

Biophysik für Pharmazeuten

10.04.2019

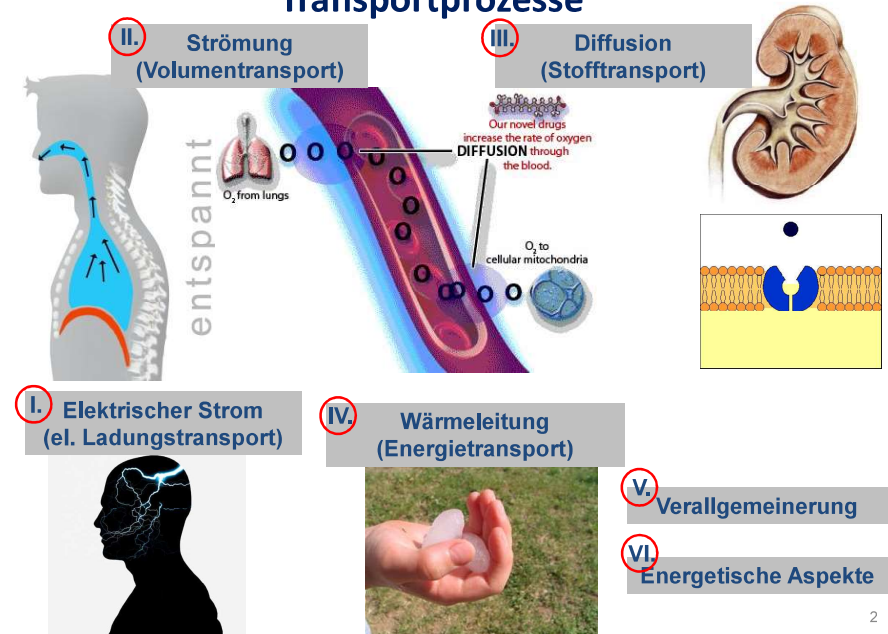
Transportprozesse

Osmose, Wärmelitung,
Verallgemeinerung
Energetische Beziehungen



1

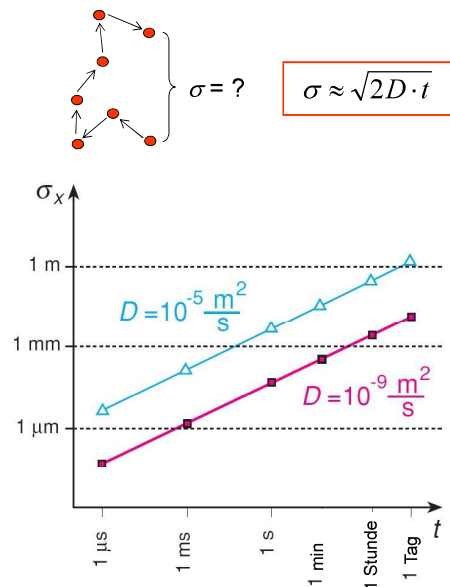
Transportprozesse



2

4. Diffusion als Random Walk

Zur Erinnerung

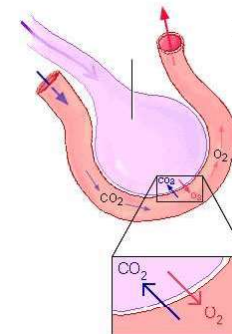


Diffundierendes Teilchen (Molmasse)	Medium	D (m ² /s)
H ₂ (2)	Luft	6,4·10 ⁻⁵
O ₂ (32)	Luft	2·10 ⁻⁵
CO ₂ (44)	Luft	1,8·10 ⁻⁵
H ₂ O (18)	Wasser	2,2·10 ⁻⁹
O ₂ (32)	Wasser	1,9·10 ⁻⁹
Glyzin (75)	Wasser	0,9·10 ⁻⁹
Serum Albumin (69 000)	Wasser	6·10 ⁻¹¹
Tropomiozin (93 000)	Wasser	2,2·10 ⁻¹¹
Tabakmosaikvirus (40 000 000)	Wasser	4,6·10 ⁻¹²

