

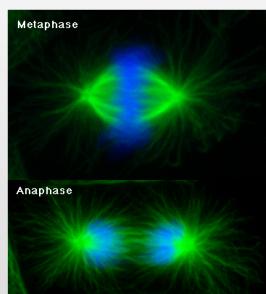
II. Physikalische Konzepte für die Zelle

Experimental Physics I, University of Bayreuth

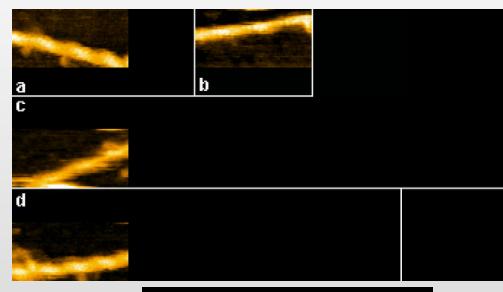


Warum Physik in der Zelle betrachten?

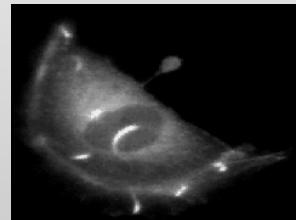
Kräfte und Strukturbildung
während der Zellteilung



Bewegung einzelner Motorproteine



Bewegung von Bakterien in Zellen



Experimental Physics I, University of Bayreuth



Warum Physik in der Zelle betrachten?

Bewegung von Zellen



Entwicklung ganzer Organismen



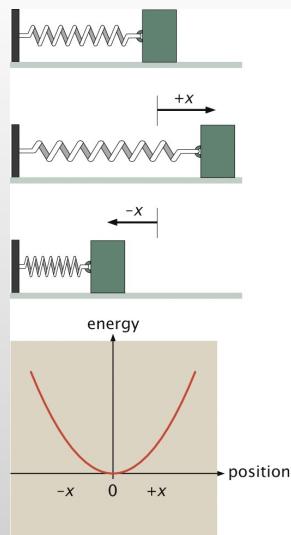
Jede Menge Phänomene jenseits der Genetik & Molekularbiologie.

Quantitatives, grundlegendes Verständnis statt qualitative Beschreibung.

Experimental Physics I, University of Bayreuth



Grundbegriffe - Kraft und Energie



Kraft ist eine gerichtete Größe (Vektor), die den Bewegungszustand eines Objekts verändern kann.

Newton'sche Gesetze verbinden Bewegungszustand $x(t)$ mit Kraft.

Energie ist die Möglichkeit Kraft entlang eines gerichteten Weges zu entfalten.

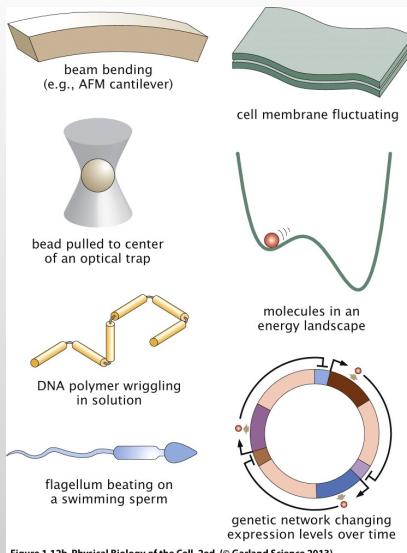
Experimentelle Beobachtung:
Zugkraft einer Spiralfeder ist proportional zur Auslenkung.

Figure 1.12a Physical Biology of the Cell, 2ed. (© Garland Science 2013)

Experimental Physics I, University of Bayreuth



Elastizität (-> Feder) und Bewegung



Experimental Physics I, University of Bayreuth



Zwei kleine Übungen dazu

Ein globuläres Protein wird im Muskel um 2nm elongiert. Die gespeicherte Energie beträgt $43 \cdot 10^{-21} \text{ J}$.

- Wie groß ist die Kraftkonstante des Proteins?
- Welche Kraft muss ein molekularer Motor aufwenden, wenn er diese Elongation aufrecht erhalten will?

$$E = kx^2/2, F = kx \Rightarrow k = 21.5 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}, F = 42.5 \text{ pN}$$

Die typische Energieeinheit in der Zelle ist die thermische Energie (ca. $4.3 \cdot 10^{-21} \text{ J}$). Die Hydrolyse von ATP liefert einem Motor eine 10fach höhere Energie.

Welche Maximalkraft kann der Motor bei einem 8nm-Schritt entwickeln?

$$E = kx^2/2, F = kx \Rightarrow \text{ca. } 11 \text{ pN}$$

Experimental Physics I, University of Bayreuth



Jetzt mit Reibungskraft...

