

# Gleichgewichte in der Troposphäre

*F. Herrmann*



[www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de](http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de)

## KPK Sek II Thermodynamik:

### 6. Gekoppelte Ströme

#### 8.3 Schichtungen in Gasen

1. Einfache Gleichgewichte
2. Gleichgewichte bei Kopplung
3. Schichtung von Flüssigkeiten
4. Schichtung von Gasen
5. Die gut durchmischte Troposphäre

## *Gleichgewicht:*

Aussage über mindestens zwei Systeme, die eine „extensive“ Größe austauschen können

Im Gleichgewicht hat die zugehörige intensive Größe Teilsystemen denselben Wert.

*extensiv*

Volumen  $V$

Entropie  $S$

Impuls  $\mathbf{p}$

elektr. Ladung  $Q$

Stoffmenge  $n$

*intensiv*

Druck  $p$

Temperatur  $T$

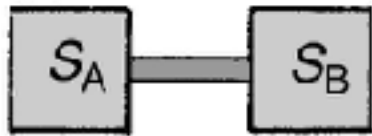
Geschwindigkeit  $\mathbf{v}$

elektr. Potenzial  $\varphi$

chem. Potenzial  $\mu$



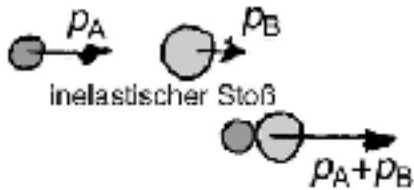
$$p_A = p_B$$



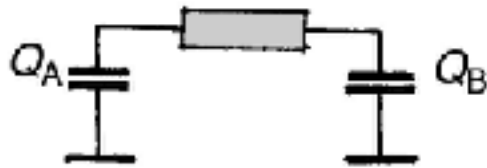
$$T_A = T_B$$

Gleichgewicht:  
Zustand maximaler Entropie

Wenn Entropie abgeführt wird:  
Zustand minimaler Energie



$$V_A = V_B$$



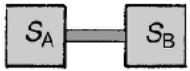
$$\varphi_A = \varphi_B$$



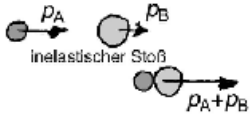
$$\mu_A = \mu_B$$



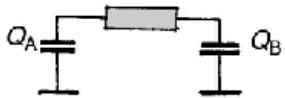
$$p_A = p_B$$



$$T_A = T_B$$



$$v_A = v_B$$



$$\varphi_A = \varphi_B$$



$$\mu_A = \mu_B$$

Gleichgewicht:  
Zustand maximaler Entropie

Wenn Entropie abgeführt wird:  
Zustand minimaler Energie

$T_1$

$T_2$

$T_3$

$T_4$

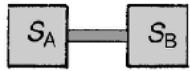
$T_5$

$T_6$

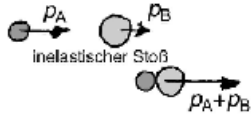




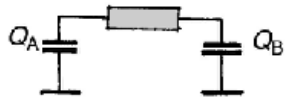
$$p_A = p_B$$



$$T_A = T_B$$



$$v_A = v_B$$



$$\varphi_A = \varphi_B$$



$$\mu_A = \mu_B$$

Gleichgewicht:  
Zustand maximaler Entropie

Wenn Entropie abgeführt wird:  
Zustand minimaler Energie

$$T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_5 = T_6$$



1. Einfache Gleichgewichte
2. Gleichgewichte bei Kopplung
3. Schichtung von Flüssigkeiten
4. Schichtung von Gasen
5. Die gut durchmischte Troposphäre



Manchmal sind 2 oder mehr extensive Größen aneinander „gekoppelt“.

*Beispiel:* bewegliche Ladungsträger

Ladung, Masse und Stoffmenge sind fest aneinander gekoppelt.  
(Die Entropie ist schwach an die anderen gekoppelt.)

*Man kann die Ladungsträger bewegen durch*

elektrisches Potenzialgefälle (in einem Widerstand)

chemisches Potenzialgefälle (in einer Batterie)

Temperaturgefälle (in einem Peltierelement)

Im Allgemeinen ist die Antriebsgröße ein „Kombipotenzial“:

*Beispiel: elektrischer und chemischer Antrieb*

$$\eta = \mu + F\varphi$$

The diagram illustrates the equation  $\eta = \mu + F\varphi$ . A blue arrow points from the label "elektrochemisches Potenzial" to the symbol  $\eta$ . A red arrow points from the label "chemisches Potenzial" to the symbol  $\mu$ . A green arrow points from the label "elektrisches Potenzial" to the symbol  $\varphi$ . A black arrow points from the label "Faradaykonstante" to the symbol  $F$ .

Im Gleichgewicht ist  $\eta$  überall gleich, obwohl  $\mu$  und  $\varphi$  nicht gleich sind:

**elektrochemisches Gleichgewicht**

1. Einfache Gleichgewichte
2. Gleichgewichte bei Kopplung
3. Schichtung von Flüssigkeiten
4. Schichtung von Gasen
5. Die gut durchmischte Troposphäre

chemisches  
Potenzial

Gravitationspotenzial  
 $\psi = g \cdot h$

gravitochemisches Potenzial  
 $\gamma = \mu + M \cdot g \cdot h$



$\mu$  klein ( $p$  klein)

$\psi$  groß ( $h$  groß)

Warum geht das  
Wasser nicht von  
unten nach oben?