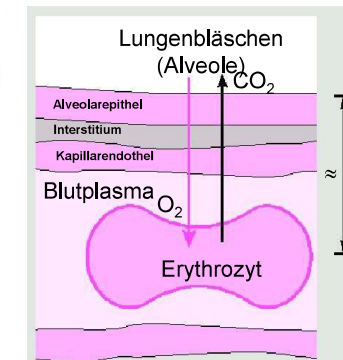
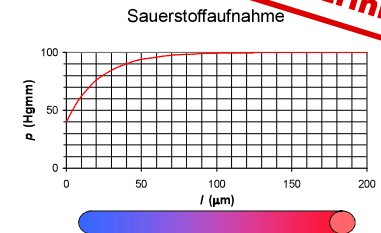
3

5. Anwendungen ■ O₂/CO₂-Diffusion Lunge-Blut

Zur Erinnerung



➤ 1. Ficksches Gesetz:



➤ Random Walk:
1 μm ⇒ 1 ms

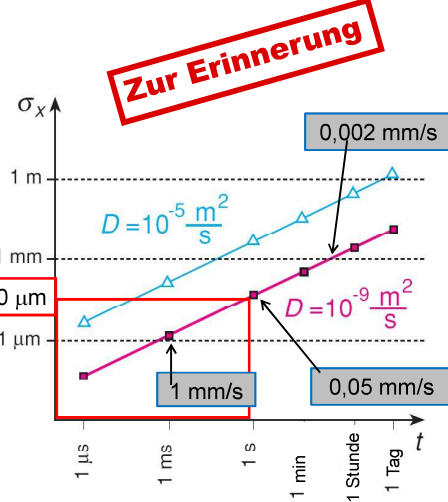
4

- Welche ist „schneller“ für O₂-Transport im Gewebe? Diffusion ↔ Blutströmung

Gefäß	Kapillaren
A (cm ²)	4500
v (cm/s)	0,022 (= 0,22 mm/s)

Blutströmung ist schneller

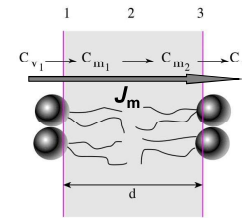
Diffusion ist schneller



5

- Diffusion durch eine Membran (passiver Transport)

Für neutrale Teilchen:

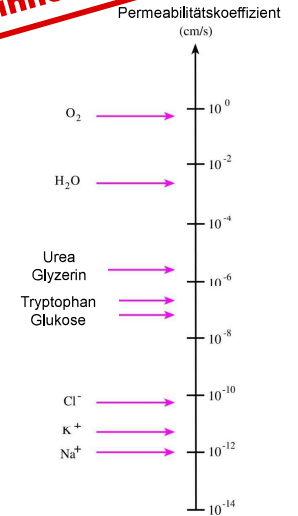


$$J_m = -D \cdot \frac{\Delta c}{\Delta x} = -D \cdot \frac{c_{m2} - c_{m1}}{d} = -p(c_{v2} - c_{v1})$$

$$J_m = -p(c_{v2} - c_{v1})$$

Permeabilitätskoeffizient (m/s)

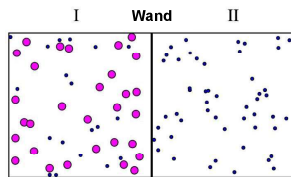
Zur Erinnerung



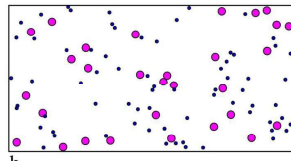
6

Diffusion (Fortsetzung)

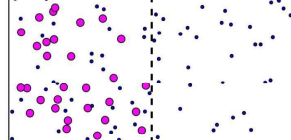
- Osmose



a ohne Wand



b semipermeable Wand



c

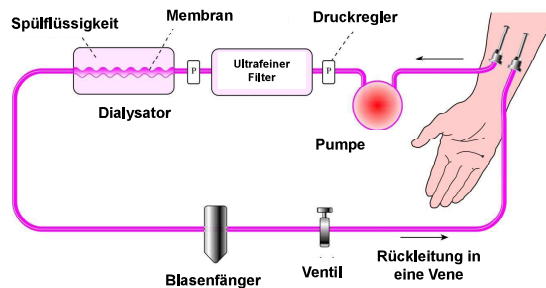


Van't Hoff-Gesetz:

$$p_{\text{Osmose}} = cRT$$



J. H. van't Hoff
1852-1911
Chemiker



7

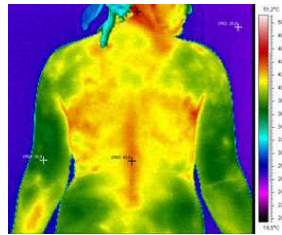
Analogie

	Was strömt?	Stärke?	Was treibt die Strömung?	Zusammenhang?	
Ladungs-transport	q	$J_q = \frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$	φ	$-\frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$	$J_q = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
Volumen-transport	V	$J_V = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$	p	$-\frac{\Delta p}{\Delta l}$	$J_V = -\frac{R^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$
Stoff-transport	v	$J_v = \frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t}$	c	$-\frac{\Delta c}{\Delta x}$	$J_v = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$

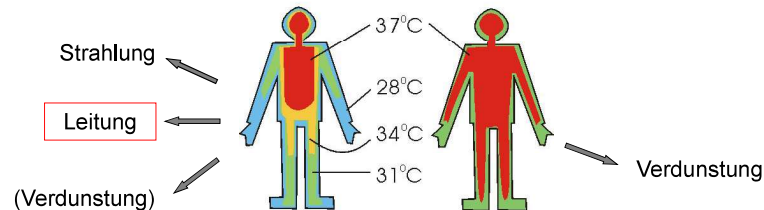
8

Wärmebildung und -abgabe

Aktivität	Wärme- bildung (W)
In Ruhe	115
Langsames Spazieren	260
Radfahren (15 km/h)	420
Treppen- steigen (2/s)	700
Laufen (15 km/h)	1150



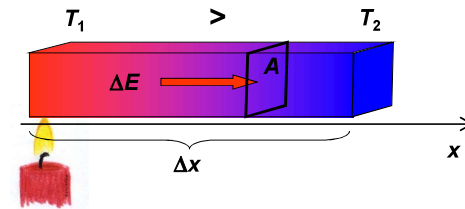
Umgebungstemperatur
20°C ← 35°C



IV. Wärmeleitung (Energietransport)



J. B. J. Fourier
1768-1830
Mathematiker
Physiker

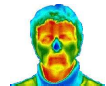


$$\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Stoff	λ (W/(m·K))
Silber	420
Glas	1
Wasser	0,6
Muskel	0,4
Fett	0,2
Luft	0,025



$T_{\text{Körper}} = 28^\circ\text{C}$
 $T_{\text{Umgebung}} = 20^\circ\text{C}$
 $A = 1,8 \text{ m}^2$
 $\Delta x = 8 \text{ mm}$
 Verdunstung:
 50 ml/h
 1600 ml/h



9

10

V. Zusammenfassung

	Was strömt?	Stärke?	Warum?	Zusammenhang?
Ladungs- transport	q	$\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t}$	φ	$-\frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$ $\frac{\Delta q}{A \cdot \Delta t} = -\sigma \frac{\Delta \varphi}{\Delta l}$
Volumen- transport	V	$\frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t}$	p	$-\frac{\Delta p}{\Delta l}$ $\frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} = -\frac{r^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta l}$
Stoff- transport	v	$\frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t}$	c^*	$-\frac{\Delta c}{\Delta x}$ $\frac{\Delta v}{A \cdot \Delta t} = -D \frac{\Delta c}{\Delta x}$
Energie- transport	E	$\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t}$	T	$-\frac{\Delta T}{\Delta x}$ $\frac{\Delta E}{A \cdot \Delta t} = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$
allgemein	x_{ext} $J = \frac{\Delta x_{\text{ext}}}{A \cdot \Delta t}$	y_{int} $X = -\frac{\Delta y_{\text{int}}}{\Delta x}$	extensive Gr. Strom- dichte	intensive Gr. thermo- dynamische Kraft onsagersche Beziehung

* Im allgemeinen Fall μ

Extensive Größe:

- additiv
- Im Gleichgewicht proportional zur Ausbreitung des Systems
- In Transportprozessen: die transportierte Größe

Intensive Größe:

- nicht-additiv
- Im Gleichgewicht überall gleich in dem System
- In Transportprozessen: die sich ausgleichende Größe

Gleichgewicht: es gibt keine Transportprozesse.