Einfachstes Reibungsmodell (Stokes-Reibung): $F = -\gamma v$

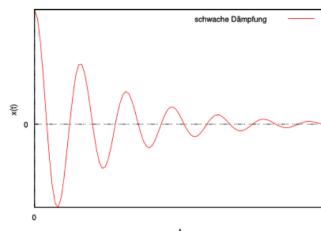
nicht als Gradient eines Potentials darstellbar (keine konservative Kraft)!

Harmonischer Oszillator mit Stokes-Reibung

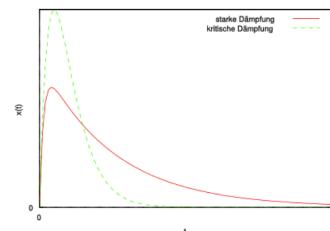
$$\text{Gesamtkraft } \vec{F} = -k\vec{x} - \gamma\vec{v}$$

$$\frac{d^2}{dt^2}x_1 + \frac{\gamma}{m} \frac{d}{dt}x_1 + \frac{k}{m}x_1 = 0$$

Schwache Dämpfung



Starke Dämpfung



Experimental Physics I, University of Bayreuth



Wie der Physiker zählt...

Skalierungen (z.B. $A \sim t$) und Größenordnungen wichtig

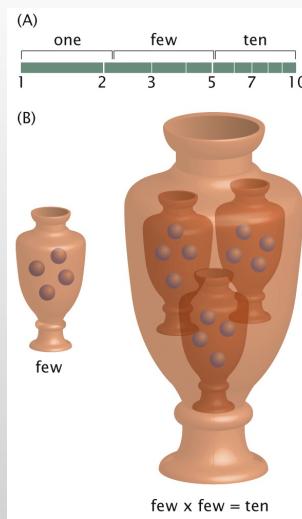


Figure 1.15 Physical Biology of the Cell, 2ed. (© Garland Science 2013)

Experimental Physics I, University of Bayreuth



Statistische Physik #1

Anwendung

Auswertung vieler Einzelmessungen (klar)

Beschreibung eines Ensembles von Teilchen

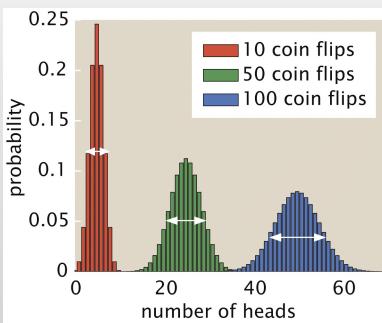


Figure 2.7b: Physical Biology of the Cell, 2nd. (© Garland Science 2013)

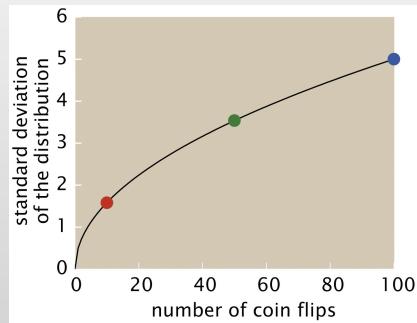


Figure 2.7c: Physical Biology of the Cell, 2nd. (© Garland Science 2013)

Experimental Physics I, University of Bayreuth



Statistische Physik #2

Erfasse alle möglichen Zustände des Systems

z.B. Bindungsreaktion bzw. Konformationsfluktuationen

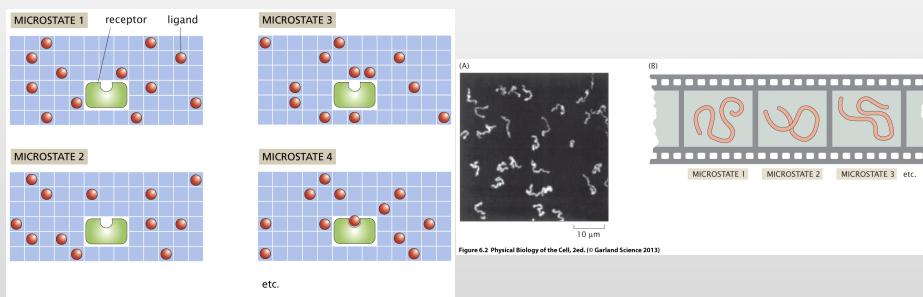


Figure 6.1: Physical Biology of the Cell, 2nd. (© Garland Science 2013)

