delta S = \overset{\downarrow}{S_2} - S_1 \leftarrow \text{System Zustand 1}$$

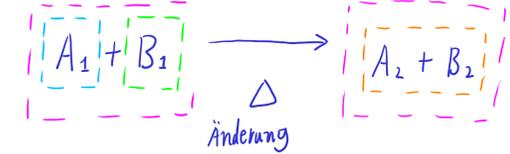
Definitionssache

$$= m_{\text{tot}}(S_2) - m_{A1}(S_{A1}) - m_{B1}(S_{B1})$$

Zustand 2 homogen  $m_{\text{tot}} = m_{A1} + m_{B1}$

a) Bestimmen Sie die Entropieänderung des gesamten Systems  $\Delta S$  bei diesem Ausgleichsprozess.

$$\Delta S = \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 2}} - \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 1}}$$



Sys. Zustand 2

$$\Delta S = S_2 - S_1 \leftarrow \text{System Zustand 1}$$

Definitionssache

$$= M_{\text{tot}}(S_2) - M_{A1}(S_{A1}) - M_{B1}(S_{B1})$$

$$M_{\text{tot}} = M_{A1} + M_{B1}$$

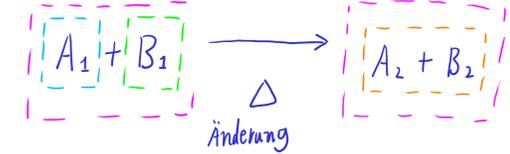
$$= (M_{A1} + M_{B1})(S_2) - M_{A1}(S_{A1}) - M_{B1}(S_{B1})$$

Klammer exp.

$$= M_{A1} \cdot S_2 + M_{B1} \cdot S_2 - M_{A1}(S_{A1}) - M_{B1}(S_{B1})$$

a) Bestimmen Sie die **Entropieänderung** des gesamten Systems  $\Delta S$  bei diesem Ausgleichsprozess.

$$\Delta S = \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 2}} - \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 1}}$$



$$= m_{A1} \cdot s_2 + m_{B1} \cdot s_2 - m_{A1}(s_{A1}) - m_{B1}(s_{B1})$$

Massen gruppieren

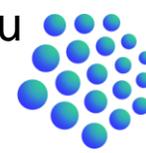
$$\Delta S = m_{A1}(s_2 - s_{A1}) + m_{B1}(s_2 - s_{B1})$$

Math. Umformung braucht keine Erklärung.

jedoch wie kann man sie verstehen?

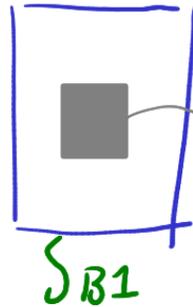
Formeln häufig sind für  $\Delta$  (Änderung) gedacht (**auch für andere Stoffmodelle**). Um sie zu nutzen, sollte man irgendwie die Masse ausklammern, um auf **Änderung der massenspezifische Grösse** zu kommen.

$$\Delta S = S_2 - S_1 = m s_2 - m s_1 = m(s_2 - s_1)$$

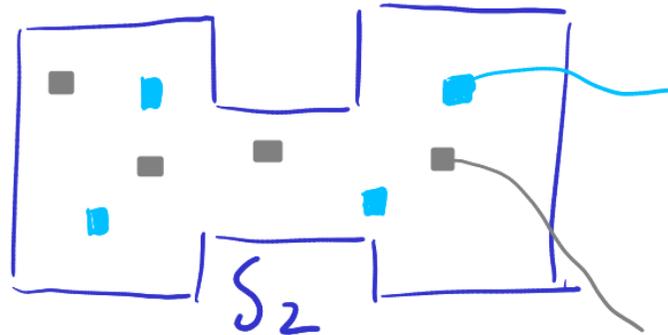


$$\Delta S = m_{A1}(S_2 - S_{A1}) + m_{B1}(S_2 - S_{B1})$$

$m_{A1}$  stammen aus Tank A, mit  $S_{A1}$  als Zustandsgröße



$m_{B1}$  stammen aus Tank B,  
mit  $S_{B1}$  als Zustandsgröße



stammen aus Tank A,  
mit  $S_2$  als Zustandsgröße

stammen aus Tank B,  
mit  $S_2$  als Zustandsgröße

a) Bestimmen Sie die **Entropieänderung** des gesamten Systems  $\Delta S$  bei diesem Ausgleichsprozess.

