

# PRĄD ELEKTRYCZNY

Prąd elektryczny – uporządkowany przepływ nośników ładunku elektrycznego

## Nośniki ładunku:

- elektrony w metalach
- pary elektron-dziura w półprzewodnikach
- jony (aniony i kationy) w roztworach

## PRZEWODNICTWO ELEKTRYCZNE METALI

Elektrony przewodnictwa – poruszające się swobodnie i nie związane z poszczególnymi atomami elektrony, które odpowiedzialne są za przepływ prądu w metalach.

*Żeby nastąpił przepływ prądu między końcami przewodnika musi zostać przyłożone napięcie!*

*Różnicy potencjałów towarzyszy pole elektryczne, które wymusza ruch elektronów przewodnictwa!*

# PRAŁD ELEKTRYCZNY

Natężenie prądu elektrycznego – ilość ładunku przepływająca przez poprzeczny przekrój przewodnika w jednostce czasu.

Średnia wartość natężenia prądu:

$$I = \frac{Q}{t}$$

Chwilowa wartość natężenia prądu:

$$I_{ch} = \frac{dQ}{dt}$$

*Jednostką natężenia prądu jest amper [A].*

## PRĄD ELEKTRYCZNY

Gęstość prądu – natężenie prądu przypadające na jednostkę powierzchni przekroju poprzecznego przewodnika. Jest to wektor, którego kierunek i zwrot jest zgodny z kierunkiem i zwrotem prędkości nośników dodatnich.

$$j = \frac{I}{S}$$

*Jednostką wektora gęstości prądu jest  $\left[\frac{A}{m^2}\right]$ .*

# PRĄD ELEKTRYCZNY

## PRAWO OHMA

Stosunek napięcia przyłożonego do przewodnika do natężenia prądu przepływającego przez ten przewodnik jest stały (nie zależy ani od napięcia ani od natężenia) i równy oporowi.

$$R = \frac{\Delta V}{I} = \frac{U}{I}$$

Gdzie:

$R$  – opór elektryczny  $[\Omega]$ .

*Opór elektryczny wyrażamy w omach  $[\Omega] = \left[\frac{V}{A}\right]$ .*

*Prawo Ohma jest spełnione dla przewodnika w stałej temperaturze!*

# PRĄD ELEKTRYCZNY

## OPÓR PRZEWODNIKA

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

Gdzie:

$\rho$  – opór właściwy [ $\Omega \cdot m$ ],

$l$  – długość przewodnika [ $m$ ],

$S$  – przekrój poprzeczny przewodnika [ $m^2$ ].

## Przewodność właściwa:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

*Jednostką przewodności właściwej jest  $\left[\frac{1}{\Omega \cdot m}\right]$ .*

# PRĄD ELEKTRYCZNY

## OPÓR WŁAŚCIWY

### Opory właściwe wybranych materiałów w temperaturze 20 °C

<i><b>Materiał</b></i>	<i><b>Opór właściwy [<math>\Omega \cdot m</math>]</b></i>
<i>Miedź</i>	$1,72 \cdot 10^{-8}$
<i>Złoto</i>	$2,44 \cdot 10^{-8}$
<i>Aluminium</i>	$2,82 \cdot 10^{-8}$
<i>Nikiel</i>	$6,99 \cdot 10^{-8}$
<i>Ołów</i>	$22 \cdot 10^{-8}$
<i>Węgiel</i>	$3,5 \cdot 10^{-5}$
<i>German</i>	0,46
<i>Krzem</i>	640
<i>Szkło</i>	$10^{10} - 10^{14}$
<i>Guma</i>	$\sim 10^{13}$

# PRĄD ELEKTRYCZNY

## MIKROSKOPOWA POSTAĆ PRAWA OHMA

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

Gdzie:

$\rho$  – opór właściwy [ $\Omega \cdot m$ ],

$l$  – długość przewodnika [ $m$ ],

$S$  – przekrój poprzeczny przewodnika [ $m^2$ ].