0. Hauptsatz der Thermodynamik: Gleichgewicht = homogene Verteilung der intensiven Größen

inhomogene Verteilung der intensiven Größen \Rightarrow **Transportprozesse**

Stärke und Richtung des Transportprozesses:

$$J = LX$$

Onsagersche Beziehung

→ Richtung: homogene Verteilung

2. Hauptsatz der Thermodynamik

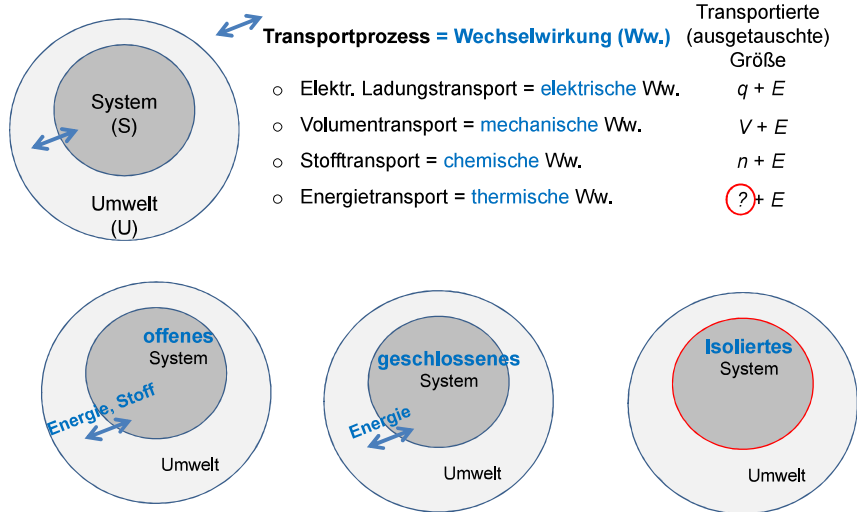
Irreversibilität

11

12

VI. Energetische Beziehungen (Thermodynamik)

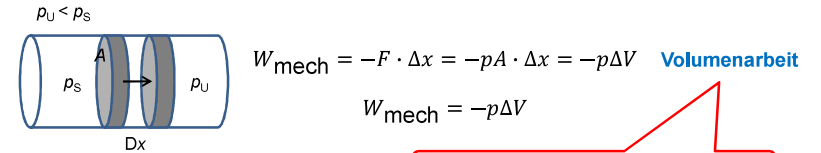
1. Nomenklatur



13

2. Energietausch (Arbeit) in den einzelnen Wechselwirkungen

- Volumentransport = mechanische Ww.



Bemerkung:

$$-p_S \Delta V \neq -p_U \Delta V !!!$$

$$W_{\text{mech, S}} \neq W_{\text{mech, U}} !!!$$

kein „Energieaustausch“

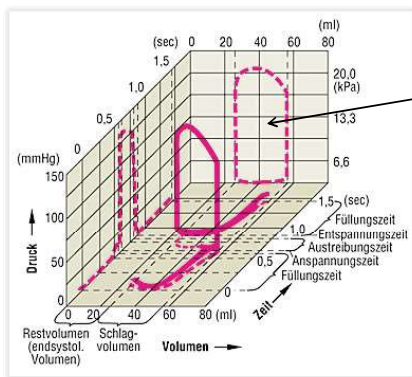
An dem System geleistete Arbeit!

$$-p_S \Delta V = -p_U \Delta V \text{ nur, wenn } p_U = p_S$$

Gleichgewicht, kein Prozess!