$$\Delta S = \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 2}} - \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 1}}$$

$$\Delta S = M_{A1}(S_2 - S_{A1}) + M_{B1}(S_2 - S_{B1})$$

$S_2, S_{A1}, S_{B1}$  sind massenspezifische Zustandsgröße  $\left[ \frac{\text{KJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$

Nun kann man Formel in ZF **3 Stoffmodelle** passende Formeln suchen.

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

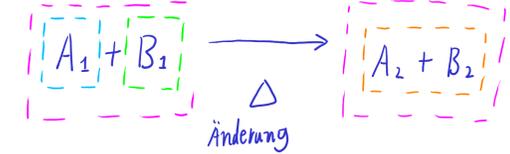
Bei Verwendung von Tabellenwerten:

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

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

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

Welche ?



# Reminder :

## Annahmen:

- Stickstoff ist als **ideales Gas** mit **konstanter Wärmekapazität** zu modellieren.

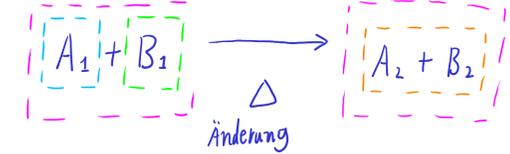
Don't get fooled by **ideales Gas** !

**ideales Gas** mit **konstanter Wärmekapazität** ist Perfektes Gas



a) Bestimmen Sie die Entropieänderung des gesamten Systems  $\Delta S$  bei diesem Ausgleichsprozess.

$$\Delta S = \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 2}} - \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 1}} \quad \Delta S = m_{A1} \boxed{(S_2 - S_{A1})} + m_{B1} \boxed{(S_2 - S_{B1})}$$



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

$$\boxed{S_2 - S_{A1}} = c_p \ln \left( \frac{T_2}{T_A} \right) - R \ln \left( \frac{p_2}{p_A} \right) = -R \ln \left( \frac{p_2}{p_A} \right)$$

$$1, T_2 = T_A = 300 \text{ K}$$

$$\boxed{S_2 - S_{B1}} = -R \ln \left( \frac{p_2}{p_B} \right)$$

ges:  $m_{A1}, m_{B1}, R, p_2$

a) Bestimmen Sie die Entropieänderung des gesamten Systems  $\Delta S$  bei diesem Ausgleichsprozess.

$$\Delta S = \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 2}} - \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 1}} \quad \Delta S = m_{A1}(s_2 - s_{A1}) + m_{B1}(s_2 - s_{B1})$$

$$s_2 - s_{A1} = c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_{A1}}\right) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_{A1}}\right) = -R \ln\left(\frac{p_2}{p_{A1}}\right) \quad s_2 - s_{B1} = -R \ln\left(\frac{p_2}{p_{B1}}\right)$$

1,  $T_2 = T_A = 300\text{K}$

ges:  $m_{A1}, m_{B1}, R, p_2$

ZF

$$\bar{R} = 8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}}$$

$$R = c_p^{\text{ig}} - c_v^{\text{ig}} = \frac{\bar{R}}{M}$$

$$M = 28,01 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \quad \text{TAB A1}$$

$$R = 0,2968 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$pV = mRT$$

$$m_{A1} = \frac{p_{1,A} V_A}{R T_A} = \frac{2200 \text{ kPa} \cdot 1 \text{ m}^3}{0,2968 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 300 \text{ K}} = 24,708 \text{ kg}$$

a) Bestimmen Sie die Entropieänderung des gesamten Systems  $\Delta S$  bei diesem Ausgleichsprozess.

$$\Delta S = \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 2}} - \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 1}} \quad \Delta S = m_{A1}(s_2 - s_{A1}) + m_{B1}(s_2 - s_{B1}) \quad s_2 - s_{A1} = c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_{A1}}\right) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_{A1}}\right) = -R \ln\left(\frac{p_2}{p_{A1}}\right) \quad s_2 - s_{B1} = -R \ln\left(\frac{p_2}{p_{B1}}\right)$$