Gęstość prądu:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{U}{R \cdot S} = \frac{E \cdot l}{R \cdot S}$$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

$$j = \frac{S \cdot E \cdot l}{\rho \cdot l \cdot S} = \frac{E}{\rho} = \sigma \cdot E$$

# PRĄD ELEKTRYCZNY

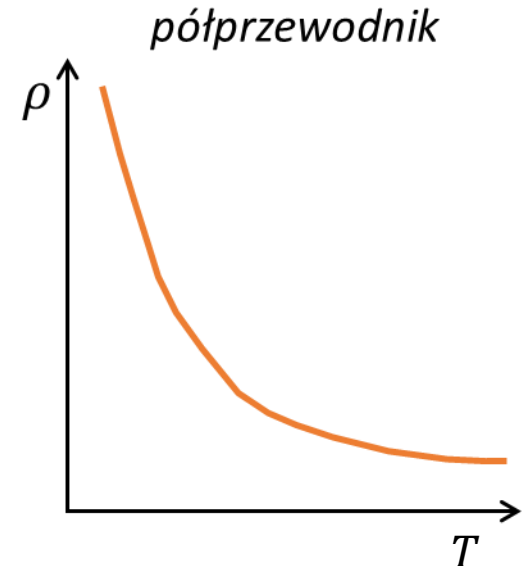
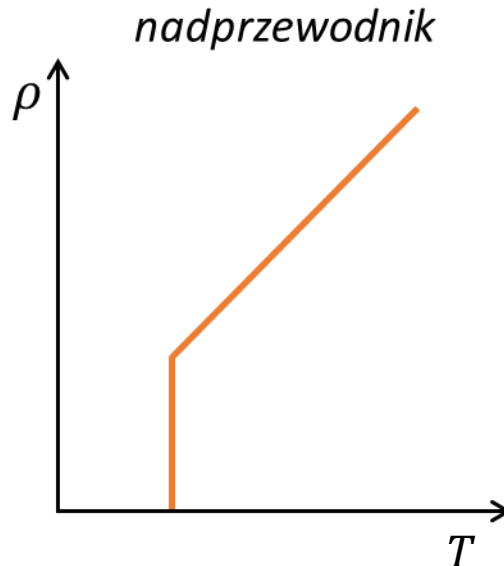
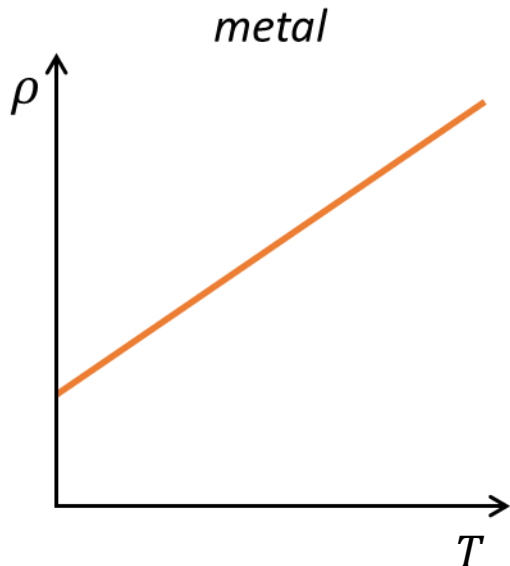
## Wektorowa (mikroskopowa) postać prawa Ohma:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$$

## Źródłami oporu w przewodnikach są:

- rozpraszanie elektronów na defektach sieci krystalicznej,
- zderzenia z drgającymi atomami tworzącymi sieć krystaliczną.

*Ponieważ oba te zjawiska zależą od temperatury, to również opór właściwy zależy od temperatury!*





# PRĄD ELEKTRYCZNY

## PRACA I MOC PRĄDU ELEKTRYCZNEGO

Dla prądu o natężeniu  $I$  płynącego pod wpływem różnicy potencjałów  $U$  zmiana energii potencjalnej (spowodowana przeniesieniem ładunku  $dq$ ) wynosi:

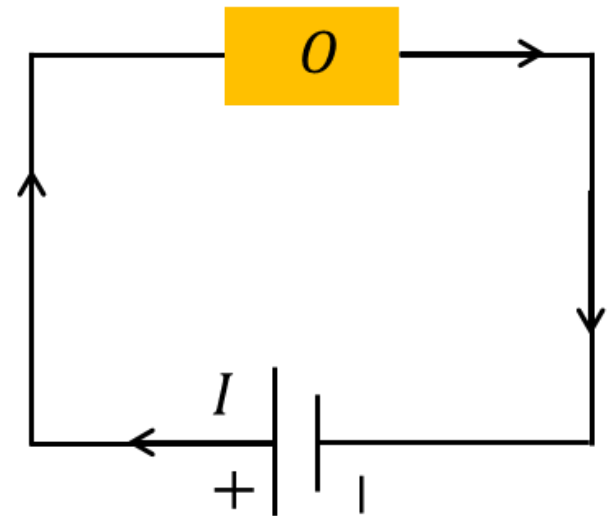
$$dE_p = dq \cdot U = dW$$

$$dq \cdot U = dW$$

Różniczkując stronami po  $dt$ :

$$\frac{dq}{dt} \cdot U = \frac{dW}{dt}$$

$$I \cdot U = P$$



*Moc prądu elektrycznego jest równa iloczynowi napięcia i natężenia!*

## PRĄD ELEKTRYCZNY

*Energia potencjalna ładunku przepływającego przez odbiornik maleje, bo potencjał dodatniego bieguna baterii jest wyższy niż ujemnego!*

*Energia potencjalna tracona w odbiorniku jest przekształcana w inną formę energii!*

### CIEPŁO JOULE'A

*Jeśli odbiornik jest opornikiem, to cała energia tracona przez ładunek  $dq$  wydzielą się w postaci ciepła, co powoduje wzrost temperatury odbiornika!*

$$P = I \cdot U$$

$$U = I \cdot R$$

$$P = I \cdot I \cdot R = I^2 \cdot R$$

$$P = \frac{U}{R} \cdot U = \frac{U^2}{R}$$

# PRĄD ELEKTRYCZNY

## SIŁA ELEKTROMOTORYCZNA (SEM)

Siła elektromotoryczna (SEM) – energia elektryczna przekazywana ładunkowi jednostkowemu w źródle SEM.

$$\varepsilon = \frac{\Delta W}{\Delta q}$$

*Miarą SEM jest różnica potencjałów na biegunach źródła prądu, gdy przez ogniwo nie płynie prąd (ogniwo otwarte).*

Źródło SEM – urządzenie, w którym wytwarzana jest energia elektryczna w wyniku przetwarzania innego rodzaju energii (mechanicznej, świetlnej, chemicznej,...).

*prądnica*



*ogniwa słoneczne*



*bateria*



*termopara*



# PRĄD ELEKTRYCZNY

## OPÓR WEWNĘTRZNY

*Napięcie zasilania jest mniejsze od SEM ze względu na spadek potencjału na oporze wewnętrznym baterii!*

$$U_Z = \varepsilon - I \cdot R_w$$

moc źródła SEM

$$P = U_Z \cdot I = (\varepsilon - I \cdot R_w) \cdot I = \varepsilon \cdot I - I^2 \cdot R_w$$

en. termiczna  
tracona w źródle  
SEM

Gdzie:

$U_Z$  – napięcie zasilania [V],

$\varepsilon$  – siła elektromotoryczna [V],

$R_w$  – opór wewnętrzny [ $\Omega$ ].

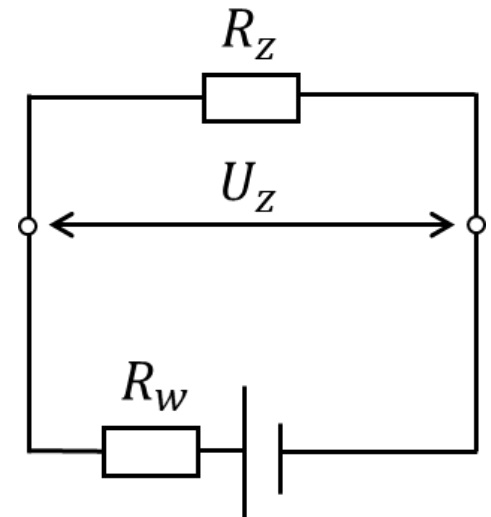
*Dla  $I = 0$   $U_Z = \varepsilon$ !*

$$\varepsilon = U_Z + I \cdot R_w$$

$$U_Z = I \cdot R_Z$$

prawo Ohma dla  
obwodu zamkniętego

$$\varepsilon = I \cdot R_Z + I \cdot R_w = I(R_Z + R_w)$$



# PRĄD ELEKTRYCZNY

## PRAWA KIRCHHOFFA

Pierwsze prawo Kirchhoffa = twierdzenie o punkcie rozgałęzienia:

Suma natężeń prądów przepływających przez węzeł jest równa zero.

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0$$

wynika z zasady  
zachowania ładunku

Drugie prawo Kirchhoffa = twierdzenie o obwodzie zamkniętym:

Algebraiczna suma sił elektromotorycznych i spadków napięć na oporach w obwodzie zamkniętym jest równa zero.

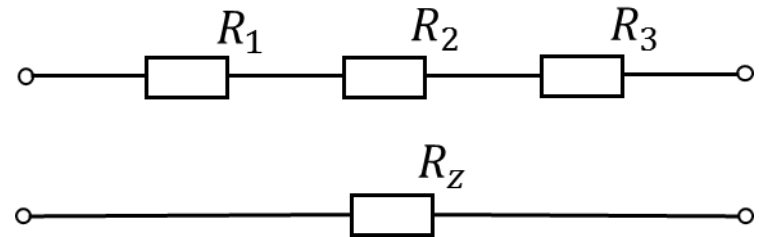
$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i - \sum_{i=1}^m I_i \cdot R_i = 0$$

wynika z zasady  
zachowania energii

# PRĄD ELEKTRYCZNY

## SZEREGOWE I RÓWNOLEGŁE ŁĄCZENIE OPORNIKÓW

### Połączenie szeregowe:



$$U_Z = U_1 + U_2 + U_3$$

$$I_Z = I_1 = I_2 = I_3 = I$$

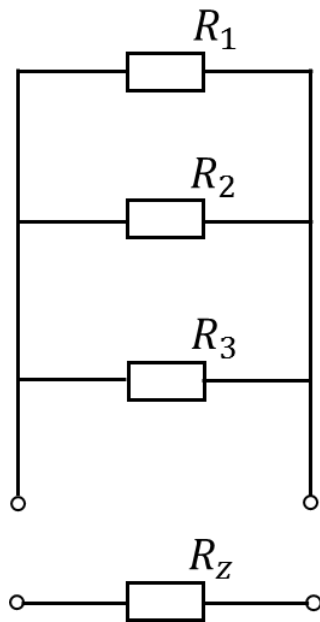
$$U_Z = I \cdot R_Z \quad U_1 = I \cdot R_1 \quad U_2 = I \cdot R_2 \quad U_3 = I \cdot R_3$$

$$I \cdot R_Z = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3$$

$$R_Z = R_1 + R_2 + R_3$$

# PRĄD ELEKTRYCZNY

## Połączenie równoległe:



$$U_z = U_1 = U_2 = U_3 = U$$

$$I_z = I_1 + I_2 + I_3$$

$$I_z = \frac{U}{R_z} \quad I_1 = \frac{U}{R_1} \quad I_2 = \frac{U}{R_2} \quad I_3 = \frac{U}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_z} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_z} = \frac{R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}$$

$$R_z = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2}$$

# PRĄD ELEKTRYCZNY

## OBWÓD RC

Obwód RC – układ złożony z opornika  $R$ , pojemności  $C$  i źródła SEM bez oporu wewnętrznego (źródło idealne).