$p_S \neq p_U$
aber quasistationäre Prozessführung („reversible Prozesse“)!
(in kleinen Schritten immer nah dem Gleichgewicht)
 $W_{\text{mech, S}} = W_{\text{mech, U}}$

14



Volumenarbeit des Herzens (des linken Ventrikels):

$$W_{\text{mech}} \approx 20000 \cdot 0,00003 = 0,6 \text{ J}$$

Volumenarbeit bei isothermischer Ausdehnung eines Gases (wenn $p \neq \text{konstant}$):

$$W_{\text{mech}} = - \int_{V_1}^{V_2} p dV = - \int_{V_1}^{V_2} \frac{vRT}{V} dV = -vRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{V} dV = -vRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

15

- Elektr. Ladungstransport

$$= \text{elektrische Ww.} \quad W_{\text{elektr}} = \varphi \Delta q$$

- allgemein

$$W = y_{\text{int}} \cdot \Delta x_{\text{ext}}$$

- Stofftransport

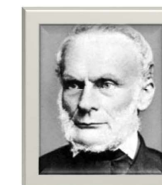
$$= \text{chemische Ww.} \quad W_{\text{chem}} = \mu \Delta v \quad (\text{nur wenn } \mu \text{ konstant})$$



wenn $\mu \neq \text{konstant}$:

$$W_{\text{chem}} = vRT \ln \frac{c_2}{c_1}$$

- Energietransport = thermische Ww. $Q = W_{\text{therm}} = T\Delta S = T\Delta S$



Rudolf Julius Emmanuel Clausius (1822-1888) Physiker

Entropie

(entrepein (gr) = umkehren)

16

2. Innere Energie (E): Summe aller kinetischen und potenziellen Energien innerhalb des Systems

3. Erster (1.) Hauptsatz der Thermodynamik

$$\Delta E = W_{\text{mech}} + W_{\text{elektr}} + W_{\text{chem}} + W_{\text{therm}} \quad (= W + Q)$$

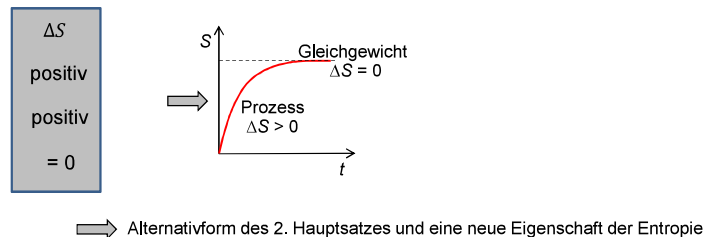
$$\Delta E = -p\Delta V + \varphi\Delta q + \mu\Delta v + T\Delta S = \sum y_{\text{int}} \cdot \Delta x_{\text{ext}}$$

4. Entropie (S) – phenomenologische Definition:

$$Q = W_{\text{therm}} = T\Delta S \quad \Rightarrow \quad \Delta S = \frac{Q_{\text{rev}}}{T} \quad (\text{bei reversibler Prozessführung: } Q_{\text{rev, System}} = Q_{\text{rev, Umwelt}})$$

wenn $T \neq \text{konstant}$:

$$\Delta S = cm \ln \frac{T_2}{T_1}$$



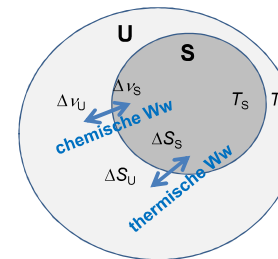
Zweiter (2.) Hauptsatz der Thermodynamik: In einem isolierten System verlaufen spontane Prozesse nur in der Richtung der Entropiezunahme.

Entropie: Sie ist keine Erhaltungsgröße, sie wird in Ausgleichsprozessen produziert.

⇒ „Wärmetod (Entropietod)“ des Universums

5. Zweiter (2.) Hauptsatz der Thermodynamik: In einem isolierten System verlaufen spontane Prozesse nur in der Richtung des Ausgleichs.

Beispiel: Konzentrationsausgleich (Ausgleich des chemischen Potentials) zwischen System (S) und Umwelt (U)



$$\Delta E_S = -\Delta E_U \rightarrow \Delta E_S + \Delta E_U = 0$$

$$\Delta v_S = -\Delta v_U$$

$$\Delta E_S = \mu_S \cdot \Delta v_S + T \cdot \Delta S_S \rightarrow \Delta S_S = \frac{\Delta E_S - \mu_S \cdot \Delta v_S}{T}$$

$$\Delta E_U = \mu_U \cdot \Delta v_U + T \cdot \Delta S_U \rightarrow \Delta S_U = \frac{\Delta E_U - \mu_U \cdot \Delta v_U}{T}$$

$$\Delta S = \Delta S_S + \Delta S_U = \frac{\Delta E_S - \mu_S \cdot \Delta v_S}{T} + \frac{\Delta E_U - \mu_U \cdot \Delta v_U}{T} =$$