$1, T_2 = T_A = 300 \text{ K}$

ges:  $m_{A1}, m_{B1}, R, p_2$

$$m_{A1} = \frac{p_{1,A} V_A}{R T_A} = \frac{2200 \text{ kPa} \cdot 1 \text{ m}^3}{0,2968 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 300 \text{ K}} = 24,708 \text{ kg}$$

$$m_{B1} = \frac{p_{1,B} V_B}{R T_B} = \frac{200 \text{ kPa} \cdot 1 \text{ m}^3}{0,2968 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 300 \text{ K}} = 2,2462 \text{ kg}$$

a) Bestimmen Sie die **Entropieänderung** des gesamten Systems  $\Delta S$  bei diesem Ausgleichsprozess.

$$\Delta S = \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 2}} - \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 1}} \quad \Delta S = m_{A1}(s_2 - s_{A1}) + m_{B1}(s_2 - s_{B1})$$

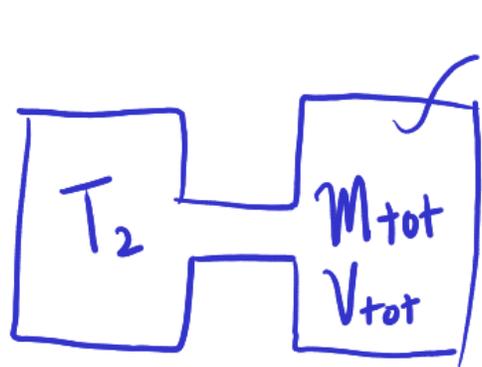
$$s_2 - s_{A1} = c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_{A1}}\right) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_{A1}}\right) = -R \ln\left(\frac{p_2}{p_{A1}}\right) \quad s_2 - s_{B1} = -R \ln\left(\frac{p_2}{p_{B1}}\right)$$

1,  $T_2 = T_A = 300\text{K}$

ges:  $m_{A1}, m_{B1}, R, p_2$

$$m_{A1} = 24,708 \text{ kg}$$

$$m_{B1} = 2,2462 \text{ kg}$$



$p_2 = ?$

$$p_2 = \frac{m_{\text{tot}} R T_2}{V_{\text{tot}}} = \frac{26,9542 \text{ kg} \cdot 0,2968 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 300 \text{ K}}{2 \text{ m}^3} = 1200 \text{ kPa}$$

$$= 12 \text{ bar}$$

a) Bestimmen Sie die **Entropieänderung** des gesamten Systems  $\Delta S$  bei diesem Ausgleichsprozess.

$$\Delta S = \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 2}} - \boxed{\text{Gesamte Entropie bei Zustand 1}} \quad \Delta S = m_{A1}(s_2 - s_{A1}) + m_{B1}(s_2 - s_{B1}) \quad s_2 - s_{A1} = c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_A}\right) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_A}\right) = -R \ln\left(\frac{p_2}{p_A}\right) \quad s_2 - s_{B1} = -R \ln\left(\frac{p_2}{p_B}\right)$$

1,  $T_2 = T_A = 300\text{K}$

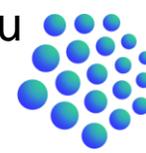
$$m_{A1} = 24,708 \text{ kg} \quad m_{B1} = 2,2462 \text{ kg} \quad p_2 = 12 \text{ bar}$$

$$s_2 - s_{A1} = -R \ln\left(\frac{p_2}{p_A}\right) = 0,1799 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$s_2 - s_{B1} = -R \ln\left(\frac{p_2}{p_B}\right) = -0,53179 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\Delta S = m_{A1}(s_2 - s_{A1}) + m_{B1}(s_2 - s_{B1}) = \underline{\underline{3,25 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}}}$$

ML. ✓



## Einheit für Entropie

Entropie  $S: \left[ \frac{\text{J}}{\text{K}} \right] \sim \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{K}} \right]$

massenspezifische Entropie  $s: \left[ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right] \sim \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$

→ Gleiche Einheit wie Gaskonstante R

$$S = m \cdot s$$

Diese und analog andere Beziehung

wie.  $V = m \cdot v$     $U = m \cdot u$     $W = m \cdot w$

müsst ihr Können !

b) Bestimmen Sie die Entropieerzeugung  $S_{\text{erz}}$  bei diesem Ausgleichsprozess.