Układ podłączony do źródła SEM:

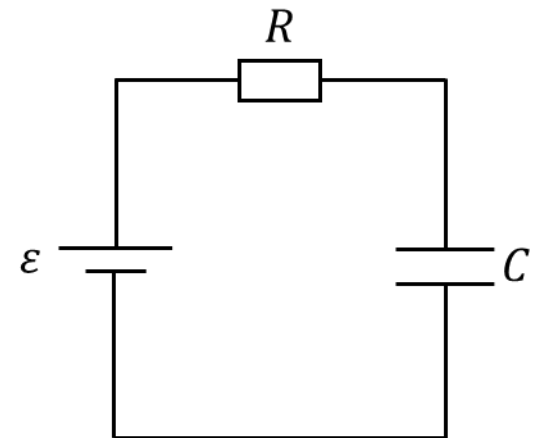
$$\varepsilon - U_R - U_C = 0$$

$$\varepsilon - I \cdot R - \frac{q}{C} = 0$$

$$\varepsilon - \frac{dq}{dt} \cdot R - \frac{q}{C} = 0$$

$$\frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC} - \frac{\varepsilon}{R} = 0$$

$$q = C \cdot \varepsilon \cdot (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) = q_0 - \text{const} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

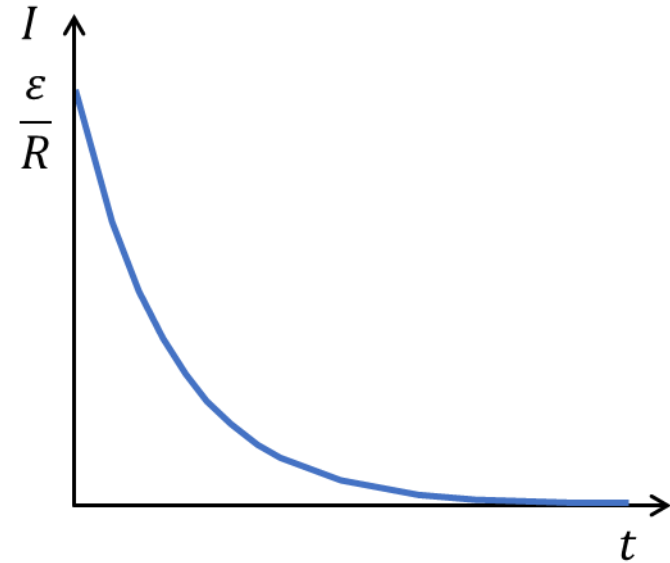
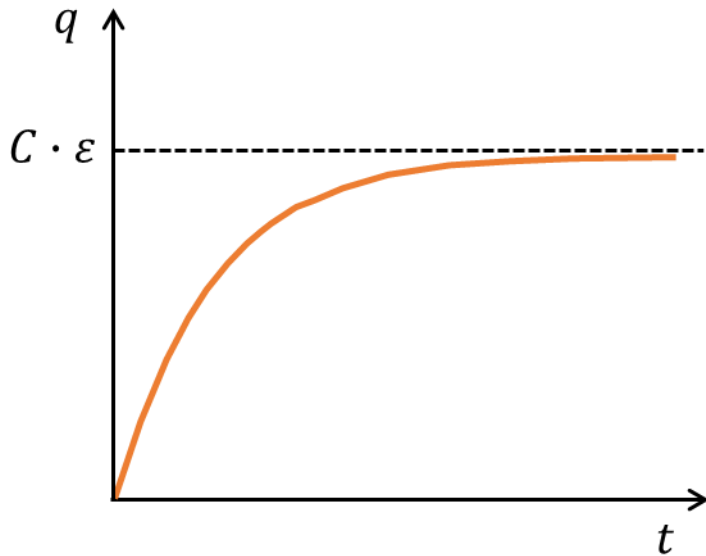




## PRĄD ELEKTRYCZNY

$$q = C \cdot \varepsilon \cdot (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

$$I = \frac{dq}{dt} = -C \cdot \varepsilon \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \cdot \left(-\frac{1}{RC}\right) = \frac{\varepsilon}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$



