10. Enzyme und molekulare Maschinen

- molekulare Maschinen: chemische Energie ⟶ Bewegung

10.1. Molekulare Geräte in der Zelle

10.1.1. Überblick

10.1.2. Enzyme

10.1.3. Zyklische Motoren in eukaryotischen Zellen

- hierarchische Struktur: ⟶ molekulare Ebene: kraftgenerierende Einheit
  $\xleftrightarrow[\text{Schritte}]{\text{kleine}}$ quasistat. Prozesse sind am effektivsten (TD)

<u>Bsp</u>: (i) Muskel... Myosin wandert auf F-Aktin [Fig. 10.1]
Nachweis: [Fig. 10.2]
(ii) E. Coli: Rotationsmotor für Flagellum
(iii) Transport ≡ Transportweg + Behälter + Motor
Transportweg: Mikrotubuli (Protein-Polymere) ⟶ intrazelluläre Bewegung
Behälter: Doppelschicht-Vesikel
Motor: Kinesin
Separation von Chromosomen während Zellteilung
→ Kinesin Familie
(iv) DNS-Verdopplung → DNS Polymerase
DNS-Kopie → RNS —〃—

10.1.4. „Einmal"-Motoren

- Translokation [Fig 10.3]
- Bewegung durch Polymerisation → Ausstülpungen [Fig. 10.4/5]

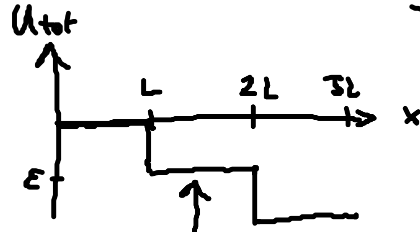
10.2. Thermische Ratschen: mechanisches Modell für mikrosk. Maschine.

10.2.1. <u>Realisierung</u> • G-/S-Ratsche [Fig. 10.10 / 10.11]

- G-Ratsche unter Last: Arbeitsleistung? Aus therm. Energie? Nein! 2.H.S.
  ohne Last: $\rightleftarrows$, dieselbe Wahrscheinlichkeit
- S-Ratsche unter Last: Arbeitsleistung durch vorgespannte Bolzen
  (i) kleine Last: $fL < \varepsilon$ ... $\rightarrow$
  (ii) große Last: $fL > \varepsilon$ ... $\not\rightarrow$ $\not\leftarrow$

Nettogeschwindigkeit?

„perfekte" Ratsche ($\varepsilon \gg k_B T$), ohne Last



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

$t_{step} = \frac{L^2}{2D}$ $\quad \langle r^2 \rangle \sim 2Dt$

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:

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

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

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

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

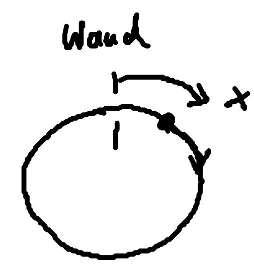
(iii) P: Erhaltungsgröße: $\int P(x,t)\,dx = 1$

$\rightarrow$ Verwende Kontin.-Gl.!

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

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

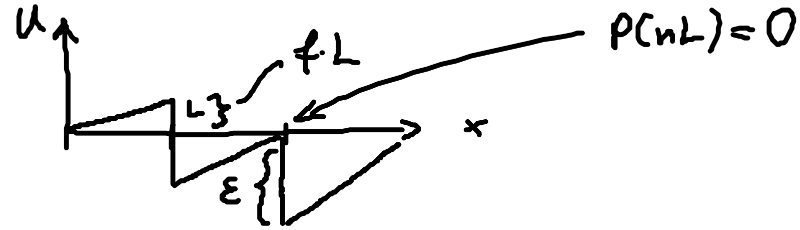
10.2.3. Mittlere Ratschengeschwindigkeit



Teilchen: perfekte Ratsche ($\varepsilon \gg k_B T$)
S-Ratsche mit N Bolzen, periodische Randbed.

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

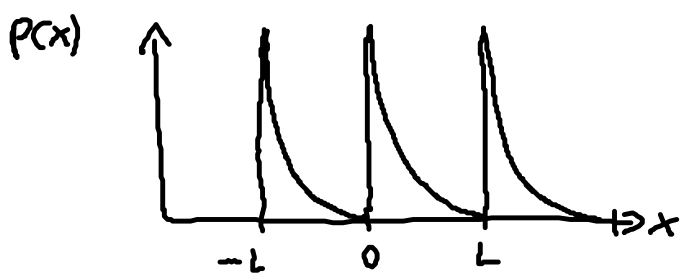
$P(x)$?



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

(Lsg. von 10.5)

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



W. stromdichte: (10.6) in (10.4) $\longrightarrow$ $$j = A\,\frac{D\,f}{k_B T} \qquad (10.8)$$

(i) $j \neq 0$ für $f \neq 0$

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

(10.7) in (10.8) + Taylor

- Ratschengeschw. $j(x) = p(x)\, v(x)$

mitteln $\frac{1}{L}\int_0^L \ldots dx$: $j = \frac{1}{NL} \underbrace{N \int_0^L p(x)\, v(x)\, dx}_{v}$

(10.7), (10.8) $\Rightarrow$

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

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

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

- allg. Fall $\longrightarrow$ Übungen

(i) $f = \frac{\varepsilon}{L} \longrightarrow U_{tot}$ periodisch $\longrightarrow j = 0$ TD-GGW

(ii) $f > \frac{\varepsilon}{L} \longrightarrow$ Rückwärtsbewegung

- Molekulare Maschinen: (i) Zufallsgehen in U_{tot}
  (ii) überqueren Energiebarrieren
  (iii) Speichern U_{pot}, nicht E_{kin} (Makrowelt) (Nanowelt)

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

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