ZF

Geschlossenes System: 
$$\frac{dS}{dt} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{S}_{\text{erz}} \quad \Delta S = S_2 - S_1 = m(s_2 - s_1) = \sum_j \frac{Q_j}{T_j} + S_{\text{erz}}$$

$$\Delta S = 3,25 \frac{\text{kJ}}{\text{K}} \quad \text{aus a)}$$

$$\Delta S = \frac{Q}{T} + S_{\text{erz}} \Rightarrow S_{\text{erz}} = \Delta S = 3,25 \frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

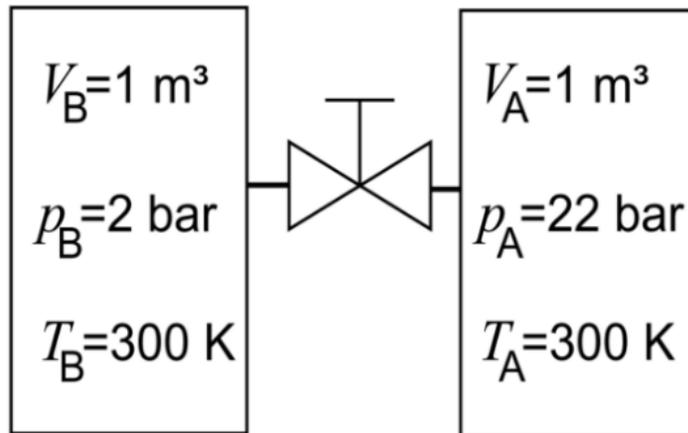
↓  
0, adiabatisch

Temperatur ausgleichen können. Während dieses Prozesses wird keine Wärme mit der Umgebung ausgetauscht. Aus der Energiebilanz folgt für die Temperatur nach dem Ausgleich  $T_2 = 300 \text{ K}$ .

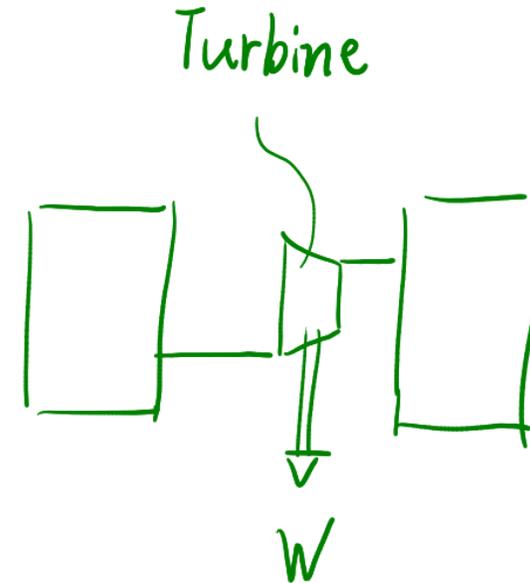
Per Definition:  $S_{\text{erz}} > 0 \Rightarrow$  irreversibel

# Welche Bedeutung hat diese Entropie und Entropieerzeugung für uns?

Drossel, irreversible Druckentspannung, Entropieerzeugung  $\longrightarrow$  Druckentspannung kann man nutzen

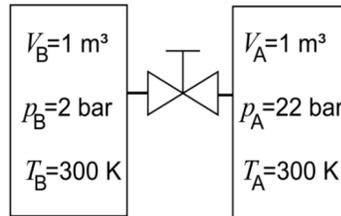


Macht nix!

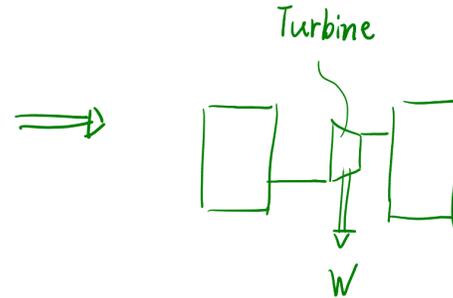


Strom generieren,  
Gewicht hochheben...