*Ładunek na kondensatorze rośnie, a prąd maleje eksponencjalnie z czasem!*

*Szybkość tych zmian zależy od stałej czasowej  $\tau = RC$ !*

# PRĄD ELEKTRYCZNY

Po odłączeniu zasilania:

$$U_R + U_C = 0$$

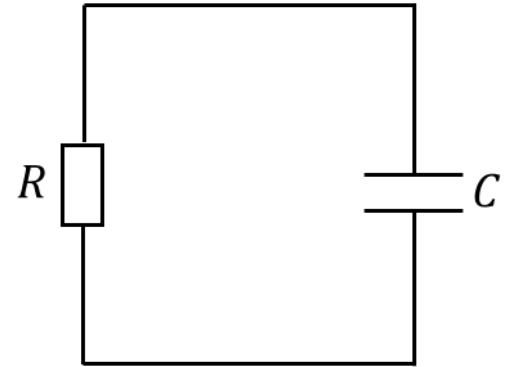
$$I \cdot R + \frac{q}{C} = 0$$

$$\frac{dq}{dt} \cdot R + \frac{q}{C} = 0$$

$$\frac{dq}{q} = -\frac{1}{RC} dt$$

$$\int_{q_0}^q \frac{dq}{q} = \int_0^t -\frac{1}{RC} dt$$

$$\ln q - \ln q_0 = -\frac{1}{RC} \cdot t$$



## PRĄD ELEKTRYCZNY

$$\ln q - \ln q_0 = -\frac{1}{RC} \cdot t$$

$$\ln \frac{q}{q_0} = -\frac{1}{RC} \cdot t$$

$$\frac{q}{q_0} = e^{-\frac{1}{RC} \cdot t}$$

$$q = q_0 \cdot e^{-\frac{1}{RC} \cdot t}$$

$$I = \frac{dq}{dt}$$

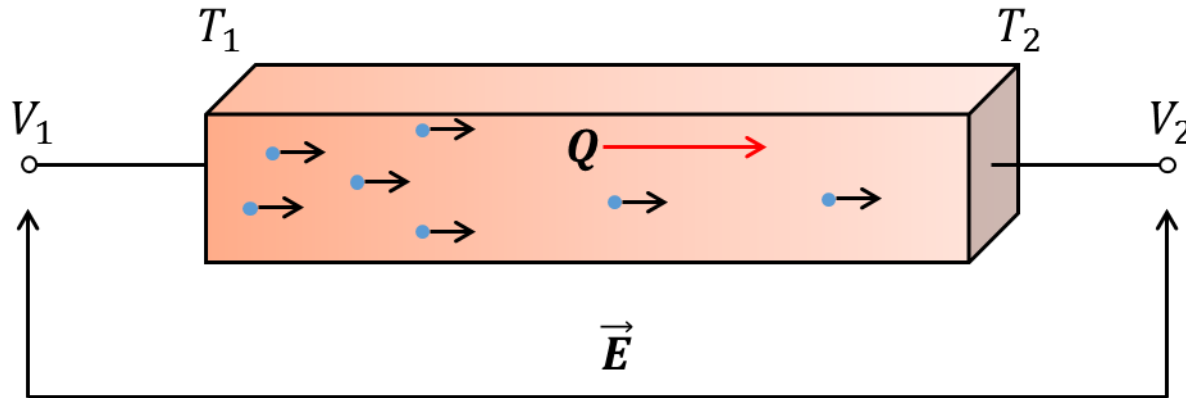
$$I = -\frac{q_0}{RC} \cdot e^{-\frac{1}{RC} \cdot t}$$

*Ładunek i prąd maleją eksponencjalnie ze stałą czasową równą RC!*

# PRĄD ELEKTRYCZNY

## ZJAWISKO SEEBECKA

**Zjawisko Seebecka** – zjawisko polegające na powstawaniu siły elektromotorycznej w obwodzie zawierającym dwa metale lub półprzewodniki gdy ich złącza znajdują się w różnych temperaturach. Wykorzystuje się je w termoparach.



*Jeśli metal nagrzej się nierównomiernie, to pojawiają się różnice w energii i koncentracji nośników ładunku między jego końcami!*

*Na cieplejszym końcu koncentracja nośników będzie większa i będą miały większą energię, co doprowadzi do dyfuzji nośników w stronę zimniejszego końca!*

# PRĄD ELEKTRYCZNY

*Przepływ prądu dyfuzji prowadzi do pojawienia się rozkładu potencjału i wystąpienia prądu unoszenia (w stanie równowagi jest równy prądowi dyfuzji, więc na zewnątrz obserwujemy tylko różnicę potencjałów)!*

## TERMOPARA