Warum geht das  
Wasser nicht von  
oben nach unten?

$\mu$  groß ( $p$  groß)

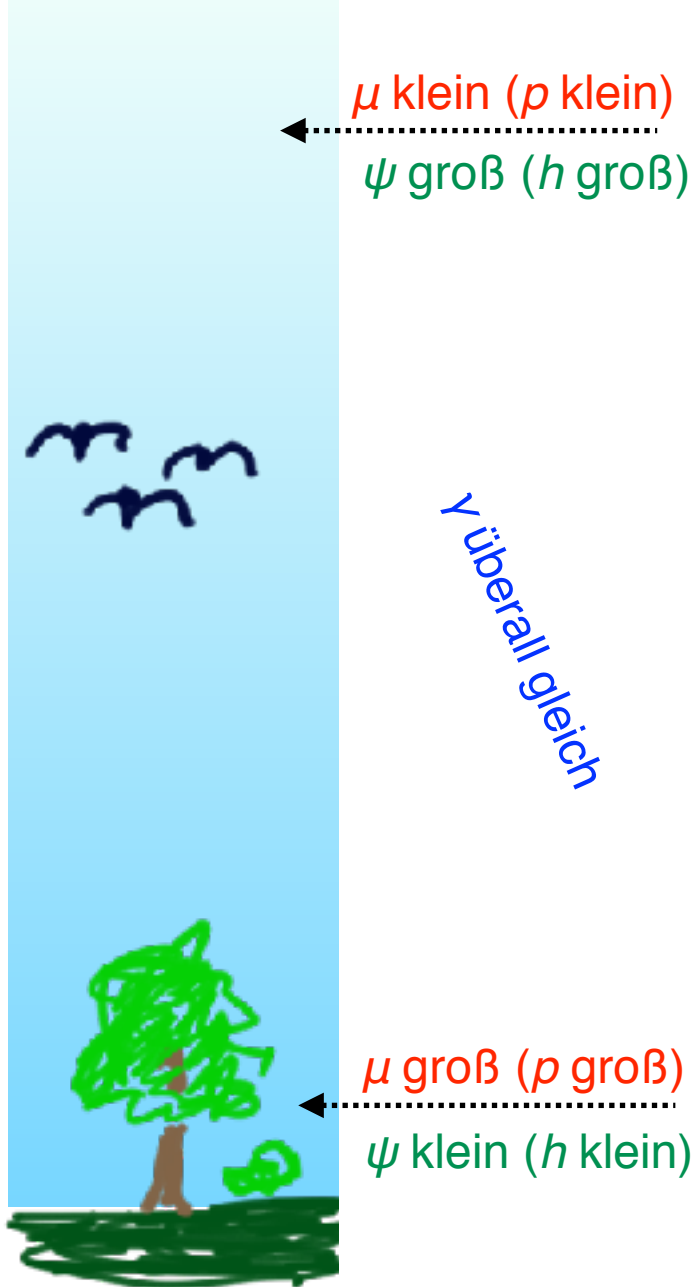
$\psi$  klein ( $h$  klein)

$\gamma$  überall gleich

gravitochemisches Gleichgewicht

indifferente Schichtung

1. Einfache Gleichgewichte
2. Gleichgewichte bei Kopplung
3. Schichtung von Flüssigkeiten
4. Schichtung von Gasen
5. Die gut durchmischte Troposphäre



gravitochemisches Gleichgewicht

liefert barometrische Höhenformel

$$p(h) = p(0) \cdot e^{-\left(\frac{Mgh}{RT}\right)}$$

Voraussetzung:  $T$  unabhängig von  $h$

**Völlig unrealistisch!**

1. Einfache Gleichgewichte
2. Gleichgewichte bei Kopplung
3. Schichtung von Flüssigkeiten
4. Schichtung von Gasen
5. Die gut durchmischte Troposphäre

thermische Leitfähigkeit der Luft sehr gering

gute Näherung: isentrop, nicht isotherm

Entropie praktisch fest gekoppelt an Stoffmenge

drei Antriebe:

Gefälle von	zieht an	Richtung
Gravitationspotenzial	Masse	nach unten
chemisches Potenzial	Stoffmenge	nach unten
Temperatur	Entropie	nach oben

„Dreierpotenzial“

$$\varepsilon = \mu + M \cdot \psi + s \cdot T$$



$$\varepsilon = \mu + M \cdot \psi + s \cdot T$$

gravito-thermo-chemisches Potenzial

gravito-thermo-chemisches Gleichgewicht

molare Entropie hat keinen festen Wert

Gut durchmischen     indifferente Schichtung

„trocken-adiabatische Schichtung“

$\varepsilon$  = „potenzielle Temperatur“

$$p(h) = p(0) \left( 1 - \frac{Mg}{c_p T_0} \cdot h \right)^{\frac{c_p}{R}}$$

$$T(h) = T(0) - \frac{Mg}{c_p} \cdot h$$

natürliches Druckgefälle

nicht exponentiell!

natürliches Temperaturgefälle

linear!    1 K/100 m

**EN**

**DE**