Welche Bedeutung hat diese Entropie und Entropieerzeugung für uns?



Entropieerzeugung



Strom generieren,  
Gewicht hochheben...

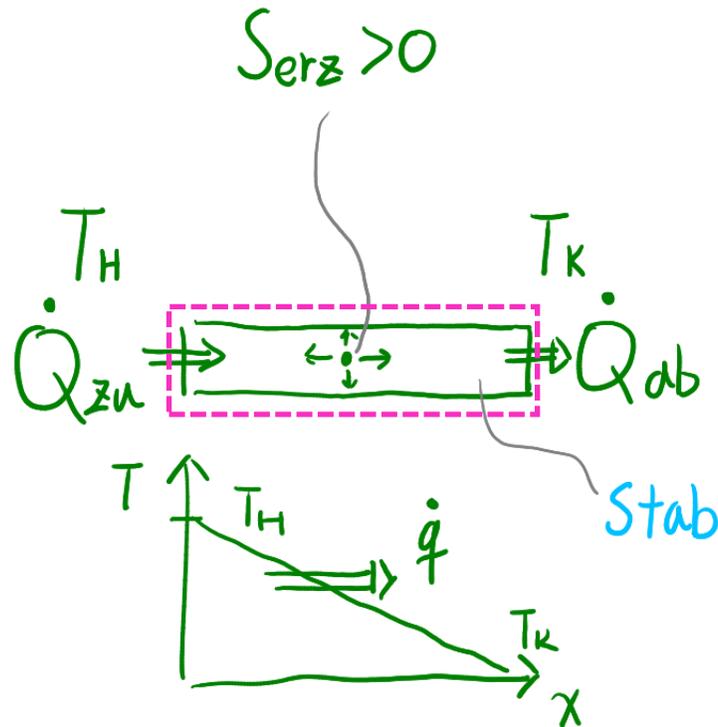
Wo die Entropieerzeugung  $> 0$  ist, ist wo, wir die Arbeit raus holen könnten.

Welche Bedeutung hat diese Entropie und Entropieerzeugung für uns?

Wo die Entropieerzeugung  $> 0$  ist, ist wo, wir die Arbeit raus holen könnten.

irreversibel Wärmeübertragung entlang eine Temp. Gradient.

Entropieerzeugung



Herleitung für Entropieerzeugung

Energie B.  $\Rightarrow \dot{Q}_{zu} = \dot{Q}_{ab}$

ZF.  $\frac{dS}{dt} = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{S}_{erz}$

Entropie B.  $\Rightarrow \frac{dS}{dt} = \frac{\dot{Q}_{zu}}{T_H} - \frac{\dot{Q}_{ab}}{T_K} + \dot{S}_{erz}$

stationär  $\downarrow$

(Klein - Groß)

$0 =$        $\downarrow$        $\uparrow$

Negativ      + Positiv

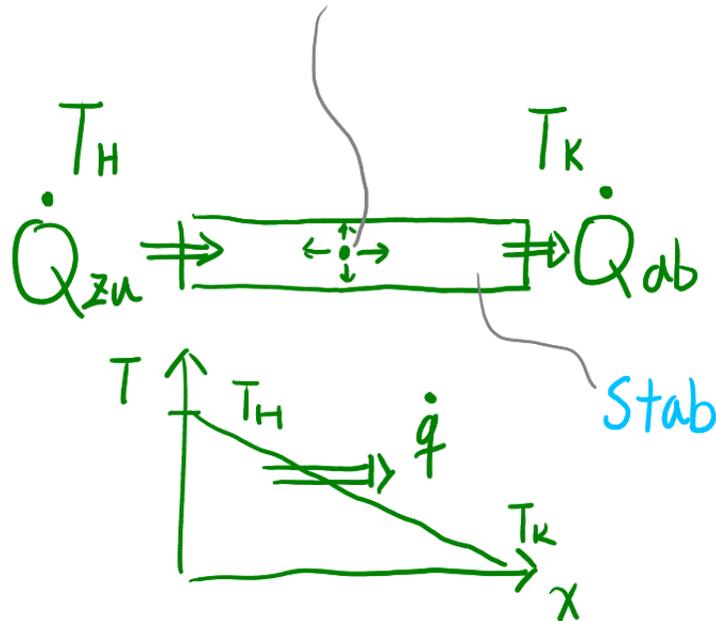
Welche Bedeutung hat diese Entropie und Entropieerzeugung für uns?

