

## 10. Enzyme und molekulare Maschinen

• molekulare Maschinen: chemische Energie  $\rightarrow$  Bewegung

### 10.1. Molekulare Schritte in der Zelle

#### 10.1.1. Überblick

#### 10.1.2. Enzyme

#### 10.1.3. Zyklische Motoren in eukaryotischen Zellen

• hierarchische Struktur:  $\rightarrow$  molekulare Ebene: konstruktive Einheit  
Mere  $\leftrightarrow$  Quasistat. Prozesse sind von effizienten (TD)  
Schritte

Bsp: (i) Muskel... Myosin wandert auf F-Actin [Fig. 10.1]

Nachweis: [Fig. 10.2]

(ii) E. coli: Rotationsmotor für Flagellum

(iii) Transport  $\equiv$  Transportweg + Behälter + Motor  
Mikrotubuli (Protein-Polymer)    Doppelschicht-Vesikel    Kinesin

Kinesin  
Familie

$\rightarrow$  intrazelluläre Bewegung

Separation von Chromosomen während Zellteilung

(iv) DNS-Verdopplung  $\rightarrow$  DNS Polymerase

DNS-Kopie  $\rightarrow$  RNS —"——

#### 10.1.4. „Einmal“-Motoren

• Translokation [Fig. 10.3]

• Bewegung durch Polymerisation  $\rightarrow$  Ausstülpungen [Fig. 10.4/5]

## 10.2. Thermisches Ratschen: mechanisches Modell für mikrosk. Maschine.

### 10.2.1. Realisierung • G-/S-Ratsche [Fig. 10.10 / 10.11]

• G-Ratsche unter Last: Arbeitsleistung? Aus therm. Energie? Nein! 2.H.H. } ⚡  
 ohne Last:  $\rightleftharpoons$ , direkte Wahrscheinlichkeit

• S-Ratsche unter Last: Arbeitsleistung durch vorgepumpte Bolzen

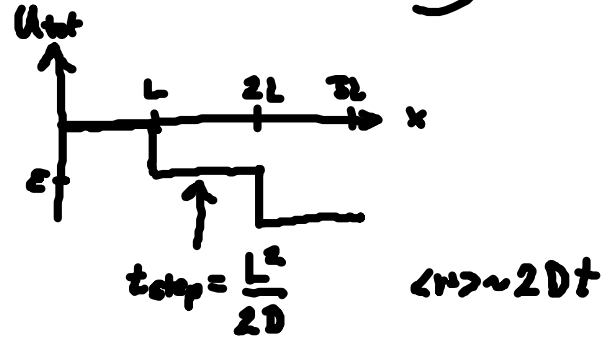
(i) kleine Last:  $f_L < \epsilon \dots \rightarrow$

(ii) große Last:  $f_L > \epsilon \dots \rightarrow \leftarrow$

Nettogeschwindigkeit?

„perfekte“ Ratsche ( $\epsilon \gg k_B T$ ), ohne Last

$$v = \frac{L}{t_{step}} \approx \frac{2D}{L} \quad (10.1)$$



mit Last:  $P(x)$  [W. am Ort  $x$  zu sein]

### 10.2.2. Smoluchowski-Gleichung

• stochastischer Prozeß: therm. Bewegung von Teilchen im Potential  $U(x)$   
 $\rightarrow P(x,t) dx$  Wahrsch. für Ort  $[x, x+dx]$  zur Zeit  $t$

Bestimmungsgl.?

(i) Wahrscheinlichkeitsstromdichte:

$$\dot{j}(x,t) = - \underbrace{D \nabla^2 P(x,t)}_{\text{diffusiver Strom}} + \dot{j}_{pot} \quad (10.2.) \quad (\text{Vgl. Maxw.-Planck-Formel})$$

(ii) therm. GlW:  $P(x,t) \sim e^{-U(x)/k_B T}$ ,  $\dot{j} = 0$

$$\rightarrow \underline{j}_{\text{pot}} = -\frac{D}{k_B T} \underline{\nabla} U P \quad (10.3)$$

$$\rightarrow \underline{j}(x,t) = -D \left[ \underline{\nabla} + \frac{1}{k_B T} \underline{\nabla} U \right] P \quad (10.4)$$

(iii)  $P$ : Erhaltungsgröße:  $\int P(x,t) dx = 1$

$\rightarrow$  Verwende Kontin.-Gl.!

$$\boxed{\frac{\partial P}{\partial t} = -\text{div } \underline{j} = D \underline{\nabla} \cdot \left[ \underline{\nabla} + \frac{1}{k_B T} \underline{\nabla} U \right] P} \quad (10.5)$$