Voraussetzungen:

- thermisches Gleichgewicht: $T_S = T_U = T$
- stabile Wand \Rightarrow keine mechanische Ww
- elektrische Ww wird vernachlässigt

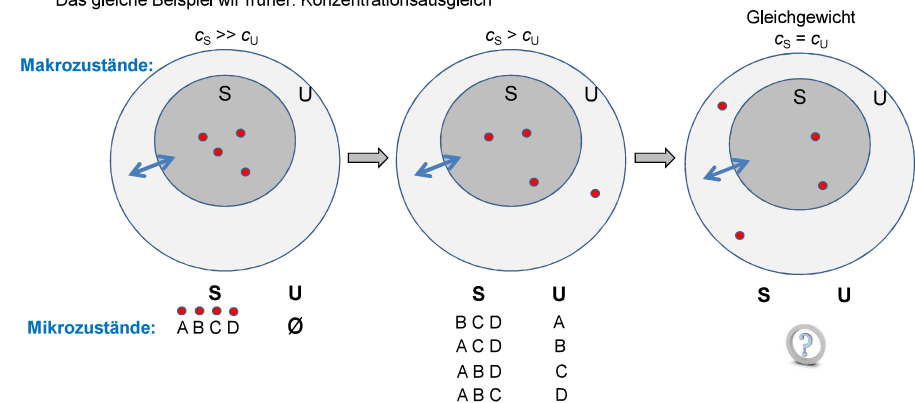
$$= \frac{\Delta v_S}{T} \cdot (\mu_U - \mu_S)$$

	$(\mu_U - \mu_S)$	$\frac{\Delta v_S}{T}$	ΔS
$\mu_U < \mu_S$	negativ	negativ	positiv
$\mu_U > \mu_S$	positiv	positiv	positiv
$\mu_U = \mu_S$	= 0	= 0	= 0

Alle Möglichkeiten:

6. Entropie (S) – statistische Definition:

Das gleiche Beispiel wie früher: Konzentrationsausgleich



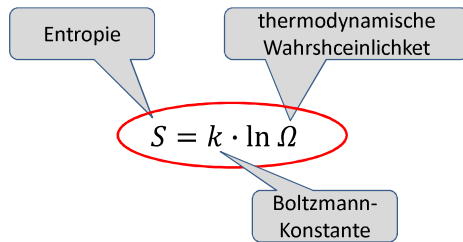
Thermodynamische Wahrscheinlichkeit (Ω): Anzahl der zu einem Makrozustand gehörenden Mikrozustände

$$\Omega = \frac{1}{4} \rightarrow 6$$

In dieser Richtung nehmen zu: ✓ Ω

✓ Unordnung

✓ Entropie



Die Entropie ist ein Maß für die Unordnung.



Ludwig Eduard Boltzmann
(1844-1906)
Physiker

7. Thermodynamische Potenzialfunktionen Für die Beschreibung von Prozessen bei speziellen Bedingungen

o Innere Energie (E)

o Enthalpie (H): $H = E + pV$

Im Spezialfall:

- $p = \text{konstant}$
- chemische und elektrische Arbeit werden vernachlässigt

$$\Delta H = \Delta E + \Delta(pV) = \Delta E + \cancel{\Delta p \cdot V} + p \cdot \Delta V = -p \cdot \Delta V + T\Delta S + p \cdot \Delta V = T\Delta S = Q_p$$

o Freie Energie (F): $F = E - TS$

Im Spezialfall:

- $T = \text{konstant}$
- $V = \text{konstant}$
- elektrische Arbeit wird vernachlässigt

$$\Delta F = \mu\Delta v = W_{\text{chem}} \quad \text{Bei spontanen Prozessen: } \Delta F < 0$$

o Freie Enthalpie (G): $G = H - TS = E + pV - TS$

Im Spezialfall:

- $T = \text{konstant}$
- $p = \text{konstant}$
- elektrische Arbeit wird vernachlässigt

$$\Delta G = \mu\Delta v = W_{\text{chem}} \quad \text{Bei spontanen Prozessen: } \Delta G < 0$$