Anzahl der 'Mikrozustände' Ω definiert die **Entropie**: $S = k_B \ln(\Omega)$

Experimental Physics I, University of Bayreuth



Statistische Physik #3

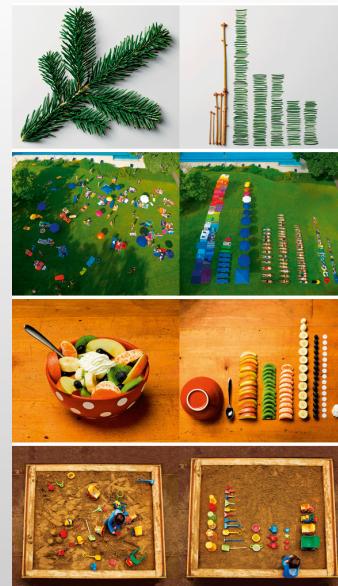
Entropie ist ein Maß für Unordnung

$$S = k_B \ln \Omega$$

2. Hauptsatz der Thermodynamik

Jedes System strebt maximaler Entropie und minimaler Energie zu.

Um Entropie zu senken muss man Energie/Arbeit ins System stecken.



Experimental Physics I, University of Bayreuth



Beispiel zur Entropie – entropische Feder

Konfigurationen eines Polymers (z.B. Polypeptidkette)



$$\Omega=1$$



$$\Omega \gg 1$$



$$\Omega \sim 1$$

Polymer will globuläre, aber nicht kompakte Konfiguration annehmen und beibehalten, d.h. Zug/Druck führt zu elastischem Widerstand ('entropische Feder')

Experimental Physics I, University of Bayreuth



Temperatur (saloppe Definition)

mittlere kinetische Energie von idealen Gasteilchen (Gleichgewicht)

$$\langle E \rangle = m \langle v^2 \rangle / 2 = k_B T \quad (\text{Boltzmann-Konstante als Vorfaktor})$$

keine Bewegung: $T=0K$ (unerreichbar wg. QM, Nernst-Theorem)

Stöße der Gasteilchen: Geschwindigkeitskomponenten gaußverteilt

$$\Rightarrow \text{Boltzmann Energie-Verteilung: } p(E) = \exp(-E/k_B T)$$

Wechsel der Konfiguration (\Rightarrow Entropie!) im Gleichgewicht darf also ca. thermische Energie $k_B T$ kosten

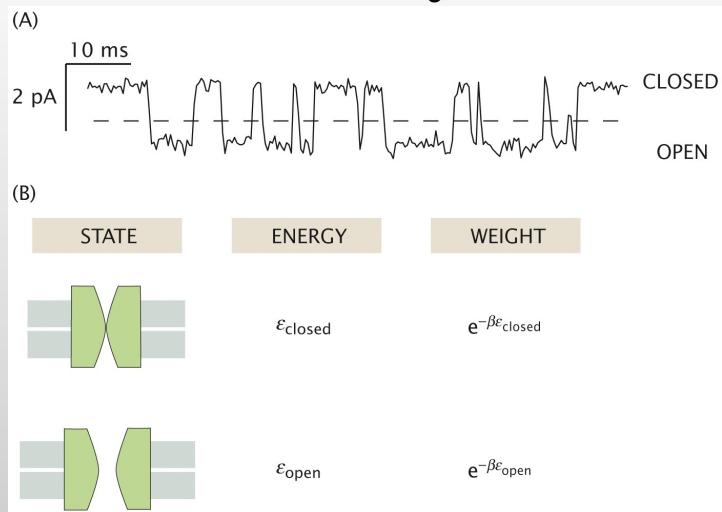
Vgl.: ATP-Hydolyse $\sim 20k_B T$, Bindungs Biotin-Streptavidin $>40k_B T$

Experimental Physics I, University of Bayreuth



Energetisches Gewicht von Zuständen

Boltzmann-Verteilung in Aktion



Experimental Physics I, University of Bayreuth



Energetische Gewichtung der Zustände

STATE	ENERGY	MULTIPLICITY	WEIGHT
(A)	$L\epsilon_{\text{sol}}$	$\frac{\Omega!}{L!(\Omega-L)!} \approx \frac{\Omega^L}{L!}$	$\frac{\Omega^L}{L!} e^{-\beta L\epsilon_{\text{sol}}}$
(B)	$(L-1)\epsilon_{\text{sol}} + \epsilon_b$	$\frac{\Omega!}{(L-1)!(\Omega-L+1)!} \approx \frac{\Omega^{L-1}}{(L-1)!}$	$\frac{\Omega^{L-1}}{(L-1)!} e^{-\beta[(L-1)\epsilon_{\text{sol}} + \epsilon_b]}$

Figure 6.4 Physical Biology of the Cell, 2ed. (© Garland Science 2013)

Experimental Physics I, University of Bayreuth



Was kann man damit ausrechnen?