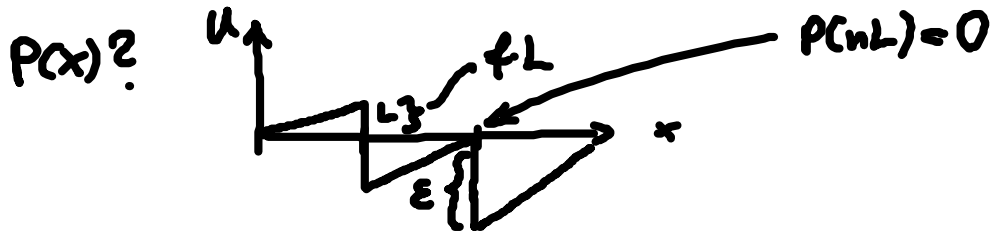
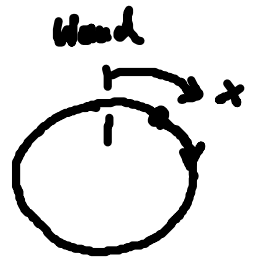
Smoluchowski-Gleichung  
(Diff.-Gl + Driftterm aufgrund  $U$ )

### 10.2.3. Mittlere Rotationsgeschwindigkeit

Tafelchen; perfekte Ratsche ( $\epsilon \gg k_B T$ )

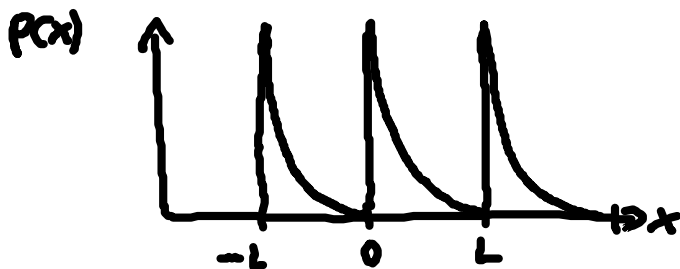
S-Ratsche mit  $N$  Bolzen, periodische Randbed.

$\rightarrow$  periodisches, stationärer  $P(x)$  für große  $t$



Übung  $\rightarrow P(x) = A \left[ e^{-(x-L)f/k_B T} - 1 \right], \quad 0 \leq x \leq L \quad (10.6)$   
(Lsg. von 10.5)

mit  $N \int_0^L P(x) dx = 1 \Rightarrow AN = \frac{f}{k_B T} \left[ e^{fL/k_B T} - 1 - \frac{fL}{k_B T} \right]^{-1} \quad (10.7)$



W. Stromdichte: (10.6) in (10.4)  $\rightarrow j = A \frac{Df}{k_B T} \quad (10.8)$

(i)  $j \neq 0$  für  $f \neq 0$

(ii)  $j = \frac{2D}{NL^2}$  für  $f \rightarrow 0$  !!

(10.7) in (10.8) + Taylor

• Ratschengeschw.  $j(x) = P(x)v(x)$

mittels  $\frac{1}{L} \int_0^L \dots dx$  :  $j = \frac{1}{NL} \underbrace{N \int_0^L P(x)v(x) dx}_v$

(10.7), (10.8)  $\rightarrow v = \left(\frac{fL}{k_B T}\right)^2 \frac{D}{L} \left[ e^{fL/k_B T} - 1 - \frac{fL}{k_B T} \right]^{-1}$  (10.9)

(i)  $f \rightarrow 0$  :  $v = \frac{2D}{L}$  vgl. (10.1)

(ii)  $v \rightarrow \left(\frac{fL}{k_B T}\right)^2 \frac{D}{L} e^{-fL/k_B T}$ ,  $k_B T \ll fL$  Aktivierungsprozess!

• allg. Fall  $\rightarrow$  Übungen

(i)  $f = \frac{\epsilon}{L} \rightarrow$  Unt. periodisch  $\rightarrow j = 0$  TD-CGW

(ii)  $f > \frac{\epsilon}{L} \rightarrow$  Rückwärtsbewegung

- Felderlose Maschinerie:
- (i) Zufallsphasen in Unt
  - (ii) überqueren Energiebarriere
  - (iii) Speichern  $U_{pot}$ , nicht Ener. (Kalenwert) (Abmowert)

Ratschen: (i) Asymmetrie, Nichtgleichgewicht  $\rightarrow$  gerichtete Bewegung

(ii)  $v \rightarrow \frac{2D}{L}$ ,  $\epsilon \gg k_B T$ ,  $f = 0$