Wo die Entropieerzeugung  $> 0$  ist, ist wo, wir die Arbeit raus holen könnten.

irreversibel Wärmeübertragung entlang eine Temp. Gradient.

Entropieerzeugung

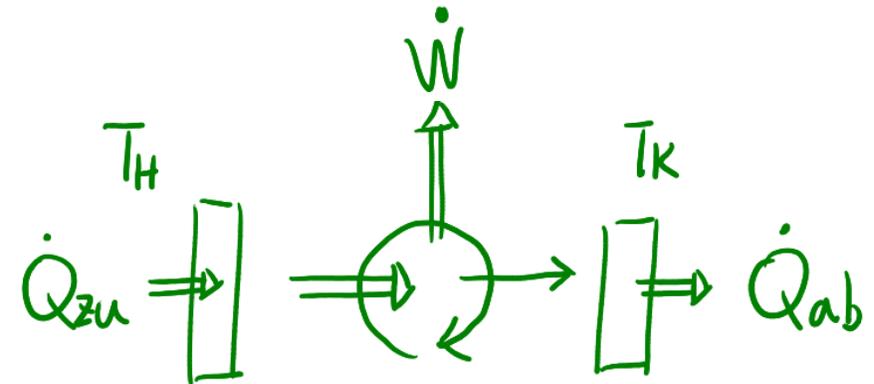
$S_{erz} > 0$



Man kann Arbeit ausholen, indem man eine Wärmekraft Maschine dem Stab ersetzen

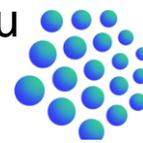


Strom generieren, Auto treiben, Gewicht hochheben...



Wärmekraft Maschine

Dem Fall  $\dot{Q}_{zu} \neq \dot{Q}_{ab}$

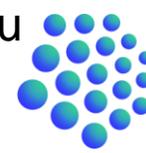


# Typische Irreversibilitäten ( $S_{erz} > 0$ )

Wo die Entropieerzeugung  $> 0$  ist, ist wo, wir die Arbeit raus holen könnten.

- Wärmeübertragung bei einer endlichen Temperaturdifferenz (immer von  $T_{heiss}$  nach  $T_{kalt}$ ) Wärmekraftmaschine bauen
- Unkontrollierte Expansion von Fluiden zu einem tieferen Druck Turbine, Kartoffelkanone bauen
- Spontane chemische Reaktionen Motoren, Jet, Fuel-Cell, Raketen bauen
- Spontane Mischung von Materie unterschiedlicher Zusammensetzung oder in unterschiedlichen Zuständen Säure mit Wasser -> exotherm
- Gleitreibung (zwischen Festkörpern als auch in Fluiden)
- Inelastische Deformation Verlust minimieren -> Nutzarbeit maximieren
- Stromleitung durch elektrische Widerstände

Entropie ist eine Wissensbrücke zur Exergie(kommt noch)



## Geschafft!

SRÜ:

7.3

Annahme durchlesen!

Recap die Sachen von Zustandsänderung, und Definition von Carnot Prozess.

7.4 b) Entropie Bilanz,  $S_{erz} \geq 0$

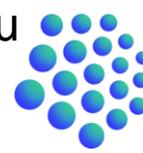
Falls Entropieerzeugung  $> 0$  -> Prozess irreversible

Prozess läuft immer in der Richtung:  $S_{erz} \geq 0$

YT Video von „Veritasium“ über Entropie: <https://youtu.be/DxL2HoqLbyA>

Danke für die Aufmerksamkeit!





# Selbstrechenübung

## Feedback