Boltzmann-Verteilung in Aktion

$$p_{\text{bound}} = \frac{\sum_{\text{states}} \left(\begin{array}{c} \text{Diagram of bound state} \\ \text{with ligands} \end{array} \right)}{\sum_{\text{states}} \left(\begin{array}{c} \text{Diagram of unbound state} \\ \text{without ligands} \end{array} \right) + \sum_{\text{states}} \left(\begin{array}{c} \text{Diagram of bound state} \\ \text{with ligands} \end{array} \right)}$$

Figure 6.5 Physical Biology of the Cell, 2ed. (© Garland Science 2013)

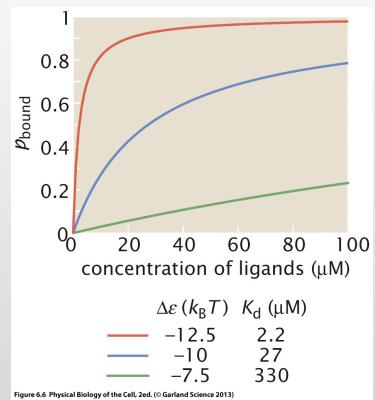


Figure 6.6 Physical Biology of the Cell, 2ed. (© Garland Science 2013)

Experimental Physics I, University of Bayreuth



Teilchenschwarm – zuviel des Guten?

Große Anzahl Teilchen, N getrieben durch thermische Energie und äußerer Potential U

Experimental Physics I, University of Bayreuth



Random walk...

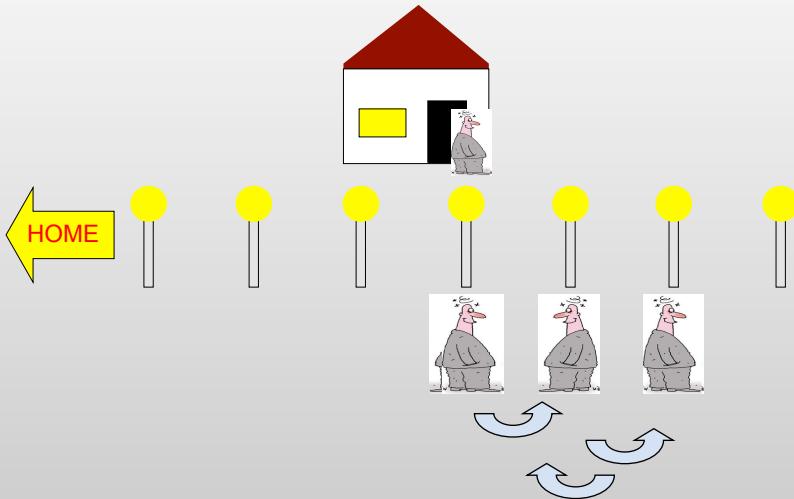


Experimental Physics I, University of Bayreuth



Was ist diffusive Bewegung?

Beobachtung eines Betrunkenen...



Experimental Physics I, University of Bayreuth



Wie lange dauert es bis nach Hause?

Gleiche Wskt. nach links & rechts zu wanken: $p_{left} = p_{right} = 0.5$

=> Wskt. nach N Bewegungen n Lampenpfosten nach links gegangen zu sein

$$P(n|N) = \binom{N}{n} p_{left}^n p_{right}^{N-n} = \frac{N!}{n!(N-n)!} p_{left}^n p_{right}^{N-n}$$

Mittlere Distanz zur Kneipe $\langle n \rangle = \langle n_{right} \rangle - \langle n_{left} \rangle = Np_{right} - Np_{left} = 0$

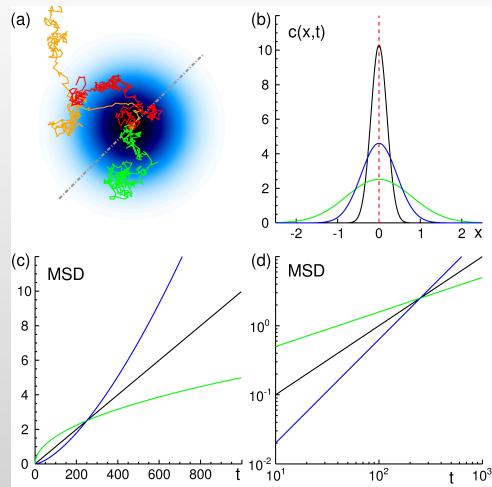
Quadratische Abweichung $\langle n^2 \rangle = 2Np_{left}p_{right}$

Exkursionsfläche steigt mit der Zahl der besuchten Pfosten (=Zeit)
 $\langle x^2 \rangle = 2Dt$

Experimental Physics I, University of Bayreuth



Diffusion im Gleichgewicht



Kurzer Exkurs: anomale Diffusion als Konzept

Experimental Physics I, University of Bayreuth

